

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский государственный университет геодезии и картографии

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Институт леса им. В.Н. Сукачева

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Красноярский государственный аграрный университет

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

ГРУППА КОМПАНИЙ «ГЕОКОСМОС», «ГЕОЛИДАР», «ГЕОПОЛИГОН»

Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ ЗЕМЛИ И ЛЕСА

Учебное пособие

Издание второе, переработанное и дополненное

Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации
для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки и специальностям:
120301 «Землеустройство», 120302 «Земельный кадастр», 120303 «Городской кадастр»,
260400 «Лесное и лесопарковое хозяйство», 020800 «Экология и природопользование»,
013600 «Геоэкология», 650400 «Фотограмметрия и дистанционное зондирование»,
080800 «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами»,
650300 «Геодезия», 300100 «Прикладная геодезия», 300300 «Аэрофотогеодезия»,
013700 «Картография», 071900 «Информационные системы в геодезии и картографии»,
072300 «Лазерная техника и лазерные технологии»,
131200 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике»,
190700 «Оптико-электронные приборы и системы»

МОСКВА – КРАСНОЯРСК
2007

УДК 528.7(075.8); 621.37; 629.78; 630.52:587/588; 634.0.2
ББК 43.4В672
М 42

Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.

Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.: илл. 160; табл. 45; библиогр. 87 назв.

ISBN 5-903055-09-5

В настоящем учебном пособии раскрываются сущность и принципы лазерной локации. Приводятся данные по приборному обеспечению воздушной лазерной и цифровой аэросъемки, наземного лазерного сканирования, результаты выполнения различных проектов в России и в зарубежных странах. На фактическом материале показаны преимущества новейших технологий лазерно-локационной съемки Земли и леса, приведены примеры трехмерного анализа земной поверхности, структуры и биомассы леса по данным лазерной локации и спутниковых систем глобального позиционирования.

Использование метода лазерной локации, совмещенного с цифровой аэрофото- и видеосъемкой, спутниковой навигацией и геопозиционированием, сопровождаемого цифровой спутниковой съемкой в оптическом и радио диапазонах и интегрированных в геоинформационных системах для целей дистанционного зондирования природной среды, землеустройства и лесоинвентаризации, позволяет проводить дистанционный мониторинг земель и лесов с высокой эффективностью, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и финансовых средств.

Учебное пособие разработано с учетом Государственного образовательного стандарта по циклу технических и естественнонаучных дисциплин и предназначено для выполнения студентами дипломных и курсовых работ, проведения лабораторных и практических занятий по направлениям подготовки и дисциплинам: «Землеустройство и земельный кадастр», «Городской кадастр», «Мониторинг природных ресурсов», «Лесное и лесопарковое хозяйство», «Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве», «Фотограмметрия и дистанционное зондирование», «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами», «Экология и природопользование», «Геоэкология», «Геодезия», «Прикладная геодезия», «Аэрофотогеодезия», «Картография», «Информационные системы в геодезии и картографии», «Лазерная техника и лазерные технологии», «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике», «Оптико-электронные приборы и системы».

Пособие может быть использовано специалистами в области земле- и лесоустройства, дистанционных методов зондирования, геодезии и картографии, экологии и природопользования, сельского и лесного хозяйства, охраны природы, преподавателями вузов, научными работниками, аспирантами и студентами землеустроительных, лесохозяйственных, картографических, геодезических, географических, биологических факультетов классических и специализированных университетов, аграрных, технологических, лесотехнических и политехнических вузов.

Научный редактор
А.С. Исаев, академик РАН

Рецензенты:

- А.П. Гук* – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования Сибирской государственной геодезической академии (Новосибирск);
Ю.Ф. Книжников – доктор географических наук, профессор, зав. лабораторией аэрокосмических методов Географического факультета Московского государственного университета (Москва);
В.И. Сухих – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (Москва);
Н.Я. Шапарев – доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделом вычислительной физики Института вычислительного моделирования СО РАН (Красноярск)

Утверждено к печати Ученым советом Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 5-903055-09-5

© Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р., 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ КАК ПРИКЛАДНАЯ ДИСЦИПЛИНА	6
1.1 Содержание и общие принципы лазерной локации	6
1.2 Справка по истории лазерной локации	15
1.3 Импульсный и фазовый метод измерения дальности	16
1.4 Лазерная локация и традиционные методы топографической съемки	23
1.5 Концепция лазерно-локационного метода сбора геопространственных данных	25
1.6 Экономические аспекты применения лазерно-локационных средств	28
2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ	32
2.1 Способы получения лазерно-локационных изображений. Основные принципы функционирования типового аэросъемочного лидара	32
2.2 Определение координат лазерных точек при выполнении лазерно-локационной съемки	36
2.3 Функциональная схема типового лазерного локатора на примере системы ALTM Optech	41
2.4 Методы выполнения развертки	47
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ	49
3.1 Зондирующие свойства лазерного излучения	49
3.2 Отражение лазерного луча от наземных объектов	52
3.3 Математическое моделирование лазерно-локационного измерения	58
3.4 Вопросы безопасного использования лидаров	61
4. НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ	64
4.1 Задачи навигации и геопозиционирования в лазерной локации	64
4.2 Системы прямого геопозиционирования	64
4.3 Системы геопозиционирования GPS и ГЛОНАСС	70
4.4 Основные принципы функционирования GPS/IMU систем	80
4.5 Интегральное навигационное решение	85
5. ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	89
5.1 Виды лазерно-локационных данных	89
5.2 Физические ограничения лазерно-локационного метода и пути их преодоления	90
5.3 Общие вопросы информационной ценности лазерно-локационных данных	94
5.4 Вопросы точности лазерно-локационных данных	98
6. ВОЗДУШНАЯ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА	101
6.1 Основные параметры воздушной лазерно-локационной съемки и оптимизация режимов ее выполнения	101
6.2 Этапы выполнения лазерно-локационной съемки и основные процедуры метрологической поддержки	104
6.3 Измерение выставочных параметров сканерного блока	106
6.4 Общие принципы проведения полетной калибровочной процедуры	108
6.5 Компоновка аэросъемочного оборудования на борту носителя	112
7. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ЗЕМЛИ И ЛЕСА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ	117
7.1 Изучение земной поверхности и структуры лесного покрова методом лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки	117
7.2 Определение запасов и фитомассы древостоев лазерно-локационным методом	139
7.3. Программный комплекс ALTEXIS	161
8. ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД В ТОПОГРАФИИ И СИСТЕМЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	176
8.1 Технологическая основа лазерно-локационного метода	176
8.2 Состояние и перспективы развития современной цифровой аэрофототопографии	177
8.3 Аналоговые и цифровые аэрофотоаппараты	179
8.4 Методы классификации и основные технические характеристики современных цифровых аэрофотоаппаратов	181
8.5 Кадровые и линейные цифровые фотографические системы	188
8.6 Системы картографирования реального времени	195
8.7 Наземное лазерное сканирование (А.И. Науменко, А.И. Данилин)	206
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	215
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	217
ПРИЛОЖЕНИЯ	221

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За год, прошедший с момента выхода первого издания учебного пособия, мы получили обширную почту, множество устных комментариев, откликов из России, стран бывшего СССР, а также из Европы, США, Канады и Японии. Книга полностью разошлась общим тиражом более 1000 экземпляров и на электронных носителях по ведущим библиотекам и вузам России, СНГ и зарубежных стран. В 2006 году на XIII Всероссийском форуме ГИС-ассоциации первое издание книги получило почетный диплом и номинацию «Лучшее издание года в области геоинформатики».

Все это, конечно, не может не радовать авторов. Мы полагаем, что позитивное отношение читательской аудитории достигнуто, во многом, благодаря правильному позиционированию издания как учебного пособия по *прикладной* лазерной локации. В результате, книга оказалась доступна широкому кругу читателей, в том числе – аспирантам, студентам ВУЗов и техникумов, интересующимися современными топографо-геодезическими, аэросъемочными технологиями, а также геоинформационными методами в лесоустройстве. С другой стороны, нам известны случаи, когда «Лазерная локация...» использовалась в качестве методической основы в крупных производственных компаниях, занятых геодезической деятельностью с использованием лазерно-локационных и цифровых аэросъемочных технологий. Надо полагать, что последнее обстоятельство явилось следствием того, что авторам удалось со страниц книги донести до читателя свой многолетний опыт практикующих инженеров, геодезистов, аэросъемщиков, таксаторов и это особенно приятно.

В последнее время в России и мире появилось много интересных работ, имеющих отношение к лазерной локации и цифровым аэросъемочным технологиям. Особенно хотелось бы отметить следующие фундаментальные труды: *Основы импульсной лазерной локации*: Учеб. пособ. для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др. Под ред. В.Н. Рождествина. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.; Сухих В.И. *Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве*: Учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.; Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. *Аэрокосмические методы географических исследований*. М.: Academia, 2004. 333 с.; *Remote Sensing of Forest Environments. Concepts and Case Studies* / Ed. by M.A. Wulder and S.E. Franklin. Kluwer Academic Pub., 2003. 519 p., а также ряд интересных публикаций в этой области скандинавских и американских ученых (Holmgren 2004, Maltamo et al. 2004, Næsset 2004, Andersen et al. 2005, Lefsky et al. 2005, Hyde et al., 2006).

Еще раз подчеркнем, что с середины 70-х годов XX века теме лазерной (оптической, световой) локации в отечественной научно-технической литературе уделяется самое серьезное внимание. Нельзя сказать, что ощущается дефицит публикаций по этому вопросу. Такое положение дел явилось, в значительной мере, результатом серьезных достижений отечественной науки и технологии советского периода в деле развития лазерно-локационных средств, достижений, к сожалению, почти полностью утраченных в постсоветский период. В этой связи, наша книга, во-первых, в определенном смысле поддержала отечественную лазерную локацию, продемонстрировав, что и сейчас активные работы по этому направлению в нашей стране ведутся, особенно в области программных и методических разработок, и, во-вторых, заполнила до недавнего времени пустующую нишу публикаций, описывающих именно прикладную сторону вопроса – как и при каких условиях целесообразно использовать лазерно-локационные методы при крупномасштабном топографическом картографировании, решении задач инженерной геодезии, таксации леса и др.

За прошедший с момента первого издания год прикладная лазерная локация еще более укрепилась в своем статусе классической геодезической технологии – воздушных и наземных средств лазерно-локационной съемки в России и странах бывшего СССР стало значительно больше, появилось много интересных (в том числе, отечественных) программных разработок. Регулярное обсуждение технических инноваций в этой области на научно-технических семинарах и конференциях стало нормой.

Обнадёживает и то, что присутствует значительный интерес к предмету со стороны ведущих российских и зарубежных ВУЗов. Так авторами, совместно с к.т.н., доцентом А.И. Науменко организованы и прочитаны курсы: «Лазерно-локационные методы в геодезии» в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК), «Лазерное сканирование – методы съёмки и моделирования» в Санкт-Петербургском горном институте, цикл лекций по воздушной лазерной локации в техническом университете Нойбранденбурга, Германия (С.Р. Мельников), «Лазерная локация для целей земле- и лесоустройства и составления кадастров природных ресурсов» на землеустроительном факультете Красноярского государственного аграрного университета (И.М. Данилин). Предполагается, что аналогичные курсы с участием авторов будут в ближайшее время читаться в ряде других ведущих российских ВУЗов, в частности – в Московском институте инженеров железнодорожного транспорта, в Сибирском федеральном университете (г. Красноярск) и в Сибирской государственной геодезической академии (г. Новосибирск).

Авторы намерены и впредь продолжать свою публицистическую деятельность, связанную с пропагандой передовых методов дистанционного зондирования, современной геоинформатики и их многочисленных приложений.

Во втором издании добавлена глава 8 «Лазерно-локационный метод в топографии и системы картографирования реального времени», описывающая одну из наиболее перспективных тенденций современного дистанционного зондирования – построение на базе авиационных и наземных лазерных сканеров и цифровых аэрофотоаппаратов средств сбора и обработки геопространственных данных, обеспечивающих радикальное сокращение длительности технологического цикла создания или обновления топографических карт и планов, других геоинформационных продуктов. Раздел 8.7. настоящей главы подготовлен совместно с А.И. Науменко и А.И. Данилиным. Существенно переработана и дополнена глава 4 «Навигационное обеспечение лазерной локации». Как и ранее, к разработке указанных систем и их практическому применению в России и за рубежом авторы имеют самое непосредственное отношение.

Мы благодарим всех, кто нашел время ознакомиться с первым изданием «Лазерной локации...». Особая признательность – внимательным читателям за доброжелательную и конструктивную критику. Все рекомендации и указания на неточности приняты авторами с благодарностью. Необходимые исправления внесены во второе издание, которое в настоящее время переводится на английский язык и будет размещено в Интернете по адресу: www.laserlocation.ru

Мы хотели бы также выразить нашу признательность ведущим отечественным ученым и специалистам, поддерживающих нас в деле практического использования и популяризации идей лазерной локации и других современных методов дистанционного зондирования. Неоценимая помощь в этом вопросе оказана нам научным редактором книги – академиком РАН А.С. Исаевым, ректором МИИГАиК, членом-корреспондентом РАН В.П. Савиных, генеральным директором ГосНИИ авиационных систем, членом-корреспондентом РАН С.Ю. Желтовым, деканом геодезического факультета МИИГАиК, профессором В.В. Шлапаком, деканом факультета аэрокосмических съёмок и фотограмметрии МИИГАиК, профессором А.Г. Чибуничевым, заведующим кафедрой фотограмметрии МИИГАиК, профессором А.П. Михайловым, проректором СГГА, профессором В.А. Середовичем, профессором Красноярского государственного технического университета В.Б. Кашкиным, официальными рецензентами второго издания – профессорами А.П. Гук, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Сухих, Н.Я. Шапаревым. Авторы выражают благодарность сотрудникам компании «ГеоЛИДАР» и «Геокосмос» – В.В. Гнилицкому, К.А. Пестову, А.А. Лихобаину, Е.Н. Капраловой, А.И. Науменко за помощь, ценные советы и замечания в процессе подготовке рукописи второго издания. Е.М. Медведев выражает свою глубочайшую признательность директору камерального производства компании «Геокосмос» С.В. Степановой за ее подвижническое отношение к лазерно-локационному делу, неизменную и не всегда заслуженную доброжелательность к авторам и их идеям.

ВВЕДЕНИЕ

Парадигма современности: XXI век – век лазерных и цифровых технологий

Лазерная локация, являющаяся составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии, в наши дни находит применение во многих гражданских отраслях и коммерческом использовании, в решении задач инженерного проектирования, земле- и лесоустройства, экологического мониторинга и бурно развивается во многих странах мира и в России.

Обработка огромных массивов данных лазерного зондирования (сотни гигабайт дискового пространства) выполняется на компьютерах в режиме *реального времени*, т.е. одновременно или почти одновременно с выполнением измерений. Все этапы выполнения лазерно-локационных съемок, начиная с приборного обеспечения, построения, обновления, совершенствования опорной геодезической сети, наземной калибровки и заканчивая обработкой и архивированием получаемых материалов, созданием и наполнением баз данных геоинформационных систем, результирующей картографической продукции и цифровых трехмерных моделей местности и объектов, требуют высокой квалификации специалистов и исполнителей. Необходимым условием подготовки таких специалистов является получение и усвоение ими теоретических и практических основ наземных и воздушных методов лазерной локации и глобального спутникового позиционирования. Практика показывает, что даже опытные специалисты, осваивающие новые приборы, технологии и алгоритмы обработки данных лазерного зондирования и спутникового позиционирования, быстро осознают необходимость изучения теоретических основ этих методов. Тем более, такие знания необходимы студентам и аспирантам.

Цель издания данного учебного пособия состоит в том, чтобы заложить основы подготовки студентов, аспирантов и специалистов-практиков в области новейших методов дистанционного зондирования Земли, при этом акцент сделан на лазерную локацию, цифровую аэрофотосъемку и спутниковое геопозиционирование.

1. ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ КАК ПРИКЛАДНАЯ ДИСЦИПЛИНА

В настоящей главе рассматриваются самые общие понятия лазерной локации и ее месте в общей топографии и ряде приложений, среди которых одно из главных – мониторинг земель и таксация леса. Данная глава может рассматриваться как вводная. Предполагается, что если читатель ограничится чтением только этой главы, то он получит самое общее, но в то же время достаточно полное представление о содержании и методах лазерной локации и ее основных приложениях.

1.1. Содержание и общие принципы лазерной локации

Лазерная локация как прикладная дисциплина изучает вопросы использования так называемых лидаров (другое название «лазерные сканеры» или «лазерные локаторы») для проведения топографо-геодезической съемки. Представленное определение, на первый взгляд, слишком общее, чтобы серьезно помочь читателю в понимании сути такого нетривиального явления, как лазерная локация. Тем не менее, оно позволяет уже сейчас сформулировать несколько

важнейших тезисов, усвоение которых крайне существенно для правильного восприятия всего дальнейшего изложения:

– Лидар как средство съемки и источник геопространственных данных есть самый значимый объект, изучению технических свойств и методов использования которого в лазерной локации уделяется центральное место.

Аналогичное явление наблюдается в топографо-геодезических науках и технологиях довольно часто, когда некоторый класс приборов выступает в роли «технологического образующего», т.е. для некоторой законченной технологии съемки, в значительной мере формируя внутреннюю логику такой технологии, набор методических приемов, терминологию и, что наиболее важно, область потенциального практического приложения. В качестве примера можно привести классический теодолит или GPS приемник геодезического применения. И тот, и другой прибор (естественно, речь идет не о конкретном приборе, а о классе приборов, реализующих единую концепцию измерений) в свое время выступили именно как «технологическое образующее», породив технологии съемки, за которыми сегодня соответственно закреплены термины «теодолитная съемка» и «GPS съемка».

Однако значительно более близким к лазерной локации является другой пример. В той же самой мере «технологическим» прибором является аэрофотоаппарат, который на протяжении всего 20-го века и вплоть до настоящего времени является основным источником сбора геопространственных данных для целей создания и обновления топографических карт и планов всего масштаба. Если продолжить использовать предложенную терминологию, то можно утверждать, что аэрофотоаппарат как главный источник данных породил целый ряд прикладных дисциплин, таких, как аэрогеодезия, аэрофототопография и в значительной мере фотограмметрия.

Что касается авиационных лидаров, то совокупный опыт их использования в топографии к началу 21-го века позволяет говорить о появлении принципиально нового *лазерно-локационного метода* съемки, который, с одной стороны, предлагает ряд инновационных решений, а с другой – является дальнейшим развитием классического *стереотопографического метода*, который до недавнего времени наиболее полно выражал концепцию использования аэросъемочных средств для целей топографического картирования.

– По своему главному содержанию лазерная локация есть технология топографо-геодезическая.

Иными словами, она предназначена, прежде всего, для сбора геопространственных данных по рельефу, а также по наземным объектам естественного и антропогенного происхождения, подразумевая в качестве главной цели создание или обновление топографических карт и планов. Конечно, эта цель не является единственно возможной, а в некоторых случаях и неосновной. Более того, возможность использования лидаров для целей крупномасштабного топографического картирования в дополнение или вместо аэрофотоаппаратов была осознана сравнительно недавно. До этого считалось, что лазерно-локационные методы могут с успехом использоваться в целом ряде практически важных приложений, причем как топографической, так и нетопографической направленности. Среди таких приложений выделяются создание цифровых моделей рельефа, прогнозирование зон затопления, обследование воздушных линий электропередачи, таксация леса, мониторинг состояния береговой линии и земель.

Роль лазерной локации во всех перечисленных приложениях несколько не

уменьшилась в настоящее время. Вдобавок появилось еще много новых. Тем не менее, по нашему убеждению, это несколько не меняет топографо-геодезического содержания лазерной локации. Действительно, *лазерно-локационные данные принципиально всегда являются топографическими по своему семантическому содержанию, они также всегда однозначно определены в некоторой хорошо определенной системе геодезических координат с некоторым, также однозначно определенным уровнем точности.* Приведенные приложения, естественно, нуждаются в доказательствах и комментариях, которые будут представлены ниже.

Признание топографо-геодезической сущности методов лазерной локации, ни в коей мере не препятствует обсуждать те ее приложения, которые по характеру выходных продуктов не могут быть прямо отнесены ни к геодезии, ни к топографии, ни даже к цифровой картографии. Вообще принята следующая схема классификации приложений лазерной локации:

- 1) топографо-геодезические и землеустроительные;
- 2) инженерно-изыскательские;
- 3) лесоустроительные и лесотехнические;
- 4) экологические;
- 5) электроэнергетические;
- 6) другие.

Еще раз подчеркнем: при определении типа приложения используют характер конечного выходного продукта, получаемого с помощью лазерно-локационных методов, либо отрасль, в которой такой продукт потребляется. Тип приложения самым существенным образом влияет на выбор методов программной обработки накопленных лазерно-локационных данных. Тоже значительно, хотя и в меньшей мере, специфика приложения сказывается на первичных этапах сбора лазерно-локационных данных, таких, как выбор модели лидара, типа летательного аппарата и режимов съемки.

Следует также отметить, что термин «съемка» наиболее полно выражает процесс использования лазерно-локационной аппаратуры и методов на практике. Этот термин также выражает преемственность с другими традиционными топографо-геодезическими методами, такими, как теодолитная съемка, тахеометрическая съемка, мензульная съемка, аэрофотосъемка, а также уже упомянутые – теодолитная съемка и GPS съемка.

– *На физическом уровне основой лазерной локации является использование полупроводниковых лазеров в качестве источника зондирующего излучения.*

Во второй главе будут подробно разъяснены преимущества лазера как источника излучения, в сравнении с естественными (некогерентными) источниками излучения оптического диапазона и радиолокаторами, которые используют сходные с лидарами методы зондирования, но работают в радио, а не в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Основная функция лазера – генерация импульсного или непрерывного излучения, которое, отражаясь от поверхности земли или наземных объектов, может быть использовано для измерения дальности от источника излучения до объекта, вызвавшего отражение. По этой причине оптико-электронный блок лидара иногда называют *дальномерным*. Лазер, таким образом, является важнейшим функциональным компонентом оптико-электронного блока лидара, в который, кроме самого лазера, могут входить устройство развертки, коллиматор, объектив, приемник, усилители, дискретизаторы, а также другие оптические и электронные компоненты.

Здесь отметим также, что вторым важнейшим компонентом авиационного лазерного локатора наряду с оптико-электронным (дальномерным) выступает *навигационный блок*, работа которого основана на взаимодействии в реальном времени системы спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС и инерциальной системы. Более подробно по этому вопросу см. главу 2.

1.1.1. Перейдем к рассмотрению практических достоинств и недостатков лазерной локации. При этом оговоримся, что, во-первых, и достоинства и недостатки представлены в самой общей декларативной форме, так как читатель еще не располагает достаточными знаниями, чтобы воспринять их в полной мере осмысленно. И, во-вторых, речь идет не об абсолютных достоинствах и недостатках, которые, как известно, не возможны, а об относительных, т.е. выявленных в сравнении с другими общепринятыми методами. Вопрос о выборе корректной базы для сравнения достаточно сложен и будет неоднократно обсуждаться в дальнейшем ходе повествования, а пока оговорим, что здесь в качестве такой базы выбраны классические аэрофототопографические методы съемки, предусматривающие использование аэрофотоаппаратов в аэросъемочном процессе и фотограмметрические методы камеральной обработки результатов съемки.

С учетом сделанных замечаний перейдем непосредственно к обсуждению достоинств и недостатков лазерно-локационного метода съемки.

Бесспорные преимущества лазерно-локационного метода.

1. Технологическая простота, короткий технологический цикл.

Здесь речь идет, конечно, об относительной простоте и относительной краткости технологического цикла по отношению к классическим аэрофотосъемочным технологиям. При реализации лазерно-локационных технологий целый ряд практически значимых материалов появляется через несколько дней или даже часов после завершения аэросъемочной части работ. Имеются в виду такие материалы, как совокупности (облака) лазерных точек, разделенные по их морфологической принадлежности (земля, растительность, поверхности водоемов, кровли зданий, провода ЛЭП и др.), цифровые модели рельефа, ортофотомозаика, а также многие контурные объекты и модели географических объектов в трехмерном представлении. Очень важно отметить, что все упомянутые материалы уже в момент возникновения полностью координированы, т.е. определены в некоторой заранее заданной системе геодезических или географических координат и в дальнейшем принципиально не требуется проведения никаких дополнительных мероприятий по координатной коррекции или преобразованию. Также важно то, что на практике подготовка всех этих материалов осуществляется в полевых условиях, в результате чего собственно камеральная фаза обработки начинается в существенно более подготовленных условиях, что, в свою очередь, также способствует сокращению технологического цикла.

2. Гарантии точности.

В большинстве случаев точность специфицируется на уровне 15 см по плановым и высотным координатам, причем специально указывается, что речь идет об *абсолютной геодезической точности*. Представленное определение нельзя признать безупречным, и вообще вопрос о реальной точности лазерно-локационного метода съемки достаточно сложен и подробно рассмотрен в главе 2. Однако сейчас главное не это. Важно то, что паспортное значение точности в большинстве случаев можно гарантировать лишь за счет формального соблюдения всех требуемых метрологических процедур, таких, как выбор благоприятного по GPS обстановке времени проведения аэросъемочных работ,

выполнение выставочных и калибровочных процедур, соблюдение нормативных режимов полета и т.д. Иными словами, достижение паспортных значений геодезической точности выходных материалов есть рутинная процедура, требующая от персонала ответственности и добросовестности, но не изощренного профессионализма, родившегося на основе многолетнего опыта. Это одно из главных отличий лазерно-локационных и стереофотограмметрических методов измерений.

Что касается упомянутого значения геодезической точности в 15 см, то, конечно, следует признать, что эта точность не самая высокая из возможных. Большая точность при определенных условиях достижима даже аэрофотосъемочными методами, не говоря уже о наземных. Однако, во-первых, такой уровень точности является безусловно достаточным для чрезвычайно обширного класса приложений, в частности для создания топографических планов, вплоть до масштаба 1:1000 включительно. И, во-вторых, сравнение различных методов съемки только по одному критерию точности было бы некорректным без учета других параметров, таких, например, как производительность.

3. Отсутствие наземных геодезических работ по плано-высотному обоснованию при выполнении воздушной лазерно-локационной съемки.

Действительно, как будет показано в следующей главе, для обеспечения координатами лазерно-локационных данных используется так называемый метод прямого геопозиционирования, который реализует входящий в состав лидара навигационный блок. При проведении воздушной лазерно-локационной съемки принципиально отсутствует тот вид наземных геодезических работ, который в традиционной аэрофототопографии называется *плано-высотное обоснование*. Для правильной интерпретации и обеспечения координатами данных съемки нет необходимости выделять опознавательные знаки и определять их координаты. Понятно, что это обстоятельство значительно упрощает задачу, особенно в удаленных и труднодоступных районах.

Геодезическая поддержка лазерно-локационной съемки осуществляется сетью наземных базовых (референтных) GPS станций, которые располагаются равномерно в районе проведения аэросъемочных работ. Каждая базовая станция обслуживает территорию в окружности с радиусом 30–50 км и центром в точке стояния данной станции. Роль базовых станций абсолютно традиционна для всех наземных и воздушных методов дифференциальных GPS съемок. Базовые станции устанавливаются не непосредственно на территории объекта съемки, а в любом удобном месте.

С учетом изложенного выше, геодезическое обеспечение лазерно-локационной съемки сводится к следующим задачам:

- выбор мест установки базовых GPS станций с учетом топологии объекта съемки;

- обеспечение всех базовых станций пространственными геодезическими координатами в выбранной системе координат.

4. Высокая производительность.

Производительность лазерно-локационного метода чрезвычайно высока. На практике достигнута производительность съемки в 500–600 км за один аэросъемочный день для линейных объектов и в 500–1000 кв. км для площадных объектов. Приведенные цифры требуют корректной интерпретации, так как производительность, кроме всего прочего, зависит от заданных условий съемки, таких, как ширина полосы захвата, плотность (количество лазерных точек на единицу поверхности), и др. В той же самой степени производительность аэро-

фотосъемочных работ прямо зависит от заданного масштаба фотографирования. Тем не менее, как было отмечено выше, в случае лазерной локации практически эквивалентными оказываются производительность как собственно аэросъемочных работ, так и базовых процедур наземной обработки. Иными словами, темп сбора данных в основном соответствует темпу их обработки и, таким образом, приведенные оценочные значения производительности маршрутной и линейной съемки соответствуют уже выдаче во многом законченных топографических данных. Совсем не так обстоят дела в классической аэрофототопографии, где по вполне объективным обстоятельствам стадии аэросъемки и обработки могут разделять месяцы или даже годы.

5. Возможность работы в ночное время и в любое время года.

Эта возможность вытекает из того факта, что лидар является *активным* средством дистанционного зондирования, т.е. регистрирует собственное, а не отраженное солнечное излучение. По этой причине ничего (кроме, конечно, условий пилотирования) не меняется при использовании воздушных лидаров в ночное время. Понятно, что такая возможность также способствует увеличению общей производительности.

6. Чрезвычайно широкий спектр приложений.

Этот вопрос уже рассмотрен выше.

А теперь перейдем к недостаткам лазерно-локационного метода съемки. Фактически можно говорить только об одном безусловном недостатке, а именно:

Сильная зависимость от состояния атмосферы.

Признавая наличие этого недостатка, необходимо особо оговорить, что и здесь речь идет об *относительном*, а не об *абсолютном* недостатке. Следует понимать, что сильная зависимость от состояния атмосферы, т.е. невозможность проведения аэросъемочных работ в условиях дождя, тумана, дымки, низкой облачности, – это особенность всех средств дистанционного зондирования, работающих в оптическом (т.е. видимом ультрафиолетовом и инфракрасном) диапазоне электромагнитного спектра. Серьезными преимуществами в этом вопросе обладают только радиолокационные системы, работающие, как следует из их названия, в радиодиапазоне.

Кроме того, говоря о воздушных лазерно-локационных методах, можно было бы упомянуть о ряде существенных недостатков, вытекающих из динамического характера съемки (носитель постоянно находится в движении) и ограничений в доступных ракурсах съемки (носитель в основном находится над объектом съемки). Эти недостатки, конечно же, существенны, они также во многом ограничивают предельно достижимую точность метода. Однако их не следует считать недостатками именно воздушной лазерно-локационной съемки, так как они присущи вообще всем аэросъемочным методам.

Иногда упоминаются другие недостатки лазерно-локационного метода съемки. Однако мы не можем их безусловно признать, так как при ближайшем рассмотрении они оказываются *не недостатками, а особенностями* лазерно-локационного метода, которые, безусловно, должны быть учтены на практике, но прямо не ограничивают его информационных возможностей. Перечислим некоторые из таких особенностей:

- 1) не всегда достаточный уровень точности для некоторых топографо-геодезических приложений;
- 2) дискретный характер данных;
- 3) снижение точности с увеличением высоты съемки;

- 4) ограничения по дальности (высоте) съемки;
- 5) опасность для органов зрения наземных наблюдателей.

Эти и другие особенности лазерно-локационного метода съемки будут подробно обсуждаться ниже.

1.1.2. Самые общие принципы работы воздушного лидара рассмотрим на примере прибора класса ALTM, выпускаемого канадской компанией Optech (рис. 1, 2).



Рис. 1. Система дистанционного лазерного зондирования земной поверхности ALTM-3100: съемочный блок (справа), блок управления и архивации данных съемки (слева) (Optech, 2007).

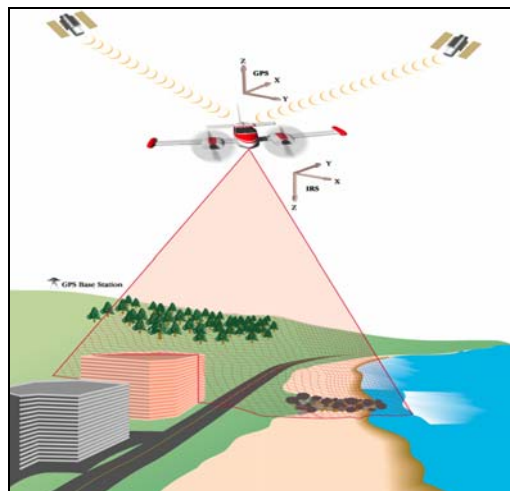


Рис. 2. Принцип работы воздушного лидара.

В качестве излучателя используется полупроводниковый лазер, как правило, ближнего инфракрасного диапазона, работающий в импульсном режиме. Для каждого излученного импульса регистрируется время, затраченное на распространение от источника до объекта, вызвавшего отражение, и обратно к приемнику. С учетом постоянства скорости и прямолинейности распространения электромагнитных колебаний в атмосфере измеренное значение временного интервала позволяет определить расстояние (в терминах лазерной локации «наклонную дальность») от источника излучения до объекта. Кроме значения наклонной дальности D , для каждого излученного импульса регистрируется текущее значение угла α отклонения сканирующего элемента (зеркала, призмы, оптического клина). Величина этого угла позволяет однозначно определить направление распространения зондирующего луча («линию визирования») в системе координат лидара, которая «жестко» связана со строительными осями сканерного блока лидара.

В свою очередь, положение и ориентация системы координат лидара в геодезической (или географической) системе координат определяются благодаря присутствию на борту в составе лидара носителя навигационного комплекса, который обеспечивает непрерывное определение трех пространственных координат положения сканерного блока X , Y , Z и трех углов его ориентации ω , ϕ , κ . Такой набор шести параметров пространственного положения и угловой ориентации в фотограмметрии называется *элементами внешнего ориентирования*. Принцип работы бортового навигационного комплекса основан на взаимодействии приемника спутниковой системы GPS и инерциальной системы.

В зависимости от типа лидара могут фиксироваться более одного (до пяти) отражений от наземных объектов для каждой линии визирования. Т.е. если на пути распространения лазерного луча он сталкивается с неполным препят-

ствием, то часть энергии импульса отражается, а другая распространяется дальше вдоль линии визирования. Такая возможность способствует получению более информативных лазерно-локационных данных, так как для одного излученного импульса имеем несколько вернувшихся. Так, даже один импульс может принести множественные отклики сразу от нескольких значимых компонентов сцены: первые отклики будут получены за счет отражений от листвы растительности, проводов и опор ЛЭП, кромок зданий, а последний отклик, как правило, соответствует поверхности земли или другой сплошной поверхности, являющейся абсолютным препятствием на пути распространения лазерного импульса. Кроме поверхности земли, примером такого «абсолютного» препятствия может выступать крыша здания.

Таким образом, функциональная схема лидара в его нынешней форме не содержит никаких принципиально новых компонентов. В этом смысле с некоторыми упрощениями прибор можно было бы определить как «сканирующий лазерный дальномер с навигационным обеспечением». Все основные структурные компоненты, составляющие лидар, – сканерный блок, GPS, инерциальная система – всесторонне изучены и уже много лет эксплуатируются. Поэтому, говоря о концепции современного лидара, используемого для топографических целей, следует заявить, что *принципиально новое качество данных, поставляемых таким прибором, появляется именно благодаря объединению всех упомянутых компонентов в единое целое*. Это произошло в начале 90-х годов 20-го века, когда использование GPS и лазерных дальномеров прочно утвердилось в аэросъемочной практике, инерциальные системы стали активно применяться для непосредственного определения элементов внешнего ориентирования, а по показателям точности все составляющие лидар источники геопространственных данных достигли взаимосогласованного уровня (табл. 1).

Таблица 1. Показатели точности основных структурных компонентов типового воздушного лидара к началу 90-х годов 20-го века

Определяемый параметр	Источник	Точность
Пространственные координаты носителя	GPS	8–10 см
Наклонная дальность	Лазерный дальномер	10–15 см
Ориентация носителя	Инерциальная система	1–2 мрад. (ошибка позиционирования 15–30 см при высоте съемки 300 м)

С этой поры лазерная локация является не только как средство «дистанционного зондирования», но в большей степени как «фотограмметрическое средство». Последнее предполагает наличие гарантий точности геопривязки данных съемки и пространственных измерений. С появлением первых лидаров гарантии точности были представлены производителями и выражались в том, что специфицируемая точность лазерно-локационных данных составляла 15–20 см в абсолютных геодезических координатах.

1.1.3. Для правильного понимания содержания и значения лазерно-локационного метода съемки необходимо, прежде всего, понять характер поставляемых лазерно-локационных данных. В качестве наиболее общего понятия в литературе все чаще используют термин *лазерно-локационное изображение*, которое, однако, не является изображением в традиционном понимании этого термина.

В настоящее время различают два основных вида лазерно-локационных

данных и соответственно два основных вида лазерно-локационных изображений:

- 1) в дальномерной форме;
- 2) в форме интенсивности отраженного импульса.

Представленное деление в равной степени применимо как к воздушным, так и к наземным лазерно-локационным данным. Соответствующие примеры приведены на рисунках 3, 4, 5.

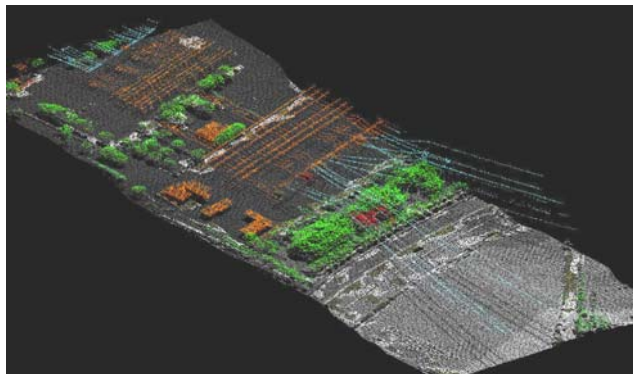


Рис. 3. Типовое лазерно-локационное изображение в дальномерной форме.



Рис. 4. Типовое лазерно-локационное изображение в дальномерной форме, полученное методом наземного лазерного сканирования.

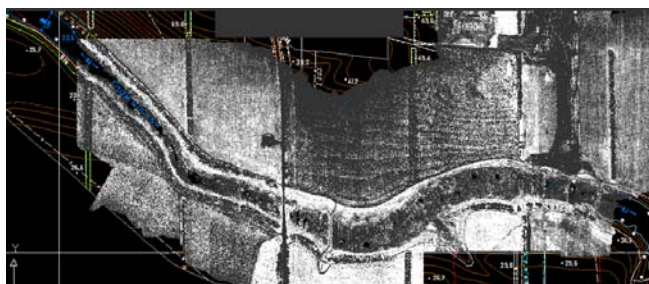


Рис. 5. Типовое лазерно-локационное изображение в форме интенсивности.

Представим необходимые пояснения. Более корректно с нашей точки зрения говорить не о двух видах лазерно-локационных данных, а о двух формах представления, так как сами данные в обоих случаях одни и те же.

Иными словами, нет никаких отдельных приемов для получения одного из двух основных ви-

дов ЛЛ данных. Оба вида возникают одновременно и в тесной связи друг с другом. Поэтому более правильно говорить именно о формах представления, а не о видах.

Дальномерная форма представления соответствует распределению в координатном пространстве трехмерного облака лазерных точек. Термин лазерная точка используется здесь и в дальнейшем для обозначения единичного первичного лазерно-локационного измерения. Т.е. важными численными параметрами, характеризующими каждую лазерную точку, являются значения пространственных координат X_p , Y_p , Z_p в некоторой заранее заданной системе координат. Распределение лазерных точек образует пространственный образ объекта съемки, который доступен визуальному анализу, проведению пространственных измерений и применению вычислительных методов геоморфологического анализа. Такой образ и составляет то, что принято называть лазерно-локационным изображением в дальномерной форме.

Наряду с пространственными координатами точки объектового пространства, вызвавшего отражение лазерного импульса, современные лидары способны регистрировать интенсивность отраженного импульса I , т.е. значение энергии импульса, вернувшейся на приемник излучения. Забегая вперед, укажем, что эта доля зависит от многих факторов, среди которых двунаправленная спектральная отражательная способность объекта, фактическое значение да-

льности, величины пропускания, рассеивания и собственного излучения атмосферы и другие параметры. Однако с практической точки зрения важно то, что лазерно-локационное изображение в форме интенсивности по своим информационным свойствам чрезвычайно близко к естественным черно-белым фотографиям (аэрофотоснимкам в случае воздушного применения), что позволяет успешно использовать их для целей визуального распознавания объектов и камерального дешифрирования даже без привлечения традиционных аэрофото-съемочных данных.

Для того, чтобы закончить формальное описание лазерно-локационных данных, дополним уже введенный набор численных параметров X_p, Y_p, Z_p, I , характеризующих каждую лазерную точку значением t – время регистрации данной лазерной точки. В результате у нас впервые появляется возможность формально определить такое понятие, как *набор лазерно-локационных данных*, а именно:

$$L = \{X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}, I_i, t_i\} \quad i = 1, \dots, N,$$

где L – означает весь рассматриваемый набор лазерно-локационных данных, N – общее количество лазерных точек в наборе L .

Представленная форма соответствует самому простому случаю и в дальнейшем будет нами уточняться.

1.2. Справка по истории лазерной локации

1.2.1. Как уже было сказано выше, приборы, которые сегодня принято называть лидарами или лазерными сканерами, можно рассматривать как механическое совмещение двух *независимых* (т.е. практически невзаимодействующих в процессе съемки) компонентов, а именно – дальномерного (сканерного) блока и навигационного комплекса типа GPS+Инерциальная система. Это замечание очень важно, так как позволяет лучше проследить историю возникновения лазерно-локационных систем и их практического применения. С практической точки зрения такое деление значительно упрощает изучение реальной точности лидаров, так как позволяет анализировать влияние этих двух компонентов на характер получаемых данных, в частности на их точность, отдельно.

Примерно 20 лет назад была предложена законченная теория электронно-оптических измерений в геодезии (Шануров, 1991), которая с успехом может быть использована для оценки функциональных возможностей дальномерного блока современного лазерного сканера, использующего, как известно, твердотельный лазер в качестве излучателя. Такая теория позволяет получить оценку достижимой точности, разрешающей способности, влияния атмосферных условий и других практически значимых параметров. Практически полностью заимствована и терминология. Так, лазерные сканеры делятся на когерентные и некогерентные, использующие фазовый или импульсный метод измерения дальности. Приходится признать, что лазерная локация как отдельная дисциплина пока не внесла ничего принципиально нового в теоретическую дальнометрию, что, впрочем, облегчает ее освоение.

Что касается второго главного компонента сканера – навигационного комплекса, обеспечивающего каждое первичное измерение полным набором элементов внешнего ориентирования, то, как указано выше, его работа строится на взаимодействии в реальном времени GPS/ГЛОНАСС приемника и инерциальной системы. Развитие и совершенствование таких систем происходит очень бурно в последнее десятилетие, и следует признать это направление в высшей

степени инновационным и с теоретической, и с технологической точек зрения. Однако широкое использование комбинированных GPS/INS систем является тенденцией современного авиационного дистанционного зондирования вообще, а не только лазерной локации. Такие системы применяются и с аэрофотоаппаратами, с телевизионными и тепловизионными сканерами, и с радиолокационными системами. Поэтому неверно было бы понимать GPS/INS метод построения навигационного решения исключительно как атрибут лазерной локации.

1.2.2. Родословная современных лазерных сканеров отразилась на терминологии. В отечественной и зарубежной литературе пока нет устоявшегося термина для обозначения приборов этого типа. Одновременно используются термины «лазерный локатор» (*laser locator*), «лазерный сканер» (*laser scanner*) и «лидар» (*lidar*). В России чаще говорят «лазерный сканер», а за рубежом – «*lidar*». В таблице 2 представлены основные достоинства и недостатки используемых терминов.

Таблица 2. Сводная таблица взаимозаменяемых терминов, определяющих понятие «лазерная локация»

Термин	Достоинства	Недостатки
Лазерное сканирование	До настоящего времени наиболее употребительный термин в зарубежной литературе	Не в полной мере соответствует сути явления. Не удобен грамматически
Лазерная локация	Наиболее точно описывает явление. Соответствует отечественной традиции (оптическая локация, световая локация)	Менее употребителен в зарубежной литературе
Лидар (LIDAR)	Достаточно точно описывает явление: Light Deection and Ranging. Выражает этимологическую преемственность с термином «радар» – RADAR, Radio Detection and Ranging. В последнее время становится все более употребителен в зарубежной литературе	Нет

В заключение этого короткого раздела представим график, который выражает динамику изменения важнейшего технического параметра, характеризующего производительность воздушных лидаров (рис. 6). В дальнейшем будет показано, что таким параметром является *частота зондирующих импульсов*, или, что тоже самое, *количество первичных измерений в секунду*. Как видно из рисунка 6, за десять лет с момента появления лидаров их производительность возросла более чем на порядок. Именно этот стремительный рост производительности в течение последних десяти лет определял технологические и экономические условия, в которых развивалась лазерная локация в России и в мире в целом.

1.3. Импульсный и фазовый метод измерения дальности

В современной лазерной локации используются два основных метода измерения наклонной дальности – импульсный и фазовый. Сразу оговоримся, что в лидарах воздушного базирования в настоящее время используется только импульсный метод, а в наземных лидарах – и импульсный, и фазовый. Причины этого явления мы обсудим позднее, а пока рассмотрим эти два метода измерения дальности подробно.

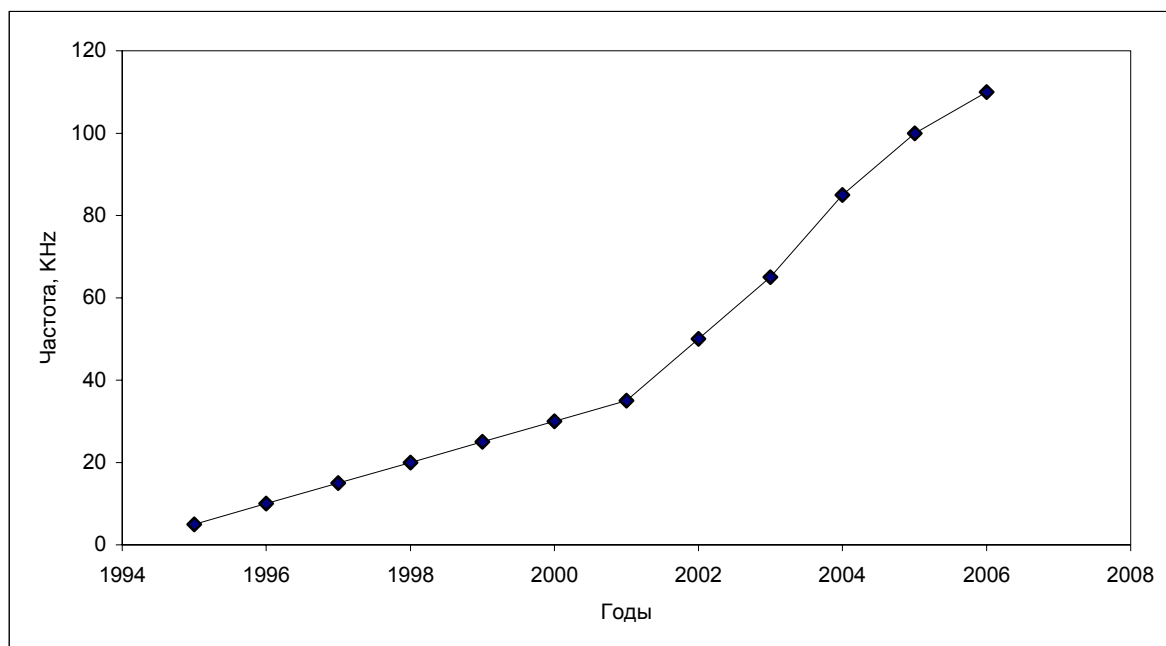


Рис. 6. Рост производительности лазерных локопоров импульсного типа.

Импульсный метод

Реализация импульсного метода измерения наклонной дальности предполагает определение времени распространения короткого лазерного импульса от источника излучения до объекта и обратно до приемника. С учетом постоянства скорости распространения электромагнитных колебаний в атмосфере $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, замеренная продолжительность распространения лазерного импульса T_i позволяет определить наклонную дальность D_i по простой формуле:

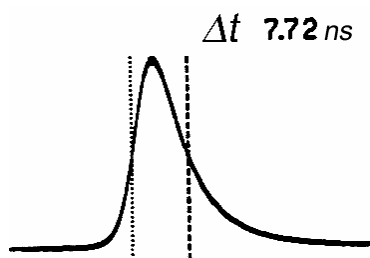


Рис. 7. Типовая форма зондирующего импульса при импульсном методе локации.

$$D_i = \frac{T_i}{2 \cdot c}$$

На рисунке 7 представлена типовая форма зондирующего лазерного импульса в лидарах типа ALTM канадской компании Optech Inc., а на рисунке 8 показана принципиальная схема приемопередатчика при реализации данной схемы измерения.

Как следует из описания, реализация импульсного метода измерения дальности сравнительно проста в функциональном отношении. Поэтому и аппаратная реализация этого метода не вызывает серьезных проблем, что в качестве положительного следствия имеет достижение устойчивости и достоверности получаемых данных.

Представим некоторые дополнительные соображения, характеризующие импульсный метод:

1. По возможности, должна быть обеспечена минимальная длительность зондирующего импульса и его максимальная добротность (т.е. максимально крутой передний фронт). Это требование представляется вполне естественным.

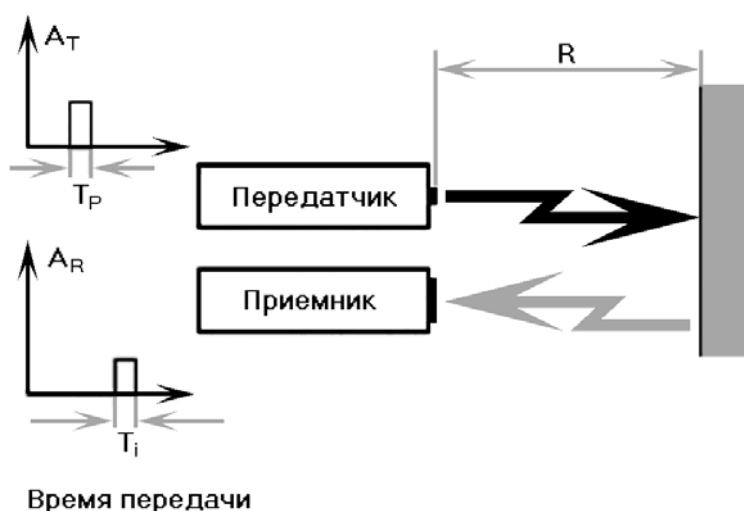


Рис. 8. Принципиальная схема приемопередатчика при импульсном методе.

дидит к искривлению оптического пути импульса. Это явление проявляется тем сильнее, чем больше высота съемки. Для последней разработки компании Ortech Inc. лидара ALTM 3100 фактическая высота съемки может достигать больших значений – до 4000 м. На таких высотах влияние рефракции для лазерных точек, полученных на краях полосы съемки, уже сопоставимо с точностью метода. Это обстоятельство вынуждает принимать специальные меры для коррекции координат лазерных точек на этапе наземной обработки. Коррекция проводится с использованием аналитических зависимостей, описывающих величину рефракции в зависимости от текущих физических параметров атмосферы, таких как температура и давление на уровне земли.

Сводная таблица 3 содержит концептуальные достоинства и недостатки импульсного метода измерений наклонной дальности.

Таблица 3. Основные достоинства и недостатки импульсного метода измерения дальности

Достоинства	Недостатки
– высокая устойчивость метода измерения; – сравнительно простая схема оптико-электронного тракта; – возможность регистрации множественного отражения.	– ограничения по достижимой точности и разрешающей способности; – принципиальное ограничение производительности при использовании одиночного приемника по норме «высота съемки – частота импульсов».

Обсудим важнейшие недостатки импульсного метода измерения дальности.

1. Как и во всех других родственных технологиях, в лазерной локации принято считать, что импульсный метод проигрывает по точности фазовому. Это происходит потому, что фактическая точность каждого измерения зависит от ряда параметров, каждый из которых может оказать на точность конкретного измерения. Таковыми параметрами являются:

– длительность и форма (в частности, крутизна переднего фронта) зондирующего импульса;

Совершенно аналогичные требования к форме зондирующего импульса предъявляются в радиолокации и других технологиях активного зондирования.

2. Описанная схема измерений предполагает постоянство скорости и прямолинейность распространения лазерного импульса в атмосфере. Строго говоря, это не совсем так с учетом явления рефракции, которое приводит

- отражательные характеристики объекта;
- оптические свойства атмосферы;
- текстура и ориентация элементарной поверхности объекта вызвавшей отражение зондирующего луча по отношению к линии визирования;
- другие.

Влияние всех перечисленных выше параметров сводится к ослаблению «размыванию» формы отраженного импульса на входе оптической схемы приемника, т.е. к возрастанию неопределенности в измерении длительности задержки распространения зондирующего импульса до объекта и обратно. Повышение этой неопределенности на практике оборачивается снижением точности. Как будет показано ниже, фазовый метод во многом свободен от этого недостатка.

2) Принципиальное ограничение производительности по норме «высота съемки – частота импульсов» состоит в следующем. Из представленной выше функциональной схемы лидара импульсного типа видно, что каждый следующий зондирующий импульс может быть излучен только после того, как зарегистрирован предыдущий отраженный импульс. С учетом конечной скорости распространения электромагнитных колебаний можно определить простое соотношение, которое определяет теоретический предел частоты зондирующих импульсов $f_{\max}$ в зависимости от высоты съемки H , а именно:

$$f_{\max} = \frac{c}{2 \cdot H}$$

Значения $f_{\max}$, рассчитанные в соответствии с данной формулой, приведены в таблице 4.

Таблица 4. Максимально возможные значения частоты зондирующих импульсов в зависимости от высоты съемки при импульсном методе

Высота съемки (H), м	Максимально возможная частота зондирующих импульсов ($f_{\max}$), КГц
300	500
1500	100
3000	50

Представленные в таблице 4 значения частот являются теоретически максимально возможными. На практике они несколько меньше.

Отметим также, что данное принципиальное ограничение в той или иной степени относится и ко всем другим методам активного дистанционного зондирования. Здесь оно упомянуто потому, что, как было сказано выше, в авиационной лазерной локации в настоящее время используются исключительно импульсные методы. Поэтому это ограничение существенно на практике, принимая во внимание значительные высоты съемки.

Дальнейшим развитием импульсного метода является так называемый метод *регистрации формы отраженной волны (wave form registration)*. Практическую реализацию данного метода обеспечивают, например, лидары ALTM 30/70 и ALTM 3100 в качестве опции к базовому импульсному методу измерения.

Технология регистрации формы отраженной волны предполагает запись в цифровом виде полной формы отклика на каждый зондирующий импульс с частотой дискретизации 1 ГГц и выше. Зарегистрированная таким образом волна дает «историю» отражения зондирующего импульса от всех препятствий, вступивших на его пути (рис. 9). Наибольший интерес такая информация может представлять для использования в специализированном программном обеспечении обработки лазерно-локационных данных для более достоверного распознавания и геопозиционирования объектов различных классов.

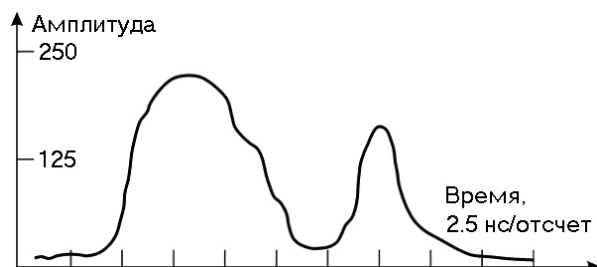


Рис. 9. К определению метода регистрации формы отраженной волны.

Другим возможным применением может явиться использование данных такого рода для нормализации изображений распределения интенсивности с учетом высоты полета и угла падения зондирующего луча.

Перейдем к рассмотрению *фазового метода*.

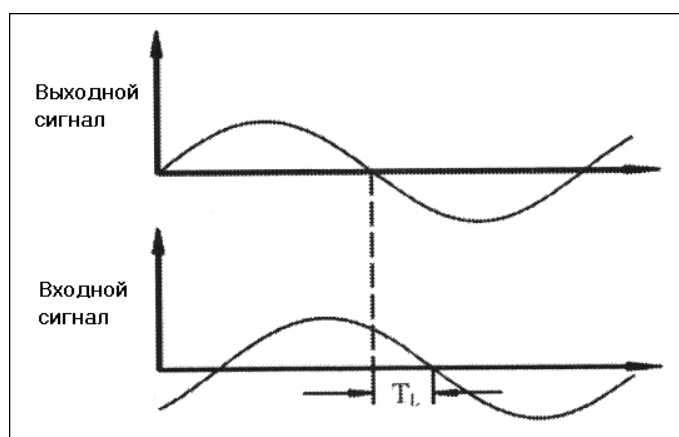


Рис. 10. К определению фазового метода определения наклонной дальности.

Рисунок 10 представляет принцип определения наклонной дальности при использовании фазового метода. Этот принцип состоит в определении количества целых длин волн между локатором и объектом и разности фаз излученной и принятой волны модулирующего колебания. Ширина полосы модуляции до 10 ГГц при использовании современных лазерных диодов (semiconductor laser diodes). Отметим, что в этом случае зондирующее

излучение должно быть непрерывным, что в общем случае значительно повышает требования по выходной мощности излучающего лазера по сравнению с импульсным методом.

Напомним, что фазовый метод измерения дальности пока применяется только в лидарах наземного базирования.

Главное преимущество фазового метода измерения — более высокая точность, которая может достигать первых миллиметров. Вообще фазовые измерения в оптической и радиодальнометрии (в том числе в GPS и ГЛОНАСС методах) считаются самыми точными. Для того чтобы пояснить это положение рассмотрим фазовый метод измерения несколько более подробно.

Для того, чтобы определить расстояние между источником и объектом, необходимо:

1. Определить целое количество длин волн модуляции K , приходящихся на это расстояние.

2. Определить разность фаз $\Delta\varphi$ между принятой и опорной волной и тем самым оценить дополнительное расстояние, соответствующее «последней» неполной волне.

Если значения K и $\Delta\varphi$ удалось определить, то искомое расстояние определяется по формуле:

$$D = K\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda,$$

где λ – длина волны модуляции.

Приведенной простой формулы достаточно, чтобы в принципе дать объяснение высокой точности фазового метода дальномерных измерений. Точность величины λ определяется стабильностью частоты генератора модулирующего колебания. В современных условиях возможно достичь очень высокой точности этого параметра. Т.е. если значение K определено правильно, то член $K\lambda$ практически не вносит никакого своего вклада в результирующую ошибку измерения дальности.

Величина $\Delta\varphi$ также может быть определена достаточно точно. Сразу отметим, что в зависимости от типа лидара может использоваться либо аппаратный метод определения значения $\Delta\varphi$ с помощью т.н. *фазиметров*, либо принятый сигнал в цифровой форме записывается на магнитный носитель, а все последующие процедуры анализа фазы осуществляются программно. В любом случае удастся достичь высокой точности определения $\Delta\varphi$ по следующим причинам:

– за счет использования синусоидального закона модуляции ширина спектра входного и выходного сигнала чрезвычайно мала. Теоретически можно говорить о бесконечно узком спектре, т.е. о единственной дискретной частоте –

$$\omega = \frac{c}{\lambda}.$$

Важно, что входное и выходное излучение может отличаться по интенсивности (т.е. по амплитуде волны модуляции), но не по частоте ω . Это обстоятельство обуславливает высокую эффективность и точность корреляционных методов, которые используются при поиске значения $\Delta\varphi$.

– фазовый метод, в отличие от импульсного, позволяет получить численные значения и оценить достоверность и точность произведенного дальномерного измерения за счет анализа взаимной корреляционной функции излученного и принятого излучения. Достоверное (и как следствие точное) измерение будет характеризоваться наличием отчетливо выраженного максимума взаимной корреляционной функции, а у недостоверного измерения соответствующая функция будет иметь размытый вид и значения максимума будут определяться не столь точно. Наличие возможности численной оценки достоверности измерения позволяет, если необходимо, отвергать некоторые измерения, точность которых находится ниже допустимого порога.

В таблице 5 сведены основные достоинства и недостатки фазового метода измерения дальности.

Упомянутая в таблице в качестве достоинства более высокая производительность, т.е. количество дальномерных измерений в секунду, которая сегодня

Таблица 5. Основные достоинства и недостатки фазового метода измерения дальности

Достоинства	Недостатки
– наивысшая возможная точность измерения; – более высокая производительность	– ограниченная дальность действия; – возможность неоднозначности при определении целого количества длин волн; – высокая потребная мощность излучателя; – невозможность регистрации множественного отражения

для некоторых моделей наземных лазерных сканеров приближается к 1 ГГц, объясняется следующими двумя обстоятельствами:

- во-первых, по описанным ниже причинам рабочие дальности действия фазовых лидаров невелики, не более 200 м. Поэтому эти приборы по норме «высота (дальность) съемки – частота импульсов» ограничены по частоте импульсов в меньшей степени;

- во-вторых, за счет использования модулирования несущего колебания некоторые из фазовых приборов вообще свободны от этого ограничения. При изменении закона модулирования во времени появляется возможность преодолеть смещение сигналов, отраженных от различных компонентов сцены и пришедших на входной зрачок приемника одновременно. Так как закон моделирования и функция его изменения известны точно, это позволяет надежно детектировать оба сигнала отдельно.

Теперь обсудим недостатки фазового метода измерения. В основном они сводятся к проблеме *неоднозначности решения по целым длинам волн* и необходимости принятия дополнительных мер по разрешению этой неоднозначности. Действительно, фазовый метод в том виде, как он описан выше, не содержит никаких механизмов определения значения K . Более того, при использовании единственной частоты модуляции определение дальности D при использовании исключительно фазового метода принципиально невозможно. Для разрешения задачи неопределенности по целым длинам волн применяют различные методы, которые, однако, могут быть объединены в две большие группы:

- 1) использование дополнительных источников информации по измеряемой дальности;

- 2) многочастотные методы.

В первом случае необходимо иметь некоторую априорную информацию о значении величины D с точностью не хуже $0.5 \cdot \lambda$. Применительно к лазерно-локационному методу измерения это можно сделать, например, выполнив измерение наклонной дальности импульсным методом, а потом уточнив его фазовым.

Во втором случае используют модуляцию несущей двумя или более синусоидальными колебаниями. Это позволяет однозначно разрешить неопределенность по целым длинам волн в диапазоне от 0 до некоторого максимального значения $D_{\max}$. Если измеряемые дальности превосходят $D_{\max}$, то разрешение неоднозначности не гарантируется. Как уже было отмечено выше, на практике значение $D_{\max}$ пока не превосходит 300 м. Исчерпывающую информацию по

применению фазового метода измерения дальности можно получить в источнике (Шануров, 1991).

1.4. Лазерная локация и традиционные методы топографической съемки

В настоящем разделе обсуждаются различные аспекты сравнения лазерно-локационного метода съемки с традиционными наземными и воздушными топографо-геодезическими технологиями.

1.4.1. Часто приходится слышать мнение, что каждое первичное лазерно-локационное измерение (лазерная точка), полученное лидаром, по своему информационному содержанию эквивалентно результату единичного наземного геодезического измерения – пикету. Такое отождествление нельзя признать безупречным. И дело здесь не только в чисто количественных различиях, вытекающих из неоспоримого преимущества лазерно-локационного метода в производительности. Эти два вида съемки – лазерно-локационная и наземная топографическая – по сути, реализуют две отличные идеологии сбора геопространственных данных. Тем не менее, такое сравнение представляется чрезвычайно полезным для правильного понимания сути проблемы. Обратимся к таблице 6, представляющей характеристики данных для двух упомянутых видов съемки.

Таблица 6. Сравнение информационного содержания лазерно-локационного и наземного топографо-геодезического измерения

Параметр сравнения	Данные наземной топографической съемки	Лазерно-локационные данные
Максимально достижимая точность определения пространственных координат	Лучше 1 см	15–30 см
Плотность	Плотность расстановки пикетов определяется масштабом выполняемой топографической съемки и характером объекта. На практике плотность ограничена производительностью съемочной бригады, которая, как правило, составляет несколько сотен пикетов в день	На практике до 3-5 лазерных точек на м ² земной поверхности. Реальная плотность определяется производительностью сканера (в настоящее время до 50–100 тыс. измерений в секунду, и условиями съемки – высотой и скоростью
Положение в пространстве	Пикеты выбирают, как правило, на поверхности земли	Точки лазерных отражений покрывают как поверхность земли, так и все наземные объекты – крыши зданий, опоры и провода ЛЭП, водоемы, растительность и др.
Характер распределения по поверхности сцены	Выбор места установки пикета определяется оператором в каждом конкретном случае, исходя из топологических особенностей объекта съемки	Распределение лазерных точек по поверхности сцены носит случайный характер

Еще раз подчеркнем, что к приведенному выше сравнению наземной топографической и лазерно-локационной съемкам следует относиться не более как к методологическому приему, призванному помочь осознать характер лазерно-локационных данных. Совершенно неправильно представлять эти два вида съемки как конкурирующие технологии, тем более что на практике они часто

дополняют друг друга. Главный вывод, который может быть сделан по результатам такого сравнения, состоит в следующем. При выполнении наземной топографической съемки как с использованием традиционных, так и GPS средств, каждый пикет несет четко определенную семантическую нагрузку, он в момент своего возникновения уже есть часть некоторой схемы, которая позднее по вполне определенным правилам будет преобразована в топографический план. Лазерно-локационное изображение – не схема, а значительно более богатый по содержанию образ реальной сцены. Использование таких данных в топографии предполагает наличие соответствующего методического и алгоритмического обеспечения, разработкой которого занимаются различные компании в России и в мире.

1.4.2. Обратимся к другому объекту сравнения. Говоря о прикладном аспекте ЛЛ методов, можно с некоторой долей условности выделить два главных направления. Первым является топографическое направление, которое предполагает использование ЛЛ данных для восстановления рельефа, а также для рисовки важнейших контуров, подлежащих изображению на топографических картах и планах. Другим главным направлением является широкий круг задач, непосредственно не связанных с топографией. В рамках решения таких задач ЛЛ данные используются для построения векторных моделей и определения набора морфологических свойств разнообразных естественных или искусственных образований. В большинстве случаев сбор информации такого рода является составной частью инженерных изысканий. В любом случае при проведении анализа прикладного значения ЛЛ метод логично сравнивать, прежде всего, со стереотопографическим методом создания карт и планов или его аналогам, основанным на методах наземной (ближней) фотограмметрии. В пользу выбора стереотопографического метода в качестве базиса для оценки эффективности ЛЛ метода можно привести следующие аргументы:

– стереотопографический метод до настоящего времени является главным технологическим звеном производства и обновления топографических данных в самом общем смысле. Использование этого метода является обязательным, что закреплено официально действующими нормативными документами. В то же время ЛЛ методы по характеру получаемых данных, степени их полноты и точности в значительной степени обеспечивают решение тех же задач, что и классический стереотопографический метод, предполагающий выполнение аэрофотосъемки, работ по геодезическому обоснованию и комплекса процедур фотограмметрической обработки. В этом смысле сравнение ЛЛ методов и стереотопографического метода корректно. Дополнительным аргументом в пользу этого являются результаты основных тенденций внедрения ЛЛ методов в практику производства топографических материалов. Здесь отчетливо прослеживается тенденция дополнения стереофотограмметрических методов лазерно-локационными при составлении топографических планов, при кадастровых работах, а также при проведении инженерных изысканий в таких отраслях, как строительство, нефтегазовая промышленность, электроэнергетика. Вообще говоря, правильнее говорить не о дополнении, а об эволюции стереотопографического метода в части прямого усвоения данных по рельефу и по важнейшим контурам, полученных ЛЛ методом;

– сравнение ЛЛ методов с другими известными в настоящее время методами авиационного дистанционного зондирования, обеспечивающих прямое получение трехмерных данных, в частности с интерферометрическими радио-локационными системами бокового обзора, не может считаться вполне кор-

ректным. Интерферометрические радиолокационные системы хотя и обеспечивают прямое измерение геометрии рельефа, но занимают отличную от ЛЛ средств технологическую нишу и поэтому не могут рассматриваться как аналог при выполнении сравнения по техническим и экономическим показателям. По своим главным параметрам – разрешение при высоте полета 2000 м на уровне первых метров, точность определения геодезической высоты на уровне 3–7 м, радиолокационные данные – также находят применение в целом ряде других областей, например, в геологии, мониторинге земель и лесов, и др.

1.5. Концепция лазерно-локационного метода сбора геопространственных данных

С учетом сказанного выше, представляется уместным говорить о *лазерно-локационном методе съемки*, понимая под этим термином совокупность методических приемов, связанных с применением ЛЛ и сопутствующих средств в топографии и при проведении изысканий. ЛЛ метод составляют следующие тематические группы:

- 1) исследование применимости ЛЛ средств съемки для той или иной группы объектов и сцен;
- 2) вопросы организации аэросъемочного процесса и выбора оптимальных режимов работы аппаратуры в соответствии с некоторой заранее определенной целевой функцией;
- 3) оценка точности и достоверности получаемых данных;
- 4) обеспечение совместимости ЛЛ данных и их комплексирование с данными других видов дистанционного зондирования и результатов наземных измерений, а также обработка данных с целью их дальнейшего использования в различных тематических приложениях.

ЛЛ метод представлен выше в наиболее общей форме. Понятно, что все приведенные положения нуждаются в конкретизации применительно к условиям решаемой задачи.

Следует отметить, что на сегодняшний день возможности, предоставляемые традиционными методами воздушной и наземной топографической съемки, не в полной мере соответствуют современным требованиям по полноте данных, их точности и форме представления. Это утверждение, естественно, нуждается в пояснениях. Прежде всего, необходимо определиться по вопросу, какие группы пользователей заинтересованы в получении материалов такой съемки. И в России и за рубежом это прежде всего топографо-геодезические, землеустроительные, картографические, проектные, эксплуатационные и специальные организации различных отраслей, деятельность которых охватывает сбор геопространственных данных, проектирование и строительство различных объектов, а также их поддержание в безопасном и работоспособном состоянии. Другую большую группу пользователей составляют компании, занятые картографическим производством, созданием геоинформационных систем (ГИС) и кадастров землепользования. Указанные две основные категории пользователей различаются как по типу выходной продукции, так и по номенклатуре используемых в процессе производства аппаратных и программных средств.

Для правильного понимания характера проблем, возникающих при использовании данных топографических съемок в инженерных отраслях, необходимо также представить краткое описание современных технологий проектирования в этой области. Существенным является тот факт, что такие технологии, как правило, реализуются в виде прикладных программных пакетов, таких, как па-

кет AutoCAD компании AutoDesk или MicroStation компании Bentley. Такие системы представляют реализацию концепции автоматизированного проектирования (Computer Aided Design (CAD) в зарубежной литературе).

Использование подобных систем значительно повышает как производительность, так и качество выполнения проектных работ, т.к., по сути, оперирует с математической моделью, включающей все значимые компоненты, имеющие отношение к объекту проектирования. Понятно, что каждый такой компонент (класс объектов) предполагает свою, учитывающую его специфику, форму представления (в частности векторную или растровую), а также требует решения ряда других чисто технических проблем, составляющих специфику реализации конкретной CAD системы. Однако решающей все же является возможность модельного представления объектовой среды, в которой ведется проектирование. Исключительная важность следования описанному модельному подходу при выполнении проектирования и математического анализа объясняется двумя главными обстоятельствами:

1) модельное представление объектовой среды предполагает ее полную формализацию, что, в свою очередь, позволяет в полной мере использовать для отдельных ее компонентов многочисленные программы тематического анализа. Понятно, что наличие подобных возможностей в части использования прикладных пакетов значительно повышает качество работ такого рода;

2) при последовательном проведении в жизнь модельного подхода, в частности при обеспеченности достоверными и полностью формализованными данными по рельефу и всей наземной инфраструктуре вдоль трассы проектирования или исследования, возможно использование чрезвычайно перспективных процедур топологического анализа. В этом смысле модельный подход хорошо согласуется с идеологией, реализуемой современными геоинформационными системами.

Использование CAD систем для проектирования сегодня является доминирующей тенденцией. Будет справедливо говорить, что требования к номенклатуре и точности топографических и нетопографических данных, собираемых в ходе аэросъемочного обследования, сегодня во многом определяются, исходя из необходимости их использования в CAD и ГИС системах. Только в этом случае результаты съемки могут считаться конкурентоспособными.

После представленного краткого анализа современного положения дел в области использования аэрофотосъемочных и наземных геодезических методов перейдем к описанию сущности предлагаемого в настоящей работе лазерно-локационного метода съемки и его сравнению с традиционными методами.

Как уже отмечено выше, решающим фактором, определившим успех ЛЛ методов, является технологическая простота сбора пространственных данных по подстилающей поверхности. По сути, при использовании ЛЛ методов можно говорить о возможности прямого измерения рельефа и многих классов наземных объектов как естественных, так и имеющих антропогенную природу. Точность геопозиционирования компонентов рельефа и наземных объектов по результатам съемки, равно как и точность всех геометрических измерений, составляет, как правило, 10–20 см, что позволяет использовать ЛЛ данные для создания и обновления топографических карт и планов практически всего масштаба ряда, вплоть до масштаба 1:2000.

С учетом того, что настоящая глава носит вводный характер, ограничимся лишь перечислением основных достоинств лазерно-локационного метода в

сравнении с классическим стереотопографическим, дальнейшим развитием которого он является:

1) производительность ЛЛ метода чрезвычайно высока. На практике достигнута производительность съемки в 500–600 км за один аэросъемочный день для магистральных высоковольтных ЛЭП и газопроводов. Во всех случаях в маршрутном режиме обеспечивается съемка всей ширины полосы отчуждения. Здесь следует отметить, что камеральная обработка результатов съемки при реализации ЛЛ метода, как правило, по продолжительности сравнима со временем выполнения авиационных работ, что позволяет выполнять такую обработку оперативно на месте проведения работ. Это, в свою очередь, позволяет эффективно контролировать качество съемки и при необходимости выполнять повторную съемку. Понятно, что подобная производительность значительно превосходит возможности традиционных аэросъемочных технологий, которые требуют сложной камеральной обработки, требующей значительного времени;

2) ЛЛ метод не требует выполнения наземных геодезических работ по плано-высотному обоснованию результатов аэросъемки. Необходимость выполнения таких работ может составить серьезную проблему при реализации традиционных методов съемки, особенно для удаленных и труднодоступных районов;

3) классические стереофотограмметрические методы в их аналитической или цифровой реализациях обеспечивают возможность проведения высокоточных измерений компонентов сцены. Однако с помощью таких методов не удастся автоматизировать воспроизведение формы сложных инженерных объектов. Кроме того, из-за особенностей пространственного положения многих объектов их измерение стереофотограмметрическими методами в значительной степени затруднено, в результате чего точность измерения этих значений оказывается неудовлетворительной. В силу того, что ЛЛ метод реализует прямое измерение всех компонентов сцены, он является полностью свободным от указанных ограничений. Более того, программная обработка первичных ЛЛ данных позволяет достичь очень высокого уровня точности по этим параметрам, например, для стрел провеса проводов ЛЭП, – 5–7 см. В то же время ЛЛ измерение всегда создает пространственный образ объекта – «облако» лазерных точек, отраженных от поверхности объекта. Такое «облако» само по себе значительно облегчает визуальный анализ формы изображаемого объекта и позволяет выполнять все необходимые первичные геометрические измерения на базовом уровне точности метода, т.е. 15–20 см. Более важно то, что данные представленные в такой форме, могут быть эффективно использованы для программного анализа и построения векторных моделей, что по указанным выше причинам крайне существенно для реализации современных подходов проектирования и анализа;

4) ЛЛ метод, в отличие от классических методов, в значительной степени свободен от сезонных ограничений, связанных с наличием листового покрова. Ниже будет показано, что ЛЛ измерения в большинстве случаев применимы к объектам, расположенным под кронами деревьев;

5) без всяких ограничений возможно проведение ЛЛ съемки для сцен с отсутствующей или слабовыраженной текстурой поверхности – песчаных пляжей, заснеженных и водных поверхностей. Известно, что стереофотограмметрические измерения таких сцен не возможны по причине невозможности установления соответственных точек в стереопаре. На практике подобные ландшафты встречаются достаточно часто.

Все приведенные в данном разделе положения, касающиеся содержания и преимуществ лазерно-локационного метода съемки, будут раскрываться и детализироваться в ходе дальнейшего изложения.

1.6. Экономические аспекты применения лазерно-локационных средств

1.6.1. Вопрос об экономической эффективности использования аэросъемочных лидаров чрезвычайно актуален для компаний, планирующих их практическое использование. Сегодня серьезная аэрогеодезическая (аэросъемочная) деятельность, особенно в части крупномасштабного топографического картирования, уже немыслима без использования лидаров, и этот факт признан геоинформационным сообществом в России и в мире. Отказ от освоения лидарных (лазерно-локационных) технологий для компании, практикующей в области аэрогеодезии, грозит потерей значительной части рынка. Это положение особенно актуально в России, оказавшейся одной из самых активных стран в деле внедрения лазерно-локационных технологий в такие отрасли и виды деятельности, как геодезия в широком смысле (топография, инженерные изыскания, картография), землеустройство, электроэнергетика, транспорт, мониторинг лесов, экология, ликвидация последствий стихийных бедствий, и др. В России сегодня эксплуатируется 11 аэросъемочных лидаров, в то время как в мире всего их произведено не более 110–120 штук.

Однако аэросъемочные лидары дороги, причем имеет место существенное различие в цене приборов, предлагаемых различными компаниями. Кроме того, такой прибор предполагает наличие большего числа дополнительного оборудования (в частности цифровой топографической камеры) и программного обеспечения. В результате стоимость комплекта может составлять от 1 до 2 млн. долларов. Необходимо также иметь в виду, что начало эксплуатации такого прибора для типовой аэрогеодезической компании предполагает существенные организационные изменения. Опыт показывает, что аэросъемочный лидар, как главный источник информации, всегда провоцирует возникновение отдельной технологической инфраструктуры, включающей службу геодезической поддержки, аэросъемочную бригаду, а также бригады предкамеральной (полевой) и камеральной обработки данных съемки. Один аэросъемочный лидар в зависимости от рода деятельности компании требует от 10 до 50 специалистов, постоянно занятых его обслуживанием и обработкой получаемых данных.

С учетом вышеизложенного становится понятным, что принятие решения о покупке аэросъемочного лидара превращается в серьезную проблему. Причем если принципиальное решение о необходимости начала использования такого прибора сегодня принимается сравнительно легко (слишком очевидны технические преимущества лазерно-локационного метода съемки), то задача выбора конкретной модели лидара остается сложной, требующей тщательной технико-экономической проработки. В настоящем разделе намечены основные подходы к анализу экономического аспекта использования аэросъемочных лидаров и выработки критериев оценки экономической эффективности такого рода деятельности.

1.6.2. Российская традиция требует при *проведении экономического анализа нового прибора или метода, прежде всего, сравнивать его с существующим аналогом*. Это позволяет оценить экономическую целесообразность внедрения, объем дополнительных дивидендов и сроки возмещения затрат, связанных с внедрением.

Применительно к аэросъемочным лидарам и связанными с ними технологиями лазерно-локационной съемки *описанный выше подход не может быть применен непосредственно*. Требуется введение целого ряда уточнений, связанных с особенностями этой технологии, а именно:

1. В наиболее общем смысле лазерно-локационный метод не имеет прямых аналогов. Это не значит, что его нельзя сравнивать с традиционными методами топографической съемки (теодолитной, тахеометрической, GPS), классическими аэрофототопографическими методами (стереотопографическим методом) и космическими методами дистанционного зондирования. Такие сравнения проводятся как на техническом, так и на экономическом уровнях. Они приводят к следующим выводам:

– авиационная лазерная локация занимает отдельную технологическую нишу по отношению ко всем наземным и космическим методам съемки, и в этом смысле не может рассматриваться аналогом по отношению к ним. Иными словами, *использование наземных и космических методов в качестве базы экономического сравнения с прикладной лазерной локацией не является корректным*;

– наиболее близки к лазерной локации классические аэрофототопографические методы, которые иногда называют аэрофотосъемочными или фотограмметрическими. Более корректно в соответствии с ГОСТ называть эти методы «стереотопографическими». Здесь речь идет об авиационных методах съемки с использованием аэрофотоаппаратов, фотограмметрических методов построения контурной части карты (плана) при доминировании камерального дешифрирования над полевым. Однако и в этом случае *использование классического аэрофототопографического метода в качестве базы экономического сравнения с лазерной локацией не является безусловно правильным* (хотя последние 5–7 лет многие в США и Европе именно так и поступают). Такое сравнение имеет смысл с технической точки зрения, но никак не с экономической. Дело в том, что сегодня уже считается общепризнанной необходимость совместного использования авиационного лидара, цифрового аэрофотоаппарата и системы прямого геопозиционирования как единого комплекса базовых средств сбора данных. Что касается этапа камеральной обработки и дешифрирования, то и здесь применяются специализированные программные средства, ориентированные на обработку лазерно-локационных данных совместно с классическими средствами цифровой фотограмметрии.

Очень важное экономическое обстоятельство, связанное с совместным использованием лидарных и аэрофотосъемочных технологий: при выполнении крупномасштабной съемки по комбинированному методу (масштабы 1:1000 – 1:5000, высоты съемки до 1000 м) *стоимость аэросъемочного лидара и стоимость цифрового метрического аэрофотоаппарата соотносятся как 10:1 или даже 15:1*. Имеется в виду случай, когда возможно и целесообразно использование среднеформатных метрических камер с матрицами емкостью порядка 22 мегапикселей (например, типа Rollei Metric). Поэтому использование комбинированного метода съемки с использованием как лидаров, так и цифровых аэрофотоаппаратов не приводит к сколько-нибудь заметному удорожанию технологии сбора данных по отношению к методу, который использует один только лидар.

Все вышесказанное свидетельствует в пользу того, что с экономической точки зрения лазерная локация не является ни аналогом, ни альтернативой классическому аэрофотосъемочному (стереотопографическому, фотограммет-

рическому) методу. Правильнее говорить о взаимном дополнении этих двух технологий. Поэтому в настоящее время *ни одна из существующих геодезических и аэрогеодезических технологий не может рассматриваться в качестве базисной для проведения корректного экономического сравнения с прикладной лазерной локацией.*

2. Сравнение экономических показателей двух технологий возможно только тогда, когда сравнимы их выходные продукты. В случае с лазерной локацией и традиционными методами съемки это сделать затруднительно по следующим причинам:

- во всех случаях, когда речь идет не о материальном, а о информационном продукте, что само по себе составляет некоторую трудность для анализа. Информационные продукты труднее сравнивать между собой из-за того, что в каждом конкретном случае необходимо конкретизировать такие категории, как полнота, точность, достоверность и актуальность. Лазерная локация как прикладная дисциплина существует только около 10 лет, и поэтому в этой области пока нет единства в подходах и терминологии описания выходных продуктов;

- область приложений лазерной локации чрезвычайно обширна. Поэтому, если сравнивать издержки на производство того или иного выходного продукта, приходится искать аналоги из совершенно различных областей. Такое сравнение выполняется по отдельным категориям продуктов, но не дает представление об экономической ценности лазерно-локационной технологии в целом;

- строго говоря, до настоящего времени можно выявить только два всеми признаваемых «конечных продукта» лазерной локации: цифровые модели рельефа, трехмерные модели воздушных ЛЭП. Здесь речь идет только о продуктах, более или менее одинаково понимаемых различными представителями геоинформационного сообщества, т.е. продуктов, для которых возможна формализация их информационных характеристик (плотность сканирования, точность, ширина полосы съемки и т. д.). Во всех остальных случаях лазерно-локационные данные являются элементом технологического цикла создания некоторого другого информационного продукта (наиболее важный пример – топографический план, либо подробная трехмерная модель сложного инженерного объекта). Т.е. *информационных продуктов, которые хотя бы по формальным основаниям могли бы использоваться в качестве объекта сравнения с традиционными аэросъемочными методами, не так много.*

3. Значительно проще сравнивать аэросъемочные лидары и геоинформационные технологии на их основе между собой. Здесь можно предложить сравнительно простые и убедительные критерии как технического, так и экономического сравнения, допускающие численные оценки. Однако и в этом случае сказывается влияние многофункциональности лазерно-локационного метода. Для проведения корректного сравнения приходится выделять отдельные технологические ниши, т.е. в значительной степени конкретизировать условия, по которым сравниваются два прибора или две методики съемки. Такой подход сразу же вынуждает делить лидары на универсальные и специализированные. Первые применимы практически для любых приложений лазерной локации (таких лидаров в настоящее время только два: Optech ALTM 3100 и Leica ALS-50), а вторые – только для некоторых. Естественно, первые значительно дороже вторых.

С учетом сказанного экономический анализ целесообразности приобретения того или иного лидара в значительной степени определяется не только техническими свойствами самого прибора, но и коммерческим диапазоном ком-

пании, планирующей покупку.

1.6.3. Как отмечено во введении, результаты ЛЛ съемки могут использоваться на различных этапах производства топографических карт и планов. Наиболее широко применяемым на практике в настоящее время является использование ЛЛ данных для создания Цифровых Моделей Рельефа (ЦМР) – в англоязычной литературе Digital Terrain Model (DTM). Этот аспект применения ЛЛ систем является наиболее изученным, в том числе и с экономической точки зрения. Это позволяет корректно в стоимостном отношении сравнивать ЛЛ методы с другими средствами авиационного и космического дистанционного зондирования применительно к задачам съемки рельефа. Результаты такого сравнения представлены на рисунке 11.

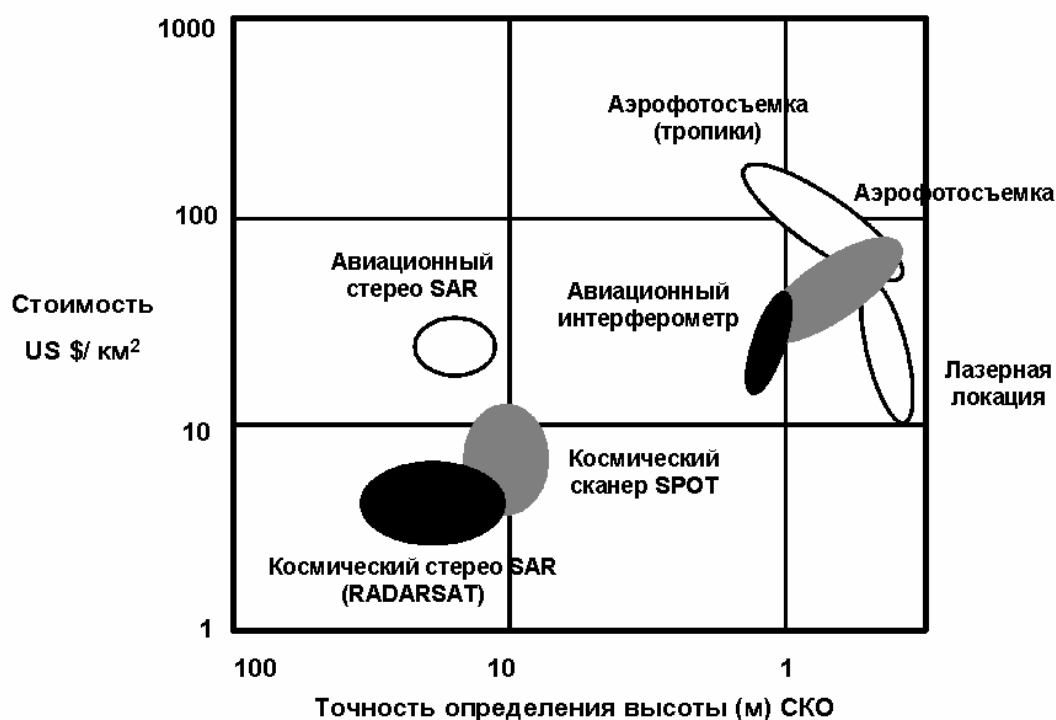


Рис. 11. Стоимость топографического картографирования с использованием различных средств авиационного и космического дистанционного зондирования.

Как отмечалось выше, роль ЛЛ методов применительно к задачам производства топографического материала можно трактовать более широко, рассматривая их как дальнейшее развитие стереотопографического метода вообще. Однако провести корректное сравнение технологий на этом уровне в настоящее время не представляется возможным.

Из рисунка 11 видно, что лазерная локация как средство съемки трехмерных сцен занимает принципиально отличную технологическую нишу по отношению к таким технологиям, как стереосъемка с использованием РЛ бокового обзора с синтезированной апертурой, а также радиолокация и сканерная космическая съемка. Значительно более близкой по своим технико-экономическим показателям является интерферометрическая РЛ съемка. Однако анализ литературы показывает, что этот метод съемки ни при каких условиях не позволяет достичь точности по вертикали лучше 1 м, в то время как ЛЛ методы обеспечивают значительно более высокую точность. Кроме того, удельная стоимость квадратного километра в случае ЛЛ съемки значительно выше, т.к. такая съем-

ка, как правило, проводится с меньших высот и следовательно требует большего объема авиационных работ.

Главный результат проведенного экономического анализа состоит в том, что только аэрофототопографические методы реально могут рассматриваться в качестве конкурирующей технологии при прогнозировании рыночных перспектив ЛЛ метода съемки для производства картографической продукции.

Информация по основным техническим параметрам ЛЛ аппаратуры, коммерчески доступной в настоящее время, показана в Приложении 2. Сравнивая технические возможности моделей ЛЛ аппаратуры, предлагаемых различными производителями, можно отметить следующее:

1) точность определения наклонной дальности (и соответственно высотной координаты) большинство производителей специфицируют на уровне 10–15 см, а точность определения плановых координат – на уровне 1/1000–1/4000 от высоты полета. Т.е. провести реальное сравнение моделей по такому важнейшему показателю, как точность, используя только данные производителя не представляется возможным;

2) большинство производителей используют в качестве излучателей полупроводниковые лазеры, работающие в видимом диапазоне или в ближнем инфракрасном диапазоне до 1100 нм. Такие лазеры относятся к 4-му классу, т.е. к самому небезопасному в смысле возможного ущерба зрению. По этой причине минимально допустимая высота полета для ЛЛ, использующих такие модели лазеров, составляет, как правило, 300–500 м. Имеются и исключения, например, лазерный сканер Falcon, выпускаемый германской компанией TopoSys, который использует лазер с рабочей длиной волны 1.56 мкм. На такой длине волны ограничения на минимально допустимую высоту практически отсутствуют. Однако выбор такого типа лазера значительно ограничивает возможности применения из-за крайне высокой степени зависимости от состояния атмосферы;

3) во всех доступных на рынке моделях локаторов используется механическая система развертки с помощью зеркала, призмы или оптического клина;

4) по такому важному параметру, как частота зондирующих импульсов, определяющему производительность и следовательно стоимость аэросъемочных работ, ведущие фирмы-производители предлагают приборы с частотой 50–100 КГц. Как указано выше, переход на большие частоты затруднен без изменения принципиальной оптической схемы сканерного блока.

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

В данной главе обсуждаются основные принципы функционирования типового лазерного локатора и методы получения лазерно-локационных изображений. Для описания различных аспектов (работа оптико-электронного блока, навигационная поддержка и др.) процесса получения ЛЛ изображения, а также для анализа точности и достоверности получаемых данных в главе предложен специальный математический аппарат и подразумевается использование импульсного метода измерения наклонной дальности.

2.1. Способы получения лазерно-локационных изображений. Основные принципы функционирования типового аэросъемочного лидара

На рисунке 12 представлена математическая схема первичного лазерно-локационного измерения.

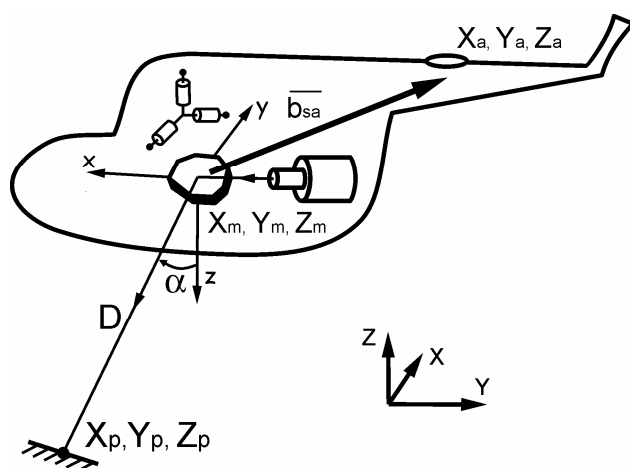


Рис. 12. Математическая схема первичного лазерно-локационного измерения.

Она осуществляется оптической системой и в частности входящим в ее состав сканирующим элементом. Режим сканирования выбирается таким образом, чтобы покрыть некоторую, наперед заданную полосу сканирования. В большинстве случаев поперечная развертка образуется за счет использования качающегося зеркала, а продольная – за счет движения носителя вдоль аэросъемочного маршрута.

Зондирующие импульсы распространяются по прямолинейной траектории от источника в сторону сцены съемки. Если в процессе распространения зондирующий импульс сталкивается с препятствием (поверхность Земли или наземный объект), то в месте столкновения лазерный луч переотражается. Характер переотражения в большинстве случаев является диффузным, в результате чего часть переотраженной энергии импульса возвращается в сторону локатора, где и регистрируется на приемнике излучения, который также входит в состав оптико-электронного блока (ОЭБ) локатора. Моменты времени, соответствующие излучению зондирующего импульса, а также регистрации отраженного импульса приемником регистрируются с высокой точностью с помощью устройства



Рис. 13. Регистрация множественных отраженных импульсов в одном акте сканирования.

Авиационный лазерный локатор (лидар) представляет собой активное средство дистанционного зондирования, используемое для съемки (получения лазерно-локационных изображений) земной поверхности. Методика съемки, реализуемая лазерным локатором, состоит в следующем.

Активным элементом является полупроводниковый лазер, работающий в импульсном режиме с рабочей длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Лазер излучает короткие импульсы, направление распространения которых регулируется

оптической системой и в частности входящим в ее состав сканирующим элементом. Это позволяет определить временной интервал, затрачиваемый зондирующим импульсом на распространение от источника до приемника и обратно, а это, в свою очередь, принимая во внимание прямолинейность распространения лазерного луча и постоянство скорости распространения электромагнитных колебаний, позволяет измерить дальность D от источника до объекта, вызвавшего отражение. Следует упомянуть, что в каждом сеансе измерения могут регистрироваться отражения более чем от одного объекта (рис. 13).

Из приведенного выше описания

ясно, что лазерный локатор во многом реализует схему сканирующего лазерного дальномера.

Все первичные измерения координат выполняются лазерным локатором в геоцентрической системе координат $oXYZ$. Траектория движения носителя определяется за счет установленного на борту GPS приемника, а его ориентация в системе координат (СК) $oXYZ$ – за счет использования инерциальной системы Inertial Measurement Unit (IMU). Таким образом, для каждого измерения, выполняемого лазерным локатором, определены пространственные координаты положения GPS антенны X_A, Y_A, Z_A и углы ориентации сенсора IMU крена R , тангажа P , рыскания H . Взаимное положение точки сканирования (центра сканирующего зеркала) и фазового центра GPS антенны, определяемое вектором b_{SA} , измеряется до начала аэросъемочных работ. Величина этого вектора постоянна в течение всего времени выполнения съемки. Это обстоятельство позволяет в каждый момент времени перейти от координат X_A, Y_A, Z_A к координатам СК X_M, Y_M, Z_M точки сканирования. Положение в геоцентрической СК зондирующего луча однозначно определяется как координатами точки сканирования X_M, Y_M, Z_M и значениями углов R, P, H , так и величиной аргумента сканирования α , численно равному углу отклонения направления распространения зондирующего луча от вертикали в локальной СК сканерного блока $oxyz$. Знание значения наклонной дальности D позволяет с учетом вышеизложенного перейти к геоцентрическим координатам точки отражения X_P, Y_P, Z_P . Полученные таким образом координаты X_P, Y_P, Z_P лазерной точки являются основным результатом работы лазерного локатора.

Говоря о функциональной схеме типового лазерного локатора, можно выделить три главных структурных компонента, взаимодействие которых составляет суть функционирования ЛЛ:

1) сканирующий блок, в функции которого входят генерация лазерных импульсов, прием отраженного сигнала и определение наклонной дальности до точки отражения. Кроме того, к функциям сканерного блока относится управление разверткой;

2) бортовой навигационный комплекс (БНК), работа которого основана на взаимодействии в реальном времени GPS приемника и инерциальной системы IMU. Основной функцией бортового навигационного комплекса является обеспечение каждого первичного лазерно-локационного измерения полным набором элементов внешнего ориентирования, позволяющих, используя измеренное значение наклонной дальности D , перейти к геодезическим координатам наземной точки, в которой произошло отражение зондирующего луча;

3) сеть наземных базовых GPS станций, поставляющих данные для проведения дифференциальной коррекции траекторных данных бортового GPS приемника. Предполагается, что каждая GPS базовая станция обеспечена реальными WGS-84 координатами. В определенных случаях, при небольших размерах территории съемки, может использоваться одна базовая GPS станция.

Здесь сразу же следует отметить, что указанные выше блоки никоим образом не отражают конкретную конструктивную структуру локатора, а приведенный список не является исчерпывающим. Структурная схема ЛЛ будет рассмотрена ниже. Там же будет дано описание всех структурных и функциональных компонентов, включая системы взаимной синхронизации, регистрации данных, электропитания и др.

Представим необходимые пояснения по принципам функционирования типового ЛЛ как системы, основанной на взаимодействии трех выделенных функциональных компонентов.

Прежде всего остановимся на уточнении используемой системы координат. Понятно, что этот вопрос имеет первостепенное значение, т.к. главным назначением ЛЛ является получение пространственных координат наземных объектов. Решающую роль при определении принципов функционирования ЛЛ играет СК Земного эллипсоида WGS-84 по следующим причинам:

- принцип определения координат существенным образом опирается на кинематические GPS измерения, которые, как известно, выполняются в WGS-84. Положение точки в пространстве описывается значениями широты φ , долготы λ и высоты над эллипсоидом A ;

- принципы измерения угловых параметров ориентации носителя подробно изложены ниже. Сейчас отметим только, что методика определения угловых параметров основана на решении в реальном времени Ньютоновских уравнений движения относительно сенсора инерциальной системы IMU и сравнения результатов с GPS данными. Все соответствующие вычисления принципиально проводятся только в WGS-84.

В силу вышеизложенного можно заключить, что первичные ЛЛ данные могут быть получены только в СК WGS-84, исходя из принципов работы локатора. Преобразование ЛЛ данных к другим СК, в частности к СК, образованной принятыми в России эллипсоидом Красовского и картографической проекции Гаусса-Крюгера, может быть выполнено только программно.

Для корректного использования СК WGS-84 необходимо принять во внимание следующие моменты:

- 1) углы ориентации крена R и тангажа P определяются относительно плоскости касательной к эллипсоиду в данной точке. Курсовой угол H определяется относительно касательной к текущему меридиану в данной точке;

- 2) окончательный расчет траектории движения носителя осуществляется только после выполнения процедуры дифференциальной коррекции и реализации фазового метода измерений. Если использованы неточные координаты базовой GPS станции или в эти координаты умышленно внесено смещение, то это прямо отразится на результатах съемки. Более того, использование неточных координат базовой станции приведет не только к соответствующему сдвигу, но и к появлению разброса результирующих лазерных точек из-за невозможности корректного разрешения неопределенности по целым длинам волн. С учетом этого, говоря о базовой системе координат, в которой происходит работа локатора, более правильно определять ее как СК Земного эллипсоида WGS-84 и конкретных значений координат базовой станции, используемых для расчета траектории;

- 3) что касается угловых параметров ориентации носителя, то по этому вопросу различные модели ЛЛ реализуют различные подходы. Во всех случаях определение значений этих параметров самым существенным образом опирается на использование GPS данных. В начале 90-х годов некоторые компании даже предлагали модели, в которых параметры угловой ориентации определялись исключительно GPS методами. Примером может служить лазерный сканер типа FliMar американской компании John Chance & Associates. В этой модели измерение угловых параметров ориентации носителя осуществлялось с помощью трех бортовых GPS приемников, разнесенных на максимально возможное расстояние друг относительно друга. Способ измерения параметров уг-

ловой ориентации для такого случая хорошо известен по литературе (Шануров, Мельников, 2001).

Требуемые параметры определяются путем фазовых измерений разности хода несущей волны от спутника до каждого из приемников. Однако описанный выше способ не получил развития. В большинстве современных ЛЛ систем параметры угловой ориентации определяются на основе совместного анализа GPS и инерциальных данных. В некоторых моделях параметры ориентации определяются в реальном времени в процессе выполнения съемки, используя текущие данные бортового GPS приемника как с использованием кинематического режима реального времени RTK так и без него. В других моделях результаты вычисления углов ориентации реального времени уточняются в ходе наземной программной обработки, используя траекторию носителя, определенную посредством дифференциальной коррекции и фазовой обработки. Естественно, второй метод позволяет добиться на порядок лучших результатов по точности.

2.2. Определение координат лазерных точек при выполнении лазерно-локационной съемки

Как показано в предыдущем разделе, первичное лазерно-локационное измерение выполняется с привлечением нескольких источников информации. По этой причине для полного описания процесса измерения необходимо законченное формализованное представление всех соотношений, определяющих пространственную и временную соотнесенность данных различных источников.

Что касается временной синхронизации, то она обеспечивается за счет привязки временных шкал всех приборов к единому абсолютному времени, поставляемому бортовым GPS приемником. При этом в процессе съемки обеспечивается лишь регистрация всех видов данных с соответствующими временными метками. Фактическая синхронизация обеспечивается на этапе наземной обработки.

Перейдем к рассмотрению вопросов пространственной синхронизации.

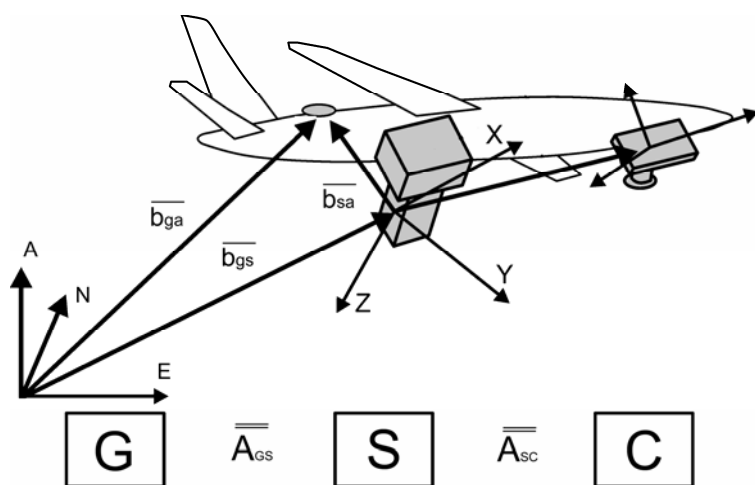


Рис. 14. Общая схема компоновки бортового аэросъемочного комплекса.

Общая схема компоновки бортового аэросъемочного комплекса изображена на рисунке 14. Изображены все значимые компоненты комплекса, а именно сканерный блок, GPS антенна, а также цифровой аэрофотоаппарат. Общее положение комплекса рассматривается в некоторой обобщенной топоцентрической СК $oNEA$, в которой предполагается, что ось oN направлена на север, ось oE на восток, а ось oA

дополняет эту СК до левой ортогональной. Более подробно вопрос о корректном выборе СК рассмотрен в последующих главах.

Так как функционирование комплекса основано на взаимодействии и обмене информацией между компонентами, необходимо установить формулы соответствия между СК, используемых для каждого из устройств.

Векторные пространства, образованные СК *oNEA*, сканерного блока и фотоаппарата, будем обозначать соответственно *G*, *S*, *C*. Строгие определения всех этих СК также представлены ниже.

Из определения ясно, что все системы координат являются ортогональными. Положение любой точки в указанных пространствах будем характеризовать векторами $\overline{g}, \overline{s}, \overline{c}$. В приведенном обозначении вектор определяет принадлежность к тому или иному пространству.

Под уравнениями связи будем понимать соотношения, обеспечивающие пересчет координат произвольного вектора из одной СК в другую. Ясно, что эти соотношения пересчета будут зависеть от некоторого набора параметров, характеризующих:

1) положение и ориентацию всего аэросъемочного комплекса в пространстве;

2) внутреннюю конфигурацию комплекса.

Только после того, как уравнения связи записаны явно, появляется возможность гарантировать пространственную синхронизованность потоков данных. Также на основе этих уравнений возможен анализ компоновки аэросъемочного комплекса на предмет его оптимизации. В этом смысл введения уравнений связи.

Ясно, что переход из одной трехмерной СК в другую осуществляется на основе матрицы третьего порядка и вектора, определяющего начало одной СК в другой СК. Будем обозначать матрицы перехода через $\overline{A}$, а начальные вектора через $\overline{b}$, с добавлением индексов, определяющих пространства, для которых определяется переход. Например, $\overline{A}_{GS}$ и $\overline{b}_{GS}$ для перехода из пространства *G* в пространство сканера *S*.

В силу того, что мы имеем дело с тремя СК, всего имеет место шесть уравнений связи. На практике, однако, достаточно определить только два из них, а именно:

$$\begin{aligned} S \rightarrow G \\ \overline{g} &= \overline{b}_{GS} + \overline{A}_{GS} \cdot \overline{s} \\ C \rightarrow S \\ \overline{s} &= \overline{b}_{SC} + \overline{A}_{SC} \cdot \overline{c} \end{aligned}$$

Покажем, что все другие уравнения перехода могут быть получены из двух, приведенных выше.

$$\begin{aligned} C \rightarrow G \\ \overline{g} &= \overline{b}_{GS} + \overline{A}_{GS} \cdot (\overline{b}_{SC} + \overline{A}_{SC} \cdot \overline{c}) = \overline{b}_{GS} + \overline{A}_{GS} \cdot \overline{b}_{SC} + \overline{A}_{GS} \cdot \overline{A}_{SC} \cdot \overline{c} \end{aligned}$$

Таким образом:

$$\begin{aligned} \overline{b}_{GC} &= \overline{b}_{GS} + \overline{A}_{GS} \cdot \overline{b}_{SC} \\ \overline{A}_{GC} &= \overline{A}_{GS} \cdot \overline{A}_{SC} \\ G \rightarrow S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{s} &= -\overline{A_{GS}}^{-1} \cdot \overline{b_{GS}} + \overline{A_{GS}}^{-1} \cdot \bar{g} \\ \overline{b_{GS}} &= -\overline{A_{GS}}^{-1} \cdot \overline{b_{GS}} \\ \overline{A_{SG}} &= \overline{A_{GS}}^{-1}\end{aligned}$$

Аналогично решается вопрос для уравнений перехода $S \rightarrow C$, $G \rightarrow C$.

При выводе уравнения связи для топоцентрического и сканерного пространств прежде всего изучим источники информации, определяющие положение сканерного блока в пространстве $oNEA$:

1. Пространственные координаты сканерного блока определяются бортовым GPS приемником, который непосредственно предоставляет координаты местоположения антенны. При этом следует отметить:

- фактическое определение геоцентрических координат антенны осуществляется дискретно с программируемой частотой, которая обычно составляет 1–20 Гц;

- точное определение координат антенны N_A , E_A , A_A осуществляется только в процессе наземной постобработки, а не в реальном времени (если не используется режим RTK). В реальном времени определяются только условные, вспомогательные координаты, необходимые для правильной работы навигационного компьютера.

2. Угловая ориентация сканерного блока определяется с помощью IMU, входящего в состав навигационного компьютера. Относительно выдаваемых им данных имеют место следующие замечания:

- определение угловой ориентации также осуществляется дискретно, обычно с частотой 50–200 Гц;

- выдаваемые значения IMU есть три угла ориентации R^* , P^* , H^* , которые эквивалентны, как уже отмечалось, соответствующим углам ориентации носителя – крену, тангажу и рысканию. Эти значения, однако, не могут быть использованы непосредственно в искомом уравнении связи по следующей причине. Специфика работы навигационного компьютера и, в частности IMU, определяет его работу только в общемировой СК Земного эллипсоида WGS-84, но не в ортогональной топоцентрической СК.

Исходя из описанных особенностей навигационного обеспечения процесса сканирования, перейдем к выводу уравнения связи. Главной целью здесь является переход к положению, когда в любой момент времени однозначно определены вектор $\overline{b_{GS}}$, определяющий текущее положение сканера и матрица ориентации $\overline{A_{GS}}$.

Такой переход возможен, исходя из следующих соображений:

1. За счет использования специальных математических приемов, изложенных ниже, можно говорить о наличии непрерывных во времени данных по траектории носителя и углам ориентации. Таким образом, можно считать, что каждое первичное лазерно-локационное измерение обеспечено соответствующими данными.

2. За счет рассматриваемой в последующих главах процедуры измерения выставочных параметров сканерного блока всегда возможен переход от вектора $\overline{b_{GA}}$, который есть результат непосредственного GPS измерения, к вектору $\overline{b_{GS}}$, определяющего положение точки центра сканирования.

3. Корректный пересчет углов ориентации R^*, P^*, H^* из СК Земного эллипсоида в углы R, P, H СК $oNEA$ всегда возможен с применением методик, изучаемых в курсе математической картографии (Серапинас, 2005).

С учетом вышеизложенного вернемся к уравнению связи:

$$\overline{g} = \overline{b_{GS}} + \overline{A_{GS}} \cdot \overline{s}.$$

Предполагается, что вектор $\overline{s}$ представляет результат единичного дальномерного измерения, т.е. значение наклонной дальности и направление зондирующего луча. Наличие определенных $\overline{b_{GS}}$ и $\overline{A_{GS}}$ позволяет перейти к картографическим координатам точки отражения $\overline{g}$, т.е. выполнить главную задачу сканирования.

Матрица $\overline{A_{GS}}$ может быть определена через величины направляющих косинусов, т.е. через разложение от СК сканера $oXYZ$ по базису обобщенной СК $oNEA$.

$$\overline{A_{GS}} = \begin{bmatrix} N_x & N_y & N_z \\ E_x & E_y & E_z \\ A_x & A_y & A_z \end{bmatrix}$$

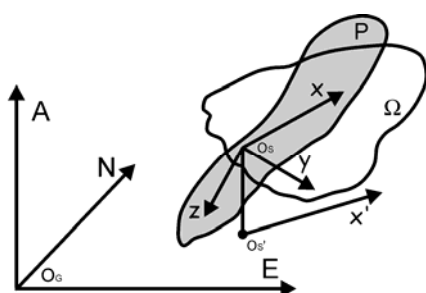


Рис. 15. К определению знаков углов R, P, H .

Представим схему интерпретации величин и знаков углов R, P, H так, как это принято в авиационном дистанционном зондировании (рис. 15).

Для формального определения углов введем несколько вспомогательных объектов:

1) $o'X'$ – проекция вектора o_sX на горизонтальную плоскость oNE .

2) P – вертикальная (параллельная oA) плоскость, проходящая через oX .

3) Ω – плоскость, совпадающая с oXY .

Теперь перейдем к определению углов.

Угол рыскания H есть угол между векторами o_sX и $o_s'X'$. Значение этого угла принято определять в диапазоне от 0 до 2π . Значение этого угла возрастает если вектор o_sX вращается по направлению часовой стрелки при взгляде со стороны конца вектора oA .

Угол тангажа P есть угол между вектором o_sX и его проекцией $o_s'X'$. Предполагается, что этот угол находится в диапазоне

$$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right].$$

Изменение P в более широком диапазоне лишено практического смысла. Угол P считается положительным, если точка X лежит выше плоскости o_sNE (имеет положительное значение координаты A) и отрицательным в противном случае.

Углом крена R будем называть угол, образованный плоскостями P и Ω . R изменяется в диапазоне

$$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

Изменение R в более широком диапазоне также лишено практического смысла. Знак R определяется правилом буравчика: R считается положительным, если кратчайший поворот от P к Ω осуществляется в направлении вращения буравчика, расположенного вдоль оси $O_S X$.

С учетом введенных определений можно явно записать значения коэффициентов матрицы $\overline{A_{GS}}$:

$$\begin{aligned} N_X &= \cos(P)\cos(H) \\ E_X &= \cos(P)\sin(H) \\ A_X &= \sin(P) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_Y &= \sin\Theta \sin(P)\cos(H) - \cos\Theta \sin(H) \\ E_Y &= \sin\Theta \sin(P)\sin(H) + \cos\Theta \cos(H) \\ A_Y &= \cos(P)\sin\Theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_Z &= \cos\Theta \sin(P)\cos(H) + \sin\Theta \sin(H) \\ E_Z &= \cos\Theta \sin(P)\sin(H) - \sin\Theta \cos(H) \\ A_Z &= -\cos(P)\cos\Theta. \end{aligned}$$

Перейдем к определению вектора $\overline{b_{GS}}$. Здесь необходимо следующее замечание. Начало СК сканера намеренно помещено в точку центра сканирования, т.е. центр сканирующего зеркала, т.к. это сильно упрощает многие уравнения в этой СК. В то же время, как уже отмечалось, непосредственно определяются координаты местоположения антенны, которая может быть удалена от главной точки сканирования на расстояние вплоть до нескольких метров. Обозначим через $\overline{b_{SA}}$, вектор в СК сканера, определяющий местоположение антенны. Этот чрезвычайно важный в метрологическом отношении вектор имеет двойное значение:

1) с его помощью можно полностью записать уравнение связи для сканерного блока и, следовательно, корректно интерпретировать результаты сканирования в процессе постобработки;

2) точное знание вектора $\overline{b_{SA}}$ является абсолютно необходимым условием корректной работы навигационного компьютера по интегрированию GPS и IMU данных для получения навигационного решения.

Отметим в качестве обязательного условия строгое постоянство вектора $\overline{b_{SA}}$. Это условие означает, что взаимное положение антенны и сканера должно быть измерено с достаточной точностью и не изменяться во время проведения съемки.

Определению величины вектора $\overline{b_{SA}}$ посвящена процедура измерения выставочных (off-set) параметров. С учетом изложенного выше, можем записать:

$$\overline{b_{GS}} = \overline{b_{GA}} - \overline{A_{GS}} \cdot \overline{b_{SA}}$$

где, $\overline{b_{GA}}$ – вектор в G, координаты которого определяются непосредственно GPS измерениями.

Полученное уравнение связи для топоцентрической СК и сканера позволяет формально описать все главные метрологические процедуры, выполняемые локатором. Представим описание операций дальномерного измерения. Каждое такое измерение выполняется по схеме, иллюстрированной на рисунке 16.

Вектор $\vec{s}$ на этом рисунке соответствует зондирующему лучу, а его длина соответствует измеренному значению наклонной дальности. В процессе сканирования зондирующий вектор $\vec{s}$ совершает колебательные движения в плоскости oYZ . Текущее положение $\vec{s}$ определяется параметром α – фазой сканирования. α определяется углом наклона сканирующего зеркала. Главной целью каждого акта сканирования является определение координат N_p, E_p, A_p точки, от которой произошло отражение зондирующего луча.

С учетом введенной системы обозначений дальномерное измерение можно выразить как:

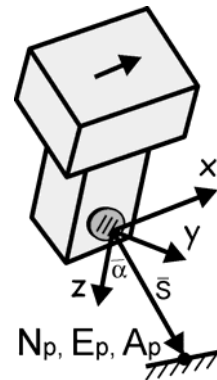


Рис. 16. Дальномерное измерение.

$$\begin{pmatrix} \overline{b_{GA}} \\ A_{GS} \\ \vec{s} \\ \alpha \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} N_p \\ E_p \\ A_p \end{pmatrix}$$

При выводе уравнения дальномерного измерения учтем, что

$$\begin{aligned} s_x &= 0 \\ s_y &= s \sin(\alpha) \\ s_z &= s \cos(\alpha). \end{aligned}$$

Подставляя это значение в общее уравнение связи, получим:

$$\begin{bmatrix} N_p \\ E_p \\ A_p \end{bmatrix} = \overline{b_{GA}} + \overline{A_{GS}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ s \cdot \sin(\alpha) \\ s \cdot \cos(\alpha) \end{bmatrix} - \overline{b_{SA}}$$

На основании этого уравнения выполняется расчет всех координат лазерных точек.

2.3. Функциональная схема типового лазерного локатора на примере системы ALTM Optech

Функциональную схему типового лазерного локатора рассмотрим на примере приборов класса Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM) производства компании Optech Inc., мирового лидера в этой области.

Основные функциональные компоненты типового воздушного лидара обсуждались выше. Повторим полученные выводы теперь уже применительно к

прибору класса ALTM. Основные функциональные компоненты схемы, реализующей лазерно-локационный метод измерения, сведены в таблице 7.

Таблица 7. Основные структурные компоненты схемы, реализующей лазерно-локационный метод измерения

Компонент	Функции
Сканирующий блок	Генерация лазерных импульсов, прием отраженного сигнала и определение наклонной дальности до точки отражения, управление разверткой.
Бортовой навигационный комплекс (БНК)	Обеспечение каждого первичного измерения полным набором элементов внешнего ориентирования.
Сеть наземных базовых GPS станций	Проведения дифференциальной коррекции траекторных данных бортового GPS приемника.

При этом сканирующий блок и бортовой навигационный комплекс относятся к воздушному сегменту схемы, а сеть наземных базовых GPS станций – к наземному сегменту.

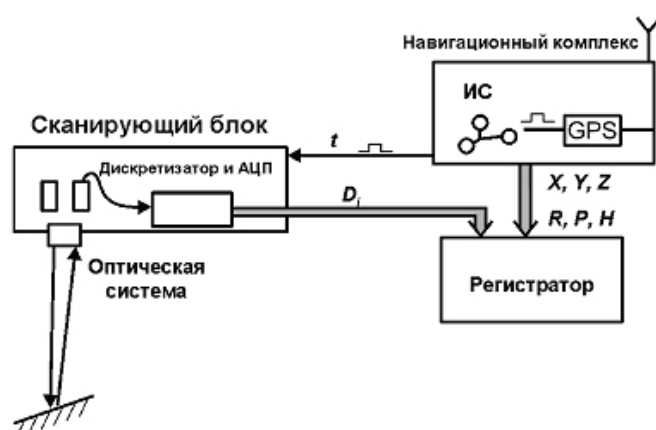


Рис. 17. Функциональная схема бортовой части лазерного локатора.

Функциональная схема бортовой части лазерного локатора изображена на рисунке 17.

Рассмотрим схему информационного взаимодействия основных структурных компонентов.

Бортовой навигационный комплекс (БНК) вырабатывает последовательность навигационных данных по траектории движения носителя X, Y, Z и углов ориентации H, R, P в СК WGS-84. Эти данные, как пра-

вило, генерируются с частотой 50–200 Гц. Навигационные данные так же, как и дальномерные данные, вырабатываемые сканерным блоком, через SCSI или Ethernet интерфейс поступают на бортовой магнитный регистратор. Здесь необходимо сделать два замечания касательно режима работы БНК:

1) указанные на схеме навигационные данные X, Y, Z и R, P, H являются окончательным результатом навигационного решения, полученного в реальном времени. Кроме них, регистрируется множество другой вспомогательной информации, отражающей внутреннюю работу навигационного комплекса. Впоследствии в ходе наземной постобработки эта информация используется для получения уточненного навигационного решения;

2) часто GPS приемник, входящий в состав навигационного комплекса, выполняет самостоятельную регистрацию своих данных на собственный носитель.

Другой функцией навигационного комплекса является временная синхронизация работы всех компонентов локатора. Синхронизация выполняется за счет выработки БНК импульса синхронизации, который подается на все внутренние устройства локатора. Для этой цели используется стандартный PPS импульс, вырабатываемый GPS приемником, который, таким образом, является

источником бортового GPS времени. Важно, что секундные импульсы вырабатываются GPS приемником с достаточной точностью в реальном времени (Шануров, Мельников, 2001), т.е. без дифференциальной коррекции. Описанный режим синхронизации имеет большое значение для всего бортового информационно-измерительного комплекса в целом. Он позволяет отказаться от выполнения аппаратной синхронизации всех источников информации, как это делалось ранее при создании летающих лабораторий. Вместо этого любая порция данных снабжается временной меткой, согласованной с источником абсолютно-го GPS времени, в результате чего любая порция данных, записываемая на регистратор, оказывается полностью определенной во временном отношении, а фактическая синхронизация потоков данных осуществляется в результате наземной постобработки. Это обстоятельство имеет два главных практических последствия:

- 1) значительно разгружается электронный блок локатора, точнее, та его часть, которая отвечает за формирование единого кадра системы;

- 2) возможности бортового информационно-измерительного комплекса могут быть существенно расширены за счет комплексирования ЛЛ с другими (внешними по отношению к локатору) источниками данных. При этом нет необходимости аппаратно включать новый поток данных в кадр локатора. Достаточно синхронизировать его с абсолютным GPS временем. Примером подобного подхода является совместное использование ЛЛ и цифровых аэрофотоаппаратов. Другим возможным практически значимым примером может явиться комплексирование с тепловизионной или спектральной аэросъемочной аппаратурой.

Перейдем к рассмотрению сканирующего блока. Сканирующий блок использует концепцию приемопередатчика, характерную для многих оптико-электронных активных систем, используемых в авиационном дистанционном зондировании. В структуре сканирующего блока можно выделить следующие компоненты:

- 1) излучатель;
- 2) приемник;
- 3) оптическая система;
- 4) дискретизатор и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), совместно выполняющие функции модуля измерения дальности.

В качестве излучателя используется твердотельный лазер типа YLF, работающий в импульсном режиме. Рассматриваемая модель лазера использовалась в первых моделях лидаров типа ALTM. В таблице 8 приведены основные технические параметры лазера типа Q-switched, серия 7960.

На рисунке 18 показана типовая диаграмма полной энергии импульса в зависимости от частоты генерации.

Рабочая длина волны лазерного излучения составляет 1047 нм, что соответствует ближнему инфракрасному диапазону. В результате этого:

- 1) лазерный локатор оказывается чрезвычайно чувствительным к метеорологическому состоянию атмосферы и наличию механических примесей, которые значительно ослабляют сигнал, а в некоторых случаях делают съемку невозможной. Однако еще раз заметим, что зависимость лидаров типа ALTM от состояния атмосферы существенно меньше, чем у приборов, использующих лазеры, работающих на длине волны около 1.5 мкм;

- 2) лазерное излучение на этой длине волны является наиболее опасным

Таблица 8. Основные технические параметры лазера

Параметр	Значение
Мощность накачки, мВт	2000
Активная среда	YLF
Модель лазера	7960-L4-E
Рабочая длина волны, нм	1047
Энергия импульса, мкДж	140
Ширина импульса, нс	<10
Диаметр луча, мм	0,51
Расходимость луча, мрад	1,3
Частота генерации импульсов, кГц	0-50
Поляризация	Вертикальная > 100:1
Пространственный тип	TEM ₀₀
Стабильность выходных параметров	
Стабильность энергии импульса	
СКО	1%
3σ	±2%
Стабильность пиковой мощности импульса	
СКО	2%
3σ	±5%

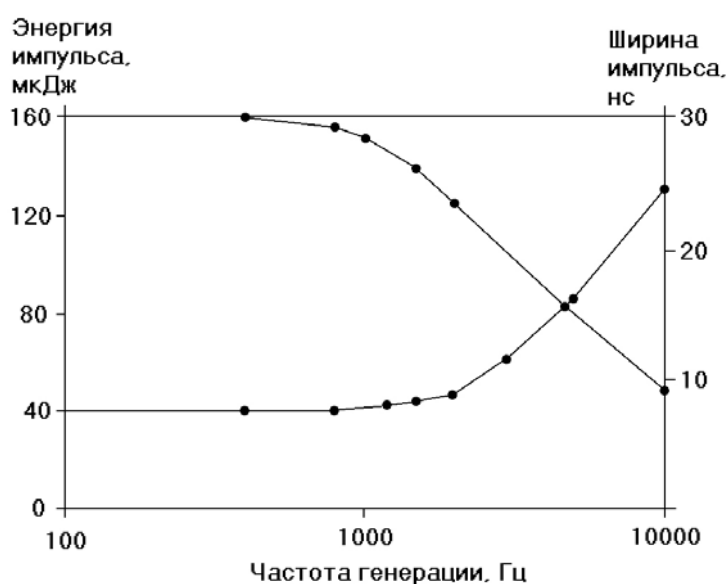


Рис. 18. Диаграмма зависимости энергии импульса от частоты генерации.

для зрения, т.к. может вызвать ожог сетчатки. В силу этого вводятся ограничения на минимальную высоту полета, которая в зависимости от модели лидара при максимальной мощности излучения составляет 300–500 м. Это обстоятельство является дополнительным ограничением при планировании аэросъемочных работ.

Значение полной энергии импульса и средней мощности (определяемое как отношение полной энергии к длительности)

косвенно определяют такой важный параметр как максимально возможная высота съемки. Для модели ALTM-3100 паспортное значение составляет 3500 м, однако на практике в условиях ясной атмосферы возможна съемка и с больших высот с потерей не более 10% импульсов.

Эффективный диаметр луча увеличивается после выхода из лазера с помощью коллиматора до нескольких миллиметров, что позволяет снизить его расходимость до примерно 0.3 мрад. Окончательное значение расходимости d играет важную роль, так как определяет размер пятна по формуле $d \cdot H$, где H – рабочая высота полета. Понятно, что это значение лимитирует точность и разрешающую способность ЛЛ метода съемки. Из рисунка 18 видно, что, начиная с некоторого значения, увеличение частоты генерации импульсов приводит к бы-

строуму падению полной энергии импульса и увеличению его ширины. Ясно, что это имеет следствием падение соотношения сигнал-шум и негативно сказывается на вероятности регистрации отраженного импульса. Это обстоятельство учитывается при выборе рабочего значения частоты генерации.

Что касается типовой формы лазерного импульса, то здесь следует отметить следующее:

1) с точки зрения точности определения наклонной дальности, как показано ниже, решающее значение имеет крутизна переднего фронта импульса и его стабильность. Это, безусловно, верно при регистрации первого отраженного импульса;

2) длительность импульса сказывается на разрешающей способности по дальности. Так, при нормативной ширине импульса в 15 нс длина «мертвой зоны» составляет $15 \cdot 10^{-9} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 0.45 \text{ м}$. Все отражения на интервале этой длины, следующим за первым отражением, будут потеряны.

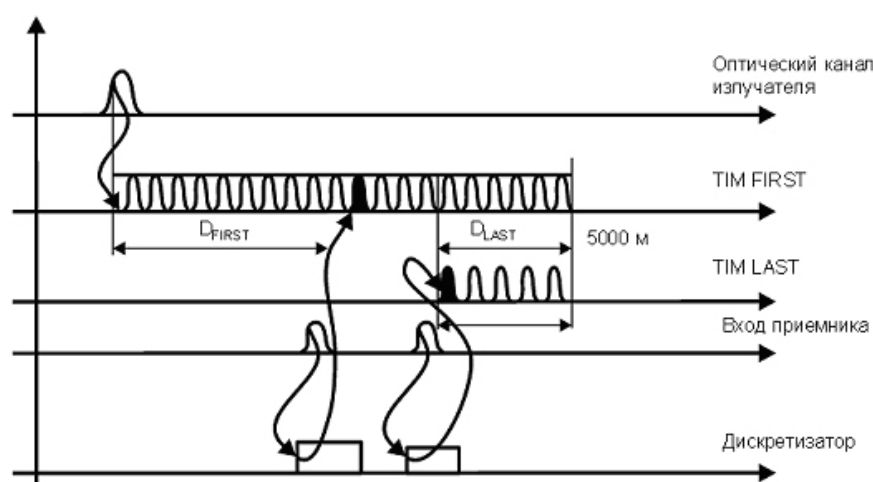


Рис. 19. Временная диаграмма процесса измерения наклонной дальности.

Временная диаграмма процесса измерения наклонной дальности изображена на рисунке 19.

По переднему фронту исходящего импульса запускается счетчик блока измерения дальности TIM. На рисунке 19 ось TIM для наглядности размечена в единицах дальности, а

не времени. Понятно, что переход от одной шкалы к другой осуществляется по формуле $D = c \cdot t$, где c — скорость света в вакууме. Для режима работы TIM блока, изображенного на рисунке 19, блок TIM ожидает прихода отраженных импульсов до момента времени, соответствующего 5000 м, т.е. максимально возможная замеренная наклонная дальность составляет 2500 м. Механизм регистрации задержки времени распространения несколько отличается для первого (FIRST) и последнего (LAST) импульсов. Время задержки (а значит и дальность) импульса FIRST определяется по накопленному значению счетчика TIM FIRST канала с момента запуска до момента прихода первого отраженного импульса, т.е. в этом случае дальность до объекта, вызвавшего отражение, определяется по формуле: $D = D_{FIRST}$.

Одновременно каждый новый входящий импульс вызывает запуск счетчика канала LAST, который накапливает значение дальности до момента окончания работы счетчика канала FIRST. В результате фактическая дальность до объекта, вызвавшего отражение, в этом случае будет определяться по формуле $D = 2500 - D_{LAST}$.

Излученный импульс, не вызвавший ответного сигнала в течение интервала, соответствующего дальности 2500 м, считается потерянным. Общее коли-

чество потерянных импульсов регистрируется локатором. Информация об этом доступна оператору и при наземной обработке для определения статистики.

Первые модели лидаров, выпускаемые компанией Optech, позволяли регистрировать только FIRST или только LAST импульсы. В последующем появились приборы, способные регистрировать и FIRST и LAST импульсы одновременно. В настоящее время лидары типа ALTM 3100 фирмы Optech и приборы других производителей позволяют регистрировать до 5 отраженных импульсов, что имеет большое значение в таких приложениях, как съемка лесных массивов.

Отметим также, что отраженный сигнал после приема и усиления подвергается дискретизации. Дискретизация является аналоговой процедурой, в результате которой входной импульс преобразуется к стандартному виду прямоугольных импульсов фиксированной длины. Это значительно повышает точность фиксации временного интервала.

Однако в ЛЛ серии ALTM длина импульса на выходе дискретизатора составляет 80 нс, в результате чего канал приемника оказывается заблокированным для приема импульсов от объектов, отстоящих от первого зарегистрированного импульса на расстояние $80 \cdot 10^{-9} \text{ с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 2.4 \text{ м}$.

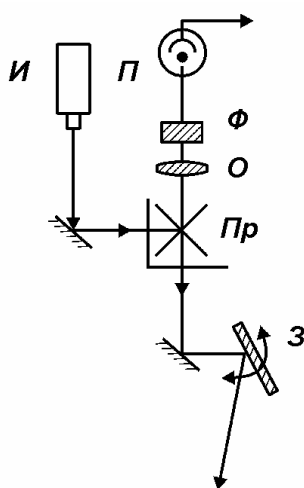


Рис. 20. Принципиальная схема оптической системы лидара типа ALTM.

Принципиальная схема оптической системы изображена на рисунке 20.

Лазерный луч от излучателя И через призму П и два вспомогательных зеркала попадает на сканирующее зеркало З. Сканирующее зеркало совершает колебательные движения. Сканирующее зеркало обеспечивает зигзагообразную развертку в направлении, перпендикулярном направлению полета. Продольная развертка обеспечивается за счет движения носителя. Призма Пр обеспечивает направление отраженного потока на собирающую линзу О, выполняющую функции объектива. Перед тем как попасть на приемник П, поток проходит через интерференционный фильтр Ф. Фильтр пропускает на приемник только излучение в узком диапазоне длин волн, с центром в рабочей длине волны излучателя $\lambda = 1047 \text{ нм}$.

Мгновенное поле зрения (МПЗ) приемника юстировано с направлением распространения луча. При выборе ширины мгновенного поля зрения принимаются во внимание следующие факторы:

1. МПЗ приемника не может быть слишком широким по следующим причинам. Во-первых, расширение МПЗ приводит к падению соотношения сигнал-шум за счет того, что приемник облучается фоновым излучением, мощность которого, естественно, пропорциональна угловой ширине МПЗ. Второе ограничение носит принципиальный характер. Широкое МПЗ позволяет достоверно фиксировать только первый отраженный импульс, т.к. по определению оптическая длина (и следовательно время распространения) до точки первого отражения всегда минимальна. Поэтому первый отраженный импульс всегда соответствует точке, лежащей на линии распространения зондирующего луча. Однако первое и все последующие отражения луча вызывают диффузное переотражение во всех направлениях, в результате чего возникает масса новых переотражений, часть энергии которых может быть переотражена в сторону приемника. В этом случае точка, вызвавшая отражение, не может быть зафиксирована в ко-

ординатном пространстве, т.к. при широком МПЗ приемника принципиально отсутствует возможность определить направление падающего излучения. Таким образом, можно сделать вывод, что для всех импульсов, кроме первого, результирующую точность определения координат в большей степени лимитирует ширина МПЗ приемника, чем эффективная ширина зондирующего луча.

2. Вместе с тем ширина мгновенного поля зрения не может быть уменьшена до величины эффективной ширины зондирующего луча. Во-первых, это труднее реализовать с чисто технической точки зрения, так как необходима очень точная юстировка излучателя и приемника. Имеется также и другое более серьезное ограничение. Для надежной регистрации отраженного сигнала необходимо, чтобы отраженное излучение осталось в пределах мгновенного поля зрения приемника, несмотря на его смещение, вызванное непрерывным вращением сканирующего зеркала. Это смещение может быть значительно по сравнению с эффективной шириной зондирующего луча. Обратимся к примеру. Пусть выполняется съемка с высоты $H = 1000$ м, с частотой сканирования $F = 100$ Гц и амплитудой сканирования $\pm 20^\circ$. Тогда угловая скорость вращения зеркала составляет $\Omega = 80^\circ \cdot 100 \text{ Гц} = 8 \cdot 10^3 \text{ град./с}$, а время распространения луча до объекта и обратно составит $\tau = 2000 \text{ м} / 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. За это время МПЗ изменит свое положение в пространстве на величину $\Omega \cdot \tau = 0,94 \text{ мрад}$, что почти в четыре раза больше значения эффективной ширины луча. Из этого простого рассуждения видно, что при данном методе сканирования значение МПЗ приемника должно выбираться с запасом, исходя из предполагаемых условий эксплуатации. Этот запас должен быть тем больше, чем выше максимально допустимая высота съемки, амплитуда и частота сканирования.

Выходными значениями сканирующего блока являются для каждого первичного дальномерного измерения замеренные значения наклонной дальности D_i и фазы сканирования α_i . Последнее значение численно равно углу наклона сканирующего зеркала в СК сканерного блока. В предыдущем разделе показано, как по этим значениям и по навигационным данным перейти к координатам точек отражения.

2.4. Методы выполнения развертки

Основные схемы выполнения развертки, используемые в современных лазерных локаторах, изображены на рисунке 21. Как уже неоднократно было отмечено выше, пока используются только механические методы развертки.

В качестве основного оптического элемента развертки используются:

- 1) качающееся зеркало;
- 2) вращающаяся призма;
- 3) оптический клин.

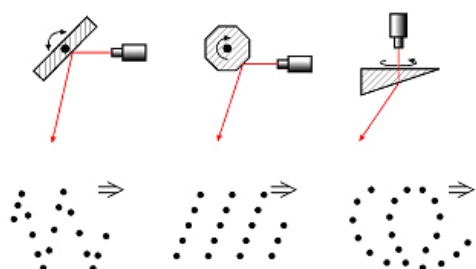


Рис. 21. Основные схемы организации развертки в современных лидарах.

Оптическая схема развертки и характерные рисунки распределения лазерных точек по поверхности сцены также представлены на рисунке 21.

Рассмотрим достоинства и недостатки указанных методов организации развертки. Для этого выделим несколько критериев, по которым будем оценивать эти достоинства и недостатки. А именно:

- 1) простота технической реализации;
- 2) возможность настройки (программирования) режимов сканирования;

3) обеспечение максимальной равномерности распределения лазерных точек по поверхности сцены;

4) другие.

Что касается простоты технической реализации, то все рассматриваемые схемы сканирования не представляют никаких проблем по этой позиции. Везде используется единственный движущийся оптический элемент, который в первом случае совершает колебания, а во втором и третьем вращается с постоянной угловой скоростью. Это обстоятельство облегчает юстировку и в значительной степени способствует стабильности и надежности работы оптической системы.

Наибольшие возможности по части гибкости и возможности программирования режимов сканирования обеспечивает схема с качающимся зеркалом. При использовании такой схемы имеется возможность регулировать все три главных параметра, характеризующих воздушную лазерно-локационную съемку – ширина полосы захвата S (регулируется значением амплитуды колебаний), частота сканирования f , т.е. количество линий сканирования в секунду (регулируется значением частоты колебаний). Третий важнейший параметр лазерно-локационной съемки – плотность сканирования d , т.е. количество лазерных точек на единицу поверхности однозначно определяется по значениям S и f . Схемы развертки с использованием призмы и оптического клина без применения дополнительных элементов регулируют ширину полосы захвата, что на практике оказывается существенным недостатком.

Дополнительным преимуществом схемы развертки с использованием качающегося зеркала является возможность динамического управления параметрами развертки в процессе выполнения аэросъемочных работ. Благодаря этой возможности удастся, например в лидарах типа ALTM, реализовать режим компенсации бокового крена, который гарантирует покрытие заданной полосы съемки, что в значительной степени облегчает пилотирование.

Следует также отметить, что в случае использования качающегося зеркала за счет изменения закона колебаний можно получить различные траектории сканирования, как, например синусоидальную, или пилообразную, такую, как изображена на рисунке 21.

Наибольшая равномерность распределения лазерных точек по поверхности сцены обеспечивается при использовании призмы в качестве сканирующего элемента. В этом случае рисунок сканирования состоит из набора прямых линий, параллельных друг другу. Легко показать, что при заданной скорости движения носителя V , высоте съемки H , и ширине полосы захвата S можно подобрать такое значение частоты сканирования f , что будет обеспечено равенство продольного и поперечного расстояния между соседними лазерными точками.

Развертка с использованием оптического клина также не отличается особой гибкостью. Кроме того, при использовании этого метода наблюдается наибольшая неравномерность распределения лазерных точек, причем минимальная плотность приходится как раз на середину полосы захвата, т.е. на ту область, которая и представляет наибольший интерес. Однако сканирование с использованием оптического клина имеет одно важное преимущество. При реализации этого метода каждый участок полосы съемки сканируется дважды – при подлете и при отлете от этого участка. Такая особенность, во-первых, позволяет получать отклики от вертикально расположенных объектов, таких, как стены здания, стволы деревьев или опоры ЛЭП, а, во-вторых, создает исключительно благоприятные условия для самокалибровки лидара.

Возможность получения откликов от вертикально расположенных объектов имеется и при реализации других схем сканирования. Так, в лидарах типа ALTM, использующих метод качающегося зеркала, предусмотрена возможность установки сканерного блока в наклонное положение до 30° от надира. Такое положение используется наиболее часто при съемке ЛЭП.

Также следует упомянуть о волоконно-оптическом методе развертки, предлагаемым компанией TopoSys.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

Настоящая глава посвящена изучению всего комплекса явлений, связанных с процессами излучения зондирующего лазерного импульса, распространения его в атмосфере, отражения от объекта и регистрации приемником. Главная цель – исследовать влияние физических процессов на информационную способность лидара, под которой понимается совокупность трех важнейших параметров, характеризующих информативность получаемых лазерно-локационных данных. Такими параметрами являются точность, производительность и достоверность. Кроме того, в данной главе рассматриваются вопросы безопасного использования авиационных лазерных локаторов.

3.1. Зондирующие свойства лазерного излучения

Зондирующее свойство лазерного излучения основано на том, что объекты, расположенные на пути распространения лазерного луча, вызывают его отражение от своей поверхности. В результате от такого объекта начинает распространяться вторичная волна, часть энергии которой возвращается в точку излучения и фиксируется приемником. При этом время, затраченное на распространение от источника к объекту и обратно к приемнику, позволяет однозначно судить о дальности от локатора до объекта. Изложенный принцип измерения дальности до объектов является основой *лазерной дальнометрии* (Шануров, 1991).

Главной характерной чертой лазерного излучения, определяющего возможность его использования для целей локации, является узкая диаграмма направленности, которая обеспечивается использованием в качестве излучателя лазера.

Применительно к задачам использования лидаров в качестве средств авиационного дистанционного зондирования для топографо-геодезических и инженерно-изыскательских задач зондирующие свойства лазерного излучения должны быть конкретизированы по следующим направлениям:

1) необходимо принять во внимание специфику отражения лазерного излучения от всех основных классов объектов, составляющих типовую сцену наблюдения. Таковыми классами объектов являются поверхность Земли, растительность, антропогенные образования (здания и сооружения), провода и опоры ЛЭП и др. Зондирующие свойства лазерного излучения должны быть детализированы для каждого класса объектов, принимая во внимание различия их оптических свойств, геометрии, текстуры поверхности и других факторов;

2) область исследования может быть значительно сужена и его конкретность повышена за счет четкого определения условий эксплуатации лидаров, характерных для современного уровня развития подобных средств.

Так, достаточно рассматривать излучение импульсных лазеров на примесных кристаллах, механические системы развертки, дальности до 3500 м.

Рассмотрим определения основных физических категорий, использованных в настоящей работе для описания оптических явлений, связанных с распространением лазерного излучения. Все категории разбиты на две группы. К первой группе отнесены общепринятые фотометрические термины (табл. 9).

Таблица 9. Общепринятые фотометрические величины и единицы их измерения

Обозначение	Наименование	Определение	Единица измерения
Φ	Поток излучения	Энергия электромагнитного излучения, переносимого сквозь поверхность за единицу времени	Вт
E	Плотность потока излучения	$E = \frac{d\Phi}{dS}$ $d\Phi$ – поток излучения через бесконечно малую поверхность dS , перпендикулярную к направлению распространения излучения	Вт/м ²

Их трактовка и обозначения даны в соответствии с (Бруевич, 1990). Во второй группе представлены специальные термины, введенные с учетом специфики настоящей работы с учетом того, что применительно к задачам работы излучение лазера может рассматриваться как монохроматическое, все использованные энергетические величины и их производные рассматриваются как функции пространственных координат, направления и времени, но не длины волны (табл. 10).

Таблица 10. Специальные фотометрические величины и единицы их измерения

Наименование	Определение	Единица измерения
H	Расстояние до излучателя	м
D_H	Эффективный диаметр лазерного луча на расстоянии H от излучателя	см
R_H	Эффективный радиус лазерного луча на расстоянии H от излучателя, $R_H = 0.5D_H$	м
A	Эффективный диаметр лазерного луча на выходе оптической системы	м
ϕ	Эффективная расходимость лазерного луча на выходе оптической системы	рад
μ	Спектральный коэффициент поглощения атмосферы	м ⁻¹
ρ	Полусферический коэффициент отражения	б/р
ρ_m	Двунаправленный коэффициент отражения	ср ⁻¹
α	Полусферический коэффициент поглощения	б/р

Эффективный диаметр лазерного луча на расстоянии H от излучателя может быть оценен формулой:

$$D_H = \sqrt{a^2 + \phi^2 H^2}.$$

Практически в современных лазерных локаторах величина a составляет не более нескольких миллиметров, в то время как реальные дальности H состав-

ляют не менее 100 м (рис. 22). С учетом этого обстоятельства можно полагать: $R_H = 0.5\phi H$.

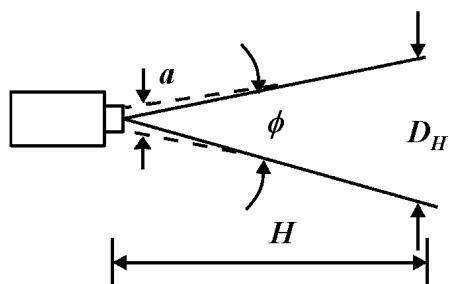


Рис. 22. Изменение эффективного диаметра лазерного луча в зависимости от дальности.

Термин «эффективный» применительно к величинам D_H , R_H , ϕ означает, что они определяются на таком расстоянии от оси лазерного луча, на котором интенсивность излучения убывает до величины $1/e = 0.368$ от максимального значения.

Перейдем к выводу аналитической зависимости, описывающей распределение поверхностной плотности потока в поперечном сечении лазерного луча. Обозначим через $W(t)$ мгновенное значение выходной мощности излучателя на выходном зрачке. Это значение будем отождествлять с потоком $\Phi(t)$, переносимым лазерным лучом сквозь свое поперечное сечение. Для оценки распределения энергии излучения в пространстве будем пользоваться понятием поверхностной плотности потока излучения:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Сделаем несколько предварительных замечаний относительно величины E :

1) значение E очевидно является функцией времени t . Более конкретно, значение E в каждой точке пространства в определенный момент времени t прямо пропорционально мгновенной мощности излучения $W(t)$. В дальнейшем будем обозначать E и все связанные с ней величины без ссылки на время.

2) в силу того, что угол расходимости ϕ мал, будем полагать, что излучение распространяется строго параллельно оси лазерного луча.

Обратимся к рисунку 23. Введением двумерной системы координат Oxy , лежащей в плоскости поперечного сечения луча, задача определения поверхностной плотности потока в произвольной точке пространства сводится к установлению функциональной зависимости вида – $E = f(H, x, y)$.

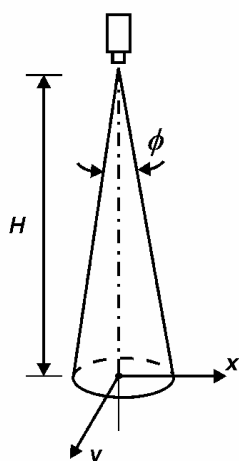


Рис. 23. Система координат для описания распределения плотности потока в поперечном сечении зондирующего луча.

Поток излучения на выходе оптической системы по определению равен выходной мощности излучателя – $\Phi_0 = W$. Изменение интенсивности потока с удалением от источника описывается законом Бугера: $\Phi_h = \Phi_0 e^{-\mu H}$, где μ – коэффициент поглощения атмосферы. Для рабочей длины волны лазерного лоатора ALTM $\lambda = 1048 \text{ нм}$ $\mu = 3.57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$.

При достаточно больших значениях H распределение E в произвольной плоскости поперечного сечения луча имеет вид гауссоиды:

$$E(x, y) = \frac{\Phi_H}{\pi R_H^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{R_H^2}}.$$

Данное выражение удовлетворяет двум главным условиям:

$$1) \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} E(x, y) dx dy = \Phi_H$$

$$2) E(x = R_H, y = 0) = 0.368 E(x = 0, y = 0).$$

Первое условие выражает тот факт, что общее количество энергии, сосредоточенное на площади поперечного сечения, равно полному потоку Φ_H , падающего на это сечение.

Второе условие определяет значение R_H как эффективный радиус сечения луча, т.к. на границе зоны, определяемой этим значением, величина плотности потока падает в e раз по отношению к максимуму.

Величины R_H и ϕ связаны соотношением $R_H = 0.5\phi H$. С учетом этого факта и вышеизложенных соображений может быть найдена искомая функциональная зависимость, определяющая значение E для произвольной точки пространства:

$$E(H, x, y) = \frac{\Phi_0 e^{-\mu H}}{\pi \left(\frac{\phi}{2} H\right)^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{\left(\frac{\phi}{2} H\right)^2}}.$$

3.2. Отражение лазерного луча от наземных объектов

Здесь и в дальнейшем исследуется отражение лазерного луча от объектов цилиндрической формы с относительно малым сечением. Примерами таких объектов могут выступать ветви деревьев, провода или тросы ЛЭП и др.

При описании процесса отражения лазерного луча от проводов первостепенное значение имеет корректное использование понятия «коэффициента отражения» ρ . Величина ρ в общем случае является двунаправленной, она зависит как от угла падения, так и от направления отраженного излучения. Кроме того, определенную трудность создает тот факт, что падающее излучение мы условились характеризовать величиной E , являющейся производной от величины потока по площади, в то время как подобная величина неприменима для характеристики отраженного излучения. Поэтому начнем с формального введения понятия коэффициента отражения применительно к задачам настоящего исследования.

Введем следующие обозначения:

$\Phi_{пад}$ – величина потока, падающего под некоторым углом на площадку малой площади dS .

$\Phi_{отр}$ – величина потока, отраженного от площадки во всю полусферу.

Исходя из введенных определений, полусферическим коэффициентом отражения ρ , может быть названа величина:

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{\text{пад}}}.$$

К введенному таким образом коэффициенту ρ применимо соотношение – $\rho + \alpha = 1$, где α коэффициент поглощения. Величины ρ и α являются безразмерными.

Перейдем к определению направленного коэффициента отражения ρ_m . Сразу оговорим, что в дальнейшем будет проведен количественный анализ только отражения диффузного типа по причинам, которые будут рассмотрены ниже. Диффузное отражение, в частности, характеризуется тем, что индикатриса отраженного излучения не зависит от угла падения, а зависит только от величины потока. Это обстоятельство позволяет уже сейчас рассматривать ρ_m как однонаправленную величину, зависящую только от угла отражения $\beta_{\text{отр}}$.

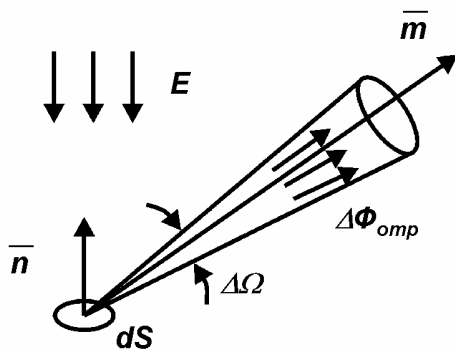


Рис. 24. К определению двунаправленного коэффициента отражения.

Обратимся к рисунку 24. Будем облучать бесконечно малую площадку dS потоком со значением поверхностной плотности потока E перпендикулярно к поверхности площадки. Рассмотрим $\Delta\Phi_{\text{отр}}$ – доля отраженного потока, заключенного в телесном угле $\Delta\Omega$, имеющего осью вектор заданного направления m . Теперь определим двунаправленный коэффициент отражения ρ_m как:

$$\rho_m = \frac{\frac{\partial^2 \Phi_{\text{отр}}}{\partial S \partial \Omega}}{E}.$$

Величина ρ_m имеет размерность ср^{-1} .

Представим два важных соотношения с участием ρ_m , имеющих практическое значение:

$$1) \quad \iint \rho_m d\Omega = \rho.$$

Как будет показано ниже, это соотношение позволяет в определенных случаях оценить значения ρ_m по ρ . Значения ρ для многих материалов могут быть получены из справочников.

Интенсивность отраженного излучения –

$$R_m = \frac{\partial^2 \Phi_{\text{отр}}}{\partial S \partial \Omega},$$

может быть найдена по формуле $R_m = \rho_m E \cos(\beta_{пад})$, где $\beta_{пад}$ – угол между направлением потока излучения и вектором нормали к поверхности в точке падения.

Выражение может быть уточнено, исходя из априорных знаний, по характеру диффузного отражения, а именно ρ_m не зависит от угла падения $\beta_{пад}$ и зависит только от угла отражения $\beta_{отр}$, который также измеряется по отношению нормали к облучаемой поверхности. Кроме того, априорно известно, что ρ_m выражается формулой $\rho_m = \rho_0 \cos(\beta_{отр})$, где ρ_0 – значение направленного коэффициента отражения в направлении перпендикуляра к поверхности.

Оценим значение ρ_0 следующим образом. Введя сферическую систему координат, где α угол отклонения от нормали, а θ угол места имеем – $d\Omega = \sin(\alpha)d\alpha d\theta$.

Тогда,

$$\rho = \iint \rho_m d\Omega = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\alpha=0}^{\frac{\pi}{2}} \rho_0 \cos(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha d\theta = \pi \rho_0.$$

Таким образом,

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \pi.$$

Как будет показано в дальнейшем, во всех случаях нас будет интересовать отражение в сторону падения излучения, т.е. $\beta_{пад} = \beta_{отр} = \beta$.

Это позволяет прямо сейчас сделать одно полезное упрощение. Будем обозначать через ρ_R направленный коэффициент отражения в сторону падения излучения. Тогда,

$$\rho_0 \cos(\beta) = \frac{\frac{\partial^2 \Phi_{отр}}{\partial S \partial \Omega}}{E \cos(\beta)}.$$

Откуда

$$\rho_R = \frac{\partial^2 \Phi_{отр}}{\partial S \partial \Omega} / E = \rho_0 \cos^2(\beta).$$

Окончательно имеем

$$\rho_R = \frac{\rho}{\pi} \cos^2(\beta).$$

Перейдем к выводу формулы, определяющей интенсивность потока, отраженного от объекта цилиндрической формы (например, провода или ветви дерева) и попадающего на входной зрачок приемника излучения. Обозначим через $r_{пр}$ радиус поперечного сечения такого объекта. Введем специальную систему координат, которая будет использоваться при вычислении, как показано на рисунке 25.

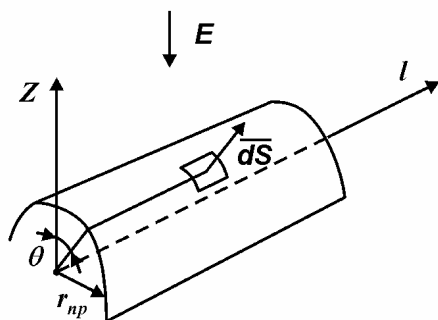


Рис. 25. Специальная система координат для описания отражения зондирующего луча от провода (ветви дерева).

Положение элементарного участка поверхности провода dS будем характеризовать его линейной координатой l вдоль оси провода и углом θ , измеренным относительно зенитного направления.

Очевидно, что $dS = r_{np} d\theta dl$.

Необходимо сделать два замечания:

1) при вертикальном расположении сканерного блока распространение падающего излучения можно считать параллельным оси Z . Строго говоря, это не так, так как сканирование осуществляется с углами до $\pm 25^\circ$ от вертикали. Однако в дальнейшем полагается, что объекты расположены в плоскости, перпендикулярной плоскости сканирования;

2) величина r_{np} может считаться малой по сравнению с эффективным радиусом луча R_H при H от 100 м и более. Поэтому величина E может считаться константой по ширине провода.

С учетом вышеизложенного вычислим величину потока в единице телесного угла, отраженного от цилиндрического элемента объекта длиной dl :

$$\frac{d\Phi_{omp}}{d\Omega} = [2r_{np} \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} \frac{\rho}{\pi} E \cos^2(\theta) d\theta] dl$$

После взятия интеграла будем иметь:

$$\frac{d\Phi_{omp}}{d\Omega} = \frac{r_{np} \rho E}{2} dl$$

Продолжим вывод формулы, определяющий поток, отраженный от объекта цилиндрической формы. Рассмотрим объект, удаленный от оси луча на расстояние d , а начало оси l расположим в точке O , соответствующей кратчайшему расстоянию до оси провода (ветви дерева) (рис. 26).

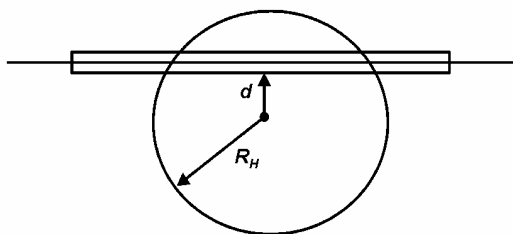


Рис. 26. Положение объекта в поперечном сечении зондирующего луча.

Распределение поверхностной плотности потока падающего излучения вдоль объекта будет выражаться формулой:

$$E(l) = \frac{W_H}{\pi R_H^2} e^{-\frac{d^2}{R_H^2}} e^{-\frac{l^2}{R_H^2}}$$

Подставим выражение для $E(l)$ в формулу для R_m , полученную ранее. Перед началом вывода формулы сделаем следующие замечания:

1) при реальных высотах полета угловой размер входного зрачка приемника мал, и поэтому отраженный поток, регистрируемый приемником, может быть выражен как

$$\Phi_{отр} = \frac{d\Phi_{отр}}{d\Omega} \Omega_{np},$$

где $\Omega_{np} = \frac{S_{np}}{H^2}$ – телесный угол, соответствующий входному зрачку приемника, S_{np} – площадь входного зрачка приемника;

2) допустим следующие упрощения, которые позволят получить аналитическое выражение для искомой величины:

– будем рассматривать только строго вертикальную составляющую отраженного излучения. Точнее было бы учитывать направление от каждой точки отражения на приемник. Однако, вариации этого направления малы, учитывая размер пятна и расстояние до приемника;

– границы интегрирования распространим на всю длину провода. Ошибка в этом случае будет определяться величиной потока, отраженного за пределами мгновенного поля зрения приемника. Эта величина мала.

Перейдем непосредственно к выводу формулы:

$$\Phi_{отр} = \left[\int_{l=-\infty}^{l=\infty} \frac{r_{np} \rho}{2} \frac{W_H}{\pi R_H^2} e^{-\frac{d^2}{R_H^2}} e^{-\frac{l^2}{R_H^2}} dl \right] \frac{S_{np}}{H^2} = \frac{\rho r_{np} W_H S_{np}}{2\pi R_H^2 H^2} e^{-\frac{d^2}{R_H^2}} \int_{l=-\infty}^{l=\infty} e^{-\frac{l^2}{R_H^2}} dl.$$

Интеграл в правой части этого выражения может быть вычислен аналитически:

$$\int_{l=-\infty}^{l=\infty} e^{-\frac{l^2}{R_H^2}} dl = \sqrt{\pi} R_H.$$

Подставляя найденное значение в формулу для $\Phi_{отр}$, а также принимая во внимание тот факт, что излучение претерпевает ослабление на пути от источника к проводу и обратно к приемнику, имеем окончательно:

$$\Phi_{np}^0 = \frac{e^{-\frac{d^2}{(\phi H)^2}}}{2\sqrt{\pi}} \frac{\beta r_{np} S_{np}}{\phi H^3} e^{-2\mu H} W_0.$$

Где, Φ_{np}^0 – поток на входном зрачке приемника при перпендикулярном облучении.

Полученная формула выражает величину потока при вертикальном облучении и полностью диффузном характере отражения. Рассмотрим другие практически важные случаи.

Прежде всего рассмотрим сканирование с наклонным положением сканерного блока. Угол наклона плоскости сканирования по отношению к вертикали будем обозначать через γ . При вычислении значения потока, вернувшегося на входной зрачок Φ_{np}^γ , будем пользоваться тем же приемом, что и в случае верти-

кального положения сканерного блока. Использованные формулы необходимо скорректировать следующим образом:

а) при вычислении отклика от элементарного участка провода (ветви) dl учесть наличие угла γ следующим образом (рис. 27).

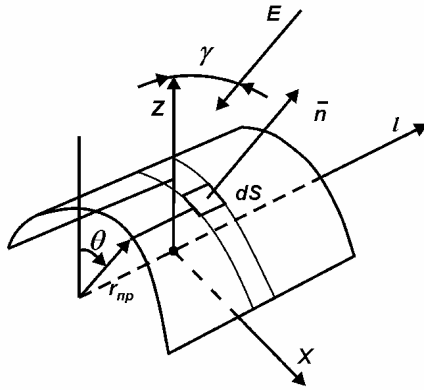


Рис. 27. К определению доли потока, отраженного от линейного участка объекта dl .

Угол падения β в этом случае есть угол между векторами e (единичный вектор обратного к E направления) и n . Для того, чтобы выполнить интегрирование по θ , необходимо найти зависимость между β и θ .

Разложим вектора e и n в системе координат (x, l, z) .

Вектор e : $e_x = 0$, $e_l = \sin(\gamma)$, $e_z = \cos(\gamma)$.
Вектор n : $n_x = \sin(\theta)$, $n_l = 0$, $n_z = \cos(\theta)$.

Тогда

$$\cos(\beta) = [\bar{e} \cdot \bar{n}] = e_x n_x + e_l n_l + e_z n_z = \cos(\gamma) \cos(\theta).$$

формулой имеем:

Таким образом, в соответствии с общей

$$\frac{d\Phi_{omp}^\gamma}{d\Omega} = [E \int_{\cap} \rho_m dS] dl = [2r_{np} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho}{\pi} E \cos^2(\theta) \cos^2(\gamma) d\theta] dl$$

После вычисления интеграла получим:

$$\frac{d\Phi_{omp}^\gamma}{d\Omega} = \frac{r_{np} \rho \cos^2(\gamma) E}{2} dl = \frac{d\Phi_{omp}^0}{d\Omega} \cos^2(\gamma)$$

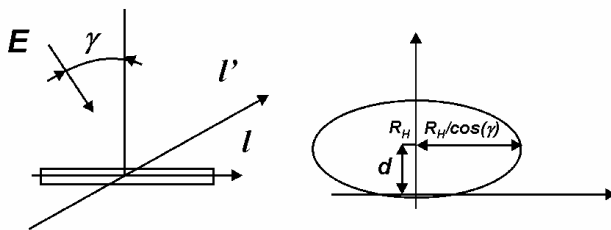


Рис. 28. Положение объекта в поперечном сечении зондирующего луча при наклонном сканировании.

б) Для определения распределения $E(l)$ вдоль объекта обратимся к рисунку 28.

Очевидно, что распределение $E(l)$, полностью соответствует формуле полученной для случая строго вертикального сканирования, а $l' = l \cos(\gamma)$.

Пятно импульса в плоскости провода (ветви) для этого случая будет иметь форму эллипса с по-

луосями, равными R_H и $R_H \cos(\gamma)$. Это позволяет записать выражение для $E(l)$ при наличии наклона сканера в виде:

$$E^\gamma(l) = E(l \cdot \cos(\gamma)).$$

В соответствии с общей формулой имеем:

$$\Phi_{omp}^{\gamma} = \left[\int_{l=-\infty}^{l=\infty} \frac{d\Phi_{omp}^{\gamma}}{d\Omega} E^{\gamma}(l) dl \right] \frac{S_{np}}{H^2} = \cos^2(\gamma) \left[\int_{l=-\infty}^{l=\infty} \frac{d\Phi_{omp}^0}{d\Omega} E(l \cdot \cos(\gamma)) dl \right] \frac{S_{np}}{H^2}.$$

С учетом того, что

$$\int_{l=-\infty}^{l=\infty} E(l) dl = \cos(\gamma) \int_{l=-\infty}^{l=\infty} E(l \cdot \cos(\gamma)) dl,$$

имеем:

$$\Phi_{omp}^{\gamma} = \cos(\gamma) \left[\int_{l=-\infty}^{l=\infty} \frac{d\Phi_{omp}^0}{d\Omega} E(l) dl \right] \frac{S_{np}}{H^2}.$$

Таким образом, получена главная формула, определяющая значение потока при наклонном положении сканерного блока:

$$\Phi_{omp}^{\gamma} = \cos(\gamma) \Phi_{omp}^0.$$

Очевидно также, что значение потока, приведенного ко входному зрачку приемника, будет выражаться аналогично:

$$\Phi_{np}^{\gamma} = \cos(\gamma) \Phi_{np}^0.$$

3.3. Математическое моделирование лазерно-локационного измерения

Оптимизация режимов эксплуатации лазерного сканера проводится в рамках математической модели с той или иной степенью адекватности, описывающей главные процессы, составляющие лазерно-локационное измерение, а именно:

- излучение лазерного импульса описывается параметром мгновенной мощности $W(t)$, имеющего максимум W_0 , а также значением расходимости ϕ ;
- распространение излучения в атмосфере описывается законом Бугера с параметром μ ;
- характер отражения от объекта считается диффузным, и для этого случая получено аналитическое выражение, описывающее значение отраженного потока;
- процесс регистрации потока приемником описывается с помощью единственного значения $\Phi_{пр}$, определяющего пороговое значение величины потока. Предполагается, что если мощность отраженного импульса хотя бы для некоторого значения t превышает $\Phi_{пр}$, то такой импульс будет зарегистрирован.

Важнейшим практическим следствием из 4-го положения является тот факт, что можно оценивать значение потока только для максимальной мощности выходного импульса W_0 , так как если W_0 превышает $\Phi_{пр}$, то регистрация гарантирована и наоборот.

С учетом введенной категории математической модели процесса регистрации перепишем основное уравнение потока на входном зрачке приемника в виде:

$$F = \cos(\gamma) \frac{e^{-\frac{d^2}{(\phi H)^2}}}{2\sqrt{\pi}} \frac{\rho r_{np} S_{np}}{\phi H^3} e^{-2\mu H} - \frac{\Phi_{np}}{W_o}.$$

Понятно, что импульс будет зарегистрирован в том и только в том случае, когда $F > 0$.

В представленном выражении можно выделить несколько смысловых групп параметров:

1) приемо-передатчик Φ_{np} , W_o , S_{np} , ϕ . В рассматриваемом приближении все три величины являются константами. Их значения могут быть определены непосредственно экспериментально либо их можно получить от производителя лидара;

2) параметры среды – μ . Эта величина сильно зависит от состояния атмосферы;

3) параметры обследуемого объекта цилиндрической формы ρ , r_{np} .

4) условия съемки H , γ , d .

Отнесение параметра d к условиям съемки нуждается в комментарии. Если значения всех прочих параметров фиксированы, то функционал F будет больше нуля только при $d < d'$ (d' может быть равен нулю, что будет означать невозможность регистрации). Это обстоятельство может быть интерпретировано следующим образом. Зарегистрированными окажутся все импульсы, попавшие в полосу по обе стороны объекта шириной $2d'$. Специфика проведения лазерно-локационной съемки такова, что при движении носителя вдоль объекта съемки генерируется некоторая совокупность точек с расстояниями до провода (ветви) $\{d_i\}$, то есть дискретная случайная совокупность значений, которая может быть описана законом распределения, а само d_i может рассматриваться как непрерывная случайная величина. Знание закона распределения $\{d_i\}$ однозначно определит количество (вероятность появления) точек с $d_i < d'$, и, таким образом, позволит однозначно судить о количестве зарегистрированных импульсов.

Параметр d потому отнесен к группе «условия съемки», что именно условия съемки определяют распределение $\{d_i\}$, а именно:

V – скорость движения носителя, м/с;

$f_{скан}$ – частота сканирования, Гц;

$f_{ум}$ – частота зондирующих импульсов, Гц;

H – высота полета;

ψ – угол (амплитуда) сканирования, °.

Далее необходимо ввести набор критериев, определяющих эффективность работы лазерного локатора. Введем численный параметр, позволяющий количественно характеризовать эффективность.

Исходя из самых общих представлений, эффективность съемки в части обнаружения провода может быть оценена по количеству лазерных импульсов, мощность отклика которых превышает Φ_{np} . С этой целью может быть введен следующий параметр – *обнаружительная способность*:

$$K = \frac{\rho_W}{\rho_T [M]},$$

где ρ_W – линейная плотность откликов от объекта, m^{-1} ;

ρ_T – поверхностная плотность всех излученных импульсов, m^{-2} .

Необходимые пояснения по введенному параметру K :

1) параметр K наиболее точно описывает эффективность обнаружения, т.к. он инвариантен по отношению к скорости полета, ширине полосы захвата, поверхностной плотности импульсов ρ_T ;

2) физический смысл K состоит в следующем. При выполнении съемки с поверхностной плотностью ρ_T равной 1 точке на m^2 , коэффициент K численно равен количеству отражений от провода на 1 м его длины;

3) в прикладной лазерной локации коэффициент K занимает центральное место в методиках оценки качества съемки в части обнаружительной способности.

Для получения аналитических оценок для K необходимо получить выражение для ρ_W . Понятно, что эта оценка ρ_W будет являться статистической. Для этой цели необходимо, в первую очередь, получить закон распределения вероятности удаления центральной точки импульса от объекта.

Проведем две параллельные полосы 1 и 2 соответственно на расстояниях d_1 и d_2 от объекта (рис. 29).

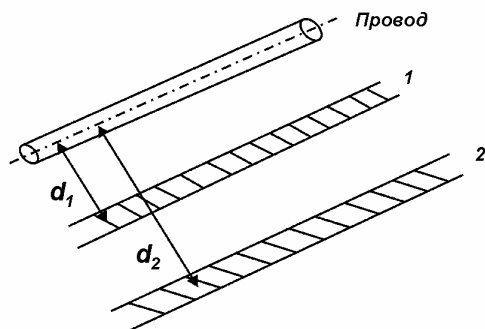


Рис. 29. К выводу средней плотности откликов.

В силу полной равномерности распределения точек по площади количество точек, попавших в полосы, не зависит от их удаленности от объекта (при достаточной длине полос). Обозначая через ∂N количество точек, попавших в полосу шириной ∂d и единичной длины, имеем:

$$\partial N = 2\rho_T \cdot (1 \text{ м}) \cdot \partial d$$

$$\frac{\partial N}{\partial d} = 2\rho_T$$

N – имеет размерность m^{-1} . Коэффициент 2 появляется потому, что рассматриваются две полосы с обеих сторон объекта, расположенные на расстоянии d . Как было отмечено выше, зарегистрированными окажутся те и только те импульсы, которые при данных условиях съемки будут иметь $d_i < d'$. С учетом этого обстоятельства:

$$\rho_W = \frac{\partial N}{\partial d} d' = 2\rho_T d'$$

И с учетом этого

$$K = \frac{\rho_w}{\rho_T} = \frac{2\rho_T d'}{\rho_T} = 2d'$$

Применительно к физическим свойствам провода ρ , $r_{пр}$ необходимо выбрать параметры съемки H , γ , d (параметр d определяется через V , $f_{скан}$, $f_{ум}$, ψ) таким образом, чтобы добиться максимального значения K .

При реализации задачи оптимизации, имеет место следующее ограничение. Оптимизация должна вестись с учетом ограничения на поверхностную плотность потока излучения на поверхности земли, исходя из соображений безопасности по зрению.

Кроме того, имеется следующее замечание. В качестве варьируемых параметров при оптимизации используются «условия съемки» так как они находятся в распоряжении постановщика эксперимента. Однако этот список может быть дополнен параметром расходимости ϕ , изменения которого требует лишь незначительных аппаратных переделок.

3.4. Вопросы безопасного использования лидаров

Излучение лидаров представляет угрозу для здоровья людей в смысле возможного поражения органов зрения и ожогов кожи. Причем на практике наибольшее внимание уделяется только угрозе зрению случайных наземных наблюдателей, так как ожоги кожи возможны только на очень близких расстояниях (первые метры), т.е. только в лабораторных условиях, где с прибором работает специально обученный персонал с соблюдением всех норм безопасности.

Вопросы безопасного использования лидаров оказывают существенное влияние на методику выполнения лазерно-локационной съемки. Как будет показано ниже, обеспечение безопасности на практике сводится к определению минимально допустимой высоты полета, которое для некоторых моделей лидаров может составлять несколько сот метров. Понятно, что это ограничение существенно, так как высота съемки является одним из главных параметров, прямо влияющих на детальность (плотность сканирования), точность и ширину полосы захвата.

Подходы к определению минимально допустимой высоты лазерно-локационной съемки различны в разных странах. Авторы руководствовались в основном американскими и российскими методическими разработками в этой области. В первом случае речь идет об обстоятельном «*American National Standard for Safe Use of Laser*», который в принципе сам по себе достаточен для того, чтобы определить параметры безопасного использования конкретного лидара при тех или иных условиях съемки. Российский стандарт «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» отличается меньшей конкретностью.

Методика расчета параметров безопасного применения лидаров достаточно сложна, поэтому рассмотрим только выводы:

1) Прежде всего все производимые в мире аэросъемочные лидары в части проблемы безопасности для зрения могут быть разделены на две большие категории – опасные и безопасные. Примеры представлены в таблице 11.

Как видно из таблицы, степень опасности для зрения определяется рабочей длиной волны излучения. Лидары с длиной волны порядка 1.0 мкм оказываются самыми опасными (наивысший IV класс опасности по американской классификации), а лидары с длиной волны около 1.5 мкм оказываются самыми бе-

Таблица 11. Классификация аэросъемочных лидаров распространенных типов по степени опасности для зрения

Факторы опасности	Опасные – рабочая длина волны излучения около 1.0 мкм	Безопасные – рабочая длина волны излучения около 1.5 мкм
Модели аэросъемочных лидаров	Optech ALTM 3100, Leica ALS-50	IGI LiteMapper, TopoSys Falcon

зопасными (низший I класс опасности). Для примера укажем: в нормальных условиях съемки для ALTM 3100 минимально допустимая высота съемки составляет 550 м, а для LiteMapper – 0.5 м. Такое принципиальное различие объясняется тем, что стекловидное тело глаза в значительной степени прозрачно на длине волны 1.0 мкм и почти полностью непрозрачно на длине волны 1.5 мкм. Поэтому лазерное излучение на длине волны 1.5 мкм не может достигнуть сетчатки и вызвать ожог, все это излучение будет поглощено стекловидным телом глаза. Напротив, лазерное излучение с длиной волны около 1.0 будет сфокусировано хрусталиком и без серьезного ослабления достигнет сетчатки, что при превышении порогового значения поверхностной плотности энергии может привести к ожогу сетчатки.

Однако сказанное не означает, что лидары с рабочей длиной волны 1.5 мкм предпочтительны из-за своей почти полной безопасности. Вспомним, что стекловидное тело глаза почти полностью состоит из воды. Именно благодаря этому обстоятельству оно оказывается почти полностью непрозрачным – вода интенсивно поглощает электромагнитное излучение на длине волны 1.5 мкм. Но это обстоятельство имеет и одно крайне неблагоприятное последствие для практического применения аэросъемочных лидаров с рабочей длиной волны излучения 1.5 мкм – такие приборы крайне зависимы от содержания водяного пара в атмосфере. Иными словами, они «слепнут» даже при незначительном снижении метеорологической дальности видимости, в условиях даже самой легкой дымки. Кроме того, по понятным причинам лазерные импульсы на этой длине волны не дают отражений от водных (водоемов) и увлажненных (болота) поверхностей, а также от всех объектов, на поверхности которых по любым причинам образовался слой влаги (например, выпадение росы).

2. Оценка минимально допустимой высоты и других параметров выполнения лазерно-локационной съемки проводится на основе вычисления суммарной энергии лазерных импульсов, которые в результате попадания на сетчатку могут вызвать ее нагрев выше допустимого уровня. Иными словами, имеет значение не только энергия каждого конкретного лазерного импульса. Если по условиям съемки глаз наблюдателя могут поразить несколько импульсов подряд, то эту возможность также следует учитывать.

3. Опасность поражения сетчатки тем выше, чем выше энергия одиночного импульса и чем меньше расстояние до источника излучения. Причем интенсивность главного поражающего фактора поверхностной плотности энергии излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния. Т.е. при снижении высоты съемки меньше допустимого порога опасность для зрения возрастает в квадратичной зависимости.

4. В лидарах типа ALTM 3100 либо ALS-50 в качестве инструмента развертки используется сканирующее зеркало. В конце каждой строки сканирова-

ния движение зеркала замедляется, затем на очень короткое время останавливается и начинает движение в обратном направлении. Именно в такие моменты создаются условия, когда глаз наблюдателя может быть поражен более чем одним лазерным импульсом. Т.е. для приборов с таким типом развертки параметры сканирования (амплитуда, частота) также прямо влияют на безопасность использования.

5. Вероятность поражения сетчатки выше ночью, чем днем, так как в ночное время зрачок полностью расширен. Так как в оптической системе глаза зрачок выполняет функции действующей диафрагмы, то понятно, что в ночное время сетчатка подвергнется воздействию максимальной дозы излучения. По этой же причине поражающий фактор лазерного излучения практически неограниченно возрастает при использовании оптических приборов (биноклей, монокуляров).

6. В лидарах типа ALTM компании Optech используется специальный прием, призванный значительно снизить значение минимально допустимой высоты безопасной съемки. За счет минимального усложнения оптической схемы (фактически за счет использования одной дополнительной линзы) появляется возможность увеличить расходимость зондирующего лазерного луча с 0.2 до 0.7 мрад. Иными словами, лазерный луч «уширяется». Понятно, что такая опция приводит к пропорциональному снижению поверхностной плотности энергии луча, и следовательно к возможности выполнять безопасную съемку на меньших высотах. В ALTM 3100 введение такой опции позволяет снизить минимально допустимую высоту с 550 до 80 метров.

В заключение данного раздела отметим, что все методы оценки безопасных условий эксплуатации аэросъемочных лидаров, в частности значения минимально допустимой высоты, используют статистический подход. Т.е. строго говоря на 100% безопасность не гарантируется. Однако соблюдение установленных правил гарантирует, что статистическая вероятность наступления неблагоприятного исхода пренебрежимо мала.

4. НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

4.1. Задачи навигации и геопозиционирования в лазерной локации

Современные геоинформационные технологии настолько сблизили понятия «навигация» и «геопозиционирование», что некоторые специалисты стали даже их полностью отождествлять. Такому представлению в значительной степени способствовало появление систем GPS и ГЛОНАСС, которые часто определяются как «глобальная навигационная система спутникового геопозиционирования», т.е. как система, решающая обе главные задачи – и навигации, и геопозиционирования. Между тем, такое отождествление пока следует считать преждевременным, хотя и нельзя не признать, что тенденция сближения этих двух категорий имеет место и составляет одну из главных тенденций развития современной геоинформатики, фотограмметрии и всей той обширной совокупности дисциплин, которые принято объединять термином «дистанционное зондирование земли».

Мы, все же, будем придерживаться, отечественной традиции, которая предписывает строго разделять вопросы навигации и геопозиционирования (*Прим.: За рубежом этот вопрос решается более либерально. Там эти термины зачастую используются полностью взаимозаменяемо. Именно это обстоятельство привело к возникновению некоторой путаницы в современной русскоязычной литературе, как следствие механического заимствования терминологии*). Отечественная традиция трактует понятие «навигация» как «науку о способах выбора пути и методах вождения судов, летательных аппаратов и космических аппаратов». Что касается «геопозиционирования», то можно предложить следующее определение: «Геопозиционирование – процесс определения координат географических объектов по данным дистанционного зондирования». Представленное определение не может считаться исчерпывающим, так как не отражает всей полноты возможных значений употребления этого термина. Кроме того, опять же основываясь на отечественном опыте, можно указать, что «... определение пространственных координат наземных объектов по аэрофотоснимкам ...» традиционно считается одной из важнейших задач фотограмметрии, а термин «геопозиционирование», являющийся калькой с английского *geopositioning*, стал использоваться сравнительно недавно.

Несмотря на некоторую путаницу в терминологии в рамках настоящего исследования мы будем строго различать эти две категории:

навигация отвечает на вопросы типа «Где я сейчас нахожусь?», «Как добраться из пункта А в пункт В», а процедура геопозиционирования для каждого бита геопространственных данных позволяет ответить на вопрос «Каковы его координаты?». В прикладной лазерной локации в равной степени актуальны как задачи навигации, так и геопозиционирования.

4.2. Системы прямого геопозиционирования

В общем случае задача геопозиционирования данных воздушной лазерно-локационной съемки может решаться различными способами, в том числе и с использованием традиционных фотограмметрических процедур (Лобанов, 1983). Однако, на практике эта задача сегодня решается почти исключительно с использованием *интегральных навигационных GPS/IMU комплексов*, входящих в состав современного лазерного локатора конструктивно. Такие комплексы получили название *системы прямого геопозиционирования*, во многом благодаря тому, что являются самодостаточными в смысле возможности полного

решения задачи геопозиционирования без привлечения других источников данных. Наличие этого свойства отличает системы прямого геопозиционирования от традиционных систем и методов геопозиционирования данных, используемых в классической аэрофототопографии. Забегая вперед отметим, что в традиционных методах для полного решения задачи геопозиционирования, как правило, используются наземные геодезические работы по планово-высотному обоснованию (определение геодезических координат опознаков), а также сложные и затратные по времени процедуры камеральной обработки данных съемки, предполагающие в частности проведение процедур пространственной фотогриангуляции (Лобанов, 1983). Системы прямого геопозиционирования полностью свободны от необходимости проведения каких-либо дополнительных работ.

С учетом представленных общих соображений перейдем к обсуждению названия «Интегральные навигационные комплексы GPS/IMU» и попробуем разъяснить. Термин GPS, не нуждается в комментариях, а подробные разъяснения по этому вопросу представлены ниже. Аббревиатура IMU есть Inertial Measurement Unit, или в переводе Инерциальное Измерительное Устройство. (Прим.: С середины 60-х годов прошлого века в отечественной технической литературе принят термин «Инерциальная система». Однако, по двум причинам, было бы не вполне корректно утверждать, что Инерциальная система в советском и нынешнем российском понимании это и есть IMU. Во-первых, кроме IMU широко употребляется термин INS, Inertial Navigational System. Последний значительно ближе к «инерциальным системам» как синтаксически, так и по существу. Во-вторых, наличие GPS, как это будет показано ниже, слишком существенно определяет принципы функционирования и характер получаемых данных систем, о которых идет речь. Поэтому сравнивать их с приборами «доGPSной» эпохи неразумно). В процессе GPS и IMU как физические устройства работают полностью автономно и независимо друг от друга, каждый по-своему решая *одну и ту же навигационную задачу*. Однако, *интегральное навигационное решение* рождается в процессе совместной обработки данных этих двух источников. Смысл такого совмещения состоит в том, что в результате такого совмещения удастся преодолеть существенные ограничения (о которых речь ниже) обоих источников, и добиться принципиально нового качества выходных данных, прежде всего по точности. В этом смысле GPS и IMU составляют комплекс. Наконец, последний термин из названия системы, который нуждается в разъяснении – «навигационные». Принимая во внимание сказанное ранее, отметим, что в данном конкретном случае термин «навигационные» следует трактовать широко. Т.е. речь идет о комплексах, которые с одинаковым успехом могут использоваться для решения, во-первых, задач чисто навигационных, и, во-вторых, задач геодезических, аэрогеодезических и топографо-геодезических. Одним из возможных приложений таких систем и является прикладная лазерная локация.

Историческое отступление:

Обращение к истории – всегда было эффективным инструментом анализа. Оба важнейших компонента и GPS, и IMU имели свои собственные богатые истории и традиции до того как встретиться и начать работать вместе. Интересующимся историей GPS можно порекомендовать книгу (Шануров, Мельников, 2001), которая отличается полнотой, убедительностью и ясностью изложения. История инерциальной навигации значительно длинней и интересней, однако

пересказать ее в рамках короткой исторической справки не представляется возможным. Поэтому перейдем сразу к выводам: 1) К концу XX века уже полностью разработана теория использования гироскопов и акселерометров для задач определения пространственного положения движущихся платформ, а также пройденного ими пути, скоростей и ускорений. Решение подобных задач и составляет предмет *инерциальной навигации*. В практическом плане развитие этой прикладной науки привело к появлению таких хорошо известных приборов как авиагоризонт, гироскоп, гировертикаль, гиropлатформа и др. 2) В последние годы имеют место значительные технологические достижения в части разработки немеханических гироскопов, которые отличаются от механических большей точностью и надежностью за счет отсутствия движущихся частей. Здесь речь идет, прежде всего, о так называемых кольцевых лазерных и волоконно-оптических гироскопах. Гироскопы именно этих типов применяются в интегральных навигационных комплексах авиационного применения POS/AV производства канадской компании Applanix, и системах AeroControl германской компании IGI, признанных мировых лидеров в этой области.

Два представленных тезиса по истории вопроса существенны, в связи с тем, что как будет показано ниже, GPS/IMU комплексы практически полностью заимствовали методы классической инерциальной навигации в частности таких вопросах как разделение функций гироскопов и акселерометров в решении общей навигационной задачи и инициализация.

Пока остается не раскрытым, возможно, главный вопрос настоящего исследования – *в чем смысл появления интегральных навигационных систем?* Почему до недавнего времени человечество с успехом обходилось традиционными средствами инерциальной навигации? Однако есть все основания полагать, что появление таких систем, конечно же, не случайность, а веление времени, следствие естественного развития науки и технологии, а также радикального изменения требований к качеству и оперативности поставки любых геопространственных данных.

Обратимся к таблице 12, где представлены параметры геопространственных измерений, обеспечиваемых уже упомянутым GPS/IMU комплексом авиационного базирования POS/AV 510 компании Applanix.

Таблица 12. Точности определения параметров GPS/IMU комплексом авиационного базирования POS/AV 510 компании Applanix

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ (1 σ)
Абсолютные геодезические координаты, м	0.05–0.30
Скорость, м/с	0.005
Крен и тангаж, градусы	0.005
Курс, градусы	0.008

Представленные в таблице значения точности могут быть достигнуты только по результатам полного курса наземной постобработки дифференциальных GPS и инерциальных данных. Соответствующие значения точности реального времени несколько хуже представленных в таблице, хотя тоже весьма убедительны. Здесь стоит упомянуть, что продукты компании Applanix активно эксплуатируются на российском рынке начиная с 1997 г., и поэтому приведенные цифры заслуживают доверия – они подтверждены результатами практической

деятельности многих российских компаний, таких, например, как «Оптэн» или «Геокосмос». Уже одни эти цифры, без каких либо дополнительных комментариев, позволяют ответить на вопрос: «Зачем нужны GPS/IMU системы прямого геопозиционирования»?



Рис. 30. Интегральный навигационный GPS/IMU комплекс POS/AV 510 компании Applanix.

Рассмотрим следующий пример. Установим систему POS/AV 510 (рис. 30) на самолет-аэрофотосъемщик вместе с аналоговым или цифровым аэрофотоаппаратом и будем использовать ее показания в качестве элементов внешнего ориентирования. Легко убедиться, что результирующая ошибка геопозиционирования при этом составит примерно 1/10000 от высоты съемки, т.е., например, 20 см при высоте 2000 м. Если в качестве аэро-съемочного средства выбрана одна из

самых достойных цифровых камер Vexcel UltraCAM-D (результатирующий кадр 86 мегапикселей!), то при ее параметрах «Размер пиксела матрицы приемника» – 9 мкм и «Фокусное расстояние» – 100 мм, имеем размер элемента разрешения на уровне земли 18 см. Путем этих несложных арифметических выкладок мы достигли первого главного вывода: Использование современных навигационных комплексов типа GPS/IMU позволяет обеспечить точность геопозиционирования цифровых аэрофотоснимков на уровне одного пиксела. Причем это верно для цифровых камер самого высокого разрешения, к которым кроме упомянутой UltraCAM-D следует отнести DMC компании Z/I Imaging и ADC-40 компании Leica Geosystems (последняя, строго говоря, является сканером). Что касается среднеформатных метрических камер (в настоящее время к таковым в основном относят приборы с приемником емкостью 16–22 мегапиксела) то для них предлагаемая точность попадает уже на субпиксельный уровень. Приведенный пример объясняет происхождение другого набирающего популярность названия интегральных GPS/IMU комплексов – *системы прямого геопозиционирования*, которое наиболее точно описывает их роль в аэрофототопографии и в авиационном дистанционном зондировании вообще.

Нельзя не отметить, что точность определения пространственных координат, обеспечиваемая системой POS/AV, близка к своему теоретическому пределу. В источнике (Шануров, Мельников, 2001) утверждается, что для кинематических GPS измерений предельно достижимая точность фазовых измерений составляет 1/4-1/5 длины волны несущего колебания. С учетом того, что длина волны колебания L_1 составляет 19 см, мы получаем около 5 см, естественно, для наиболее благоприятной GPS обстановки.

Что касается, точности определения угловых координат, то их удобно представлять не в градусах, а в радианах. Легко проверить, что приведенные выше значения угловой точности примерно соответствуют значению 10^{-5} рад. Удобство использования радианной меры в этом случае объясняется тем, что при использовании авиационных методов съемки ошибка определения итоговых плановых координат наземного объекта Δ_{xy} , вызванная данной ошибкой угловых координат POS/AV и других аналогичных систем выражается простой формулой:

$$\Delta_{xy}=10^{-5} \cdot H,$$

где H – высота съемки.

Иными словами, если измеренные системой прямого геопозиционирования POS/AV линейные и угловые параметры принять в качестве элементов внешнего ориентирования аэрофотоснимка или набора лазерно-локационных данных, то можно рассчитывать, что ошибка определения плановых координат по таким данным составит около одной десятитысячной от высоты съемки, т.е. 5 см при $H=500$ м, 10 см при $H=1000$ м, и т.д.

Те, кто знакомы с традиционными фотограмметрическими методами взаимного и абсолютного ориентирования аэрофотоснимков, согласятся, что точность 10^{-5} рад для угловых элементов внешнего ориентирования в большинстве случаев является достаточной. В определенных случаях, значения угловых параметров с таким уровнем точности можно использовать *в качестве окончательных, т.е. не требующих никакой коррекции*, при выполнении процедур геопозиционирования различных видов аэросъемочных данных (прежде всего, конечно, лазерно-локационных и цифровых аэрофотографических). Имеют место утверждения, что данные современных интегральных навигационных систем достигли *фотограмметрического уровня точности*. Последнее утверждение выражает то обстоятельство, что хотя и средства определения всех параметров положения и угловой ориентации в пространстве движущихся платформ активно применяются на практике уже давно (например, в курсовой системе любого летательного аппарата), только сейчас появились системы, уровень точности выходных данных которых, позволяет решать геоинформационные, а не только пилотажно-навигационные задачи.

Теперь можно более строго определить понятие *системы прямого геопозиционирования*, которое часто используется для обозначения интегральных GPS/IMU комплексов, когда речь идет об их геодезическом или аэрогеодезическом применении. Здесь наиболее важен термин «*прямого*», так как термин «*геопозиционирование*» и его связь с навигацией подробно обсуждались выше. Итак, предлагаемый метод геопозиционирования является прямым, прежде всего, в сравнении со стандартной фотограмметрической процедурой геопозиционирования аэрофотоснимков, которая, как известно, включает следующий набор операций: выделение наземных опознаков и определение их геодезических координат, определение связующих точек на стереопарах, развитие и уравнивание фототриангуляционной сети, создание свободной модели и ее масштабирование. Т.е. при традиционном подходе общая задача геопозиционирования решается за счет последовательной реализации нескольких технологических процедур, каждая из которых достаточно трудоемка. Важно также заметить, что хотя и современные фотограмметрические компьютерные технологии обеспечивают значительную степень автоматизации, тем не менее, участие оператора практически на всех стадиях описанного цикла существенно, что может явиться дополнительным источником ошибок при недостаточной квалификации персонала.

Метод геопозиционирования данных съемки, предлагаемый интегральными GPS/IMU комплексами, практически полностью свободен от всех недостатков, связанных с сложностью традиционного подхода. С некоторой долей условности, можно даже говорить, что все численные параметры, необходимые для окончательного геопозиционирования данных съемки, возникают одновременно с самими этими данными непосредственно в ходе съемки. Последнее обстоятельство позволяет некоторым авторам говорить, что применение GPS/IMU систем обеспечивает *аппаратный* метод определения элементов внешне-

го ориентирования, противопоставляя его традиционному *фотограмметрическому* методу.

Перед тем как перейти к детальному исследованию принципов функционирования GPS/IMU систем, объясняющих их феноменальную точность, обсудим более детально прикладной аспект их применения. Выделим только самые главные положения:

1. Создание первых GPS/IMU систем в начале 90-х годов прошлого века явилось важнейшей технологической предпосылкой появления воздушных аэросъемочных лидаров в их нынешнем виде. Именно использование GPS/IMU данных позволило корректно представлять данные лидарной съемки в геодезических координатах с вполне определенными количественными гарантиями точности, т.е. способствовало превращению авиационных лидаров из средств дистанционного зондирования (в основном, военного назначения) в средства топографического картирования. Современный аэросъемочный лидар в столь значительной степени не мыслим без GPS/IMU комплекса, что даже конструктивно эти два прибора неотделимы друг от друга (точнее один включает в себя другой).

2. Идеология использования GPS/IMU систем при съемке с любых движущихся платформ (летательных аппаратов, морских и речных судов, поездов, вообще любых движущихся платформ) предполагает их полностью автономное функционирование от съемочного оборудования. Это чрезвычайно важное обстоятельство позволяет использовать такие системы в паре с практически любыми источниками геопространственных данных, в частности с любыми аэросъемочными средствами – аналоговыми и цифровыми аэрофотоаппаратами, радиолокаторами, инфракрасными и спектрозональными приборами и др. Так, нет никакой необходимости аппаратно «сопрягать» классический пленочный аэрофотоаппарат с GPS/IMU системой POS/AV 510. В процессе аэросъемки эти приборы могут работать совершенно независимо на аппаратном уровне. Необходимо обеспечить только их синхронность или более точно *временную определенность событий*, чего в нынешних условиях нетрудно добиться благодаря использованию GPS/GLONASS технологий. Применительно к аэрофотоаппарату последнее требование означает, что время совершения каждого аэрофотоснимка должно быть определено во временной шкале, единой с POS/AV комплексе. На практике это достигается регистрацией импульса срабатывания затвора аэрофотоаппарата через один из специальных EVENT входов комплекса. Аналогично может быть выполнена синхронизация с практически любым аэросъемочным средством в том числе а авиационным лидаром.

3. Использование GPS/IMU данных в аэрофототопографии представляется наиболее интересным как с теоретической, так и с практической точек зрения. Здесь возможны два подхода. В первом случае данные, поставляемые GPS/IMU комплексом используются непосредственно в качестве элементов внешнего ориентирования аэрофотоснимков для выполнения стереофотограмметрического восстановления рельефа, ортотрансформирования и окончательного геопозиционирования снимков. Во втором случае, GPS/IMU используются только в качестве начального приближения, по которому осуществляется поиск еще более точных значений элементов внешнего ориентирования. В любом случае, наличие GPS/IMU данных оказывается очень полезным – в первом случае вообще удастся избежать процедуры построения фототриангуляционной сети и ее уравнивание, а во втором случае, благодаря наличию достаточно точной априорной информации по элементам внешнего ориентирования в блоке или

маршруте, алгоритм уравнивания становится более устойчивым, а выходные данные более достоверными и точными.

4. Большое практическое значение имеет также то очевидное обстоятельство, что одна GPS/IMU система может обслуживать одновременно несколько аэросъемочных средств. Наиболее характерный пример это лидар и цифровой аэрофотоаппарат (рис. 31).



Рис. 31. Совместное использование аэросъемочного лидара ALTM и цифрового аэрофотоаппарата.

При такой схеме использования задействованным оказывается GPS/IMU комплекс, который штатно входит в состав лидара. Требуется только обеспечить взаимную неподвижность в процессе съемки сканерного блока и фотоаппарата, а также точно определить их взаимное пространственное положение (выставку). И того и другого можно добиться расположив оба прибора как можно ближе друг к другу на единой жесткой раме. Чем больше удаление аэросъемочного прибора от сенсора инерциальной системы, тем в общем случае для этого прибора менее пригодны GPS/IMU данные, из-за неизбежных деформаций корпуса летательного аппарата. Поэтому для крупных аэросъемочных летающих лабораторий, таких, например, как Ан-30, приходится использовать по одной GPS/IMU системе для каждого отдельного аэросъемочного прибора, что, конечно, значительно дороже.

4.3. Системы геопозиционирования GPS и ГЛОНАСС

Спутниковые системы позиционирования и задачи, решаемые с их помощью в геоинформационных технологиях.

Основным источником информации об изменениях картографической ситуации служили результаты топографических съемок и аэрофотосъемок. Первый метод слишком трудоемок, особенно для больших, труднодоступных территорий. Кроме того, информация, полученная из результатов топографических съемок, может устареть на этапе обработки данных полевых измерений вследствие быстрых изменений ситуации. Второй метод более оперативен и информативен, но дорог. Поэтому для оптимального решения проблемы постоянного обновления пространственной информации в ГИС требуется иной подход к ее сбору и представлению в цифровом виде. Наиболее перспективным решением этой проблемы является применение спутниковых технологий позиционирования GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система), что позволяет собирать не только пространственную информацию в цифровом виде, но и связанные с ней семантические данные. Метод сбора данных с помощью GPS и ГЛОНАСС приемников принципиально не отличается от традиционных полевых геодезических работ, но имеет ряд несомненных преимуществ, вытекающих из особенностей и технических возможностей спутниковой технологии позиционирования.

Помимо задач сбора и обновления информации, GPS-технологии решают и еще одну важную проблему геоинформационной системы – создание координатной основы цифровой карты, любой объект которой имеет вполне опреде-

ленные координаты, «привязанные» к жесткой координатной основе. Как правило, исходной координатной основой являются пункты ГГС (Государственной геодезической сети), более или менее равномерно расположенные на территории России. Но в ходе создания карт, обработки материалов аэрофотосъемки, оцифровки имеющихся карт возникает задача уточнения исходной координатной основы или ее трансформации. Эти проблемы решались и решаются развитием и сгущением геодезических сетей на основе более высокочасных. Но развитие геодезических сетей с применением традиционных приборов и методов слишком долгий и дорогой процесс, особенно там, где внешние условия (отсутствие прямой видимости на залесенной территории, в горах, городах) препятствуют проведению традиционных геодезических работ. Учитывая общую географическую ситуацию России, можно говорить о неэффективности применения традиционных методов геодезии на большей части российской территории. Поэтому применение GPS-технологий может существенно снизить затраты на проведение комплекса работ по созданию координатной основы будущей ГИС, а главное, повысить точность и надежность геодезической сети.

Это две основные задачи, которые, на наш взгляд, можно и нужно решать с помощью GPS-технологий применительно к географическим информационным системам.

Краткое описание спутниковых систем позиционирования

Системы глобального спутникового позиционирования GPS разработаны в США. Аналогичная российская спутниковая система носит название ГЛОНАСС.

Система GPS позволяет определять координаты в любой точке земного шара, в любое время, независимо от погодных условий. Точность определения координат колеблется (в зависимости от типов и классов аппаратуры, а также от методики измерений) от 100 м до 1 мм. Основные преимущества GPS-технологии по сравнению с традиционными геодезическими методами:

- не требует взаимной видимости между пунктами;
- работает в любых погодных условиях, в любое время, в любой точке Земли;
- обладает высокой точностью определения координат;
- имеет гораздо более высокое быстродействие;
- предоставляет трехмерные координаты в плане и по высоте.

На сегодняшний день действует уже второе поколение спутниковых систем позиционирования (ССП). К первому поколению можно отнести системы, разрабатывавшиеся до 70-х гг. Главными из них были NNSS (США) и ЦИКАДА (СССР). NNSS (Navy Navigation Satellite System) – система ВМФ США, позже получившая название TRANSIT. Работы по ее созданию были начаты в 1958 г., в эксплуатации находилась с 1964 г., с 1967 г. открыта для гражданского применения. К 1980 г. ее услугами пользовались многие тысячи потребителей разных государств. С ее помощью в 1984–1993 гг. в России проводились работы по созданию геодезической сети. Разработки системы ЦИКАДА начаты в 1967 г., в эксплуатацию введена в 1979 г. К первому поколению принадлежит также международная система обнаружения терпящих бедствие COSPAS-SARSAT.

Ко второму современному поколению относятся две системы: американская GPS (параллельное название NAVSTAR – Navigation Satellite Timing and Ranging) и российская ГЛОНАСС. Их разработка была начата в 70-х гг. прошлого века. Запуск спутников GPS первого блока начат в 1978 г. В 1983 г. система от-

крыта для гражданского использования. В 1991 г. сняты ограничения на продажу приемной аппаратуры в Россию (Серапинас, 1998).

Общие сведения о ГЛОНАСС

Глобальная Навигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС) – это уникальные технологии, плод многолетнего труда российских конструкторов и ученых. Она состоит из 24 спутников, которые, находясь в заданных точках на высоких орбитах, непрерывно излучают в сторону Земли специальные навигационные сигналы. Любой человек или транспортное средство, оснащенные специальным прибором для приема и обработки этих сигналов, могут с высокой точностью в любой точке Земли и околоземного пространства определить собственные координаты и скорость движения, а также осуществить привязку к точному времени. ГЛОНАСС является государственной системой, которая разрабатывалась как система двойного использования, предназначенная для нужд Министерства обороны и гражданских потребителей. Обязанности по управлению и эксплуатации системы ГЛОНАСС возложены на Министерство обороны Российской Федерации (Космические войска). В создании системы ГЛОНАСС принимали участие:

Министерство обороны Российской Федерации – головной заказчик системы, обеспечивающий контроль разработки и ее дальнейшее совершенствование, а также развертывание, поддержание и управление орбитальной группировкой ГЛОНАСС;

Научно-производственное объединение прикладной механики им. академика М.Ф. Решетнева (НПО ПМ) – головной разработчик системы, спутника ГЛОНАСС, автоматизированной системы управления спутниками и ее математического обеспечения;

Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (РНИИ КП) – головной разработчик наземного комплекса управления и бортовой аппаратуры спутника ГЛОНАСС;

Российский институт радионавигации и времени (РИРВ) – головной разработчик спутниковой и наземной аппаратуры системы синхронизации и времени;

Производственное объединение «Полет» (ПО «Полет») – разработчик и изготовитель спутника ГЛОНАСС, а также ряд других российских научных и производственных организаций.

Первый запуск спутника по программе ГЛОНАСС (Космос 1413) состоялся 12 октября 1982 года. Система ГЛОНАСС была официально принята в эксплуатацию 24 сентября 1993 года распоряжением Президента Российской Федерации 658 рпс с неполной комплектацией орбитальной структуры при условии развертывания штатной орбитальной структуры (24 спутника) в 1995 году. Постановлением Правительства РФ от 7 марта 1995 г. №237 были организованы работы по полному развертыванию орбитальной структуры (24 спутника), обеспечению серийного производства навигационной аппаратуры и представлению ГЛОНАСС в качестве элемента международной глобальной навигационной системы для гражданских потребителей.

Как работает система ГЛОНАСС?

Спутники системы ГЛОНАСС непрерывно излучают навигационные сигналы двух типов: навигационный сигнал стандартной точности (СТ) в диапазоне L1 (1.6 ГГц) и навигационный сигнал высокой точности (ВТ) в диапазонах L1 и L2 (1.2 ГГц). Информация, предоставляемая навигационным сигналом СТ, дос-

тупна всем потребителям на постоянной и глобальной основе и обеспечивает при использовании приемников ГЛОНАСС возможность определения:

- горизонтальных координат с точностью 50–70 м (вероятность 99.7%);
- вертикальных координат с точностью 70 м (вероятность 99.7%);
- составляющих вектора скорости с точностью 15 см/с (вероятность 99.7%);
- точного времени с точностью 0.7 мкс (вероятность 99.7 %).

Эти показатели точности можно значительно улучшить, если использовать дифференциальный метод навигации и/или дополнительные специальные методы измерений.

Сигнал ВТ предназначен в основном для потребителей МО РФ, и его не-санкционированное использование не рекомендуется. Вопрос о предоставлении сигнала ВТ гражданским потребителям до сих пор находится в стадии рассмотрения.

Для определения пространственных координат и точного времени требуется принять и обработать навигационные сигналы не менее чем от 4-х спутников ГЛОНАСС. При приеме навигационных радиосигналов ГЛОНАСС приемник, используя известные радиотехнические методы, измеряет дальности до видимых спутников и измеряет скорости их движения.

Одновременно с проведением измерений в приемнике выполняется автоматическая обработка содержащихся в каждом навигационном радиосигнале меток времени и цифровой информации. Цифровая информация описывает положение данного спутника в пространстве и времени (эфемериды) относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат. Кроме того, цифровая информация описывает положение других спутников системы (альманах) в виде кеплеровских элементов их орбит и содержит некоторые другие параметры. Результаты измерений и принятая цифровая информация являются исходными данными для решения навигационной задачи по определению координат и параметров движения. Навигационная задача решается автоматически в вычислительном устройстве приемника, при этом используется известный метод наименьших квадратов. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале Координированного всемирного времени (UTC).

Состав системы ГЛОНАСС: орбитальная структура спутников ГЛОНАСС

Полная орбитальная структура системы ГЛОНАСС состоит из 24 спутников, равномерно размещенных на трех орбитальных плоскостях.

Орбитальные плоскости разнесены относительно друг друга на 120° по абсолютной долготе восходящего узла. Плоскостям присвоены номера 1, 2, 3 с возрастанием в направлении вращения Земли. Номинальные значения абсолютных долгот восходящих узлов идеальных плоскостей, зафиксированных на 00 часов Московского времени 1 января 1983 года, составляют: $215^\circ 15' 00'' + 120^\circ (i - 1)$, где i – номер плоскости ($i = 1, 2, 3$).

Номинальные расстояния между соседними спутниками ГЛОНАСС в орбитальной плоскости по аргументу широты составляют 45° .

Средняя скорость прецессии орбитальных плоскостей равна (-0.00059251) радиан/сутки.

Спутникам 1-й плоскости присвоены номера 1–8, 2-й плоскости – 9–16, 3-й плоскости – 17–24, с возрастанием против направления движения спутника.

Аргументы широты спутников с номерами $j = N + 8$ и $j = N + 16$ отличаются от аргументов широты спутников с номерами $j = N$ и $j = N + 8$ на $+15^\circ$ соответственно, (где $N = 1...8$) и составляют на 00 часов Московского времени 1 января 1983 года: $145^\circ 26' 37'' + 15^\circ (27 - 3j + 25j^*)$, где $j = (1...24)$ - номер спутника; $j^* = E((j - 1)/8)$ - т.е. целая часть числа $(j - 1)/8$.

Другими словами, орбитальные плоскости сдвинуты относительно друг друга по аргументу широты на 15° .

Максимальные уходы спутников относительно идеального положения в орбитальной плоскости не превышают 5° за пятилетний период.

Интервал повторяемости трасс движения спутников и зон радиовидимости для наземных средств - 17 витков (7 суток, 23 часа 27 минут 27 секунд). Драконический период обращения спутника ГЛОНАСС - 11 часов 15 минут 44 секунды. Высота орбиты - 19100 км (18840...19440 км). Наклонение орбиты - 64.8 ± 0.3 град. Эксцентриситет - 0 ± 0.01 .

Такая конфигурация орбитальной структуры позволяет обеспечивать глобальную и непрерывную зону действия системы, а также оптимальную геометрию взаимного расположения спутников для повышения точности определения координат.

Выведение спутников ГЛОНАСС на орбиту осуществляется с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя "Протон", разгонного блока 11С861-01 и СЗБ 11Ф639.М0000-0-01. Одним носителем одновременно выводятся три спутника ГЛОНАСС.

Перевод каждого спутника в заданную точку орбитальной плоскости производится с помощью собственной двигательной установки.

Спутник ГЛОНАСС

Спутник ГЛОНАСС конструктивно состоит из цилиндрического гермоконтейнера с приборным блоком, рамы антенно-фидерных устройств, приборов системы ориентации, панелей солнечных батарей с приводами, блока двигательной установки и жалюзи системы терморегулирования с приводами. На спутнике также установлены оптические уголковые отражатели, предназначенные для калибровки радиосигналов измерительной системы с помощью измерений дальности до спутника в оптическом диапазоне, а также для уточнения геодинамических параметров модели движения спутника. Конструктивно уголковые отражатели формируются в виде блока, постоянно отслеживающего направление на центр Земли. В состав бортовой аппаратуры входят:

- навигационный комплекс;
- комплекс управления;
- система ориентации и стабилизации;
- система коррекции;
- система терморегулирования;
- система электроснабжения.

Навигационный комплекс обеспечивает функционирование спутника как элемента системы ГЛОНАСС. В состав комплекса входят: синхронизатор, формирователь навигационных радиосигналов, бортовой компьютер, приемник навигационной информации и передатчик навигационных радиосигналов.

Синхронизатор обеспечивает выдачу высокостабильных синхрочастот на бортовую аппаратуру, формирование, хранение, коррекцию и выдачу бортовой шкалы времени.

Формирователь навигационных радиосигналов обеспечивает формирование псевдослучайных фазоманипулированных навигационных радиосигналов, содержащих дальномерный код и навигационное сообщение.

Комплекс управления обеспечивает управление системами спутника и контролирует правильность их функционирования. В состав комплекса входят: командно-измерительная система, блок управления бортовой аппаратурой и система телеметрического контроля.

Командно-измерительная система обеспечивает измерение дальности в запросном режиме, контроль бортовой шкалы времени, управление системой по разовым командам и временным программам, запись навигационной информации в бортовой навигационный комплекс и передачу телеметрии.

Блок управления обеспечивает распределение питания на системы и приборы спутника, логическую обработку, размножение и усиление разовых команд.

Система ориентации и стабилизации обеспечивает успокоение спутника после отделения от ракеты-носителя, начальную ориентацию солнечных батарей на Солнце и продольной оси спутника на Землю, затем ориентацию продольной оси спутника на центр Земли и нацеливание солнечных батарей на Солнце, а также стабилизацию спутника в процессе коррекции орбиты. В системе используются прибор на основе инфракрасного построения местной вертикали (для ориентации на центр Земли) и прибор для ориентации на Солнце. Погрешность ориентации на центр Земли не хуже 3° , а отклонение нормали к поверхности солнечной батареи от направления на Солнце – не более 5° . Для минимизации возмущений на движение центра массы спутника разгрузка двигателей маховиков производится с помощью магнитопровода. В качестве исполнительного органа при осуществлении успокоения и стабилизации спутника во время выдачи импульса коррекции используется двигательная установка. Режим успокоения, в результате которого происходит гашение угловых скоростей, включается в зоне радиовидимости.

В режиме начальной ориентации на Солнце осуществляется разворот спутника относительно продольной оси с помощью управляющих двигателей-маховиков до появления Солнца в поле зрения прибора ориентации на Солнце, который установлен на панели солнечных батарей.

Режим ориентации на Землю начинается из положения ориентации на Солнце путем разворота спутника с помощью двигателей-маховиков вдоль оси, ориентированной на Солнце, до появления Земли в поле зрения прибора ориентации на центр Земли. В штатном режиме обеспечивается ориентация оси спутника вместе с антеннами на центр Земли с помощью управляющих двигателей-маховиков по сигналам с приборов ориентации на центр Земли, ориентация солнечных батарей на Солнце путем разворота спутника вместе с солнечными батареями с помощью управляющего двигателя-маховика по одному каналу и разворотов панелей батарей относительно корпуса спутника с помощью привода вращения солнечных батарей по другому каналу по сигналам приборов ориентации на Солнце.

В режиме ориентации перед проведением коррекции и стабилизации спутника во время выдачи импульса коррекции отслеживание ориентации на Солнце не производится.

Система коррекции обеспечивает приведение спутника в заданное положение в плоскости орбиты и его удержание в данных пределах по аргументу широты. Система включает двигательную установку и блок управления ею.

Двигательная установка состоит из 24 двигателей ориентации с тягой 10 г и двух двигателей коррекции с тягой 500 г.

Система терморегулирования обеспечивает необходимый тепловой режим спутника. Регулирование тепла, отводимого из гермоконтейнера, осуществляется жалюзи, которые открывают или закрывают радиационную поверхность, в зависимости от температуры газа. Отвод тепла от приборов осуществляется циркулирующим газом с помощью вентилятора.

Система электроснабжения включает солнечные батареи, аккумуляторные батареи, блок автоматики и стабилизации напряжения. Начальная мощность солнечных батарей – 1600 Вт, площадь – 17.5 м².

При прохождении спутником теневых участков Земли и Луны питание бортовых систем осуществляется за счет аккумуляторных батарей. Их разрядная емкость составляет 70 ампер-часов.

Для обеспечения надежности на спутнике устанавливаются по два или по три комплекта основных бортовых систем.

Таким образом, на спутник ГЛОНАСС возложено выполнение следующих функций:

- излучение высокостабильных радионавигационных сигналов;
- прием, хранение и передача цифровой навигационной информации;
- формирование, оцифровка и передача сигналов точного времени;
- ретрансляция или излучение сигналов для проведения траекторных измерений для контроля орбиты и определения поправок к бортовой шкале времени;
- прием и обработка разовых команд;
- прием, запоминание и выполнение временных программ управления режимами функционирования спутника на орбите;
- формирование телеметрической информации о состоянии бортовой аппаратуры и передача ее для обработки и анализа наземному комплексу управления;
- прием и выполнение кодов/команд коррекции и фазирования бортовой шкалы времени;
- формирование и передача "признака неисправности" при выходе важных контролируемых параметров за пределы нормы.

Управление спутниками ГЛОНАСС осуществляется в автоматизированном режиме.

Выведение спутников ГЛОНАСС на орбиту

Выведение спутников ГЛОНАСС на орбиту осуществляется носителем тяжелого класса "ПРОТОН" с разгонным блоком с космодрома Байконур. Носитель одновременно выводит три спутника ГЛОНАСС.

Схема выведения включает:

- выведение космической головной части на промежуточную круговую орбиту с высотой ~200 км;
- переход на эллиптическую орбиту с перигеем ~200 км, апогеем ~19100 км и наклоном 64.3°.

Перевод каждого спутника в заданную точку орбитальной плоскости проводится с помощью спутниковой двигательной установки.

Точность приведения в рабочую точку орбиты:

- по периоду обращения – 0.5 с;
- по аргументу широты – 1°;

- по эксцентриситету ~ 0.01 ;
- по наклонению орбиты $\sim 0.3^\circ$.

Наземный комплекс управления

Управление орбитальным сегментом ГЛОНАСС осуществляет наземный комплекс управления. Он включает в себя Центр управления системой (г. Краснознаменск, Московская область) и сеть станций слежения и управления, рассредоточенных по территории России. Наземный комплекс управления осуществляет сбор, накопление и обработку траекторной и телеметрической информации обо всех спутниках системы, формирование и выдачу на каждый спутник команд управления и навигационной информации, а также контроль качества функционирования системы в целом.

Потребители системы ГЛОНАСС

Основными областями применения системы ГЛОНАСС являются: Министерство обороны, транспорт (космический, воздушный, морской, речной, наземный), прикладные задачи (геодезия, картография, океанография, геофизика, земле- и лесоустройство, геология, добыча полезных ископаемых, рыболовство, экология), научные задачи (фундаментальные исследования, прикладные экспериментальные исследования) (Общие сведения, 2005).

Подсистемы спутниковых систем позиционирования

Выделяют три главные подсистемы (сегменты): наземного контроля и управления (НКУ), созвездия космических аппаратов (КА) и аппаратуры пользователей (АП).

Подсистема НКУ состоит из станций слежения за КА, службы точного времени, главной станции с вычислительным центром и станций загрузки данных на борт спутников. Спутники проходят над контрольными пунктами дважды в сутки. Собранную об орбитах информацию обрабатывают и прогнозируют координаты спутников (эфемериды). Эти и другие данные с наземных станций загружают на борт каждого спутника.

Приемные устройства, составляющие подсистему аппаратуры пользователей, на сегодняшний день, достигли высокого совершенства. Особенно широкое практическое распространение получили приемники GPS (рис. 32, 33). Их выпуском в настоящее время в мире занимаются более 50 фирм. В России известны фирмы из США (Magellan, Trimble, Ashtech, Garmin, Leica), Франции (Sercel), Швеции (Geotronics) и др. В настоящее время работают приемные устройства, одновременно использующие спутники GPS и ГЛОНАСС. Так, к примеру, новый приемник GG24 Ashtech имеет 12 каналов для наблюдений спутников каждой системы.

GPS-оборудование Trimble Navigation для ГИС-приложений

Американская фирма Trimble Navigation, являющаяся лидером на рынке GPS-оборудования, выпускает различные типы приемников для разнообразных приложений, в том числе и использующих ГИС.

Приемники геодезического класса можно разделить на два основных типа: – точные фазовые приемники семейства 4000 и 4600, применяемые в геодезии, геодинимике, позволяющие определять координаты с максимальной точностью до 5 мм;



Рис. 32. Портативные приемные устройства подсистемы аппаратуры пользователей спутниковых систем позиционирования GARMIN GPSmap 60C и 60CS.



Рис. 33. Стационарный интегрированный картплоттер / эхолот GARMIN GPSmap 376C.

– приемники для картографии и ГИС семейства PathFinder, позволяющие определять координаты с максимальной точностью до 10 см.

Приемники первого типа применяются в основном для создания геодезических сетей, служащих координатной основой цифровых карт, обычно используются на начальном этапе, например для привязки аэрофотоснимков перед их трансформированием, сканированием и векторизацией. Также точные приемники могут быть задействованы в том случае, когда цифровая карта территории разорвана на отдельные фрагменты (планшеты) и в процессе ее «сшивки» ошибки по краям достигают значительных величин. В большинстве случаев основной причиной этих ошибок является различие координатных систем на различных планшетах или ошибки, внесенные полевыми геодезическими измерениями. С помощью точных GPS приемников серии 4000 и 4600, определяющих координаты с сантиметровой точностью, вся оцифрованная территория может быть в сжатые сроки покрыта плотной сетью связанных пунктов, жестко посаженной на исходную геодезическую основу. Практически все инструментальные геоинформационные системы, используемые в России, имеют встроенный аппарат для «сшивания» планшетов и устранения ошибок при введении жесткой координатной основы. Стоимость подобных GPS-систем составляет от 20 до 100 тыс. долларов США. Наиболее популярным инструментом является комплект приемников серии 4600LS. Методика работы с GPS-приемниками заключается в полевых измерениях (полностью автоматизированных) и обработке данных в камеральных условиях, с окончательным результатом в виде файла, содержащего каталог координат определяемых пунктов в системе исходного каталога.

Приемники второго типа могут применяться для сбора данных в уже существующие ГИС в целях внесения оперативных изменений и дополнений в базы данных. Методика съемки предусматривает работу с тремя типами объектов: точечными (деревья, столбы, колодцы, углы строений, заборов и пр.), линейными (лесные просеки, дороги, ЛЭП, трубопроводы и пр.), площадными (таксационные выделы, лесосеки, гари, строения, земельные участки, сельскохозяйственные наделы и пр.). В процессе измерений объект «привязывается» к местной системе координат с точностью до 50 см, что удовлетворяет требованиям масштаба 1:5000. Координаты точечных объектов могут быть определены в местной системе с точностью до 10 см.

PathFinder позволяет произвести обработку «сырых» измерений, полученных в поле, трансформировать их в требуемую систему координат и преобразовать выходной файл в формат наиболее популярных ГИС (ARC/INFO, Mapinfo, CADdy и пр.), или форматы DXF и DWG. Таким образом, измерения, сделанные в поле, преобразуются в цифровую форму и могут быть наложены на имеющуюся цифровую карту данной территории. Метод позволяет полностью исключить трудоемкие этапы создания цифровой карты, имеющие место при традиционных геодезических измерениях (длительные полевые работы, обработка результатов, рисовка планшета, дигитализация или векторизация сканированного изображения). Семейство PathFinder позволяет использовать неограниченное количество передвижных приемников с одним базовым (неподвижным), причем радиус действия базового приемника может составлять до 200 км.

Как показала наша практика, наиболее популярный представитель семейства PathFinder – 8 или 12 канальный приемник ProXR, весьма удобен в полевых условиях и при работе под пологом леса (рис. 33).

Перспективы развития спутниковых технологий позиционирования в геоинформационных приложениях

Наиболее перспективным направлением GPS-технологий и их приложений в ГИС, геодезии и картографии в целом можно считать дифференциальное позиционирование – DGPS, позволяющее повысить точность навигационных определений до 0.5 м непосредственно в лесу.

Для нормального функционирования системы DGPS необходимо наличие на территории России базовых станций, транслирующих дифференциальные поправки и создающих так называемое дифференциальное поле. В этом случае пользователь GPS-приемников для ГИС может получать необходимую точность измерений без последующей обработки, используя всего лишь один приемник (экономя до 50% средств). Используя новые программно-аппаратные средства фирмы TRIMBLE, можно с помощью системы DGPS производить съемку для ГИС непосредственно в лесу с наложением данных на готовую цифровую карту местности с одновременным введением необходимых условных знаков, обозначений названий, атрибутов и описаний объектов, привязанных к местной системе координат с точностью до полуметра. Подобную возможность предоставляет программно-аппаратный комплекс Aspen GPS, представляющий собой полевой защищенный компьютер типа PenBook, использующий для ввода информации клавиатуру или световое перо, что наиболее удобно в полевых условиях, и GPS-приемник (ProXL или PCMCIA-карта). Для приема дифференциальных поправок используется радиомодем.

В сентябре 2005 года TRIMBLE анонсировал выпуск модифицированных приемников ProXR. Этот приемник представляет собой усовершенствованную модель приемника ProXL с одним важным дополнением: вместо GPS-антенны в новом приемнике используется совмещенная антенна для приема сигналов GPS-спутников и NavBeacon для приема дифференциальных поправок от базовых дифференциальных станций, вещающих в диапазоне средних волн.

Важнейшее направление развития GPS-технологий в геодезии, картографии и ГИС – цифровая воздушная фото-, видео- и лазерная съемка с использованием GPS-приемников для определения координат съемочной камеры в процессе полета. Как уже отмечалось выше, данная методика съемки местности позволяет практически в полете получать цифровую модель местности в

растровом виде с привязкой к местной системе координат. Подобная технология цифровой съемки местности позволяет получать изображение с разрешением до 5–15 см и полностью исключить несколько трудоемких этапов создания карт, присущих традиционной аэрофотосъемке и, следовательно, получить существенную экономическую выгоду (Медведев, 2003).

Это основные направления дальнейшего развития новых методов геодезии, картографии и ГИС, в которых технологии глобального спутникового позиционирования могут найти самое широкое использование применительно к решению целого ряда задач мониторинга природных систем и техногенных объектов уже в самом ближайшем будущем (Данилин и др., 1998, Kulešis et al., 2001, Шануров, Мельников, 2001, Медведев, 2003, Falkenried, 2004, Yu et al., 2004).

4.4. Основные принципы функционирования GPS/IMU систем

Перейдем обсуждению самого интересного вопроса: «Как работают такие системы, и как они могут обеспечить такой высокий уровень точности?» Ответ начнем с опровержения заблуждений, главным из которых, применительно к теме обсуждения, является следующее: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS, а в равной степени ГЛОНАСС и Galileo позволяют определять только положение, но не ориентацию в геодезическом пространстве. Из этого делается ложный вывод – одиночный GPS приемник принципиально ничем не может помочь инерциальной системе в повышении точности определения параметров угловой ориентации, просто потому что он определяет координаты, а не углы.

Подобные доводы выглядят разумными, но только на первый взгляд. В действительности все происходит как раз наоборот. Всю первую половину 20-го века инерциальные системы активно применялись для целей навигации, но никто был не в состоянии предложить эффективного метода парирования собственных неустранимых погрешностей инерциальной системы, к которым, как известно, относятся следующие:

- 1) собственные шумы;
- 2) дрейф («уход»);
- 3) масштабные ошибки (*scale factor misalignments*).

Именно появление в конце 20-го века систем спутниковой навигации, позволило создать алгоритмы, которые позволяют эффективно оценить значение всех составляющих погрешностей инерциальной системы (в том числе в реальном времени) и, следовательно, добиться высокого уровня определения параметров угловой ориентации в современных GPS/IMU системах.

Не хотелось бы также оставить без комментариев заявления типа того, что GPS средствами невозможно измерить никакие угловые параметры с приемлемой точностью. Такие заявления опровергаются опытом геодезической и аэро-съемочной деятельности многих компаний. На практике три GPS приемника, работающих в фазовом режиме, при благоприятных обстоятельствах обеспечивают точность определения угловых параметров (опять же, в том числе и в реальном времени) на уровне лучше 1 мрад. Желаясь ознакомиться с этим вопросом более подробно можно порекомендовать статью в журнале Геопрофи №3 за 2005 г. «Методика высокоточного RTK-позиционирования морских судов».

Однако, на практике реализация такого подхода сдерживается рядом причин, главными из которых являются следующие:



Рис. 34. Аэросъемочный комплекс FLI-MAP компании FUGRO с двумя разнесенными GPS антеннами.

1) габариты комплекса, реализующего такой подход измерения, оказываются значительными (рис. 34), что само по себе может составлять серьезную проблему.

2) Выдаваемые данные чрезвычайно критичны к качеству принимаемого GPS сигнала.

Эти два обстоятельства и предопределили недолгую судьбу подобных устройств. В настоящее время они полностью вытеснены приборами, работа которых построена на

интегрировании GPS и IMU данных.

Структурная схема навигационного комплекса GPS/IMU типа представлена на рисунке 35.

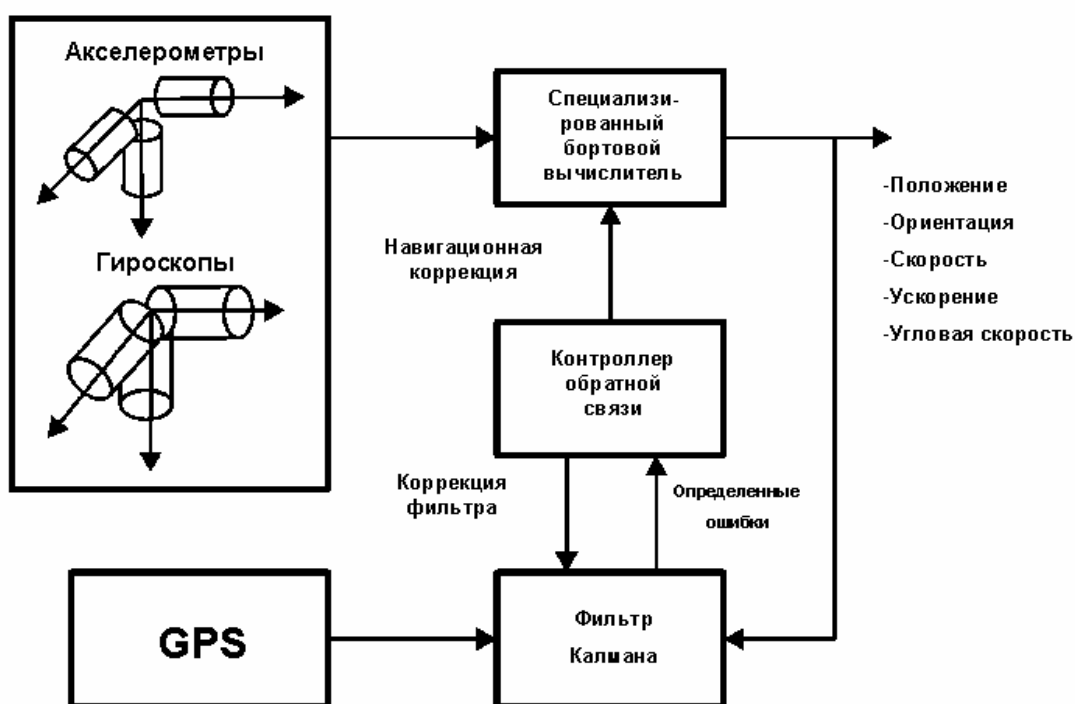


Рис. 35. Структурная схема навигационного комплекса GPS/IMU типа.

Навигационный комплекс включает три основных компонента:

1) двухчастотный (L1/L2) GPS приемник с опцией слежения за фазой несущей;

2) встроенный бортовой вычислитель, который реализует функции контроллера обратной связи и аппаратного или программного фильтра Калмана;

3) инерциальная система (IMU).

Используя эти компоненты, навигационный комплекс обеспечивает получение интегрированного навигационного решения для траектории и ориентации носителя.

Основные принципы, используемые при получении интегрированного навигационного решения:

1) инерциальная система предоставляет данные в специализированные навигационный вычислитель, который вырабатывает данные по положению, скорости и ориентации. Существенным является тот факт, что инерциальная система

является жестко связанной с корпусом носителя, точнее с рамой, на которую крепиться то, или иное аэросъемочное средство;

2) GPS приемник используется для корректирования инерциального навигационного решения путем оценки погрешностей, а также для инициализации интеграционного процесса. При отсутствии GPS обеспечения, инерциальное навигационное решение остается без GPS коррекции;

3) используется замкнутая система контроля погрешностей, обеспечивающая оптимальное управление.

Основная алгоритмическая нагрузка возложена на специализированный бортовой вычислитель (СБВ), который в реальном времени получает решение уравнений движения Ньютона, описывающих положение, скорость и ориентацию сенсора IMU в СК Земного эллипсоида WGS-84 с учетом ее вращения в физическом пространстве. Вычисления выполняются на основе данных, получаемых с помощью гироскопов и акселерометров, которые являются механически жестко связанными с корпусом носителя. По этой причине определяемые значения координат, скоростей и углов ориентации для сенсора IMU могут быть аналитически трансформированы в любую другую точку носителя, в частности, в точку центра сканирующего зеркала локатора. Для корректного перехода необходимо знание параметров взаимного положения и ориентации точки центра сканирования и сенсора IMU.

Работа в дифференциальном GPS режиме также может обеспечивать выработку навигационного решения в реальном времени. Однако для этого необходимо использовать режим Real Time Kinematics (RTK), который крайне трудно реализовать в условиях съемки с использованием летательных аппаратов. На практике реализация дифференциального GPS режима чаще предполагает съемку с использованием одной или нескольких референтных (базовых) GPS станций, по данным которых в процессе наземной постобработки выполняется дифференциальная коррекция траектории носителя, зарегистрированная бортовым GPS приемником. Именно эта траектория используется при реализации алгоритма определения полного навигационного решения.

Режим полномасштабной наземной постобработки GPS и инерциальных данных является дальнейшим развитием дифференциального GPS режима. Он может быть реализован только в камеральных условиях. В этом режиме для определения траектории носителя используются как GPS данные после процедуры дифференциальной коррекции, так и инерциальные данные, поставляемые гироскопами и акселерометрами.

При описании принципов функционирования БНК необходимо четко выделять два уровня информационного обмена внутри комплекса:

Базисный информационный уровень составляют данные, непосредственно вырабатываемые входящими в комплекс GPS приемником и инерциальной системой. Здесь важно подчеркнуть, что функционирование этих устройств на физическом уровне происходит независимо. Информация, получаемая на этом уровне, используется двояко. Во-первых, на основе этой информации выполняется инициализация системы, и во-вторых она подвергается алгоритмической обработке на следующем информационном уровне.

Уровень генерации навигационного решения. На этом уровне с помощью аппаратных средств, либо с помощью аналогичных программных процедур вырабатывается законченное навигационное решение, включающее координаты траектории носителя и параметры его угловой ориентации для произвольного

момента времени. Получаемые на этой стадии результаты, естественно, опираются на данные, накопленные на базисном уровне.

Выше уже неоднократно подчеркивалось, что навигационные решения надлежащего качества могут быть получены именно в результате взаимодействия или последующей совместной обработки данных от двух основных источников - системы спутникового геопозиционирования (GPS, ГЛОНАСС) и инерциальной системы. Можно сказать, что обе эти системы в некотором смысле решают одну и ту же навигационную задачу – определяют в некоторой заранее определенной системе координат траекторию движения носителя. Принципиально новое качество данных, прежде всего точность, рождается именно в результате совместного анализа обеих траекторий, в результате чего интегральное навигационное решение заимствует основные преимущества и подавляет основные недостатки обеих базовых систем. Интегральное навигационное решение оказывается свободным как от дрейфа (благодаря наличию GPS и/или ГЛОНАСС), так и от высокочастотных помех (благодаря наличию инерциальной системы).

Было бы весьма полезно обсудить основные принципы современной инерциальной навигации, которые, как уже неоднократно подчеркивалось, в основном реализованы и в интегральных навигационных комплексах GPS/IMU типа. Предполагается, что с вопросами использования систем спутниковой навигации читатели хорошо знакомы.

В наиболее общей форме можно определить инерциальную систему как ортогональную *триаду гироскопов и акселерометров*, выполняющих непосредственные геопространственные измерения и вычислительный блок, осуществляющий алгоритмические преобразования данных непосредственных измерений.

Как было отмечено выше, в современных GPS/IMU системах используются в основном не механические, а кольцевые лазерные или волоконно-оптические гироскопы, имеющие существенно отличающийся принцип действия. Однако для целей данной публикации будет достаточно считать, что гироскоп любого типа позволяет определять ориентацию в геодезическом пространстве в любой момент времени независимости от местоположения, скорости и других параметров носителя. Точность поставляемых гироскопом данных во всех случаях подвержена деградации («ухода») с течением времени. Величина «ухода» значительна и может составлять до нескольких градусов в час.

Акселерометры предназначены для измерения линейных ускорений. В равной степени они пригодны для измерений сил, так как согласно ньютоновской механике сила и ускорение есть разные проявления одного и того же физического явления.

С учетом сделанных замечаний рассмотрим основные процедуры, выполняемые в навигационном комплексе на базисном информационном уровне.

Вычисление крена и тангажа посредством акселерометров

Обладая чувствительностью к земной гравитации, акселерометры обеспечивают измерение долговременных значений крена и тангажа по схеме, изображенной на рисунке 36. Рассмотрим акселерометр, рабочая ось которого совпадает со строительной осью *OX* носителя.

Полагая ускорение носителя равным нулю, мы можем вычислить угол тангажа как:

$$P = \arcsin(-a_s/g)$$

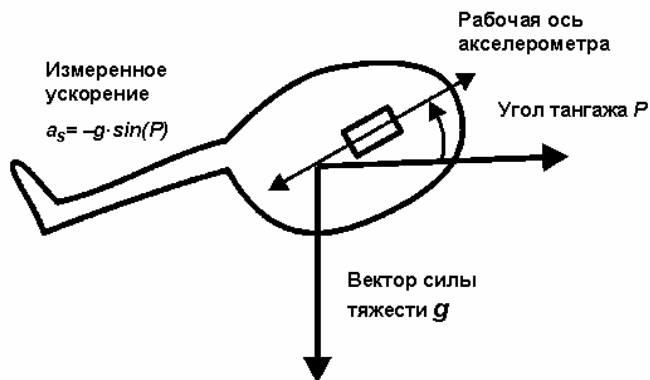


Рис. 36. Измерения величин крена и тангажа посредством акселерометров.

Аналогично вычисляется угол крена. Таким образом, два из трех углов, определяющих угловую ориентацию, могут быть определены только за счет использования акселерометров. Это совершенно очевидный результат, принимая во внимание то обстоятельство, что углы крена и тангажа по изначально определены по отношению к вертикали, которая в нашем случае соответствует вектору тягести.

Однако, здесь следует признать, что описанный метод не может быть использован на практике сам по себе, так как в описанной схеме существенно состояние покоя, в котором должна находиться система. Если это условие не соблюдается, то совершенно очевидно, что *отсутствует принципиальная возможность* выделить вектор ускорения свободного падения из суммы всех ускорений, которую испытывает система.

Вычисление изменений ориентации с использованием гироскопов

Как отмечено выше, в конструкции навигационного комплекса используются оптические гироскопы, обладающие чувствительностью к изменениям ориентации т.е. к величине угловой скорости. Интегрирование (численное суммирование) значений, измеренных гироскопами, обеспечивает определение кратковременных угловых перемещений в физическом пространстве.

Необходимо отметить, что угловые перемещения в геодезическом (например, WGS-84) и физическом пространствах не тождественны. Для корректного перехода к геодезическому пространству должны быть учтены следующие факторы:

- вращение Земли с угловой скоростью $15^\circ/\text{час}$;
- транспортная норма, определяемая как изменение ориентации в физическом пространстве при движении. Скорость такого изменения равна V_H/R , где V_H – горизонтальная составляющая вектора скорости, а R – радиус Земли;
- внутренние ошибки гироскопа – дрейф, ошибка масштабного коэффициента, случайный шум.

Что касается первых двух упомянутых факторов, то они могут быть учтены аналитическими методами при вычислении интегрального навигационного решения. Однако внутренние ошибки гироскопа полностью смешаны с истинными значениями и не могут быть отделены от них на базисном информационном уровне. В процессе дальнейшей обработки эта смесь подвергается интегрированию, в результате чего возникает ошибочное угловое смещение, которое, таким образом, приобретает долговременный характер (рис. 37). Точная оценка величины ошибочного углового смещения и его устранение осуществляется при генерации навигационного решения на последующем навигационном уровне.

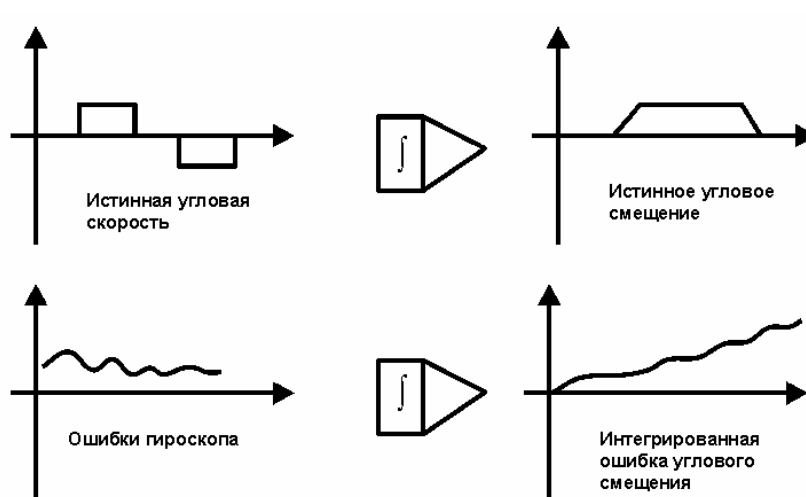


Рис. 37. Схема определения углового смещения.

Вычисление курсового угла

Метод измерения величины курсового угла, используемый в GPS/IMU системах также можно считать классическим.

Курсовой угол в процессе инициализации определяется путем наблюдения компонентов вектора вращения Земли по «горизонтальным»

гироскопам. Данные «вертикального» гироскопа в процессе съемки интегрируются по времени для определения изменений курсового угла.

Определение координат пространственного положения с помощью акселерометров

Наличие акселерометров позволяет определять величины линейных ускорений, которые испытывает система. Положим, что ориентация системы в физическом пространстве определена точно с помощью методов, описанных выше. Тогда имеется возможность выделить вектор силы гравитации среди всей суммы векторов сил, приложенных к системе и, следовательно, оценить величину ускорения. Численное интегрирование ускорения позволяет перейти к скорости, а повторное интегрирование к перемещению. Таким образом, с учетом представленных выше замечаний и правила перехода из физического пространства в географическое, появляется принципиальная возможность оценить геодезические координаты системы в любой момент времени.

4.5. Интегральное навигационное решение

Принципы образования интегрального навигационного решения

Из представленного выше краткого описания основных принципов инерциальной навигации видно, что использование только триад гироскопов и акселерометров позволяет в принципе решить все основные навигационные задачи. В реальных GPS/IMU системах используется детальная *модель динамики системы*, которая включает набор алгоритмов решения уравнений движения Ньютона в геоцентрической системе координат, а также параметрическую модель ошибки IMU, которая описывает:

- ошибки инерциального измерения позиции, скорости и ориентации;
- дрейф гироскопа и ошибки масштабного коэффициента;
- дрейф акселерометра и ошибки масштабного коэффициента и другие параметры.

Создание *модели динамики системы* весьма нетривиальная задача и исследованиям по этому направлению различные компании уделяют большое внимание.

Принципиально важно, что все ошибки IMU описываются системой алгебраических и дифференциальных уравнений с конечным числом параметров.

Т.е. считается, что поведение системы было бы полностью определено используемыми уравнениями движения, если бы были известны точные значения этих численных параметров. Проблема состоит как раз в том, что численные значения этих параметров неизвестны априорно и, кроме того, они могут меняться с течением времени. Общее количество таких параметров может достигать нескольких десятков.

Главная идея методики работы GPS/IMU систем состоит в том, что значения неизвестных параметров могут быть определены путем решения системы уравнений, составляющих модель динамики системы, что может быть выполнено исключительно благодаря наличию GPS, выступающего в качестве независимого источника данных. Иными словами наличие некомпенсированных ошибок IMU приведет к появлению рассогласований траекторий движения системы, исчисленных раздельно по GPS и IMU данным. Для получения корректного интегрального навигационного решения подбираются такие значения параметров модели динамики системы, при которых обе траектории будут тождественны. Это достигается описанным ниже способом.

Совместный анализ данных GPS и инерциальной системы

Инерциальная система и GPS являются взаимно дополняющими источниками навигационных данных, потому что их динамические ошибки, имея различную природу и спектральный состав, могут быть разделены, в результате чего погрешности обеих систем могут быть взаимно компенсированы. Более того, инерциальная система обеспечивает поддержку навигационного решения даже в случае полной потери GPS сигнала. Смешанное решение является непрерывным и, следовательно, сохраняет целостность данных (рис. 38).

Интегральное навигационное решение может быть получено как в реальном времени, так и в процессе наземной постобработки. В любом случае, в ходе обработки программное обеспечение моделирует работу бортового инерциальной системы в рамках замкнутого контура обмена данными с GPS, фильтром Калмана, а также с контроллером ошибки IMU.

По сравнению с режимом построения навигационного решения реального времени, обработка навигационных данных в камеральных условиях позволяет добиться существенно лучших результатов по точности. Программное обеспечение включает рекурсивный алгоритм сглаживания, который обеспечивает получение «траектории наибольшей достоверности». Эта траектория является наилучшей для уровня точности данных, получаемых GPS и инерциальной системой.

Заключительные замечания по главе

В заключении данной главы хотелось бы еще раз повторить те факторы, которые, по нашему мнению, определили успех применения интегральных навигационных комплексов во многих системах аэрофототопографии и авиационного дистанционного зондирования:

- 1) возможность одновременного решения задач навигации и прямого геопозиционирования данных съемки;
- 2) точность, достаточная для решения большинства задач по крупномасштабному топографическому картографированию;
- 3) получения навигационного решения, как в процессе наземной постобработки, так и в реальном времени;
- 4) сравнительная простота реализации;
- 5) экономическая целесообразность.

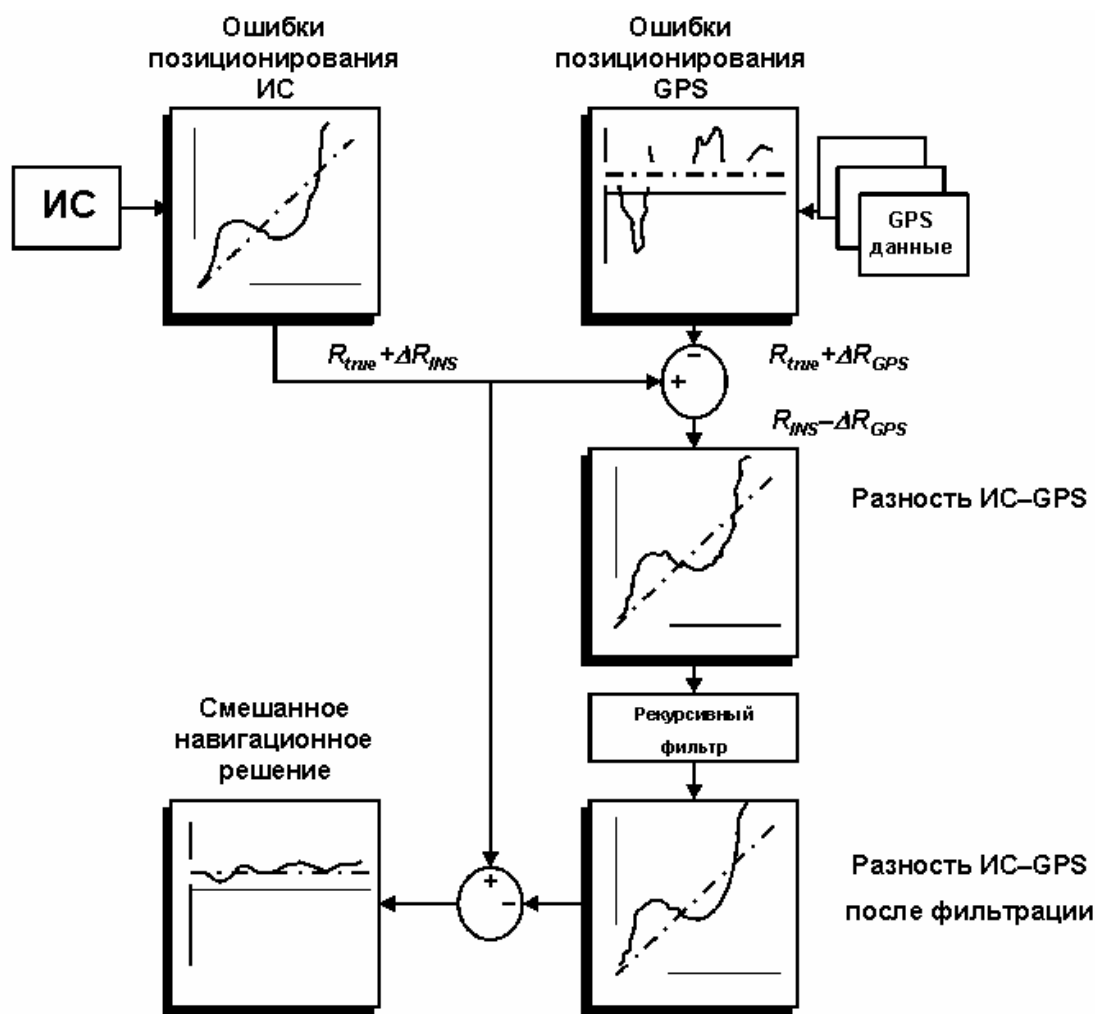


Рис. 38. Схема образования интегрального навигационного решения в реальном времени за счет совместной обработки данных GPS и инерциальной системы.

Справедливости ради необходимо отметить, что начало активного применения в аэросъемке систем прямого геопозиционирования GPS/IMU типа по-прежнему вызывает активные дискуссии, главными вопросами которых являются:

- Всегда ли достаточна заявляемая производителем паспортная точность для решения тех или иных задач?
- Всегда ли реальная точность соответствует паспортной?
- Как соотносятся методы прямого геопозиционирования и традиционные фотограмметрические методы?

Отметим также, что к настоящему времени появились целые классы аэросъемочных средств, работа которых невозможна без использования систем прямого геопозиционирования GPS/IMU типа. К таким приборам относятся, прежде всего, аэросъемочные лидары (Optech ALTM 3100, IGI LiteMapper, TopEye и др.), а также линейные фотографические сканеры (Leica ADS-40, Jena-Optronik JAS-150 и др.). Практически все другие современные средства авиационного дистанционного зондирования цифровые а аналоговые аэрофотоаппараты, радиолокаторы, спектрозональные и тепловизионные сканеры используют системы прямого геопозиционирования в качестве опции. Главный вывод,

который может быть сделан в заключении, состоит в том, что, во-первых, никакой дальнейший прогресс в аэрогеодезии, дистанционном зондировании и в смежных отраслях без активного применения GPS/INS систем не возможен, и, во-вторых, наиболее перспективным направлением в этой области является комбинирование методов прямого геопозиционирования и традиционных фотограмметрических методов.

5. ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В настоящей главе рассмотрены основные вопросы, касающиеся лазерно-локационных данных, т.е. основного продукта лазерной локации. Обсуждаются все вопросы, связанные с получением данных такого рода, их накопления и первичной обработки. Основным критерием является степень их информационной ценности при последующем использовании в топографических, инженерно-изыскательских и других приложениях. Имеют место следующие предварительные замечания:

1) информационная ценность лазерно-локационных данных несколько различна в случае их использования в различных приложениях. Т.е. к лазерно-локационным данным предъявляются различные требования при их использовании в таких приложениях, как общетопографическое, съемка леса, обследование ЛЭП, и др. Поэтому в настоящей главе будут рассматриваться только самые общие информационные характеристики, представляющие равную значимость для всех возможных приложений;

2) рассматриваются только воздушные методы съемки и соответственно только характеристики данных, полученных этим методом съемки.

5.1. Виды лазерно-локационных данных

Вопрос о видах лазерно-локационных данных уже рассматривался в главе Вернемся к этому вопросу еще раз, чтобы рассмотреть его более полно.

Ранее мы уже определили два основных вида лазерно-локационных данных:

- 1) в дальномерной форме;
- 2) в форме интенсивности отраженного импульса.

Кроме этих основных видов, выделяют еще следующие дополнительные виды:

- 3) навигационные;
- 4) сопутствующие.

Эти виды данных считаются дополнительными, потому что по своему семантическому содержанию прямо не могут быть отнесены к лазерно-локационным. Однако данные такого рода неизбежно появляются как выходной продукт работы практически любого современного аэросъемочного лидара. Именно в этом смысле такие данные могут считаться лазерно-локационными.

Навигационные данные определяют положение и ориентацию сканирующего блока в каждый момент лазерно-локационного измерения, и поэтому их наличие является важнейшим условием появления основных видов лазерно-локационных данных (рис. 39).

Кроме того, навигационные данные имеют и вполне самостоятельную ценность. С одной стороны, в силу их роли в окончательном расчете координат лазерных точек навигационные данные активно используются в процедурах метрологической поддержки и коррекции: здесь речь идет о процеду-

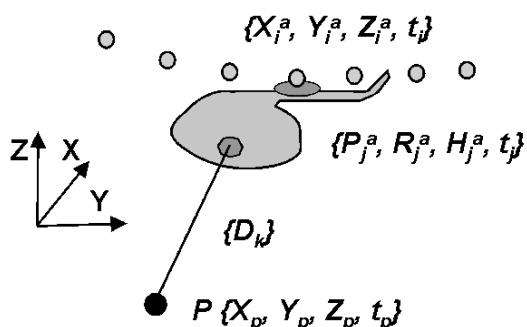


Рис. 39. Навигационные данные.

рах измерения выставочных параметров, калибровки, «подтяжки» проходов и т.д. С другой стороны, данные такого рода могут использоваться по своему прямому назначению – в качестве пилотажно-навигационных, т.е. помогать экипажу качественно выполнять полетное задание и на этапе послеполетной обработки контролировать качество выполнения съемки (рис. 40).

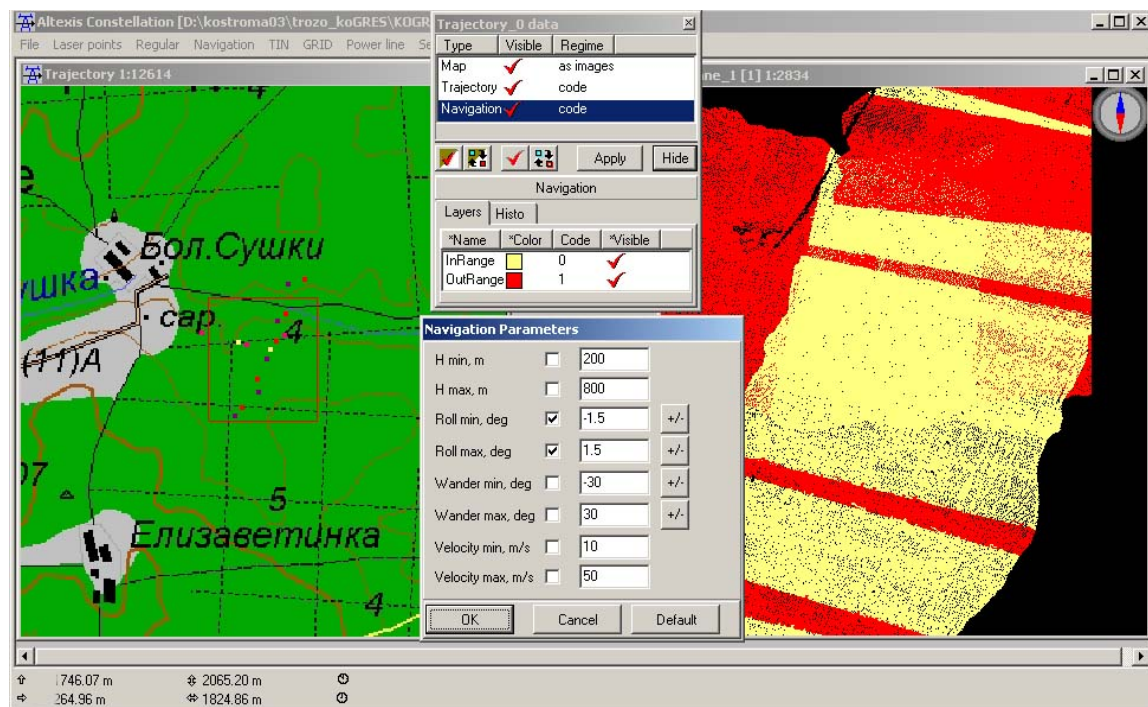


Рис. 40. Контроль качества пилотирования средствами программного комплекса ALTEXIS.

В левом окне траектории навигационных данных визуализированы специальными маркерами на фоне растровой карты района съемки. В правом окне изображен фрагмент лазерно-локационных данных. Красным цветом изображены лазерные точки, полученные с недопустимо большим значением бокового крена, что является нарушением со стороны экипажа, выполнявшего аэросъемочный полет.

Существуют также сопутствующие лазерно-локационные данные. Прежде всего это видео- и фотосопровождение. Большинство аэросъемочных лидаров имеет соответствующее оборудование, причем часто видео- и фотокамеры встроены непосредственно в сканирующий блок. Специфика ЛЛ метода съемки состоит в том, что при совместной обработке этих видов данных их ортотрансформирование и геопривязка могут во многом быть автоматизированы (рис. 41).

5.2. Физические ограничения лазерно-локационного метода и пути их преодоления

Под физическими ограничениями лазерно-локационного метода понимают такие явления, которые либо препятствуют получению данных, либо приводят к возникновению *особенностей*, требующих правильной интерпретации, а иногда принятия специальных мер на этапе наземной обработки для продолжения последующего корректного использования. В соответствии с принятой в данной

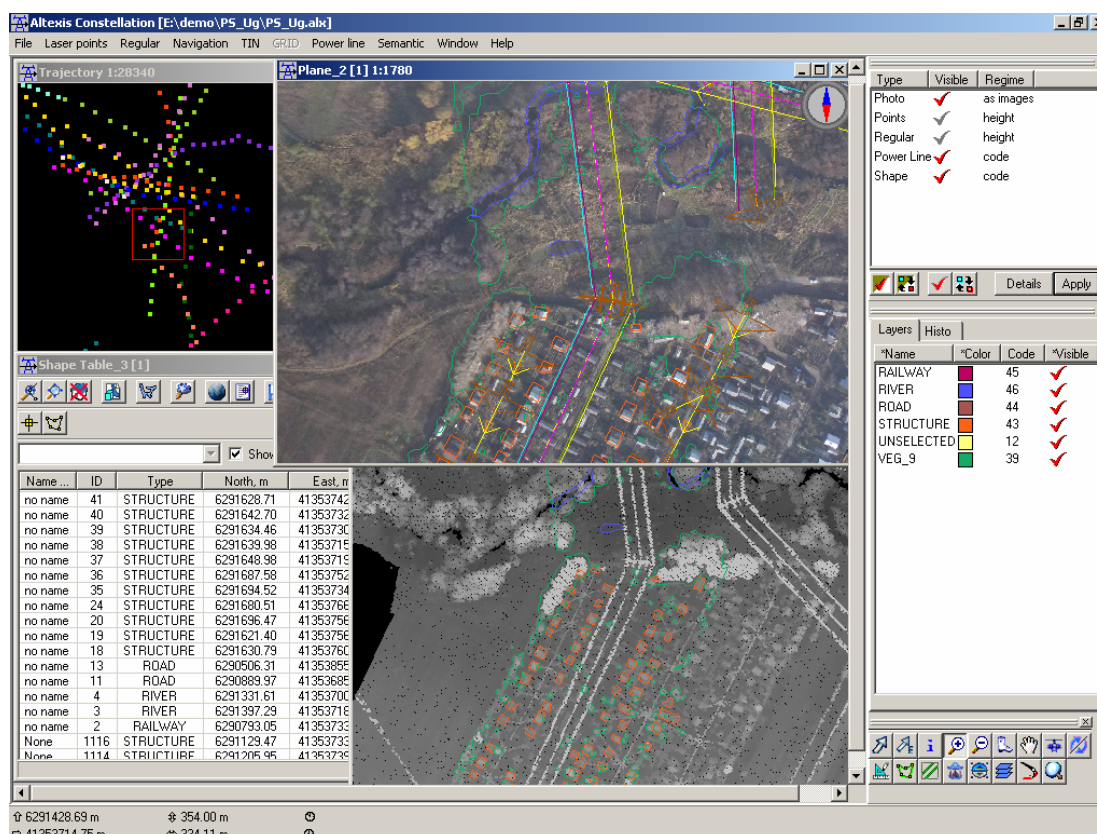


Рис. 41. Синхронные фрагменты ЛЛ данных и цифрового аэрофотоснимка.

работе методологией к физическим ограничениям прямо не относятся *метрологические* вопросы, которые определяют точность получаемых данных. Рассмотрим все основные ограничения последовательно.

- Множественные отражения от тонких линейных объектов – «гроздь» (рис. 42).

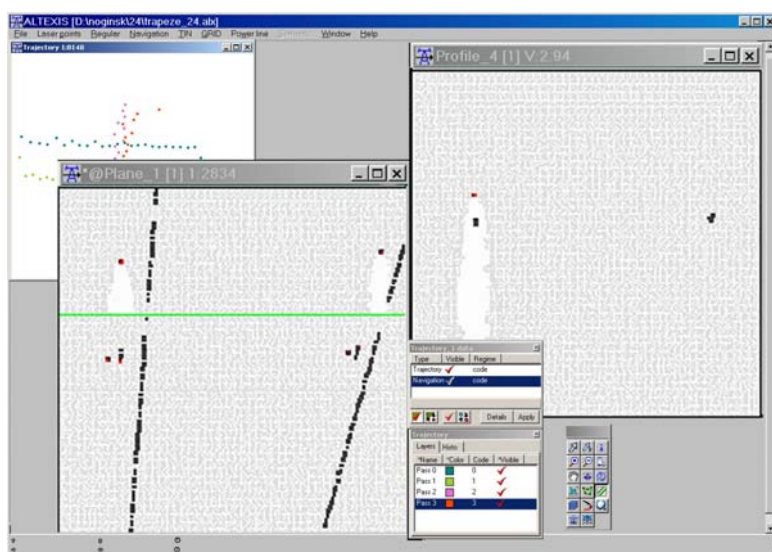


Рис. 42. Множественные отражения от тонких линейных объектов - «гроздь».

Такое явление наблюдается при низкочастотном сканировании линейных объектов, когда сканы распределяются в пространстве очень близко друг к другу или даже с перекрытием. Ведет к существенному снижению информативности при съемке ЛЭП, а также леса и всех других сцен, в которых представлены подобные линейные объекты. Действительно, среди лазерных точек, входящих в «гроздь», только одна является

полностью информативной. Условно назовем ее главной. Координаты остальных лазерных точек отличаются от координат главной только на величину шума, связанного с фактической шириной зондирующего луча, особенностями приема и состояния атмосферы. Однако это различие не несет никакой дополнительной информации об объекте съемки. Такое явление является в чистом виде паразитным, так как приводит только к пустому расходованию информационной мощности локатора. Метод преодоления этого явления основан на правильном выборе режима сканирования, когда невозможно чрезмерное сближение сканов.

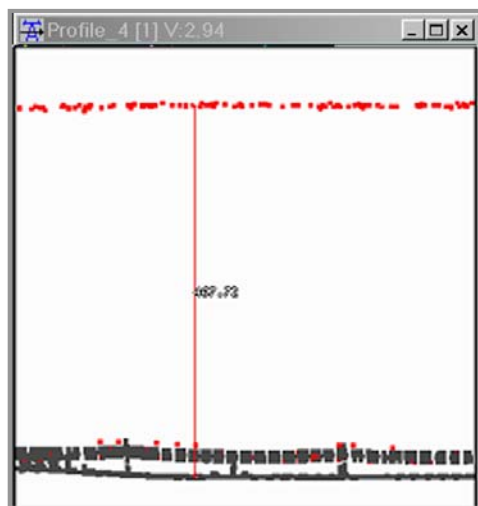


Рис. 43. Эффект Гутелиуса.

- *Эффект Гутелиуса.* Проявляется в отражении лазерного импульса от взвешенных атмосферных частиц (рис. 43). Такое отражение имеет место только на очень коротких дальностях, где плотность энергии луча очень высока. Это в чистом виде паразитное явление.

Борьба с эффектом Гутелиуса не представляет серьезной проблемы. В связи с тем, что ложные отражения имеют место только на очень коротких дальностях, наиболее эффективный метод борьбы с эффектом Гутелиуса на этапе расчета лазерных точек заключается в запрете генерации точек с дальностями меньше некоторого порогового значения, например 50 м. Однако борьба с этим явлением возможна и на этапе, когда анализируется уже полностью сформированное облако лазерных точек. Точки ложных отражений от атмосферы могут быть эффективно выделены и удалены на основе их морфологических признаков – эти точки всегда имеют большие значения высоты (расположены выше остальных точек сцены) и отделены от множества остальных точек свободным пространством размером, сравнимым с высотой полета.

• *Экранирование земли.* Проявляется в том, что первый зарегистрированный импульс делает невозможной регистрацию последующих, которые расположены ближе 3–5 м. Это является следствием ненулевой ширины зондирующего импульса и конечным временем срабатывания электронной схемы дискретизатора. Эффект имеет крайне негативное проявление при съемке поверхности земли, покрытой порослью, которая, таким образом, значительно снижает количество отражений от истинной земли. Следствием этого эффекта является тот факт, что при выполнении дуальной FIRST-LAST съемки дополнительный выигрыш по количеству точек составляет не более 20–25% для типовых сцен. Этот недостаток может быть преодолен только совершенствованием аппаратного комплекса, в частности за счет повышения быстродействия дискретизатора. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при планировании аэросъемочных работ в районах с густой растительностью.

• *Отражение от водной поверхности.* Приводит к практически полной потере отраженного сигнала вследствие зеркального характера отражения (рис. 44). Однако, это явление не может считаться в чистом виде негативным. Действительно, хотя снижение количества вернувшихся отражений от невозмущен-

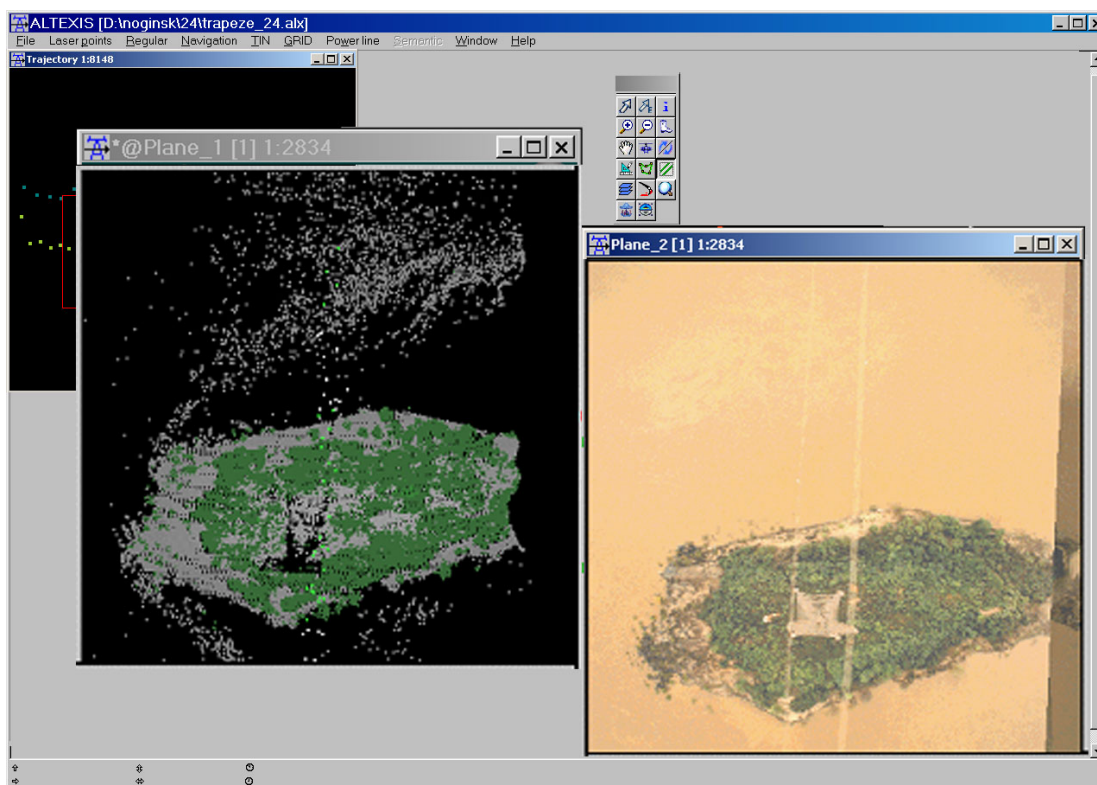


Рис. 44. Отражение лазерных импульсов от водной поверхности.

ной водной поверхности составляет не более 1–2% от общего числа импульсов, во многих случаях этого количества достаточно для определения уровня геодезической высоты водоема. Исключения составляют лишь узкие ручьи, расположенные перпендикулярно к направлению съемки. С другой стороны, факт отсутствия отражений от водной поверхности имеет и некоторые положительные стороны:

- очень четко на ЛЛ изображении представлена граница водной и земной поверхности, что позволяет четко выделять береговую линию. Возможно даже автоматическое распознавание;

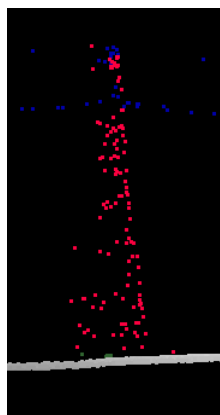


Рис. 45. Эффект многолучевого переотражения.

- во многих случаях отсутствие отражений на ЛЛ изображении может выступать в качестве дополнительного дешифровочного признака при обнаружении заболоченных участков, районов с подтопленным грунтом, которые с трудом могут быть дешифрованы по аэроснимкам.

- **Бликующие объекты.** В случае объектов, содержащих металлические элементы с прямыми двухгранными углами (угловые отражатели), имеет место сложное многолучевое переотражение (рис. 45). В этом случае при регистрации в режиме LAST появляются ложные точки.

Например, в практике съемки ЛЭП это явление наиболее отчетливо проявляется при использовании наклонного положения сканерного блока (Медведев, 2003), которое используется специально для более содержательного изображения тела опоры по сравнению со строго вертикальным положением. В результате появляются ложные

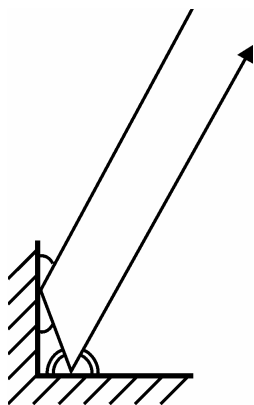


Рис. 46. К образованию многолучевого переотражения.

лазерные точки на продолжении линии распространения луча. Другим примером является ЛЛ изображение рифленной крыши. Причина возникновения подобного явления иллюстрируется на рисунке 46. Отметим, что аналогичное явление наблюдается и при использовании других активных средств авиационного дистанционного зондирования. Так, в радиолокации используются уголкового отражатели в качестве реперных точек.

5.3. Общие вопросы информационной ценности лазерно-локационных данных

Как уже неоднократно отмечалось, ЛЛ данные представляют собой совокупность или «облако» лазерных точек. Это обстоятельство позволяет предложить следующий подход к исследованию вопроса информационной ценности ЛЛ данных в целом, а именно – необходимо, во-первых, рассмотреть вопросы информационной ценности отдельной лазерной точки, а во-вторых, информационные характеристики распределения лазерных точек по поверхности сцены, определяемые режимом сканирования и условиями выполнения аэросъемки.

Информационная ценность каждой отдельной лазерной точки определяется следующими условиями:

- 1) точность пространственных координат;
- 2) эффективная ширина пятна;
- 3) номер отражения в серии (первое, последнее, промежуточное);
- 4) семантическая определенность.

Первые два условия уже неоднократно обсуждались и еще раз будут обсуждены в следующем параграфе. Важность этих условий для определения информационной ценности очевидна. Перейдем к обсуждению следующих двух условий.

Обсудим такой важный параметр, как *семантическая определенность* лазерной точки. В первой главе этот вопрос уже обсуждался, когда проводилось сравнение лазерной локации с традиционными методами наземной топографической съемки. Там же было показано, что, в отличие от традиционных методов съемки, семантическая ценность различных лазерных точек, покрывающих некоторую сцену, принципиально различна.

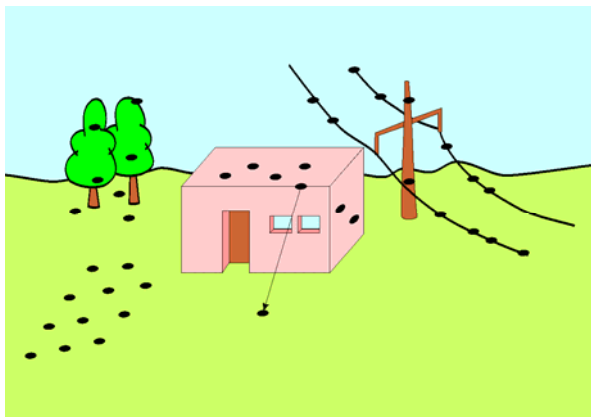


Рис. 47. К вопросу о различии информационной ценности лазерных точек.

Обратимся к рисунку 47. Здесь представлены типовые примеры лазерных точек, попавшие на различные компоненты сцены. Информационная ценность лазерной точки попавшей на столб (ствол), чрезвычайно высока. Всего одна такая точка однозначно определяет плановое положение всего географического объекта. Также высока ценность точек, попавших на провода ЛЭП. Три таких точки позволяют построить параболу, которая точно определит

пространственное положение всего провода. Другие примеры, иллюстрирующие различие в информационной ценности, – точки на боковых поверхностях (стенах) здания и пара точек, FIRST–LAST полученных вдоль одной линии визирования. В силу строгой вертикальности расположения ограждающих конструкций зданий лазерные точки, попавшие на стены, сразу определяют контур здания. Еще более содержательной является первая точка в паре FIRST–LAST. Каждая такая точка определяет пространственное положение кромки здания. Причем определение происходит с точностью метода, т.е. 15–20 см. Существенно менее информативны точки, отраженные от поверхности земли и растительности. Для их правильной интерпретации необходимо применение специальных математических методов, которые позволят их надежно классифицировать, т.е. с некоторой степенью достоверности определить, действительно ли эти точки относятся к этим классам объектов. После такой классификации по отобранным точкам необходимо перейти к геометрическим объектам, адекватно описывающим форму соответственно поверхности рельефа и растительности. Понятно, что существенно более неоднозначная задача по сравнению с такими хорошо определенными в геометрическом смысле объектами, как столб, провод или здание.

Наконец очень малую ценность имеют лазерные точки, попавшие на крышу здания (если известно, что эта крыша плоская и строго горизонтальная). Все эти точки имеют равное значение высотной координаты, а планиметрические координаты точек в данном случае вообще не несут никакой полезной информации.

По итогам обсуждения проблемы семантической значимости отдельной лазерной точки можно сделать следующие выводы:

1) информационная ценность лазерных точек, составляющих ЛЛ изображение, неодинакова;

2) информационная ценность определяется физическими условиями съемки, точностью пространственных координат, плотностью сканирования, размером пятна и т.п.;

3) еще в большей степени информационная ценность каждой конкретной лазерной точки определяется ее семантической нагрузкой, т.е. отнесенностью к тому или иному морфологическому компоненту сцены – истинной земле, растительности, зданию, столбу, проводу и т.д.;

4) значительную роль в определении информационной значимости ЛЛ данных играет программное обеспечение, позволяющее выполнять распознавание и геопозиционирование компонентов ландшафта и географических объектов по первичным ЛЛ данным.

Продолжим обсуждение вопросов информационной ценности ЛЛ данных. Рассмотрим распределение лазерных точек по поверхности сцены. Для количественного описания распределения можно предложить следующие характеристики:

1) средняя плотность, т.е. среднее количество лазерных точек на единицу поверхности;

2) равномерность;

3) доминирующая ориентация зондирующего луча.

Рассмотрим эти характеристики отдельно.

• *Средняя плотность лазерных точек.* Измеряется, как правило, в точек/м². Влияние этого параметра на общую информационную ценность ЛЛ данных почти очевидно.

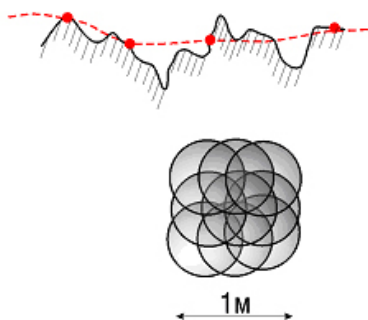


Рис. 48. К вопросу о выборе достаточной плотности сканирования.

На рисунке 48 приведены два примера, соответствующих двум крайним случаям выбора плотности сканирования. В верхней части рис. 48 приведен пример недопустимо низкой плотности сканирования (для простоты рисунок выполнен в двумерной форме). Здесь изображается съемка морфологически выраженного рельефа ЛЛ методом. Из-за неверного выбора плотности сканирования построенная модель поверхности рельефа, существенно отличается от истинного рельефа. Отметим, что в случае, когда объектом съемки является поверхность рельефа, вопрос о выборе оптимальной плотности сканирования мо-

жет быть формально решен на основании теоремы Найквиста–Котельникова, которая определяет необходимую частоту дискретизации (в данном случае плотности сканирования) в зависимости от ширины пространственного спектра поверхности рельефа. Однако при таком подходе трудность составляет тот факт, что во многих случаях пространственный спектр поверхности рельефа неизвестен, а наоборот, является целью исследования.

В нижней части рисунка 48 представлен пример избыточной плотности сканирования. Здесь пятна лазерных точек располагаются на поверхности сцены со значительным перекрытием. В большинстве случаев выбор такой плотности сканирования является неоправданным. При выборе плотности сканирования выше оптимальной не достигается существенного увеличения информативности лазерно-локационного изображения. В то же время существенно снижается производительность съемки.

Другой пример, характеризующий влияние плотности сканирования на результирующую информативность, представлен на рисунке 49. Этот пример соответствует одному из важнейших аспектов применения ЛЛ данных в топографии – использование ЛЛ данных для формирования контурной части карты (плана).

В этом случае плотность сканирования и соответственно среднее расстояние между смежными лазерными точками определяет, как это совершенно очевидно, предельно достижимую точность планового контура. Это положение, безусловно, справедливо при выделении таких объектов, как дороги, реки и другие водоемы. Не столь строго действует это правило применительно к таким объектам, как здания или ЛЭП. Здесь из-за особенности морфологии таких объектов с использованием специальных математических приемов удастся достичь точности определения плановых и высотных координат таких объектов выше среднего расстояния между смежными лазерными точками.

- **Равномерность.** Вопрос равномерности распределения лазерных точек можно рассматривать в двух аспектах. Во-первых, почти всегда (при некоторых важных исключениях) стремятся добиться равномерной продольной и поперечной плотности сканирования. Это всегда справедливо в проектах топографической направленности. При использовании универсальных средств авиационной лазерной локации, таких, как ALTM 3100, этот вопрос почти всегда может быть однозначно решен путем выбора надлежащих условий выполнения аэросъемочных работ. Однако в некоторых случаях использование неравномерной поперечной и продольной плотности сканирования считается допустимой, если по физическим ограничениям лидара равномерную плотность обеспечить не уда-

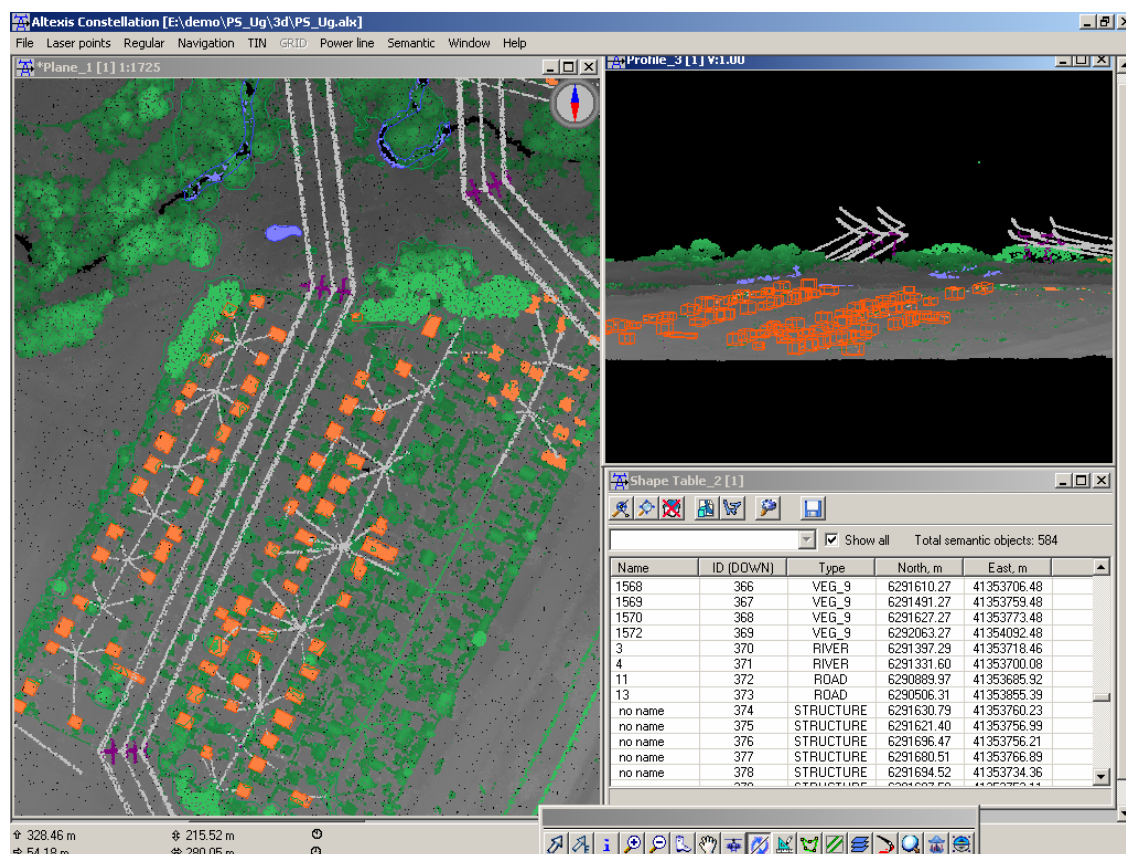


Рис. 49. Прорисовка контурной части карты (плана) по лазерно-локационным данным.

ется, но данные даже с существенной неравномерностью представляют определенную ценность. Во-вторых, проблема равномерности связана с выдерживанием заданных условий выполнения аэросъемочных работ, прежде всего высоты и скорости.

В настоящее время нет официальных рекомендаций, определяющих требуемую плотность сканирования в зависимости от характера решаемой задачи. В таблице 13 приведены ориентировочные значения плотности сканирования при выполнении работ по топографическому картированию в различных масштабах по данным компании «Геокосмос».

Таблица 13. Типовые значения плотности сканирования

Масштаб создаваемой карты (плана)	Плотность сканирования, точек/м ²
1:2000	5
1:5000	2
1:10000	0.5

Приведенные в таблице значения следует понимать таким образом, что ЛЛ данные с указанным в таблице значением плотности сканирования могут быть эффективно использованы как для построения рельефа, так и для выделения контуров на требуемом уровне точности. Кроме того, обязательным яв-

ляется наличие геопривязанных цифровых аэрофотоснимков, которые используются совместно с ЛЛ данными для выделения контуров и дешифрирования.

- *Доминирующая ориентация зондирующего луча.* Если, как в большинстве случаев, используется режим плоскостного сканирования, то доминирующая ориентация зондирующего луча определяется следующими двумя значениями: амплитудой сканирования, т.е. угловой шириной полосы съемки, и углом наклона сканирующего блока.

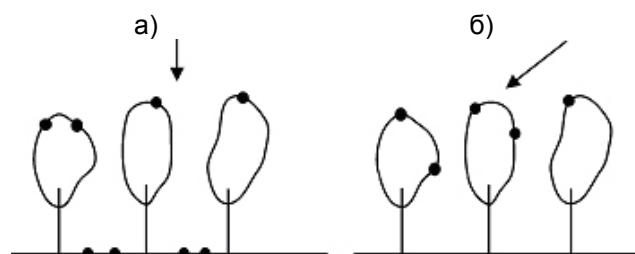


Рис. 50. Характер распределения лазерных отражений от крон деревьев и поверхности земли при вертикальном (а) и наклонном (б) положении сканерного блока.

Иллюстрация этого положения изображена на рисунке 50 применительно к вопросу о наклоне сканерного блока при съемке леса.

Если лес разреженный (кроны деревьев не сомкнуты), то при использовании вертикального режима съемки (а) значительное число лазерных точек будет достигать поверхности земли. Такой режим съемки наиболее удобен, если требуется за один проход

получить ЛЛ изображение как истинной земли, так и растительности. Однако при таком положении сканирующего блока могут появиться трудности при восстановлении огибающей лесного массива из-за недостаточного количества отражений от крон.

При съемке той же сцены с использованием наклонного режима сканирования практически все отражения соответствуют верхней части крон. Это позволяет существенно повысить степень детальности восстановления огибающей и распознавания отдельных деревьев. Однако при таком режиме съемки практически отсутствуют отражения от земли, что делает невозможным прямое использование традиционной методики восстановления огибающей, явным образом опирающейся на данные по истинному рельефу. В этом случае необходимы дополнительные проходы над заданным маршрутом с вертикальным режимом сканирования.

Другие примеры, иллюстрирующие важность выбора надлежащих параметров ориентации зондирующего луча:

- 1) съемка ЛЭП, когда за счет установки сканера в наклонное положение на 10–20° по направлению полета удастся обеспечить получение как отражений от проводов и тросов, так и от опор и даже столбов;

- 2) съемка плотно застроенных городских территорий. В этом случае необходимо обеспечить максимальную вертикальность распространения зондирующего луча с тем, чтобы исключить возникновение мертвых зон.

5.4. Вопросы точности лазерно-локационных данных

Важность вопроса точности лазерно-локационных данных не нуждается в дополнительных комментариях, поскольку аэросъемочный лидар есть, по определению, средство аэрогеодезических измерений. Однако большое внимание должно быть уделено правильной трактовке такого понятия, как точность.

Как известно из общей метрологии: проблема точности любого средства измерения сводится к исследованию источника и характера ошибок между истинным и замеренным значением измеряемого параметра. Применительно к

лазерно-локационным измерениям можно предложить несколько аспектов рассмотрения этого вопроса. Возможные способы классификации погрешностей:

- паспортные и реальные;
- приборные и методические;
- по источнику происхождения.

Кроме того, следует упомянуть, что проблема точности лазерно-локационных данных практически неотделима от проблемы их семантической ценности, а также то, что необходимо разделять точность первичных ЛЛ данных («физическую» точность) и точность геоинформационных материалов (топографических карт, планов, инженерных моделей), построенных на их основе. В настоящей главе рассматривается только точность первичных ЛЛ данных. Рассмотрим упомянутые способы классификации погрешностей ЛЛ данных отдельно.

• *Паспортные и реальные погрешности.* Паспортные значения ошибок измерений специфицируются производителем. В качестве примера рассмотрим спецификацию точности лазерного локатора ALTM 3100 канадской компании Optech Inc. (табл. 14).

Табл. 14. Типовая спецификация точности лазерно-локационных данных

Параметр	Значение
Точность в плане(1δ)	Не хуже, чем $1/3000 \times H$, где H – высота съемки
Точность по высоте (1δ)	Не хуже 15 см при высоте до 1200 м Не хуже 35 см при высоте до 3000 м
Разрешение по дальности	1 см

Паспортная спецификация точности ЛЛ измерений, обеспечиваемая тем или иным прибором, обладает некоторыми особенностями:

1) количество определяемых параметров сильно ограничено, а определение точности сильно упрощено. По сути дела указывается только предельное значение ошибки и вероятность в предположении, что характер распределения погрешности – Гауссовый. Целесообразность такого подхода определяется в большей мере коммерческими, а не техническими обстоятельствами. Кроме того, спецификация такого рода у каждого производителя предполагает наличие хорошо определенной процедуры контроля точности, включающей летные и наземные измерения. Такая процедура, как правило, используется в качестве приемо-сдаточной;

2) неявно подразумевается, что указанные значения точности соответствуют идеальным условиям съемки, т.е. в процессе эксперимента обеспечены следующие условия: благоприятная GPS обстановка, по количеству спутников, значению PDOP, надлежащее геодезическое обеспечение, качественное пилотирование, обеспечивающее получение полноценного навигационного решения, нормальные оптические свойства отражающих поверхностей наземного объекта, используемого в качестве эталона.

Реальные погрешности почти всегда отличаются от паспортных в худшую сторону. Здесь речь идет не о том, что паспортные спецификации точности содержат недостоверную информацию. Правильнее будет говорить, что в реальности съемка выполняется не всегда в идеальных условиях, поскольку в расчет применяются не только технические, но и экономические факторы. Поэтому на практике приходится сталкиваться со значительным снижением точности по отношению к паспортным значениям. По этой же причине категория точности ЛЛ

данных намного сложнее формы, указываемой в спецификации, так как на практике в не самых благоприятных условиях приходится считаться с множеством факторов, прямо или косвенно влияющих на точность.

- *Приборные и методические погрешности.* Такое деление погрешностей в метрологии считается классическим. Приборные погрешности связаны с неустраняемыми эффектами в форме шумов и наводок, содержащимися в результирующих измерениях и носящих случайный характер. В азросъемочном лидаре это приборные погрешности оптико-электронного тракта приемника и излучателя, схемы измерения дальности, ошибки механизма развертки, а также ошибки GPS и IMU. Контроль за величиной и динамикой (изменением значений приборных погрешностей в ходе эксплуатации) выражается в проведении периодических лабораторных калибровок и поверок, в ходе которых определяется множество поправочных коэффициентов к результатам непосредственных измерений дальнометрического и навигационного блока. Применение этих поправок позволяет в значительной степени устранить системные погрешности и определить величину остаточного разброса значений, которые и принимаются за точность.

Как и для других средств дистанционного зондирования и измерения вообще, следует различать абсолютную и относительную точность измерения, а также такие категории, как точность и чувствительность (или разрешающая способность).

Методические погрешности, по определению, возникают от того, что для получения результата измерений в конечные сроки и с «разумными» затратами всегда приходится игнорировать некоторые неглавные факторы, которые тем не менее оказывают некоторое воздействие на результат. В авиационной лазерной локации главными источниками методических погрешностей оказываются бортовой GPS приемник, а также средства геодезического обеспечения.

Приведем некоторые примеры методических погрешностей:

- конечная расходимость зондирующего луча;
- ширина мгновенного поля зрения приемника, которая шире эффективной расходимости зондирующего луча;
- рефракция в атмосфере;
- гравитационные аномалии.

- *Классификация погрешностей по источнику происхождения.* Этот вопрос уже косвенно обсужден нами выше. Он имеет важное практическое значение, так как всегда важно понимать, какой блок в составе лидара или какой процесс является источником той или иной погрешности или неисправности. Локализация источника позволяет принять адекватные корректирующие действия, так как применительно к каждому отдельному блоку разработчиком прописаны процедуры контроля, калибровки и профилактики. Повторим еще раз, что источником различного рода погрешностей в лазерной локации могут выступать:

- сканирующий блок;
- дальнометрический блок;
- навигационный комплекс GPS+IMU;
- средства геодезического обоснования, т.е. опорная геодезическая сеть;
- ошибки по результатам определения выставочных параметров.

6. ВОЗДУШНАЯ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА

Настоящая глава посвящена изучению воздушной лазерно-локационной съемки, т.е. аэросъемки с использованием лазерно-локационной аппаратуры. Вводятся основные количественные и качественные параметры, которые могут быть использованы для полностью формального представления полетного задания, условий фактического выполнения съемки и контроля качества выполнения задания. Везде в настоящей главе предполагается, что лазерно-локационная съемка сопровождается аэросъемкой с использованием цифрового или аналогового топографического аэрофотоаппарата, поэтому параметры, характеризующие его работу, также принимаются во внимание. Также в настоящей главе рассмотрены в общей форме вопросы оптимизации режимов выполнения лазерно-локационной съемки, исходя из характеристик объекта съемки, типа ландшафта, метеорологических условий и других параметров.

6.1. Основные параметры воздушной лазерно-локационной съемки и оптимизация режимов ее выполнения

Основные параметры, характеризующие процесс воздушной лазерно-локационной съемки, приведены в таблице 15.

Таблица 15. Основные параметры воздушной лазерно-локационной съемки

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Ограничения
Скорость движения носителя	V	м/с	Технические возможности носителя. Например для вертолета Ми-8 – 20–60 м/с.
Частота сканирования	f скан	Гц	– От 0 до 70 Гц. – $\varphi \cdot f_{\text{скан}} < 1000$
Амплитуда (максимальный угол) сканирования	φ	Град.	– От 0 (режим профайлера) до $\pm 25^\circ$. $\varphi \cdot f_{\text{скан}} < 1000$
Высота съемки	H	м	– Безопасность для зрения; – возможности носителя; – выбор значения дивергенции луча
Частота зондирующих импульсов	F	КГц	– 33, 50, 70, 100 КГц; – высота съемки

Приведенные параметры соответствуют аэросъемочным лидарам с зигзагообразным методом сканирования. Данные, представленные в столбце «Ограничения», соответствуют лидару ALTM 3100 компании Optech Inc. Таблица 15 содержит не все технические параметры, характеризующие съемку, а только те из них, выбор которых относится к компетенции аэросъемочной бригады и экипажа. В этом смысле они определяют именно процесс *съемки*. Кроме них, имеется еще обширное множество численных параметров, в той или иной степени характеризующих процесс работы локатора и информационную ценность собираемых данных, которые прямо не относятся к характеристикам съемки.

На рисунке 51 представлены основные геометрические соотношения, характеризующие распределение лазерных точек по поверхности земли при зигзагообразном методе сканирования. Рассмотрим эти соотношения подробнее. Как видно из рисунка и представленных формул, ширина полосы захвата W

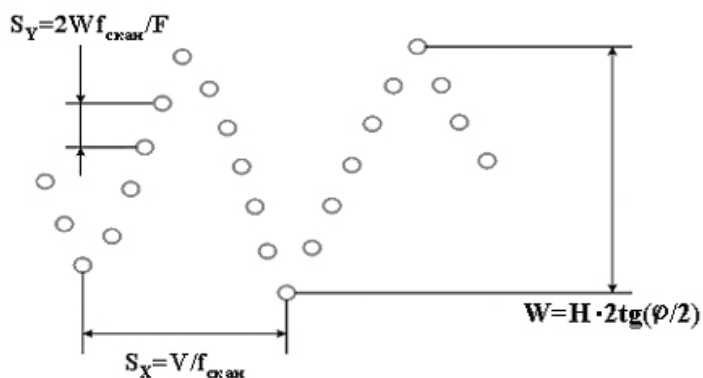


Рис. 51. Основные геометрические соотношения распределения лазерных точек.

прямо пропорциональна высоте съемке H и тангенсу амплитуды сканирования.

Это понятное соотношение не требует специальных комментариев. Отметим только, что в приведенной формуле $W = H \cdot 2\text{tg}(\varphi/2)$ значение φ соответствует полному углу сканирования. Иногда значение φ определяют как максимальное угловое отклонение линии визирования (зондирующего луча) от ли-

нии визирования. В последнем случае величину амплитуды сканирования записывают в форме $\pm\varphi'$. Понятно, что величины φ и φ' связаны простым соотношением $\varphi = 2\varphi'$. Например, для ALTM 3100 максимальная амплитуда сканирования составляет 50° или $\pm 25^\circ$.

Направление, соответствующее движению летательного аппарата вперед, обычно обозначается индексом X , а перпендикулярно этому направлению – индексом Y . Соответственно говорят о продольных (X) и поперечных (Y) геометрических соотношениях и параметрах. Значение S_X принято называть продольным интервалом сканирования. Как видно из рисунка 51, значение S_X соответствует максимальному продольному расстоянию между смежными линиями сканирования. Легко понять, что среднее продольное расстояние между соответствующими лазерными точками смежных линий сканирования вдвое меньше – $0.5 S_X$. Из формулы $S_X = V/f_{\text{скан}}$ видно, что продольный интервал сканирования прямо пропорционален скорости движения носителя и обратно пропорционален частоте сканирования.

Величину S_Y принято называть поперечным интервалом сканирования. Эта величина характеризует расстояние между соседними лазерными точками в пределах каждой линии сканирования. Формула, определяющая значение S_Y , несколько сложнее $S_Y = 2Wf_{\text{скан}}/F$, т.е. поперечный интервал тем больше, чем больше ширина полосы захвата и частота сканирования, и меньше частота зондирующих импульсов.

Так же определяют понятия продольной и поперечной плотностей сканирования D_X , D_Y соответственно как обратные величины к значениям интервалов сканирования: $D_X = 2/S_X$, $D_Y = 1/S_Y$.

При определении D_X использован коэффициент 2, потому что, как было показано выше, среднее значение продольного интервала сканирования равно $0.5 S_X$. Размерности величин плотностей сканирования – м^{-1} . Можно также определить категорию поверхностной плотности сканирования D , которая будет характеризовать среднее количество лазерных точек, приходящихся на единицу поверхности земли. Совершенно очевидно, что: $D = D_X D_Y$. Размерность D – м^{-2} .

На практике введенные значения плотности сканирования оказываются важнейшими параметрами, характеризующими информативность съемки. Ясно, что чем выше значение D , тем в общем случае выше степень подробности и больше объем информации, собираемый в процессе лазерно-локационной съемки для данной территории. С другой стороны, пропорционально увеличе-

нию D увеличивается потребное летное время – одна из важнейших составляющих стоимости работ.

Проведение воздушной лазерно-локационной съемки предусматривает решение следующих основных вопросов:

1) выбор оптимального значения плотности сканирования D с учетом характера решаемой задачи;

2) выбор режимов пилотирования с учетом технических возможностей летательного аппарата и квалификации экипажа. Правильный выбор режимов пилотирования, в свою очередь, должен обеспечивать:

– возможность стабильного выдерживания параметров высоты H и скорости съемки V ;

– максимальную точность прохождения аэросъемочных маршрутов;

– примерное равенство значений продольной D_x и поперечной D_y плотности сканирования. Это положение верно в большинстве случаев, но имеются некоторые исключения. Например, при съемке леса или линий электропередач иногда выбирают очень высокие значения поперечной плотности сканирования, значительно занижая продольную. Таким приемом достигается предельно плотное расположение лазерных точек вдоль линии сканирования, когда очень важно «не пропустить» некоторый тонкий объект, такой как ветвь дерева или провод.

3) Учет необходимости обеспечения заданных режимов функционирования другой аэросъемочной аппаратуры, которая используется одновременно с лидаром. Например, если кроме лидара используется аэрофотоаппарат, необходимо при определении режимов съемки учесть следующие параметры: ширина поля зрения аэрофотоаппарата, требуемое значение интервала фотографирования для обеспечения фотограмметрического продольного перекрытия и другие параметры. Технические характеристики аэрофотоаппарата окажут влияние на выбор H , V и других параметров съемки.

Вообще выбор параметров выполнения аэросъемочных работ с использованием лидаров является нетривиальной задачей. Решение, как правило, является результатом оптимизации технических и экономических условий проведения съемки по одному или нескольким критериям. Могут использоваться различные критерии, но все они предполагают работу с некоторыми параметрами, характеризующими те или иные результаты съемки и допускающими количественные оценки. Задача оптимизации в наиболее общей форме может быть сформулирована как достижение максимального значения одного из параметров при наличии количественных ограничений на значения других параметров. Например, необходимо обеспечить максимальное значение плановой точности лазерных точек при наличии ограничения на плотность сканирования $D < 2 \text{ м}^{-2}$. В некоторых случаях подобного рода задачи могут быть решены чисто аналитически, в других случаях решение может быть найдено с привлечением аппарата динамического программирования или более сложных математических приемов.

Рассмотрим некоторые параметры, которые наиболее часто выступают в качестве аргументов при решении задачи оптимизации режимов выполнения лазерно-локационной съемки:

– производительность, т.е. количество погонных или квадратных км, которые могут быть отсняты в единицу времени, например за один аэросъемочный час. Понятно, что так определенная величина производительности в общем случае обратно пропорциональна заданной плотности сканирования. Иными

словами, чем меньше заданная величина плотности, тем большее количество километров можно отснять за равное время;

- точность. При выполнении задач оптимизации всегда разделяют плановую и вертикальную результирующую точности лазерных точек, так как ошибки, влияющие на эти две составляющие точности, имеют разную природу. Кроме того, в традиционной топографии всегда было принято специфицировать требования по точности плановых и высотных координат разными значениями;

- плотность сканирования. Этот параметр подробно описан выше;

- равномерность сканирования. Как правило, под равномерностью сканирования понимают обеспечение примерного равенства продольной и поперечной плотности сканирования, а также выдерживание заданных значений высоты и скорости съемки. Для оценки равномерности сканирования вводится набор специальных численных характеристик;

- высота съемки не более определенного значения. Необходимость использования такого параметра объясняется, прежде всего, вероятными погодными ограничениями. Как было показано выше, лазерно-локационная съемка невозможна в условиях облачности. Поэтому очень часто планировать аэросъемочные работы приходится «по фактической погоде» с учетом фактического значения высоты нижней кромки облаков;

- вероятность обнаружения объектов определенного класса, например ЛЭП, береговой линии. Это параметр, требующий чрезвычайно ответственного подхода при использовании его в качестве основного параметра оптимизации. Почти всегда достижение максимальной вероятности обнаружения того или иного объекта требует максимальных экономических затрат. Как раз в таких случаях необходимо наличие развитого математического аппарата, обеспечивающего априорные оценки вероятности обнаружения объекта той или иной морфологии при определенных условиях выполнения аэросъемочных работ;

- обеспечение фотограмметрического перекрытия аэрофотоснимков либо условий для использования другого средства авиационного дистанционного зондирования, например инфракрасного сканера, используемого одновременно с лидаром.

В заключение данного раздела отметим, что с формальной точки зрения оптимизация режима съемки подразумевает выбор параметров съемки V , $f_{\text{скан}}$, φ , H , F и др., в соответствии с одним или несколькими выбранными критериями.

6.2. Этапы выполнения лазерно-локационной съемки и основные процедуры метрологической поддержки

В практическом плане задача выполнения лазерно-локационной съемки предполагает последовательное выполнение ряда этапов:

1. Подготовительный этап, который включает такие процедуры, как:

- метрологическое обеспечение;

- калибровка;

- развитие опорной геодезической сети.

2. Этап выполнения собственно аэросъемочных работ.

3. Этап предкамеральной (полевой) обработки, который включает следующие процедуры:

- восстановление траектории, т.е. получение законченного навигационного решения по линейным и угловым параметрам движения носителя в процессе съемки;

– производство (расчет) первичных лазерно-локационных и сопутствующих данных;

– экспресс-анализ первичных данных по таким понятиям, как полнота покрытия, точность, качество пилотирования.

4. Этап общетопографической обработки, включающий:

– геокодирование лазерных точек;

– выделение поверхностей истинной земли, растительности;

– создание ортофотомозаики цифровых аэрофотоснимков.

5. Этап семантической обработки, включающий:

– создание семантических трехмерных моделей географических объектов;

– дешифрирование, выделение контуров;

– другие виды картографической обработки.

Рассмотрим более подробно процедуры метрологической поддержки.

Применительно к задаче метрологического обеспечения лазерно-локационной съемки можно выделить четыре группы вопросов:

1. *Восстановление траектории.* В рамках этой задачи осуществляется восстановление точной траектории движения точки сканирования в ходе съемки. Понятно, что это является необходимым условием получения точных результирующих данных. Эта процедура осуществляется на основе совместного анализа данных GPS и инерциальной системы. Как было указано выше, положительный результат достигается за счет того, что возмущения обеих систем находятся в различных диапазонах спектра.

Функция восстановления траектории является неотъемлемой частью комплекса процедур, выполняемых бортовым навигационным комплексом, входящим в состав лидара. Такое восстановление осуществляется как в реальном времени в ходе выполнения аэросъемки, так и в ходе наземной постобработки. Во втором случае получаемые данные используются для обслуживания дальномерных измерений, т.е. для расчета координат лазерных точек. На практике восстановление траектории практически всегда осуществляется штатными аппаратными и программными методами, поставляемыми вместе с лидаром. По этой причине методические аспекты восстановления траектории в настоящей работе не рассматриваются. Описанные ниже навигационные процедуры следует рассматривать как необходимые условия полного и качественного восстановления траектории.

2. *Измерение выставочных (off-set) параметров взаимного ориентирования сенсора инерциальной системы и антенны GPS.* Точное измерение выставочных параметров имеет большое значение, так как корректная работа бортового навигационного комплекса возможна только при малых (не более нескольких см) ошибках определения взаимного положения.

3. *Калибровочная процедура.* Специфика работы бортового навигационного комплекса, как уже отмечалось, состоит в интегрировании GPS и IMU данных на основе фильтра Калмана. Использование фильтрации нестационарного типа определяет характер ошибок выходных значений, характеризующих положение носителя. Если погрешности определения внутренних и внешних выставочных параметров не превосходят допустимых значений, то ошибка положения проявляется в основном в появлении постоянных смещений к определяемым углам ориентации носителя ΔR , ΔP , ΔH .

Калибровочная процедура, выполняемая после каждой новой установки оборудования, призвана определить значения погрешностей с тем, чтобы в последующем они могли быть учтены математически как поправки. Калибровоч-

ная процедура заключается в многократной съемке наземного эталонного объекта. По лазерно-локационным изображениям, соответствующим различным проходам, подбираются такие значения поправок: ΔR , ΔP , ΔH , чтобы обеспечить геометрическое совпадение всех этих изображений.

4. *Контроль качества пилотирования.* Соответствующие программные процедуры используются для контроля качества выполнения аэросъемочных работ в части выполнения экипажем заданных режимов полета.

6.3. Измерение выставочных параметров сканерного блока

Схема измерения выставочных параметров основана на следующих принципах:

- конфигурация взаимного положения и ориентации сканерного блока и GPS антенны на летательном аппарате варьируется. Сканерный блок может устанавливаться как на внешней подвеске, так и внутри фюзеляжа. Кроме того, часто сканерный блок наклоняют. Почти всегда отсутствует прямая видимость между сканерным блоком и GPS антенной;

- положение и ориентация всех компонентов определяются с помощью GPS методов в специальной системе координат, образованной базовой GPS станцией, располагаемой в непосредственной близости от объекта измерения;

- положение в пространстве GPS антенны определяется непосредственно. Для определения положения сканерного блока сначала осуществляют проектирование двух характерных точек на поверхность земли. После этого летательный аппарат удаляется, что дает возможность определить пространственные координаты характерных точек и через них восстановить положение сканерного блока.

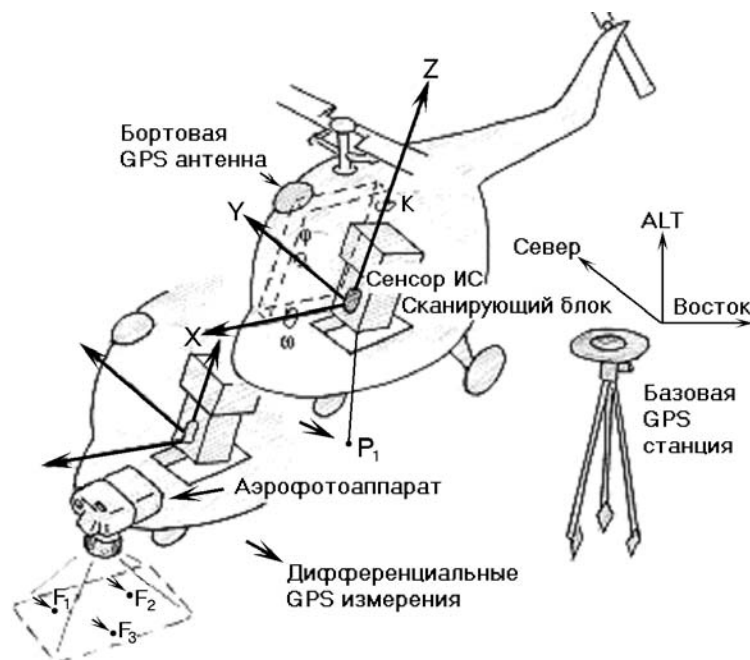


Рис. 52. Схема измерения выставочных параметров сканерного блока и цифрового аэрофотоаппарата.

Общая схема проведения измерений выставочных параметров сканерного блока приведена на рисунке 52. На данном рисунке обозначен также цифровой аэрофотоаппарат, измерения выставочных параметров для которого также проводятся на этапе подготовки к съемке.

На рисунке 53 представлена векторная схема измерения и обозначения используемых векторов.

При выполнении измерений используется географическая система координат $oNEA$, и система координат $oXYZ$, жестко связанная с корпусом сканерного блока. Положение систем координат ясно из рисунка 53.

Проводятся следующие непосредственные измерения:

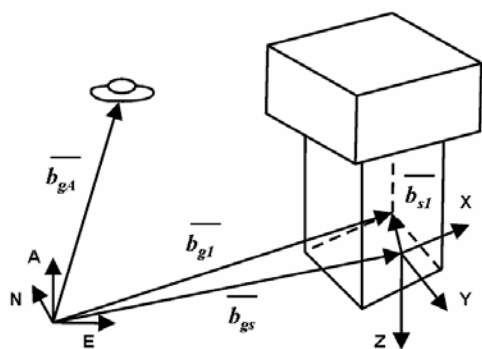


Рис. 53. Векторная схема измерения выставочных параметров.

– N_A, E_A, A_A – географические координаты положения антенны;

– N_S, E_S, A_S и N_Q, E_Q – географические координаты положения двух характерных точек сканерного блока (их вертикальных проекций на плоскость основания);

– R, P_S – углы крена и тангажа положения сканерного блока в момент измерения. Определяются по данным IMU, входящей в состав локатора;

– H_1 – высота фактического положения характерной точки над плоскостью основания.

В качестве параметра рассматривается значение вектора $\overline{b_{s1}}$, определяющего положение первой характерной точки в $oXYZ$. Понятно, что целью процедуры является определение координаты вектора $\overline{b_{sA}}$ в $oXYZ$.

Если все приведенные выше значения известны, значение $\overline{b_{sA}}$ может быть определено по следующей схеме:

1) определяется матрица направляющих косинусов $\overline{A_{GS}}$, характеризующая текущее положение сканерного блока в геодезическом пространстве в момент измерения;

2) при этом в качестве значений крена R , и тангажа P используются данные инерциальной системы. Что касается значения курса H , то оно может быть определено по координатам N_S, E_S и N_Q, E_Q следующим образом:

$$H = \arctan\left(\frac{E_2 - E_1}{N_2 - N_1}\right).$$

Введем дополнительный вектор $\overline{b_{s1}}$, определяющий положение первой характерной точки сканера в $(oXYZ)$ (рис. 51).

Очевидно, что $\overline{b_{s1}}$ в $oXYZ$ является константой и определяется только конструкцией сканерного блока, поэтому он может быть измерен один раз и в дальнейшем использоваться в качестве параметра.

Положение в геодезическом пространстве первой характерной точки будем определять вектором $\overline{b_{G1}}$, который очевидно равен: $\overline{b_{G1}} = (N_S, E_S, A_S + H_S)$, а положение антенны в геодезическом пространстве будем описывать вектором:

$\overline{b_{GA}} = (N_A, E_A, A_A)$. Очевидно, что $\overline{b_{sA}} = \overline{A_{SG}} \cdot (\overline{b_{GA}} - \overline{b_{GS}})$, где $\overline{A_{SG}} = \overline{A_{GS}}^{-1}$.

Отметим, что для любой матрицы направляющих косинусов, в частности для $\overline{A_{GS}}$, определитель равен 1. Поэтому обратная матрица $\overline{A_{SG}}$ может быть получена из $\overline{A_{GS}}$ просто транспонированием.

Отметим также, что $\overline{b_{GS}} = \overline{b_{G1}} - \overline{A_{SG}} \cdot \overline{b_{s1}}$,

тогда искомый вектор $\overline{b_{SA}} : \overline{b_{SA}} = \overline{A_{GS}} \cdot (\overline{b_{GA}} - (\overline{b_{G1}} - \overline{A_{GS}} \cdot \overline{b_{S1}}))$.

Упрощая это выражение и принимая во внимание, что $\overline{A_{SG}} \cdot \overline{A_{GS}} = 1$, имеем

$$\overline{b_{SA}} = \overline{b_{S1}} + \overline{A_{SG}} \cdot (\overline{b_{GA}} - \overline{b_{G1}}).$$

Последнее уравнение является основным при определении выставочных параметров сканерного блока.

Описанная в настоящем разделе методика измерения выставочных параметров сканерного блока реализована в виде специального программного модуля, входящего в семейство программных продуктов ALTEXIS.

Как было отмечено выше, процедура измерения выставочных параметров выполняется всякий раз при новой установке аэросъемочного комплекса на борт летательного аппарата.

6.4. Общие принципы проведения полетной калибровочной процедуры

6.4.1. Неизбежные малые ошибки в определении выставочных параметров X_0, Y_0, Z_0 проявляются в возникновении систематических постоянных погрешностей H_E, R_E, P_E в данных, выдаваемых бортовым навигационным комплексом. Обычно значения таких погрешностей не превышают 2–3 мрад, и их определение в лабораторных условиях не представляется возможным. Это вынуждает проводить специальный аэросъемочный полет, в котором выполняется съемка эталонного (калибровочного) наземного объекта. По результатам камеральной обработки с помощью специальных математических процедур определяются поправочные значения R_E, P_E, H_E . Эти значения в дальнейшем могут использоваться в качестве поправок к угловым координатам носителя R, P, H , поставляемых навигационным комплексом, и таким образом повысить результирующую точность лазерно-локационных данных.

Для проведения калибровочной процедуры выбирается наземный объект значительных размеров, по возможности правильной геометрической формы. Как правило, используются промышленное здание, ангар и т.п. Положение калибровочного объекта предварительно точно определяется наземными геодезическими методами.

В ходе калибровочной процедуры выполняется серия аэросъемочных залетов над выбранным объектом. Смысл этой операции состоит в том, что наличие ненулевых погрешностей H_E, R_E, P_E вызывает те или иные отклонения лазерно-локационного изображения объекта по отношению к его истинному положению. Так, при наличии положительной погрешности по углу тангажа R_E изображение здания прямоугольной формы будет смещаться по направлению полета. Величина линейного смещения ΔS может быть измерена как разность координат стены здания на изображении и истинных геодезических координат, либо как половина разности координат стены с двух изображений, полученных на встречных курсах. Если достоверно известно, что две другие составляющие погрешности равны нулю, то значение P_E может быть определено по формуле:

$$P_E = \frac{\Delta S}{H},$$

где H – высота полета в метрах.

Аналогично определяются значения R_E и H_E . Для их вычисления в рамках калибровочной процедуры используются специальные типы заходов, которые будут рассмотрены ниже.

Рассмотрим основные требования к выбору стандартного калибровочного объекта и режимов съемки:

1) калибровочный объект должен иметь значительные размеры (более 100 м). Это позволяет обеспечить хорошее покрытие калибровочного объекта ЛЛ данными с типовых высот H в 400÷600 м, используемых при калибровке;

2) калибровочный объект должен иметь хорошо определенные боковые грани с четкими кромками, так как именно по кромкам наиболее точно определяется смещение ΔS . Кромка здания должна быть свободна от всех образований, способных снизить четкость ее ЛЛ изображения, а именно перил, рифленого металлического покрытия и т.п.;

3) при выборе высоты полета следует руководствоваться следующими соображениями. Большее значение высоты полета H позволяет получить пропорционально большее значение отклонения ΔS и тем самым повысить чувствительность и результирующую точность. С другой стороны, чрезмерное увеличение H создает трудности по пилотированию в части выхода на калибровочный объект и устойчивости по крену;

4) также при выборе высоты H и скорости полета V следует иметь в виду значение среднего интервала сканирования, т.е. среднего расстояния между смежными лазерными точками, которое, естественно, лимитирует максимальную точность измерения ΔS и соответственно угловых поправок.

Возможны два основных метода калибровки:

1) стандартный;

2) автоматический.

В стандартном методе в качестве калибровочного объекта, как правило, используется крупное промышленное здание. Величины поправок H_E , R_E , P_E определяются оператором в результате итерационной процедуры, предполагающей многократный пересчет ЛЛ изображений калибровочного объекта с различными значениями поправок.

При автоматическом методе в качестве калибровочного объекта используется провод одного пролета ЛЭП. В силу того, что провод ЛЭП является полностью математически определенным объектом, в этом случае удастся полностью автоматизировать процесс подбора поправочных параметров H_E , R_E , P_E . Кроме того, удастся получить статистические оценки точности и достоверности значений поправок. Выполнение калибровочной процедуры в общем случае включает этапы, показанные в таблице 16.

6.4.2. Вне зависимости от используемого типа калибровочной процедуры на этапе камеральной обработки данных необходимо выполнить ряд подготовительных мероприятий, обеспечивающих возможность перехода непосредственно к подбору значений поправок.

Главная функция программного обеспечения, используемого на этом этапе, заключается в обеспечении каждой лазерной точки изображения набором данных, однозначно определяющих направление коррекции положения этой лазерной точки в геодезическом пространстве под влиянием введения малых значений поправок ΔH_E , ΔR_E , ΔP_E .

Траекторные данные представляют собой две дискретные последовательности – последовательность координат GPS антенны носителя $\{X_i^a, Y_i^a, Z_i^a, t_i\}$, частота которой составляет 1–20 Гц, и последовательность углов пространст-

Таблица 16. Этапы работ при выполнении калибровочной процедуры

Этап	Содержание
1. Выбор калибровочного объекта	Как правило, предполагает выполнение летных рекогносцировочных работ по выбору калибровочного объекта необходимого размера и формы
2. Наземная геодезическая съемка (необязательный этап)	Выполнение плановой наземной геодезической съемки всех характерных элементов калибровочного объекта. Обычно выполняется GPS средствами. Этот этап может быть пропущен при выполнении калибровки в автоматическом режиме, либо когда отклонение ΔS определяется по разности двух ЛЛ изображений, полученных на встречных курсах
3. Аэросъемка калибровочного объекта	Выполняется серия аэросъемочных проходов над калибровочным объектом. Направление проходов и режимы сканирования выбираются в соответствии с типом калибровочной процедуры
4. Камеральная обработка результатов съемки	Включает программную обработку результатов съемки калибровочного объекта, определение значений поправок H_E , R_E , P_E . Методика обработки принципиально различается для стандартного и автоматического методов

венной ориентации сенсора IMU $\{R_j^a, P_j^a, H_j^a, t_j^a\}$, частота которой в зависимости от модели лидара составляет 50–200 Гц.

Последовательность замеренных наклонных дальностей $\{D_k\}$ и углов фазы сканирования $\{\alpha_k\}$ имеют частоту равную основной частоте сканирования конкретного локатора с учетом возможности регистрации более одного импульса за акт сканирования, т.е. находится в диапазоне 5–100 кГц.

Каждая лазерная точка P характеризуется своими пространственными координатами X_P, Y_P, Z_P и временем регистрации t_P . Функции базового программного обеспечения с учетом введенных определений могут быть сформулированы следующим образом:

1. Путем совместного анализа последовательностей данных необходимо сопоставить каждой лазерной точке калибровочного объекта $\{X_P, Y_P, Z_P, t_P\}$ значения пространственных и угловых координат носителя с учетом значения угла сканирования, приведенных к точке сканирования (рис. 54).

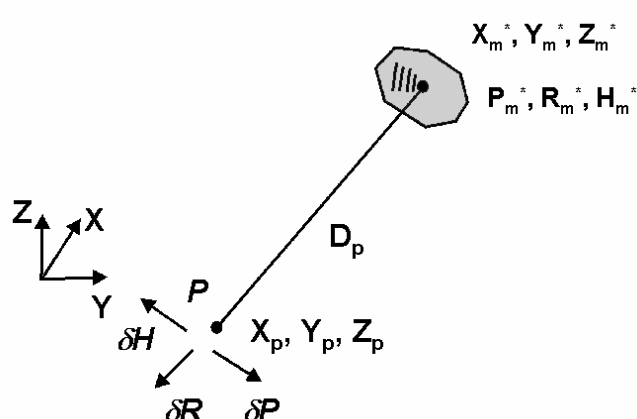


Рис. 54. Пространственные данные, сопоставляемые по каждой лазерной точке при проведении калибровки.

На рисунке значения координат X_m^*, Y_m^*, Z_m^* соответствуют точке сканирования в момент регистрации лазерной точки P , а значения P_m^*, R_m^*, H_m^* есть углы ориентации IMU в этот момент.

2. После того, как соответствие установлено, могут быть аналитически определены единичные векторы $\delta H, \delta R, \delta P$, соответствующие элементарным движениям точки P под воздействием коррекции соответственно углов H, R, P , так что новое исправленное положение P^* может быть определено по формуле:

$$P^* = P + \delta H \Delta H + \delta R \Delta R + \delta P \Delta P.$$

Представим математическое обоснование приведенных функций базового программного обеспечения. При выполнении синхронизации потоков данных выполняется билинейная интерполяция последовательностей $\{X_i^a, Y_i^a, Z_i^a, t_i\}$ и $\{R_j^a, P_j^a, H_j^a, t_j\}$ для определения значений, соответствующих моменту t_p . Так, для двух значений временных отметок t_i, t_{i+1} , таких что $t_i < t_p \leq t_{i+1}$ имеем:

$$X_a^* = \frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i} (t_p - t_i) + X_i$$

Аналогично определяются все остальные значения – $Y_a^*, Z_a^*, P_m^*, R_m^*, H_m^*$. Значения наклонной дальности D_p и фазы сканирования α_p могут быть определены непосредственно по полетным данным, так как всегда имеется однозначное соответствие между каждой лазерной точкой P и соответствующими значениями.

Следует иметь в виду следующее. Полученные таким образом значения P_m^*, R_m^*, H_m^* являются окончательными в том смысле, что они непосредственно могут быть использованы при расчете смещений $\delta H, \delta R, \delta P$. В то же время значения X_a^*, Y_a^*, Z_a^* определяют положение антенны и их необходимо привести к точке сканирования. Обозначая через $\overline{X_A^*} = \{X_A^*, Y_A^*, Z_A^*\}$ и через $\overline{X_m^*} = \{X_m^*, Y_m^*, Z_m^*\}$, такое приведение может быть выполнено по следующей формуле:

$$\overline{X_m^*} = \overline{A^*} \overline{X_A^*}$$

Задача определения элементарных векторов $\delta H, \delta R, \delta P$ может быть решена чисто аналитически.

Понятно, что искомые векторы могут быть выражены как:

$$\overline{\partial H} = \frac{\partial \overline{X}}{\partial H}, \quad \overline{\partial R} = \frac{\partial \overline{X}}{\partial R}, \quad \overline{\partial P} = \frac{\partial \overline{X}}{\partial P}$$

6.4.3. Рассмотрим стандартный метод калибровки. Как указано выше, при выполнении стандартной калибровки в качестве калибровочного объекта используется крупное здание. Залеты выполняются с высот 400–600 м по схеме, изображенной на рисунке 55.

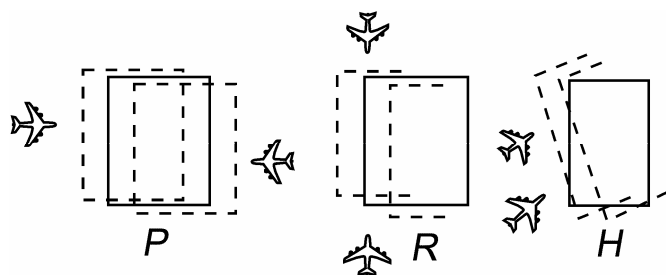


Рис. 55. Схема проведения залетов при выполнении стандартной калибровки.

следующие виды данных:

Используются по меньшей мере 6 результативных проходов, по два для контроля ошибки по тангажу – P , по крену – R и по курсу – H (рис. 55).

Для обработки данных калибровочного полета может использоваться, например, специализированная версия программного пакета ALTEXIS. В качестве входных используются

- 1) лазерно-локационные данные в ALX формате, т.е. совокупность лазерных точек, полученных в ходе калибровочного полета;
- 2) траекторные GPS данные, зарегистрированные бортовым GPS приемником;
- 3) данные по угловой ориентации носителя, зарегистрированные бортовым навигационным комплексом;
- 4) выставочные параметры взаимного положения точки сканирования, сенсора IMU и GPS антенны;
- 5) цифровой ортотрансформированный и геопривязанный аэроснимок калибровочного объекта, полученный в ходе выполнения калибровочного полета (может использоваться в качестве опции).

Процесс программной обработки при выполнении калибровки стандартного типа может быть разбит на три этапа:

- 1) ввод входных данных, проверка их целостности и полноты;
- 2) преобразование последовательностей данных к виду, описанному выше;
- 3) итерационный пересчет выбранного фрагмента данных с различными значениями ΔH , ΔR , ΔP . Коррекция пространственного положения каждой лазерной точки осуществляется в соответствии с представленными выше формулами.

Подбор значений поправок ΔH , ΔR , ΔP осуществляется оператором, исходя из общих представлений о характере смещений, вызываемых ошибкой того или иного вида, а также на основании геометрических замеров.

Благодаря использованию описанного программного обеспечения процедура пересчета нового положения лазерных точек после применения очередных значений ΔH , ΔR , ΔP не занимает значительного времени (как правило, не более нескольких секунд). Поэтому оператор может свободно выполнить десятки итераций по качественному подбору калибровочных параметров.

При реализации автоматического метода определение значений поправок ΔH , ΔR , ΔP происходит без участия оператора. Как уже отмечено выше, роль калибровочного объекта играет один пролет ЛЭП. Используется такая же, как и при стандартном методе, схема из шести залетов. По данным каждого залета программа распознает группу лазерных точек как связный объект – провод ЛЭП, положение которого в пространстве описывается законом цепной функции. Такой подход позволяет автоматизировать процедуру нахождения поправок ΔH , ΔR , ΔP , так как мы имеем шесть хорошо определенных математических объектов – уравнения цепных функций, описывающих один и тот же провод по данным залетов. Также имеется четкий критерий поиска – минимизация невязок пространственного положения всех этих шести математических объектов. С использованием численных математических методов удастся реализовать как определение самих значений поправок ΔH , ΔR , ΔP , так и доверительных интервалов для этих значений.

6.5. Компоновка аэросъемочного оборудования на борту носителя

В данном разделе анализируется опыт различных российских компаний по установке на различные летательные аппараты аэросъемочных лидаров серии ALTM канадской компании Optech Inc.

При решении задачи компоновки аэросъемочного оборудования решаются две основные задачи:

1) обеспечение наиболее качественной и надежной работы всех элементов аэросъемочного комплекса, а также наиболее комфортных условий работы бригады бортовых операторов;

2) обеспечение минимального вмешательства в конструкцию летательного аппарата.

Первая задача представляется совершенно естественной и не требует комментариев. Представим пояснения по второй задаче. При работе на территории Российской Федерации, так и за ее пределами, аренда носителя в месте проведения аэросъемочных работ является значительно более целесообразной с экономической точки зрения по сравнению с оборудованием постоянной летающей лаборатории. Однако при таком подходе необходимо свести к минимуму (желательно полностью исключить) какое-либо вмешательство в конструкцию летательного аппарата, так как против этого, как правило, возражает его владелец.

Вопросы компоновки аэросъемочного оборудования рассмотрим подробно на конкретных примерах из практики применения ЛЛ средств.

Вариант размещения сканерного блока и цифрового аэрофотоаппарата внутри фюзеляжа вертолета Ми-8 отечественного производства, представлен ранее на рисунке 31, с. 70. На рисунке 56 представлено размещение GPS антенны на хвостовой балке вертолета вместо 2-го строевого огня.



Рис. 56. Крепление GPS антенны на хвостовой балке вертолета Ми-8.

Данная схема компоновки представляется удачной по следующим причинам:

- удастся полностью исключить вмешательство в конструкцию летательного аппарата, что крайне важно при работе на территории Российской Федерации. Весь аэросъемочный комплекс получает энергию от штатного бортового источника питания. Максимальное потребление не превышает 1 кВт;

- для размещения сканерного блока и цифрового аэрофотоаппарата используется штатный люк тросовой подвески, которым оборудованы все вертолеты типа Ми-8, Ми-8МТ, Ми-8МТВ. Размер люка позволяет использовать лазерный локатор с максимальным углом сканирования – до 50° , а также фотоаппарат с объективом, обеспечивающим ширину поля зрения до 70° . При этом фотоаппарат располагается только в плановом положении, а сканерный блок за счет использования специальных скобок может занимать три положения – строго вертикальное, с углом наклона 10° и 20° .

Аэросъемочное оборудование крепится к раме, которая используется как для размещения оборудования, так и для вибрационной защиты. При выборе амортизаторов для рамы были приняты меры по исключению вращательных колебаний, так как такие колебания даже с небольшой угловой амплитудой могут привести к значительным колебаниям взаимного положения сенсора IMU и GPS антенны и тем самым существенно снизить точность определения координат.

нат. В зимнее время года для обогрева аэросъемочного оборудования используется вентилятор, который обдувает сканерный блок салонным воздухом.



Рис. 57. Размещение стойки управления локатора, GPS приемника и вспомогательного оборудования.

Рисунок 57 иллюстрирует размещение стойки управления локатора, GPS приемника и вспомогательного оборудования внутри фюзеляжа.

Фактическая дальность вертолета Ми-8 с двумя дополнительными топливными баками составляет 600–650 км на рабочей скорости 100–120 км/час, что значительно облегчает организацию аэросъемочных работ в удаленных районах с недостатком мест базирования.

К недостаткам вертолета Ми-8 как носителя можно отне-

сти следующие факторы:

- высокая стоимость – в Российской Федерации порядка 1000–1500 долларов США за летный час, за рубежом – до 5000 долларов. Это связано как с большой стоимостью самого вертолета (около 2 млн. долларов), так и с высокими эксплуатационными расходами, в частности потребление горючего составляет 600 кг/час;

- низкая маневренность и ограничение на минимальную скорость и высоту полета. Эти ограничения связаны с большим весом аппарата. В определенных случаях это создает значительные проблемы при организации аэросъемочных работ;

- GPS антенна устанавливается под несущим винтом, который у Ми-8 выполнен из металла, т.е. не является радиопрозрачным. В результате этого снижается соотношение сигнал-шум на входе GPS приемника на 20–30 дБ. Кроме того, расстояние между сенсором IMU и GPS антенной для этой модели вертолета значительно – около 7 м, что налагает дополнительное требование к точности определения выставочных параметров.



Рис. 58. Размещение аэросъемочного комплекса на вертолете Gazelle.

Другим возможным примером внутренней установки аэросъемочного оборудования является вертолет Gazelle производства французской компании Aerospatiale, ныне входящей во франко-германский концерн Eurocopter (рис. 58). Важным преимуществом этого типа носителя является возможность установки GPS антенны на конец хвостовой балки. В этом положении антенна не подвергается влиянию ни несущего винта, ни заднего винта. Малые размеры вертолета не позволяют, однако, разместить в салоне более одного аэросъемочного прибора.



Рис. 59. Размещение аэросъемочного комплекса на вертолете Bell-206 Jet Ranger с внешней установкой сканерного блока.



Рис. 60. Размещение аэросъемочного комплекса на вертолете Bell-206 Jet Ranger с внутренней установкой сканерного блока.



Рис. 61. Размещение аэросъемочного комплекса на вертолете Eurocopter AS-350.

Другим примером является размещение аэросъемочного комплекса на вертолете Bell-206 в модификации Jet Ranger или Long Ranger, производства американской компании Bell Helicopters. Эта модель вертолета не оборудована штатным плановым люком, поэтому размещение сканерного блока возможно по одной из следующих схем: на внешней подвеске с креплением к шасси с помощью AIR STEPS (рис. 59), либо внутри фюзеляжа по схеме, изображенной на рисунке 60.

Во втором случае временно удаляется один из нижних иллюминаторов, который заменяется пластмассовой заглушкой. В заглушке проделываются отверстия для размещения сканера, цифрового фотоаппарата или тепловизора. GPS антенна для этой модели вертолета, как правило, крепится в верхней части фюзеляжа.

При размещении аэросъемочного комплекса на борту вертолета AS-350 производства франко-германского концерна Eurocopter был разработан специальный контейнер, который крепился в носовой части фюзеляжа (рис. 61). Внутри контейнера располагались сканирующий блок, цифровой фотоаппарат и средства коммутации. Контейнер был выполнен герметичным, что позволяло выполнять работы, не опасаясь появления осадков. GPS антенна располагалась на верхней крышке контейнера. Такая схема представляется наиболее удачной с метрологической точки зрения, так как все три главных аэросъемочных компонента максимально приближены друг к другу.

Размещение аэросъемочного оборудования на борту вертолета Robinson R-44 вызвало наибольшие трудности следующего характера:

- 1) штатная система электропитания вертолета имеет напряжение 12 вольт, в то время как для питания лидаров типа ALTM было необходимо пита-

ние 24–32 вольт. По этой причине были использованы два автомобильных аккумулятора, которые позволяли выполнять съемку в течение 40 минут без подзарядки;

2) в связи с отсутствием люка сканерный блок крепился к шасси, как и в случае с вертолетом Bell-206. Однако, в отличие от последнего, у R-44 шасси меняют свое положение после взлета. Чтобы избежать изменения взаимного положения GPS антенны и сканерного блока, GPS антенна была закреплена на специальной штанге, которая также крепилась к шасси. В результате шасси, GPS антенна, сканерный блок и фотоаппарат, конструктивно представляли собой единое целое и их взаимное положение не изменялось в ходе съемки.

7. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ ЗЕМЛИ И ЛЕСА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ

7.1. Изучение земной поверхности и структуры лесного покрова методом лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки

Лазерное зондирование, как мы уже отмечали выше, является составной частью новейших методов и технологий геоинформатики и цифровой фотограмметрии, находит применение во многих гражданских отраслях и коммерческом использовании, а также в решении задач лесоэкологического мониторинга и активно развивается во многих странах (Мельников, 2001, 2005, Медведев, 2005, Медведев и др., 2002, 2005, Данилин, Медведев, 2005а,б, Основы, 2005).

В целях мониторинга леса лазерное зондирование выполняется как самостоятельно, так и в комплексе с цифровой воздушной и космической фото- и видеосъемкой, а также наземными исследованиями на пробных площадях и полигонах и по многим показателям превосходит другие, известные на сегодняшний день, дистанционные методы изучения и измерения параметров лесного покрова (табл. 17).

Таблица 17. Общая сравнительная оценка регистрации характеристик лесного покрова различными методами измерений и дистанционного зондирования

Методы регистрации и измерений	Размеры отдельных деревьев	Высота деревьев	Площади и границы объектов	Получение данных	Обработка данных	Классификация лесного покрова
Наземные измерения	⊙	△	×	×	△	×
Воздушная съемка и фотограмметрия	○	△	○	○	×	⊙
Спутниковые снимки	×	×	⊙	⊙	⊙	○
Лазерная локация	○	⊙	○	⊙	⊙	△

За рубежом лазерная съемка с космических и авиационных носителей и наземная съемка отрабатывались методически и получили распространение в геодезии, картографии и при инвентаризации лесов (Hill et al., 2000, Means et al., 2000, Lefsky et al., 2002, 2005, Remote Sensing, 2003, Maltamo et al., 2004, Næsset et al., 2004) (рис. 62, 63).

В России работы, ориентированные на лазерную таксацию лесов, получили развитие еще до появления бортовых лазеров. Это, главным образом, исследования, проведенные в Ленинградском НИИ лесного хозяйства, которые показали высокую эффективность лазерного профилирования, совмещенного с материалами традиционной аэрофотосъемки для целей таксации леса (Солодухин и др., 1977, Столяров и др., 1987).

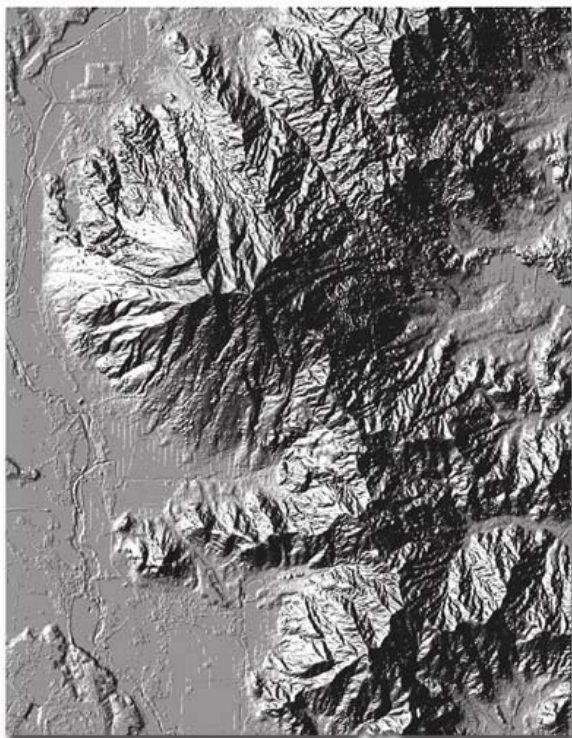


Рис. 62. Цифровое отображение рельефа (цифровая модель рельефа) на основе лазерной съемки в районе горы Цукуба, Япония (Hill et al., 2000).

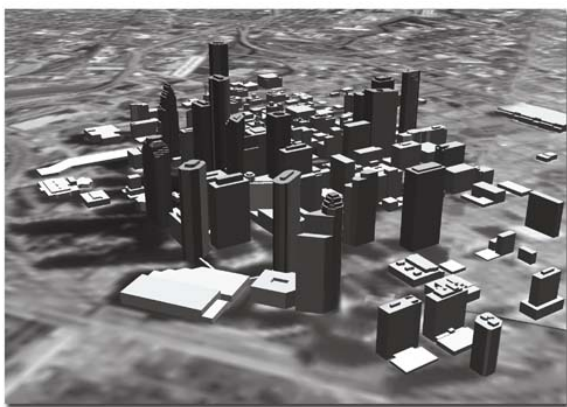


Рис. 63. Цифровая реконструкция (ЦММ) центральной части г. Хьюстон, Техас, США (Hill et al., 2000).

С появлением и доступностью в гражданских отраслях высокоточных систем глобального спутникового позиционирования, бортовой лазерной и цифровой фото- и видеосъемки открываются новые возможности для получения характеристик земной поверхности и лесной растительности с дистанционным измерением геометрических параметров наземных объектов с точностью порядка $\pm 5\text{--}10$ см (Harding et al., 2001, Данилин и др., 2001, 2005, Kulešis et al., 2001, Medvedev, 2002, Zhou et al., 2003, Falkenried, 2004, Yu et al., 2004, Andersen и др., 2005).

В последние годы (2000–2006) абсолютное конкурентное преимущество исследований в данном направлении принадлежит ученым из западных стран, прежде всего Канады, США и Европы, где отмечается бум в области применения лазерных технологий для исследования лесов и в других тематических приложениях, на новом этапе развития аппаратуры и методов дистанционного зондирования и спутниковой навигации, и наблюдается «массированная атака» в решении проблемы с бюджетами в сотни миллионов долларов (Means и др., 2000, 2001, Harding et al., 2001, Lefsky et al., 2002, 2005, Persson et al., 2002, Proceedings, 2003, Maltamo et al., 2004, Laser-Scanners, 2004, Riaño et al., 2004, Næss et al., 2004, 2005).

Особо выделяются в этой области канадские исследователи, в течение нескольких лет выполняющие

крупномасштабный многокомпонентный проект по исследованию структуры покрова лесных территорий методом лазерного сканирования (Remote Sensing, 2003, St-Onge et al., 2004, Wulder et al., 2004), а также американские ученые, работающие с лазером для сканирования полога растительности (Vegetation Canopy Lidar (VCL)) и в ряде других проектов Национального Аэрокосмического Агентства (NASA) и американских университетов (Means et al., 2000, 2001, Harding et al., 2001, Hudak et al., 2002, Lim et al., 2002, 2004, Andersen et al., 2005, Lefsky et al., 2005, Hyde et al., 2006).

Для целей таксации и мониторинга лесов представляет интерес разработка американских ученых, создавших и использующих относительно недорогую

(порядка \$30 тыс.), по сравнению с лазерными сканерами ALTM канадской фирмы Optech (\$1–1.3 млн.), портативную, легкую (5 кг) и достаточно эффективную систему воздушного лазерного сканирования для высокоточной оценки древесных запасов и биомассы леса (Nelson et al., 2004).

Российские исследования в области применения методов лазерного зондирования леса в настоящее время явно недостаточны и фрагментарны, что в значительной мере объясняется скудностью бюджетного финансирования науки в данной области и невыраженной заинтересованностью основных потенциальных пользователей и заказчиков новейших технологий дистанционного мониторинга, прежде всего Министерства природных ресурсов и других министерств и ведомств (Данилин, 2003, Медведев, 2003, Данилин и др., 2005).

Методика работ

Съемочные работы выполняются по принципу фотостатистического метода. Предварительно на район работ выполняется подбор спутниковых снимков среднего и высокого разрешения и доступных данных космической съемки в системах LANDSAT ETM+, IRS, РЕСУРС, ERS-1/2, JERS, а также систем нового поколения: QuickBird-II, IKONOS, РЕСУРС ДК-1, EARLYBIRD, ORBVIEW-3, RADARSAT-2, ALOS, ADEOS и др. С использованием стандартных методов и процедур осуществляется геометрическая и радиометрическая коррекция спутниковых изображений и проводится предварительное изучение территории и лесного покрова, в том числе по данным наземных наблюдений и измерений и имеющимся картографическим и лесоустроительным материалам (Erdas, 2002, Remote Sensing, 2003, Книжников и др., 2004б, Данилин и др., 2005, Сухих 2005).

Весь комплекс работ включает в себя следующие основные этапы и процедуры:

Исследование данных спутниковой съемки –

- Предварительная обработка данных (геометрическая и радиометрическая коррекция).
- Классификация по параметрам лесного покрова с использованием существующих методов обработки данных, основываясь на спектральных сигнатурах и текстурных характеристиках изображений.
- Верификация результатов классификации по данным наземных измерений на тестовых участках.

Исследование данных лазерной локации –

- Применение существующих статистических методов для оптимизации и достоверного разделения «первичных» и «вторичных» лазерных импульсов, основываясь на исходных данных сканирования.
- Расчет параметров трехмерных моделей кроновых структур и древостоев на основе исходных «первичных» импульсов.
- Расчет параметров трехмерных моделей кроновых структур и древостоев на основе исходных «вторичных» импульсов.
- Интерполяция исходных данных сканирования.
- Разработка эффективных алгоритмов сегментации и сепарации деревьев и древостоев и их структурных элементов.
- Расчет лесотаксационных показателей по данным лазерного сканирования.
- Верификация результатов математического моделирования на координатных пробных площадях и тестовых участках.

Синергетическое использование различных типов сенсоров –

- Интегрирование результатов классификации лазерной локации, радарной и цифровой воздушной и спутниковой съемки.
- Изучение методических и технологических преимуществ и недостатков синергетического использования различных типов сенсоров.
- Лабораторное моделирование и визуализация операционных возможностей перспективных приборов и инструментов дистанционного зондирования для целей лесозоологического мониторинга и лесной таксации, на примере таких систем, как: ALTM, FALCON, ADS, ALS, RSAL, Pi-SAR, ADEOS.

Контроль качества работы системы –

- Оценка стоимостных показателей метода в сравнении с существующими методами таксации и мониторинга леса, с целью содействия процессу принятия решений и его дальнейшего совершенствования.
- Оценка возможностей полноценной замены традиционных подходов и способов наземных полевых измерений и мониторинга инновационными методами и технологиями дистанционного зондирования.
- Оценка полученных результатов конечными пользователями.

Тематическая обработка и дешифрирование космических изображений проводятся в интерактивном (человеко-машинном) режиме с использованием пакетов программ Erdas Imagine V.8.5 методом обучающей выборки (*supervised classification*) и цветовых композиций (*color composition*) (Erdas, 2002).

Метод цветовых композиций основывается на синтезе в псевдоцветах пространственно совмещенных изображений, полученных в отдельных узких зонах спектра и передающих яркостные характеристики природных объектов в этих отдельных зонах спектра. Причем для синтеза выбираются такие зоны съемки, в которых наилучшим образом отражаются интересующие исследователя объекты. Изображениям отдельных зон спектра могут присваиваться любые из трех основных цветов (синий, зеленый, красный – преобразование RGB) или другие характеристики, например, интенсивность, насыщенность, оттенок – преобразование IHS. Последнее преобразование обычно используется при синтезировании радиолокационных снимков и изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

На примере спутниковых снимков JERS-1 центральных районов Республики Тува были выделены волновые диапазоны, которые позволяют достоверно классифицировать основные типы лесного покрова (по преобладающей породе) и категориям земель (рис. 64, табл. 18, 19).

В таблице 18 представлены результаты анализа существенности различий дешифрируемых контуров лесных массивов в различных волновых диапазонах, оцененных по критерию Стьюдента (t при $p < 0.01$). Как видно из таблицы 18, использование 1-го и 3-го волновых каналов космических снимков JERS-1 в цветовой композиции RGB обеспечивает достоверное дешифрирование практически всех, перечисленных ниже, типов лесного покрова, в то время как во втором волновом диапазоне не было установлено существенных различий контуров по их спектральной яркости между лиственничниками и кедровниками (1-й и 2-й классы), между кедровниками и сосняками (2-й и 3-й классы), а также между березой и редкостойными лиственничниками (5-й и 6-й классы).

По результатам компьютерной классификации космических снимков, выполненной в первом и третьем волновых диапазонах методом максимального подобия (*maximum likely-hood classifier*) (Erdas, 2002), была составлена цифро-

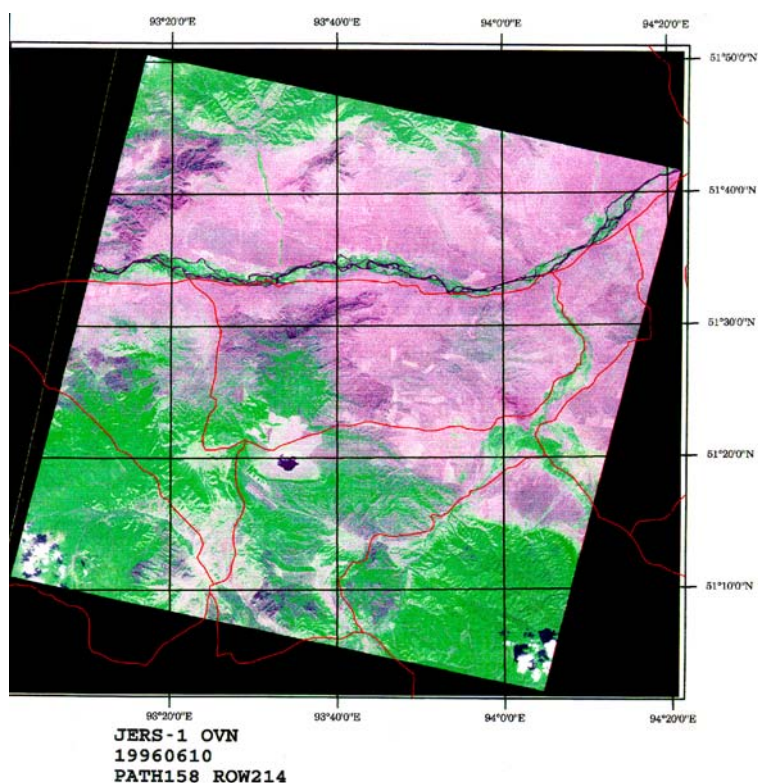


Рис. 64. Геокодированный цифровой снимок центральной части Республики Тува, выполненный со спутника JERS-1 OPS (Japanese Earth Resource Satellite-1 Optical Scanner) оптическим сканером с разрешением 18 м на местности и классифицированный методом максимального подобия (данные Национального Агенства Аэрокосмических Исследований Японии - NASDA).

вая карта доминирующих типов лесного покрова центральных районов Республики Тува (рис. 65) (Данилин, 2003).

В пределах покрытия одной спутниковой сцены (территория размером примерно 70×70 км) намечаются трансекты для воздушной цифровой фотографической и лазерной съемки, подбираемые на природной основе по принципу репрезентативного представления разнообразия геоморфологической структуры и растительного покрова земной поверхности района исследований и выполненной ранее классификации, а также намечаются и закладываются наземные пробные площади и полигоны на ключевых участках (Фарбер и др., 2003).

Таблица 18. Показатели значимости и достоверности различия выделения различных классов лесного покрова по спутниковым снимкам JERS-1 в различных волновых диапазонах

Класс	1	2	3	4	5	6
Волновые диапазоны 1 и 3 (0.52–0.60/0.76–0.86 нм)						
1	–	○	○	○	○	○
2	○	–	○	○	○	○
3	○	○	–	○	○	○
4	○	○	○	–	○	○
5	○	○	○	○	–	○
6	○	○	○	○	○	–
Волновой диапазон 2 (0.63–0.69 нм)						
1	–	×	○	○	○	○
2	×	–	×	○	○	○
3	○	×	–	○	○	○
4	○	○	○	–	○	○
5	○	○	○	○	–	×
6	○	○	○	○	×	–

Условные обозначения: × – различия не значительны и недостоверны;
○ – различия значительны и достоверны.

Таблица 19. Классификация типов лесного покрова и категорий земель

Класс	Наименование класса (типы лесного покрова и категории земель)
1	Лиственница (<i>Larix sibirica</i>)
2	Кедр (<i>Pinus sibirica</i>)
3	Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>)
4	Ель (<i>Picea obovata</i>)
5	Береза (<i>Betula pendula</i>)
6	Редкостойные лиственничники
7	Леса, нарушенные вырубками и пожарами
8	Водные поверхности
9	Луга, участки степей и открытые пространства

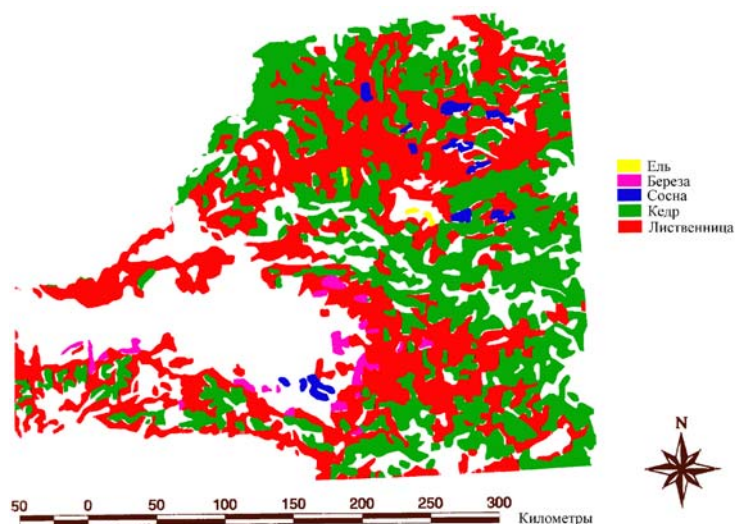


Рис. 65. Фрагмент цифровой карты основных типов лесного покрова центральных районов Республики Тува.

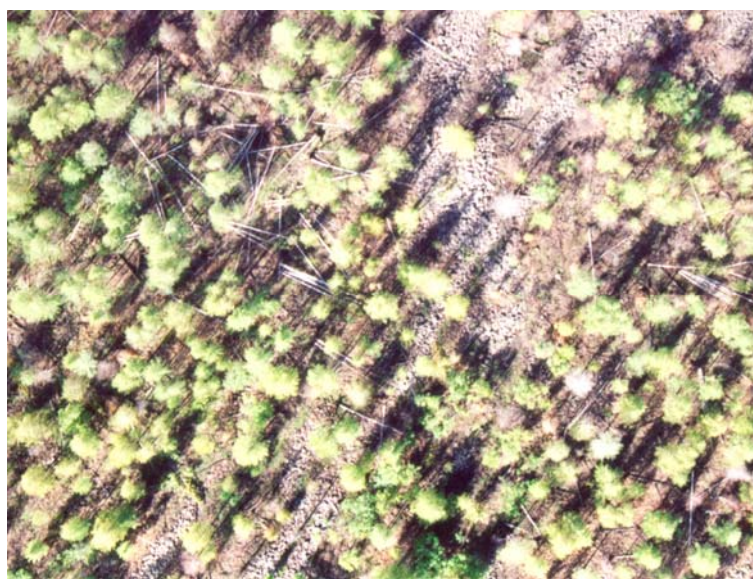


Рис. 66. Цифровой аэрофотоснимок в формате True Color (истинные цвета) участка лазерного трансекта в районе р. Бахта (63°34'47.3" с.ш. 90°42'11.2" в.д.).

Аэросъемочные работы проводились с борта вертолета МИ-8 аппаратурой авиационного лазерного картографирования ALTM 3100 (Aiborne Laser Terrain Mapping System) производства канадской фирмы Optech Inc.

Прибор размещается в малогабаритном (29×25×43 см) контейнере и работает по принципу полупроводникового импульсного сканирующего лазерного дальномера ближнего инфракрасного диапазона, который обеспечивает измерение наклонной дальности по каждому элементу сканирования. При этом может фиксироваться дальность как до ближайших объектов, попавших в поле проникновения лазерного луча (верхушки деревьев), так и, наоборот, до наиболее далеких (в этом случае возможна съемка рельефа сквозь листву деревьев).

Одновременно ведется цифровая видео- и фотосъемка (рис. 66) аппаратурой KODAK EOS -

DSC 1 с CCD матрицей размером 5000×3000 элементов (15 млн. пикселей) в истинных цветах (True Color), обеспечивающей разрешение на местности с высоты 300 м 5–7 см при размере кадра 200 м вдоль направления полета и 100 м поперек.

Основные технические характеристики сканера ALTM 3100 приведены в таблице 20.

Система ALTM 3100 изначально разрабатывалась для производства воздушных топографических съемок земной поверхности и создания крупномасштабных планов местности.

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, *принцип работы* системы лазерного сканирования леса достаточно прост. Импульсный лазер оптически совмещен с главным лепестком диафрагмы направленности антенны, которая сканирует лазерным лучом полосу местности обычно в направлении полета самолета, на котором установлена ALTM. Время отражения лазерного луча от земли и лесной растительности измеряется и приводится к скорости света. Положение самолета при каждом измерении фиксируется с помощью Глобальной Системы Позиционирования (GPS). Вращательные движения главного лепестка антенны определяются креном самолета, угол наклона и направление которого определяются инерционной навигационной системой, с ее помощью вычисляются векторные значения от самолета до земли. Когда эти значения суммируются с текущим местоположением самолета, мы получаем истинные координаты точек отражения на поверхности земли и различных частей деревьев (Медведев, 2003).

В настоящее время в промышленности доступны лазеры, изготовленные из твердотельных элементов, которые могут излучать 100 тысяч и более импульсов в секунду, длительностью в несколько наносекунд.

Свет распространяется приблизительно на 30 сантиметров за одну наносекунду (1 сек. = 10^9 наносекунд). Точно рассчитывая время распространения импульсов света от лазера до отражающей поверхности и обратно, можно определить расстояние от лазера до поверхности с точностью до одного сантиметра. Ошибки в определении местоположения и ориентации самолета, угловые лепестки диаграммы направленности, атмосферная рефракция и другие помехи ухудшают точность измерения координат точек отражения до 5–10 сантиметров. Ширина сканируемой полосы местности (за один проход) зависит от угла сканирования лазерного дальномера и высоты полета самолета. Обычно скорость самолета составляет от 200 до 250 километров в час (55–70 метров в секунду), а высота – от 80 до 3500 метров, угол сканирования может достигать 20 градусов, частота – от 33 до 100 тысяч зондирующих импульсов в секунду. Эти параметры могут варьироваться для достижения точности измерения координат местности порядка 10–20 сантиметров, что достаточно для создания цифровой модели местности (ЦММ) и выбора технических решений при проектировании и создании различных инженерных объектов, топографических и лесных карт, планов и схем, освидетельствовании вырубок и гарей и многих других задач.

Навигационное обеспечение осуществляется за счет использования бортовых GPS приемников Trimble 750, синхронно работающих с наземной базовой станцией Z-12 Ashtech (рис. 67) и инерциальной системой на основе оптических гироскопов и акселерометров.

Материалы съемки обрабатываются сразу же на борту летательного аппарата, в дальнейшем – в камеральных условиях с помощью специальных прог-

**Таблица 20. Основные технические параметры лазерных сканеров,
используемых для съемки леса**

Наименование параметра	ALTM 30/70	ALTM 3100
Частота зондирующих импульсов	33 кГц; 50 кГц; 70 кГц	33 кГц; 50 кГц; 70 кГц; 100 кГц
Высота полета при съемке	от 200 до 3000 м	от 80 до 3500 м
Точность сканирования по высоте	Не хуже 15 см при высоте 1200 м; не хуже 35 см при высоте 3000 м	Не хуже 15 см при высоте 1200 м; не хуже 25 см при высоте 2000 м; не хуже 35 см при высоте 3000 м
Точность определения планового положения точек	Лучше, чем 1/2000 от высоты съемки	Лучше, чем 1/2000 от высоты съемки
Ширина полосы съемки	От 0 (режим профайлера) до 93% от высоты съемки	От 0 (режим профайлера) до 93% от высоты съемки
Разрешение по дальности	1 см	1 см
Количество регистрируемых отражений лазерного импульса	4, включая последний	4, включая последний
Регистрация интенсивности	12 бит динамический диапазон для каждого измерения	12 бит динамический диапазон для каждого измерения
Угол сканирования	От 0 до + 25°	От 0 до + 25°
Компенсация крена	Номинально ±5°, в зависимости от текущего значения поля зрения (например, при ±15° допустимое значение компенсации ±10°)	Номинально ±5°, в зависимости от текущего значения поля зрения (например, при ±15° допустимое значение компенсации ±10°)
Ширина полосы захвата	От 0 до 0.93×Н м	От 0 до 0.93×Н м
Частота сканирования	0–70 Гц, зависит от угла сканирования (например, 50 Гц при ±20°)	0–70 Гц, зависит от угла сканирования
Распределение отражений на поверхности земли	Равномерное, на протяжении 96% линии сканирования	Равномерное, на протяжении 96% линии сканирования
Используемый бортовой навигационный комплекс	Applanix POSAV, модифицирован	Applanix POSAV, модифицирован
Бортовой GPS приемник	Trimble 750	Trimble 750
Регистрация данных	Переносной жесткий диск (37 Гбайт)	Переносной жесткий диск (57 Гбайт)
Расходимость лазерного луча	Двойная: 0.2 мрад или 0.7 мрад	Двойная: 0.3 мрад или 0.8 мрад
Категория лазера	Class 4	Class 4
Высота безопасного зрения	200 м при 0.7 мрад 400 м при 0.2 мрад	200 м при 0.7 мрад 400 м при 0.2 мрад
Потребление энергии	28 вольт переменного тока, 24 ампера в среднем, 35 ампер пиковое потребление	28 вольт переменного тока, 24 ампера в среднем, 35 ампер пиковое потребление
Влажность	0–95% без конденсата	0–95% без конденсата
Диапазон рабочих температур: – сканирующий блок; – стойка управления; – при термостабилизации	от –20°C до +35°C от +10°C до +35°C от –30°C до +55°C	от –10°C до +35°C от +10°C до +35°C от –30°C до +55°C
Габариты/вес: – сканирующий блок; – стойка управления	25 W×32 L×56 H см/20 кг 59 W×58 L×49 H см/55 кг	26 W×19 L×57 H см/23.4 кг 65 W×59 L×49 H см/53.2 кг



Рис. 67. Установка наземной базовой GPS станции Z-12 Ashtech для обеспечения воздушной лазерной съемки (работы выполняет профессор Е.М. Медведев).

рамм, позволяющих получать геометрические параметры отдельно стоящих деревьев и реально читаемые морфоструктурные характеристики полога древостоя по всему маршруту съемки. Изображение представляется в трехмерном виде, поэтому пользователи могут работать с материалами фото- и видеосъемки, цифровой моделью и базой данных в наиболее удобном режиме.

Выходные данные

Курс полета наносится на топографические карты масштаба 1:100000–200000. На жесткий диск портативного компьютера записываются данные локаций:

- а) расстояние маршрута полета в метрах;
- б) показатели широты и долготы точек съемки в системе WGS84 или UTM;
- в) оригинал полосы сканирования с отметками высоты поверхности земли и отметки полога лесной растительности над уровнем моря в метрах;
- г) высота полога лесной растительности, включая подрост, подлесок и травяной покров в метрах;
- д) время съемки по приемнику GPS с точностью до секунды.

Параметрические характеристики каждой точки локаций (100 точек на 1 погонный метр профиля) табулируются и разбиваются на колонки данных по пунктам для каждой точки в формате данных ASCII или любом другом цифровом формате представления и с последующей статистической обработкой массивов данных (табл. 21).

Таблица 21. Пример исходных табулированных данных лазерной съемки

Номер точки съемки	Расстояние от начальной до конечной точки маршрута съемки, м	Широта точки съемки	Долгота точки съемки	Высота над уровнем моря, м	Высота лесного полога, м	Время съемки (час/мин./сек.)
1	0.00	50°55'00"	94°49'00"	1147	23.4	11:25:13
2	0.05	50°55'00"	94°49'00"	1147	23.2	11:25:13
3	0.10	50°55'00"	94°49'00"	1147	23.3	11:25:14
.	.	.	.	.	.	.

Для расширения номенклатуры собираемых данных и обеспечения комплексности и максимальной информативности получаемой информации формируются так называемые «многосенсорные» аэросъемочные системы, которые включают «тематические сенсоры» – тепловизоры, работающие в спектральном диапазоне 3–5 мкм, для оценки температурного режима и степени по-

жарного созревания лесной растительности (точность дистанционного измерения температурного градиента $\pm 0.01^\circ\text{C}$) и спектрозональные сканеры высокого разрешения для оценки степени нарушенности лесного покрова. Максимальный информативный эффект достигается, когда тепловая и спектрозональная съемки выполняются в синхронном режиме с лазерной, радарной, фото- и видеосъемкой и спутниковым геопозиционированием (Данилин и др., 2005).

При дистанционном мониторинге лесного покрова обычно проводится съемка tranсекты, представленной различными типами лесной растительности и элементами рельефа. На протяжении tranсекты для наземной верификации закладываются пробные площади (по принципу репрезентативного представительства типов местообитаний и лесной растительности), на которых проводятся измерения параметров насаждений с получением детальной таксационной характеристики и взятием модельных деревьев по принципу ступенчатого представительства, что важно для корректной оценки биомассы.

Наземные измерения на пробных площадях выполняются с использованием системы лазерного дендрометра LaserAce 300 MDL, полевого микрокомпьютера Psion и приемника спутникового геопозиционирования Trimble, что позволяет оперативно получать таксационные характеристики насаждения и его географические координаты с высокой точностью и переводить их в цифровой формат непосредственно в лесу на пробной площади с сохранением в памяти компьютера для последующей специализированной обработки и архивирования (рис. 68–71).

Спутниковые снимки на объект исследований (используются усиленные панхроматические лесные сцены IKONOS, с нанесенными границами таксационных выделов, траверсами и GPS центрами пробных площадей с реальным пространственным разрешением на местности 1 м) для работы в полевых условиях представлены в карманных компьютерах типа Casio CASSIOPEIA E-750, или Compaq iPAQ 3650 Pocket PC (рис. 72), совмещенных с GPS приемником Trimble PathFinder Pocket и средствами телекоммуникации и передачи данных непосредственно с пробной площади (таксационного выдела) в офис, посредством сотовой или спутниковой связи. Данная система позволяет работать с цифровыми спутниковыми изображениями в формате ГИС ESRI ArcPad 5.0.1, полностью совместимой со всеми версиями ArcView, непосредственно на пробной площади в лесу и позиционировать как отдельные участки таксационного выдела (пробной площади), так и отдельные деревья с очень высокой (± 10 – 15 см) точностью (рис. 73). Снимки сверхвысокого разрешения IKONOS имеют размер порядка 415–450 Mb, поэтому для работы с ними в карманных полевых компьютерах выполняется процедура сжатия исходного изображения в соотношении примерно 20:1 и уменьшения объема до 20 Mb средствами программного обеспечения MrSID компанией LizardTech, Inc.

В 2000–2006 гг. нами отрабатывалась общая методика зондирования и исследования структуры лесного покрова на основе спутниковой съемки и воздушной съемки бортовыми лазерными сканерами ALTM 1020/30/70/3100.

Работы выполнялись в Туруханском районе Красноярского края (район р. Бахта) на tranсекте общей протяженностью 200 км, где была заложена серия наземных пробных площадей для определения лесной биомассы в подзоне сибирских среднетаежных лиственнично-елово-кедровых лесов, местами в сочетании с березняками и сфагновыми болотами (63° – 64° с.ш., 89° – 91° в.д.) (рис. 74–83).



Рис. 68. Лазерный дендрометр (дальномер-высотометр) Laser Ace 300 MDL.



Рис. 69. Полевой портативный компьютер Psion.



Рис. 70. Измерение и регистрация таксационных и морфоструктурных параметров деревьев на пробной площади лазерным дендрометром Laser Ace 300, сопряженным с полевым компьютером Psion.



Рис. 71. Определение местоположения и географических координат на пробной площади лазерного трансекта системой спутникового позиционирования DGPS Trimble ProXR.

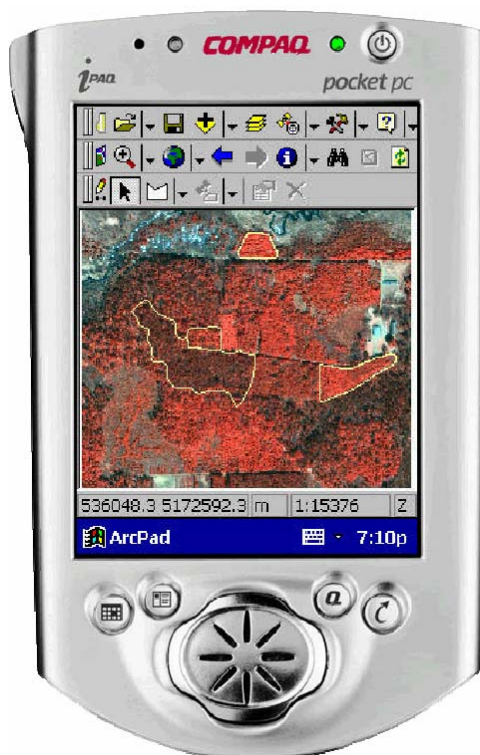


Рис. 72. Карманный компьютер Compaq iPAQ Pocket PC для работы со спутниковыми изображениями высокого разрешения на координатных пробных площадях.

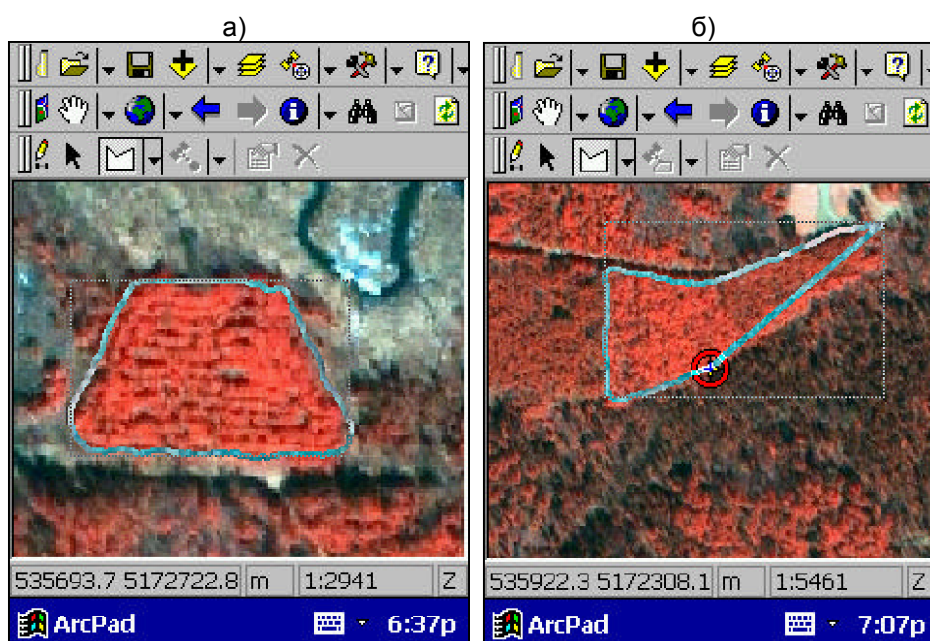


Рис. 73. Снимки экрана лесотаксационного выдела спутникового изображения IKONOS в программной оболочке ESRI ArcPad ГИС: а) – цифровое кодирование полигона; б) – нанесение марок GPS точек таксации участка наземной пробной площади.

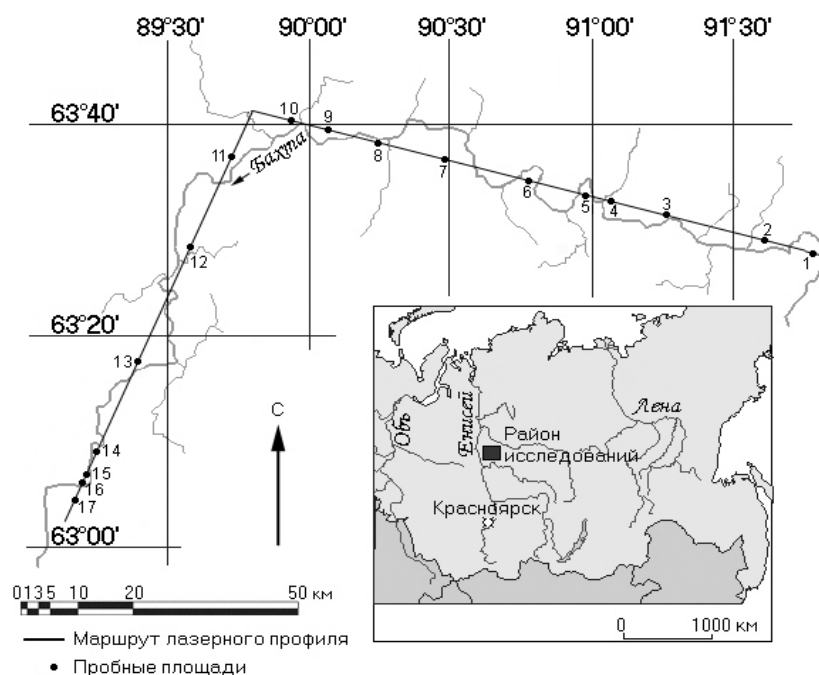
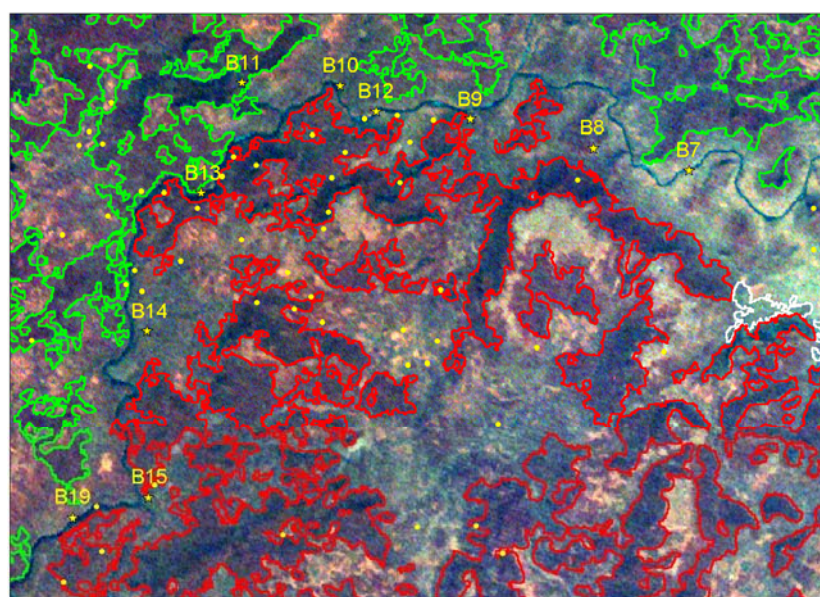


Рис. 74. Схема района исследований и размещения наземных пробных площадей по маршруту лазерного сканирования лесного покрова в районе р. Бахта.



р. Бахта 15.09.2000 г. М 1 : 500 000

- 15 Сибирские северотаежные лиственнично-елово-кедровые леса, местами в сочетании со сфагновыми болотами
- 16 Сибирские среднетаежные елово-пихтово-кедровые леса, местами в сочетании со сфагновыми болотами и березняками
- B7 Локализация наземных пробных площадей и снимков высокого (1 м) разрешения

Рис. 75. Спутниковый снимок Ресурс МСУ-Э среднего (35 м) разрешения на район р. Бахта, классифицированный по преобладающим типам лесного покрова методом максимального подобия (данные СканЭкс, 2002).

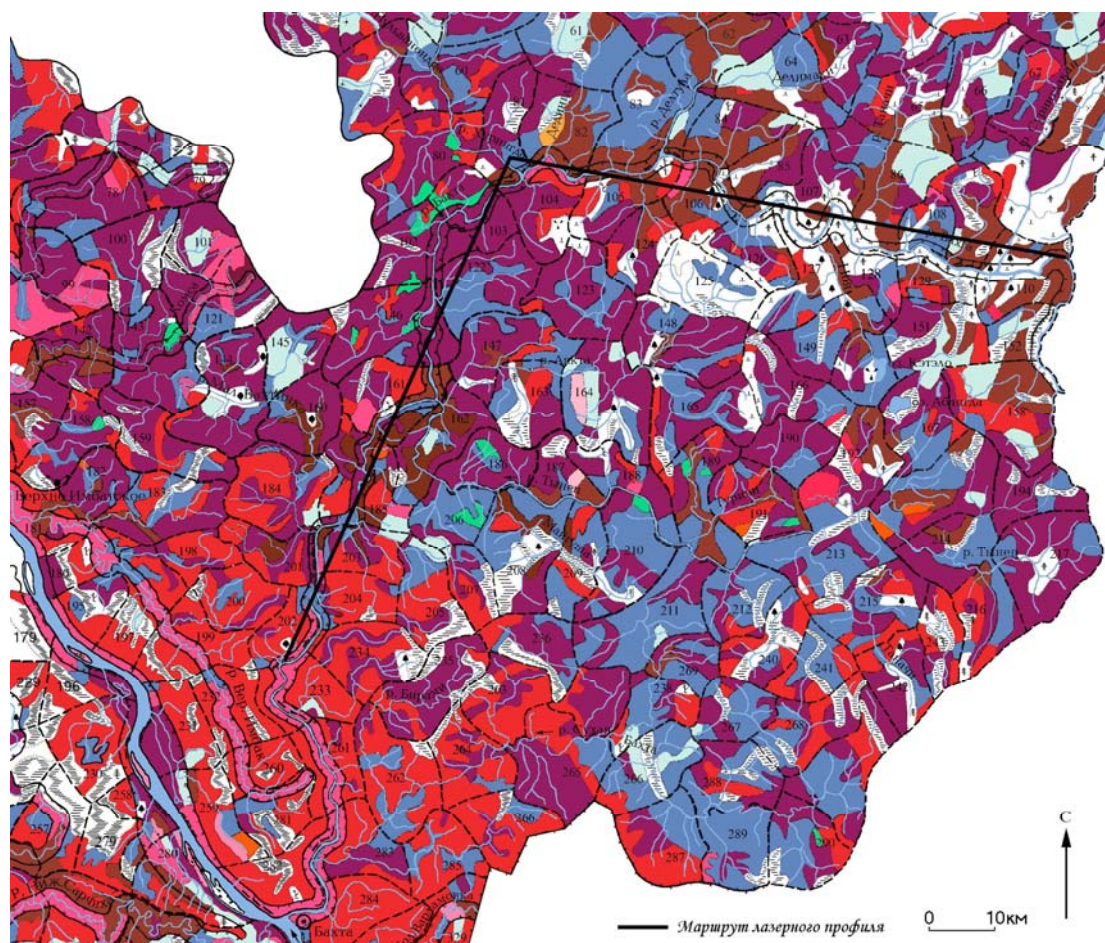


Рис. 76. Фрагмент цифровой карты-схемы, окрашенной по преобладающим породам, с маршрутом лазерного профилирования в районе р. Бахта (Туруханский лесхоз Красноярского края).

Древесная порода	Обозначения		Окраска			
	Для редин и подроста	Для яруса	Молодняки	Средне-возрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные
Сосна	☎	☎☎	Orange	Orange	Orange	Orange
Лиственница	☎	☎☎	Light Orange	Light Orange	Light Orange	Light Orange
Кедр	☎	☎☎	Light Pink	Light Pink	Light Pink	Red
Пихта	☎	☎☎	Pink	Pink	Pink	Pink
Ель	☎	☎☎	Light Pink	Light Pink	Light Pink	Light Pink
Береза	☎		Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue
Осина	☎		Light Green	Light Green	Light Green	Light Green
Ольха, ива	☎		Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

Рис. 77. Условные обозначения для карты-схемы на рисунке 76.



Рис. 78. Вид с воздуха участка лазерного трансекта в районе порога Узкий на реке Бахта ($63^{\circ}27'$ с.ш., $91^{\circ}43'$ в.д.).



Рис. 79. Леса из лиственницы Гмелина на маршруте лазерной съемки в районе реки Таначи ($63^{\circ}35'$ с.ш., $90^{\circ}50'$ в.д.).



Рис. 80. Лиственнично-елово-кедровые насаждения на маршруте съемки в районе реки Бахта ($63^{\circ}30'$ с.ш., $89^{\circ}40'$ в.д.).



Рис. 81. Смешанные лиственнично-елово-кедровые и осиновые леса на маршруте съемки ($63^{\circ}15'$ с.ш., $89^{\circ}23'$ в.д.).

Бахтинский лазерный трансект



Рис. 82. Пробная площадь в лиственнично-елово-кедровом насаждении в районе реки Бахта ($63^{\circ}30'$ с.ш., $89^{\circ}40'$ в.д.).



Рис. 83. Пробная площадь в лиственничнике голубично-зеленомошном в районе реки Таначи ($63^{\circ}35'$ с.ш., $90^{\circ}50'$ в.д.).

Исследования и лазерная локация также проводились на канадском трансекте, на северо-западе страны, на протяжении 600 км севернее г. Эдмонтон в провинции Альберта – до озера Клафф (*Cluff Lake*) в северном Саскачеване (53.5° с.ш., 113.5° з.д. – 58.0° с.ш., 109.0° з.д.), в подзонах колковых осиновых (*Populus tremuloides*) остепненных (прериевого типа) и бореальных еловых (*Picea mariana*, *P. glauca*), сосновых (*Pinus banksiana*) и осиновых лесов послепожарного формирования (рис. 84–87).

Канадский лазерный трансект

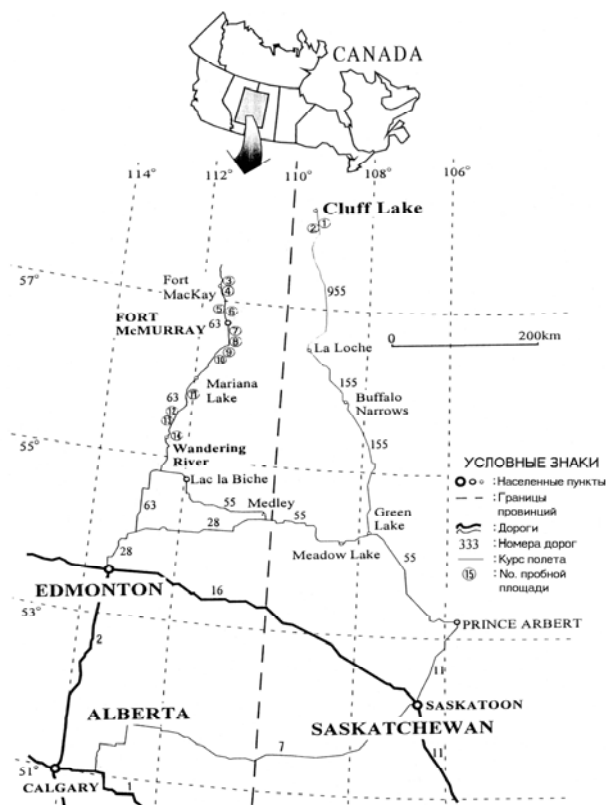


Рис. 84. Районы исследований на канадском лазерном трансекте.



Рис. 85. Редкостойные насаждения ели черной (*Picea mariana*) с подлеском из березы тощей (*Betula glandulosa*) в верховьях реки Ричардсон, в северной части провинции Саскачеван (57.8° с.ш., 109.5° з.д.).



Рис. 86. Смешанные осиново-еловые (*Populus tremuloides*, *Picea glauca*) леса в южной части провинции Альберта (п.п. 14 – 55.3° с.ш., 112.3° з.д.).



Рис. 87. Прибрежное высокосомкнутое, спелое осиновое насаждение (*Populus tremuloides*) в районе форта Мак-Марри, провинция Альберта (п.п. 9 – 56.3° с.ш., 111.2° з.д.).

Результаты и обсуждение

Интерактивная обработка данных лазерной и цифровой аэросъемки выполняется в программе Altexis 2.0 (Программный, 2005), которая предназначена для использования на IBM-совместимых компьютерах и обеспечивает реализацию следующих возможностей:

- Визуализация первичных лазерно-локационных данных, результатов селекции (классификации точек), а также результатов векторизации и регуляризации. Произвольный выбор ракурсов и масштабов.

- Визуализация цифровых аэрофотоснимков синхронно с соответствующими лазерно-локационными данными. Произвольный выбор ракурсов и масштабов.

- Определение пространственных геодезических координат всех видов объектов.

- Выполнение всех видов геометрических измерений по лазерно-локационным данным и цифровым аэрофотоснимкам.

- Визуализация всех видов данных синхронно с растровой топографической картой.

- Визуализация и выдача на твердую копию графического изображения всех доступных видов данных (копии экрана).

- Формирование и визуализация профилей и сечений (задание коридоров и различного вида проекций).

- Автоматизированное выполнение сложных геометрических измерений: вычисление расстояний между деревьями, между кроной и землей, между деревом и указанным оператором объектом и пр.

- Проведение информационно-поисковых операций с формированием листинга по определению критических участков растительности (гари, вырубки, шелкопрядники и пр.).

- Синтезирование полутоновых теневых изображений сцены с произвольным выбором положения источника освещения.

- Настраиваемый экспорт данных в любую программную оболочку для их специализированной постобработки (PLS-Cadd, AutoCad, Pole-Cad, ArcView, ArcInfo и др.).

Более подробно о структуре и возможностях программного комплекса Altexis будет показано в разделе 7.3.

В результате комбинации записей высотомера и GPS строится профиль, состоящий из полога растительности и частично из топографической (земной) поверхности (рис. 88а). В результате математической обработки данных интерполируется протяженность топографической поверхности путем выравнивания и объединения точек, в которых лазерный луч достиг поверхности земли, пройдя через листву (рис. 88б). Путем элиминации топографического профиля из первоначального результируется профиль полога древостоя (рис. 88в).

Анализ структуры полога, интегрированный с данными цифровой фото- и видеосъемки в процессе компьютерной обработки массивов данных, позволяет с высокой степенью достоверности вычленять различные типы и ярусы лесной растительности, с разделением ее по породному составу, густоте и другим параметрам (рис. 89, 90). Последующая обработка данных лазерного профилирования путем интегрирования, преобразования Фурье и анализа методом свободной компоненты позволяет получить такую важную и точную информацию о растительности, как запас древостоя, тип леса, индекс листовой поверхности, напрямую или опосредованно – через значения диаметра крон и

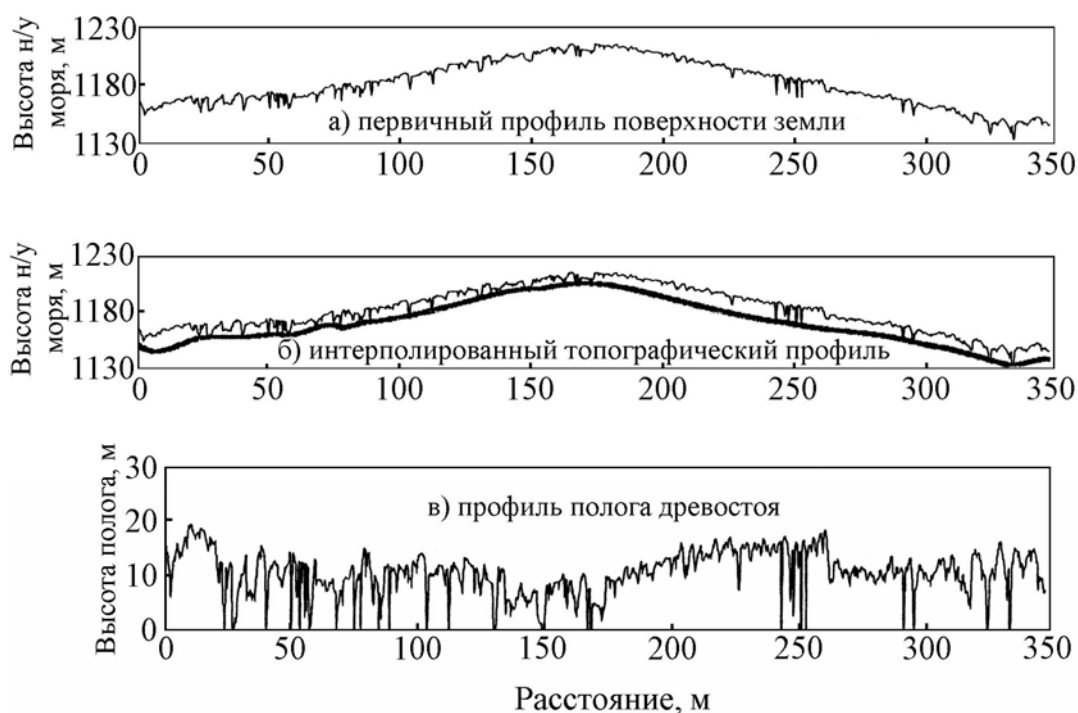


Рис. 88. Основные этапы обработки и представления данных лазерных профилей лесной растительности.

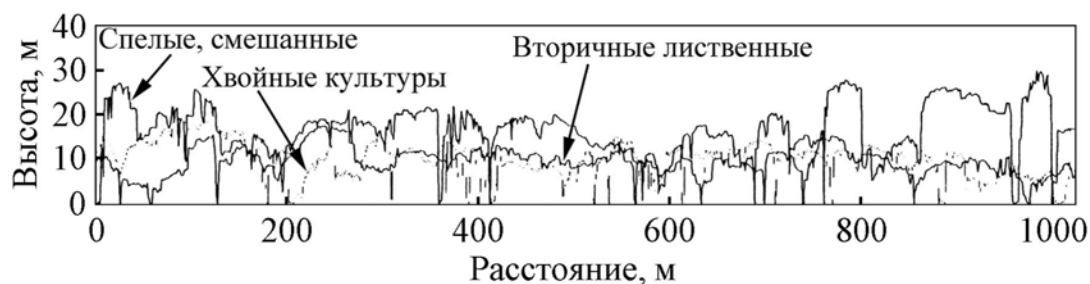


Рис. 89. Интегрированный профиль полога древостоев – спелых смешанных, хвойных молодняков и вторичных лиственных.

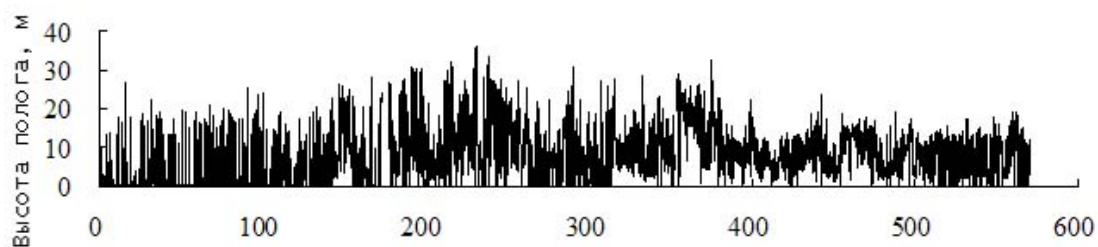


Рис. 90. Обобщенный профиль полога лесной растительности на протяжении 600 км на север от г. Эдмонтон (Канада).

стволов, густоту, протяженность полога и высоту древостоя (рис. 91).

Интегрирование является самым простым методом математической обработки данных профилирования, при котором древесный запас вычисляется на прямую. Метод основан на закономерности – чем больше высота и густота древостоя, тем больше его биомасса. Аналитическое выражение:

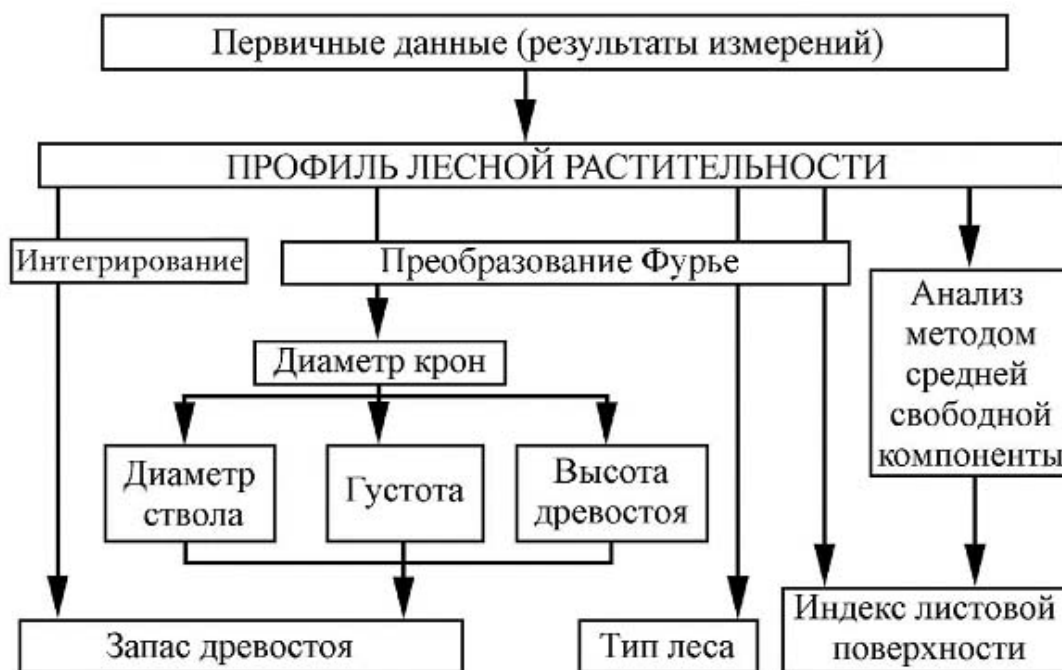


Рис. 91. Методы анализа данных лазерной локации.

$$M = \sum_{i=1}^n (v_i = n\bar{v} = an\bar{d}^2\bar{h} = an\bar{h}^\beta)$$

где M – запас древостоя; v_i – объем i -го дерева в древостое; n – густота древостоя; v – объем среднего дерева в древостое; d – средний диаметр древостоя; h – средняя высота древостоя; a, β – коэффициенты уравнения.

Запас древостоя (M) является производным от густоты (n), среднего диаметра (d) и средней высоты (h), возведенной в степень β . В показателях профиля это означает, что большое значение n характеризует высокую густоту древостоя и равномерную не «разорванную» структуру полога. Большое значение h характеризует среднюю высоту полога. Густота древостоя определяется в автоматическом режиме при машинной обработке цифровых крупномасштабных аэрофотоснимков с реальным оптическим разрешением на местности 5–10 см, а также по данным цифровых видеоизображений.

Преобразование Фурье

Анализ данных локации методом Фурье является более сложным и длительным, но позволяет вычислять высоту древостоев и диаметр крон с точностью, близкой инструментальным измерениям на пробных площадях (ошибки в пределах 5–7%). Высота древостоя и диаметр крон тесно коррелируют с его средним диаметром и густотой ($R^2 = 0.7$ – 0.9). С помощью этих параметров вычисляются интегрированные показатели древостоев – запас, биомасса и другие, с погрешностью, не превышающей 7–10%, с учетом изменчивости таксационных признаков (Данилин, Сведва, 2001).

При преобразовании Фурье полог древостоя представляет собой временную вариацию высотных отметок, набор точек, зафиксированных ранее, и точек, зафиксированных позже (функция от времени) на некотором расстоянии

(функция от пространственных переменных). После преобразования Фурье профиль полого приобретает вид непрерывной совокупности значений синусов и косинусов, представленных рядом коэффициентов гармонических кривых, где каждый коэффициент выражает величину изменчивости отметок профиля в определенной частоте. Таким образом, преобразование Фурье отображает профиль полого в частотном ряду. Величина изменчивости данных профиля понимается здесь как дисперсия, мощность или амплитуда, зависящая от природы исходных свойств волны, поэтому ряд коэффициентов Фурье называют еще «спектральной плотностью».

Преобладающие частоты на профиле выделяются как пики в спектральной амплитуде. Одной из таких преобладающих частот профиля являются повторности типа «вверх» и «вниз», соответствующие коническо-параболической форме кроны дерева и отображающие спектральную плотность, которая соответствует трем различным типам лесной растительности (рис. 92).

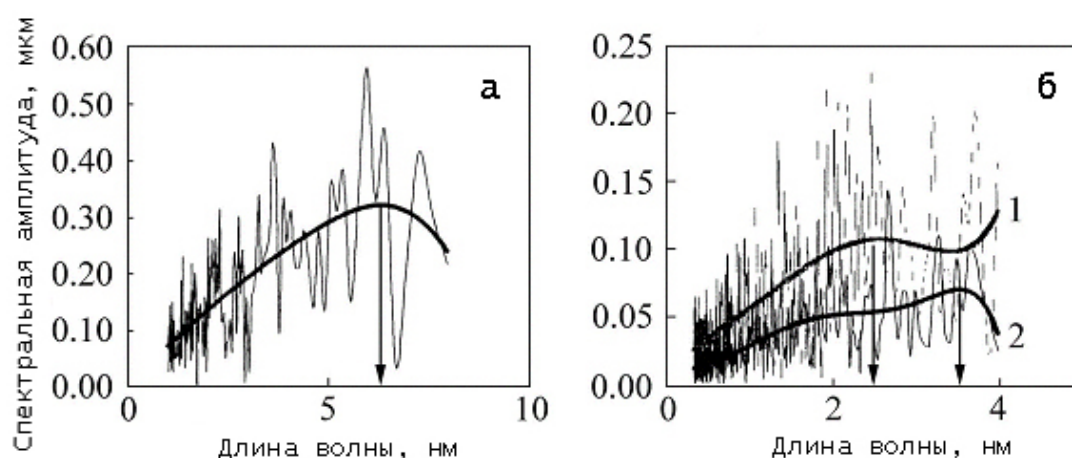


Рис. 92. Спектральные максимумы, соответствующие среднему диаметру крон деревьев: а – спелые смешанные; б – вторичные лиственные (1) и хвойные молодняки (2).

Спектральная амплитуда соответствует длине волны, которая зависит от размера кроны. Спектральные максимумы тесно коррелируют с длинами волн, соответствующими средним диаметрам крон различных типов насаждений, а именно: 2.4 нм - для вторичных лиственных насаждений, 3.5 нм – для хвойных молодняков и 6.3 нм – для спелого смешанного насаждения.

Интерпретацию спектральной амплитуды затрудняет наличие спектральных максимумов, соответствующих второстепенным показателям профиля древостоя. Это могут быть повторности различного характера ветвления отдельных деревьев в пологе древостоя, соответствующие более короткой длине волны (рис. 92). Большей длине волны соответствуют прогалины в лесном пологе (рис. 93).

Спектральные энергетические максимумы проявляются на большей части длины волны, регистрируя изменения качества условий местообитаний, связанных, в свою очередь, с изменением топографии местности. Высота деревьев на возвышениях меньше, чем на пониженных участках, в долинах и у подножий склонов, что выражается в однородном изменении высоты древесного полога в связи с изменением рельефа местности (рис. 88 б, в).

Наложение рекуррентных кривых искусственного происхождения на вершины естественным образом повторяющихся моделей различных длин волн,

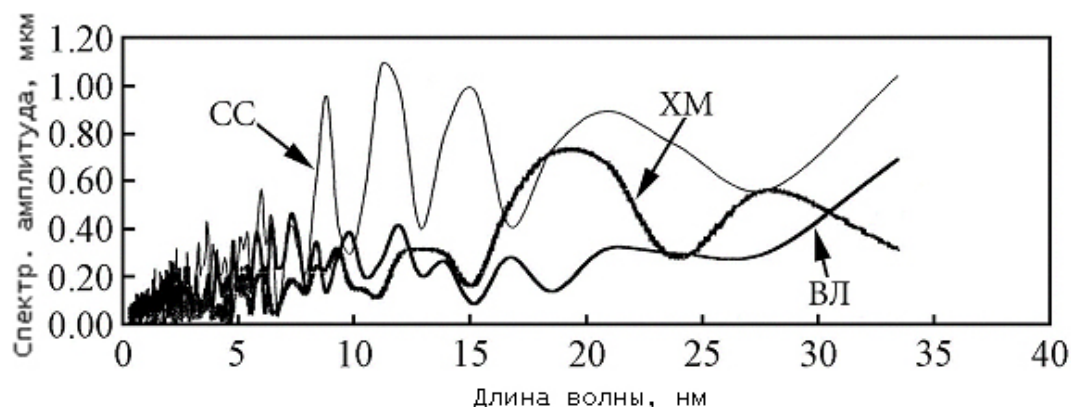


Рис. 93. Волновой спектр полога древостоев – спелых смешанных (СС), хвойных молодняков (ХМ) и вторичных лиственных (ВЛ).

связанное с интерполяцией профиля земной поверхности, значительно усложняет преобразование Фурье. При аппроксимации с помощью сплайн-функции точек поверхности земли, фиксируемых при проникновении лазерного луча под полог леса, происходит отклонение их от истинных отметок земли, а также генерируются ложные и нежелательные энергетические максимумы в спектральной плотности. В этой части требуется дальнейшее изучение и установление более четких критериев для определения спектральных максимумов полога древостоев и их вычленение от соседних «шумовых» спектральных максимумов.

Метод средней свободной компоненты

Средняя свободная компонента – концепция, развитая в молекулярной кинетике для выражения плотности молекул в газе, представляемая как среднее расстояние, на которое любая молекула может перемещаться, соударяясь с другими молекулами при трехмерном Броуновском движении. Средняя свободная компонента зависит от размера рассматриваемой молекулы и количества молекул в данном пространстве. Концепция может быть применима к анализу лазерного профиля лесной растительности. При детальном анализе профиля обнаруживается, что часть лазерных лучей отражается от верхней части полога или от поверхности земли, как два крайних случая при максимальных и минимальных значениях спектральной плотности, а другая их часть отражается в средней части кронового слоя. Среднее расстояние, на которое проникают в полог лазерные лучи, зависит от размера листьев и их количества. Таким образом, средняя длина проникновения лазерного луча в полог коррелирует с густотой облиствления крон, размером листьев и в итоге с площадью листовой поверхности.

Очевидно, что моделировать листовую поверхность значительно труднее, чем движение молекул газа, так как листья в большей степени варьируют по размерам и располагаются под разными углами по отношению к лазерному лучу. Ветви кроны дерева также вносят вклад в характер отражения исходного лазерного импульса. Требуется разработать физическую модель, объясняющую взаимосвязь между средней длиной проникновения лазерного луча в полог и площадью листовой поверхности. Модель явится инструментом для оценки площади листовой поверхности и индекса листовой поверхности (ИЛП), который сложно определить традиционными методами наземных измерений. В то

же время ИЛП является крайне важным показателем при формировании обобщающих моделей глобальной циркуляции углерода.

Некоторые выводы по разделу

Воздушная лазерная съемка Земли и леса – это достаточно универсальный инструмент, позволяющий дистанционно и оперативно получать достоверную информацию об экологическом состоянии земель и лесных покровов.

Данный метод в комплексе с цифровой фотограмметрией обеспечивает:

- создание трехмерной цифровой модели рельефа – первичной, лесной растительности, а также «очищенной» от лесной растительности и других объектов;
- автоматизированное выделение контуров выделов, вырубок, гарей, просек, дорог, водоемов и т.д.;
- создание цифровых ортофотопланов лесных территорий в абсолютных геодезических координатах;
- создание лесных цифровых фотокарт;
- в автоматическом режиме может быть выполнено выделение и определение геометрических параметров площадных и линейных объектов, определение плановых и профильных координат и высоты деревьев и древостоев.

Являясь реальной альтернативой классическим методам топографической аналоговой аэрофотосъемки и стереофотограмметрической обработки (Бруевич, 1990), а также развивающимся в настоящее время цифровым методам моделирования рельефа местности (Книжников и др., 2004а) рассматриваемая методика обладает рядом серьезных преимуществ:

- обеспечивается эффективность получения данных, не достижимая для классических методов аэросъемки;
- производительность при выполнении площадной топографической съемки, в том числе и лесных территорий, составляет 1000 кв. км за один рабочий день, что является самой высокой производительностью из коммерчески доступных систем на сегодняшний день;
- отсутствует необходимость проведения наземных лесоинвентаризационных и геодезических работ по уточнению таксационных показателей древостоев и плано-высотному обоснованию результатов аэросъемки;
- продолжительность цикла послеполетной обработки материалов съемки не более 7–10 дней, после которого заказчику передаются результаты в цифровом виде в абсолютных геодезических координатах;
- технология не критична к наличию листвы на деревьях, что позволяет проводить аэросъемочные работы в любой сезон года;
- благодаря наличию специального программного обеспечения пространственного анализа достигается полная автоматизация процесса создания рельефной части лесной карты и достоверность контурного дешифрирования;
- достигается принципиальное снижение стоимости работ по сравнению с классическими методами. Ориентировочная стоимость лазерной съемки, включая базовую обработку и архивацию данных, на сегодняшний день составляет порядка 1 доллара США за 1 га снимаемой площади и имеет постоянную тенденцию к снижению, в связи с появлением относительно недорогих систем воздушного лазерного сканирования и совершенствования технологии самой съемки и обработки аэросъемочных данных (Means et al., 2001).
- используемая аэросъемочная аппаратура может быть в течение одного

дня установлена на любой вертолет со штатным люком для внешней подвески, что делает возможным использование вертолетов местных авиапредприятий и исключает затраты на перегонку летательных аппаратов.

Дополнительные технологические возможности:

- возможность измерения параметров рельефа местности под кронами деревьев для участков насаждений с высокой сомкнутостью в любое время года и время суток (возможность работы в ночное время);
- измерение рельефа для безориентированной местности (вырубки, гари, пустоши, заснеженные территории и т.д.);
- автоматическое выделение и измерение геометрических параметров линейных объектов толщиной до 5–10 мм: ветвей деревьев, диаметров крон, высоты, пространственного размещения и др.;
- возможность дополнительной установки специализированной аэросъемочной аппаратуры (радар, тепловизор, многоспектральная цифровая камера и др.).

7.2. Определение запасов и фитомассы древостоев лазерно-локационным методом

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, лазерная локация, составляющая новейшие методы и технологии геоинформатики при современном приборном обеспечении, является высокоэффективным инструментом в решении многих исследовательских и практических задач лесной таксации, лесоведения и лесоэкологического мониторинга, что принципиально важно также для оперативности и точности получаемой информации о земной поверхности.

При воздушной лазерной съемке достигается «сантиметровая» точность измерения геометрических параметров деревьев, которая сопоставима только с наземными инструментальными измерениями на пробных площадях. Уровень производительности при выполнении измерений морфометрических параметров деревьев лазерно-локационным методом (с использованием современной компьютерной техники) не сопоставим с трудоемкими и дорогостоящими наземными измерениями и превосходит их на порядки.

Принципиальным отличием лазерной локации от классической аэрофотосъемки является то, что лазерный луч, проникая сквозь полог леса до самой земли, сканирует все ярусы растительности с высокой плотностью (5–10 и более лазерных точек сканирования на 1 кв. м), позволяя получать трехмерные изображения отдельных деревьев с высокой точностью. Полученный «лазерный портрет древостоя» позволяет наблюдать его на экране монитора с любой точки, произвольно меняя проекции (ракурсы) изображения, что очень важно, в частности, для анализа морфологической и пространственной структуры насаждения и анализа распределения органического вещества в лесных биогеоценозах. При этом отпадает необходимость в рутинной и достаточно длительной обработке изображений (получение стереоэффекта, вычисление высот деревьев методом продольных параллаксов и пр.), характерной для классических фотogramметрических методов обработки снимков.

В работах, выполненных ранее в России и за рубежом, установлено, что по лазерно-локационным данным, крупно- и среднемасштабным аэрофотоснимкам и материалам космического зондирования структура, запасы и фитомасса древостоев определяются достаточно точно при использовании регрессионных зависимостей с их морфометрическими показателями и отражательными свойст-

вами полога (Солодухин и др., 1977, Столяров и др., 1987, Means et al., 2000, Данилин и др., 2001, Harding et al., 2001, Hudak et al., 2002, Lefsky et al., 2002, 2005, Lim et al., 2002, 2004, Данилин, 2003, Remote Sensing, 2003, Holmgren, 2004, Gobakken et al., 2004, Danilin et al., 2004, Maltamo et al., 2004, Morsdorf et al., 2004, Nelson et al., 2004, Patenaude et al., 2004, St-Onge et al., 2004, Wulder et al., 2004, Andersen et al., 2005, Данилин и др., 2005, Næsset et al., 2005).

Использование данных воздушной лазерной локации при характеристике лесных ландшафтов позволяет получать достаточно высокие по точности результаты оценки структуры и древесного запаса насаждений (рис. 94).

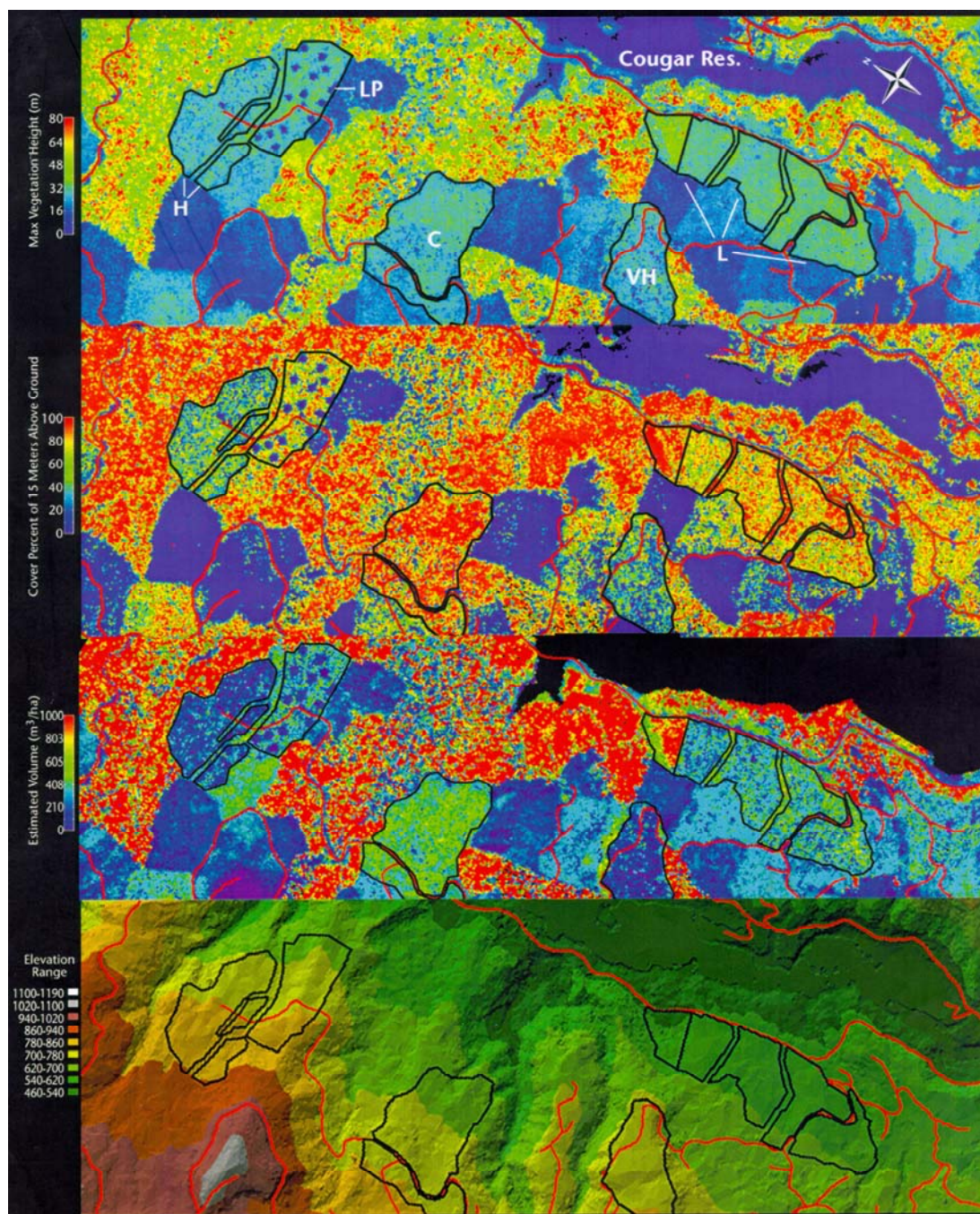


Рис. 94. Использование данных воздушного лазерного сканирования для характеристики лесных ландшафтов в Западном Орегоне (Means et al., 2001).

На рисунке 94 показана территория размером 4.6×1.6 км (1 пиксел = 10 м²) в Западном Орегоне, вблизи города Блю Ривер. Доминируют насаждения пихты Дугласа (Douglas fir), среди которых наиболее густые и высокие представлены древостоями возрастом более 400 лет. Данные лазерного зондирования лесного покрова сопровождаются характеристикой рельефа и наземной цифровой моделью местности, как это показано на нижнем снимке (Elevation Range). Способность лазерного сканера определять структуру древостоя, видна на примере разграниченных 40-летних насаждений пихты Дугласа, пройденных рубками прореживания различной интенсивности: С – рубки прореживания не проводились (контроль), L – проведены рубки прореживания низкой интенсивности, Н – рубки прореживания высокой интенсивности, LP – рубки прореживания низкой интенсивности и сплошные рубки участками, VH – рубки прореживания высокой интенсивности. На верхнем снимке разграниченные насаждения одинаковы по высоте (Max Vegetation Height). На втором сверху снимке видно различие в пологе древостоя в связи с прореживанием различной интенсивности (Cover Percent of 15 Meters Above Ground). На третьем снимке представлен древесный запас, оцененный на основе регрессионной зависимости с данными лазерных измерений (Estimated volume, м³/ha). Результаты наземного тестирования показали, что наиболее точно древесный запас определен в левой верхней части изображения, на участке древостоя, пройденного рубкой прореживания низкой интенсивности с относительно более высокими деревьями и общим запасом (Means et al., 2001).

Определение морфометрических параметров деревьев по лазерно-локационным данным методически выполняется в автоматическом режиме в программной оболочке Altaxis 2.0, при этом, как уже отмечалось выше, экранный «портрет» насаждения может быть представлен средствами трехмерной компьютерной графики в любом ракурсе для детального анализа его структуры и распределения биомассы (рис. 95).

Построение цифровой модели лесного полога

Цифровая модель (поле распределения) лесного полога генерируется из исходных данных лазерной локации способом фильтрации импульсов сканера, отраженных от земной поверхности и растительности, путем интерполяции точек земли, как это уже было показано прежде, с последующей триангуляцией точек растительности, что позволяет получать детальные координаты и морфоструктурные характеристики как древостоя, так и отдельных деревьев средствами трехмерной компьютерной графики в оболочке ArcView 3D Analyst или другими, известными на сегодняшний день, средствами (рис. 96).

Теоретически и математически решение данной задачи основывается на морфологическом анализе модели поверхности лесного полога, применяемого при обработке и дешифрировании изображений леса на снимках (Haralick et al., 1987, Soille, 1999), а также при компьютерном анализе геометрии нечетких (*fuzzy*) и рассеянных структур и изображений, который находит применение во многих областях знаний (Pal et al., 1992, Аникин и др., 2003).

Морфологический анализ модели поверхности лесного полога

Математическая морфология (или просто морфология) как теория, созданная в конце 60-х годов для обработки изображений, впоследствии развитая и математически обоснованная Г. Матьероном (Matheron, 1988), обеспечивает количественный подход при анализе геометрической структуры модели поверхно-

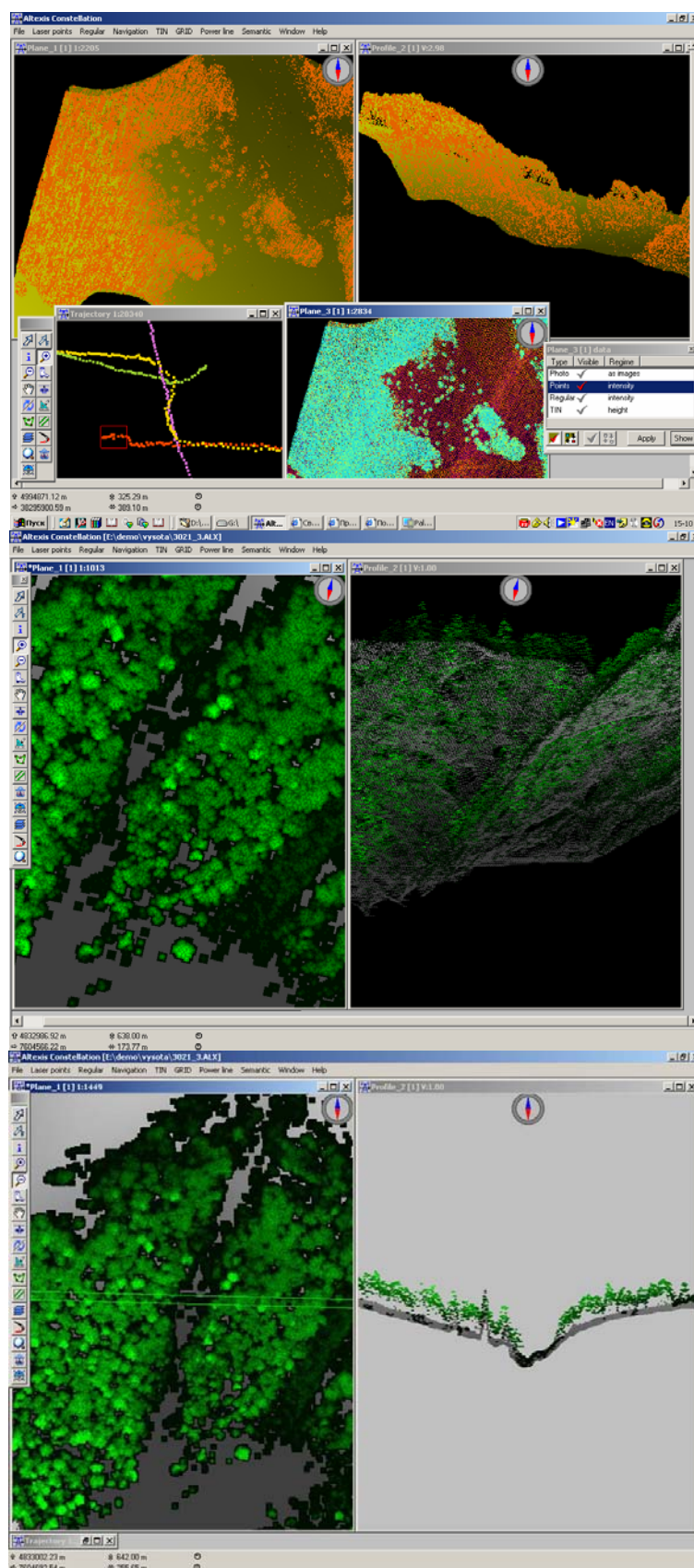


Рис. 95. Визуализация лазерно-локационных данных, выделение коридоров и измерение параметров лесной растительности в плановой, профильной и трехмерной проекциях Altaxis.

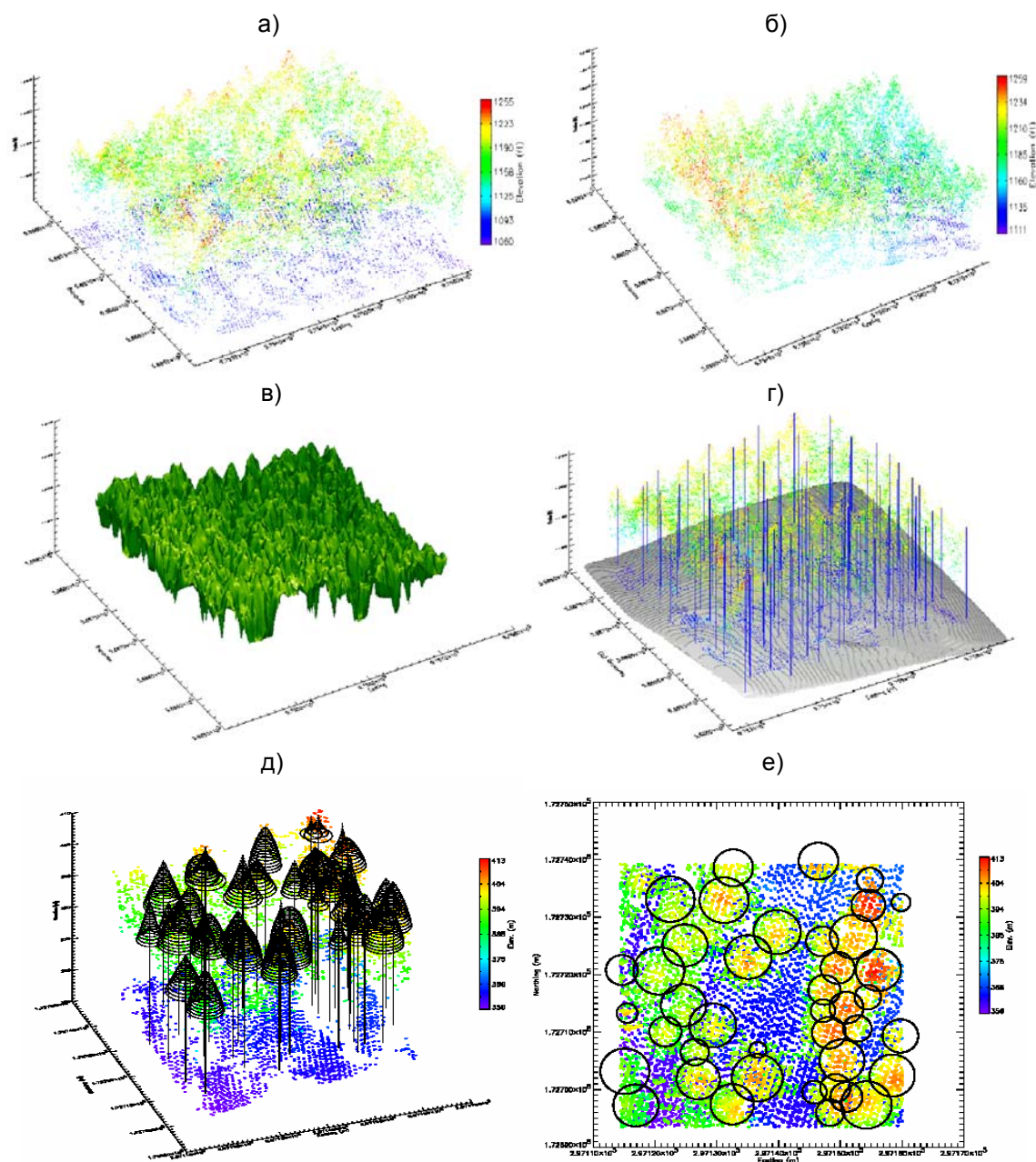


Рис. 96. Трехмерная цифровая реконструкция и визуализация массива точек лазерного сканирования лесного участка площадью 0.4 га: а) – исходный массив точек лазерной локации, б) – тот же массив, после выполнения процедуры фильтрации, в) – цифровая модель (поле распределения) лесного полога с фиксированным размером пикселя 0.3 м, г) – цифровая модель стволов и крон деревьев, интегрированная с цифровой моделью рельефа, д) – полная трехмерная реконструкция древостоя, е) – плановая проекция полога древостоя с оконтуренными кронами деревьев основного яруса. Точки, кодированные цветом, соответствуют различным элементам рельефа.

сти полога леса. В частности, специфическая последовательность морфологических преобразований (трансформаций) бинарных (двоичных) и полутоновых изображений может быть использована для выделения отдельных деревьев, составляющих поверхность полога леса, а также может обеспечивать алгоритм измерения отдельных деревьев. Несмотря на то, что изначально теория математической морфологии разрабатывалась применительно к анализу двумерных бинарных (т.е. черно-белых) изображений, в дальнейшем она была также рас-

пространена и на трехмерные полутоновые образы (Choi et al., 1996), где величины шкалы яркости (шкалы уровней серого цвета) представляют интенсивность или другие атрибуты пикселей (минимальных элементов изображения), таких, например, как высотные отметки элементов рельефа.

Операции математической морфологии определяются в терминах теории множеств (в нашем случае *множества* – это поле рассеяния отраженных лазерных импульсов). В контексте морфологии *множества* представляют формы, которые взаимосвязанно формируют двоичные или полутоновые изображения. На двухмерных изображениях *множества* описывают передний план поля, а на трехмерных образах они могут описывать варьирование в пределах поверхности распределения точек.

Целью любой морфологической операции является получение информации о геометрической структуре изображения, сопоставляя данное изображение с другими *множествами*, специфических размеров и формы, известных как *элементы структурирования*. Размер и форма элементов структурирования подбираются в соответствии с информацией о типе формы исследуемой поверхности, которая должна быть получена на изображении. В формальных терминах морфологическая операция – это преобразование (трансформация) изображения с элементами структурирования, которые служат как параметры для данного преобразования. Результатом единичного преобразования (морфологической операции), выполняемого с данным элементом структурирования, является информация относительно содержания формы поверхности исходного изображения.

Изменение размера элементов структурирования может приводить к различным преобразованиям изображений поверхности лесного полога и тем самым получать больший объем информации о содержании снимка.

Основными морфологическими операциями являются *расширение (dilatation)* и *размытие (erosion)*. Если исходное изображение полога представить как множество A , а элемент структурирования – как другое (меньшее) множество B , то результат расширения изображения A элементами структурирования B можно выразить как области, где элемент структурирования B соприкасается с множеством A (Soille, 1999). Формализованно, в терминах теории множеств, если A и B представить как подмножества d размерного пространства, то расширение множества A посредством B будет определяться как:

$$A \oplus B \{c \in E^d \mid c = a + b \text{ для некоторых } a \in A \text{ и } b \in B\}.$$

При обработке снимков операция расширения часто именуется терминами *наполнение (fill)*, *растягивание (expand)* или *рост (grow)*. Двойственная (парная) *расширению* – это операция *размытие*. Используя приведенное выше выражение, *размытие множества A* элементами структурирования *множества B* укажет на те области, где элементы структурирования соответствуют *множеству A*. Формализованно, *размытие множества A* элементами структурирования определяется как:

$$A \ominus B \{x \in E^d \mid x + b \in A \text{ для каждого случая } b \in B\}.$$

В процессе обработки изображений операция *размытия* часто именуется также как *усадка (shrink)* или *сокращение (reduce)*. На практике операции *рас-*

ширения и размытия используются и выполняются совместно. Например, *размытие*, выполняемое вслед за *расширением*, делает возможным выполнение следующей операции, называемой *раскрывание* (*opening*).

Практический эффект морфологического раскрывания заключается в удалении из изображения поверхности полого деталей, меньших по размеру, чем элементы структурирования без искажения общей геометрической структуры подавленных признаков.

Процедура раскрывания, следовательно, имеет тенденцию к разрушению узких перемычек в поле рассеяния точек поверхности полого (в нашем случае это точки и совокупности точек в местах смыкания крон деревьев) и удаления небольших совокупностей шумовых точек на двоичных изображениях.

Полутоновая морфология приводит к распространению рассмотренных выше понятий из двумерных множеств – к трехмерным функциям. Выполнение данной процедуры требует определения вершины (наивысшей отметки) поверхности множества и *теневого отображения* (*тени*) (*umbra*) функции. Для множества A в трехмерном поле рассеяния, где первые две координаты (x, y) отображают пространственное расположение точек, а координата z определяет точки на поверхности полого, вершиной поверхности $T[A]$ множества точек лазерных импульсов является наибольшая величина z , как $(x, y) \in A$. *Теневое отображение* функции f , обозначаемое как $U[f]$, представляет собой множество, составленное поверхностью f и всеми другими множествами точек, находящимися под данной поверхностью. Для данной функции (полутонового изображения) f и *трехмерного элемента структурирования* k , полутоновое расширение f через k определяется как поверхность расширения их *теневого отображений*:

$$f \oplus k = T[U[f] \oplus U[k]].$$

Полутоновое размытие функции f элементом структурирования k определяется как *поверхность размытия* их *теневого отображений*:

$$f \ominus k = T[U[f] \ominus U[k]].$$

Таким образом, *полутоновое раскрывание* функции f элементом структурирования k можно выразить как:

$$f \circ k = (f \ominus k) \oplus k.$$

Операция *полутонового раскрывания* может быть интерпретирована геометрически, посредством наложения элемента структурирования на поверхность полого и последующего смещения его в нижнюю часть поверхности. Раскрывание поверхности элементом структурирования является наивысшей точкой, достигаемой элементом структурирования в процессе его смещения в нижнюю часть поверхности (Haralick et al., 1987).

Принципиально важным для корректной оценки биомассы древостоя по данным лазерного профилирования, цифровой фото- и видеосъемки и резуль-

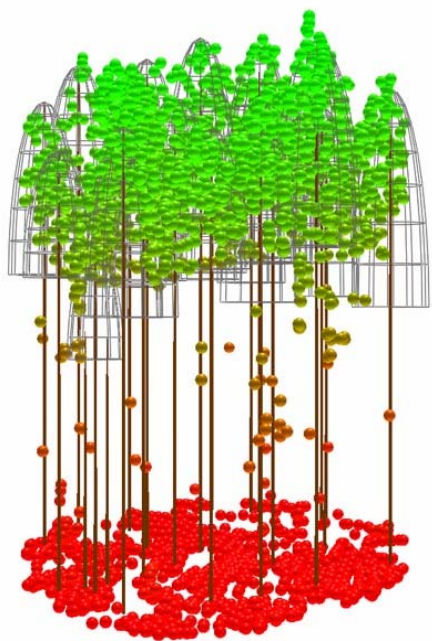


Рис. 97. «Сочлененная» реконструкция морфологической структуры лиственныйного древостоя по данным лазерной локации (точки, окрашенные зеленым и красным цветом) и наземным измерениям на координатной пробной площади (63°34'08" с.ш., 90°47'15" в.д.).

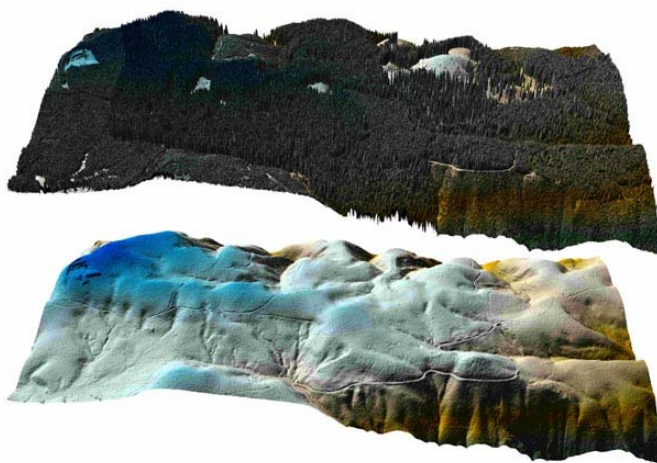


Рис. 98. Цифровая модель земной поверхности на основе автоматизированной классификации лазерных импульсов, отраженных от поверхности лесного полога (5×10^5 , первый отраженный сигнал), верхнее фото и земли (2.7×10^5 , последний отраженный сигнал), нижнее фото, «очищенное» от лесной растительности, на тестовом участке Капитол Форест, штат Вашингтон (46°56'–46°57' с.ш., 124°38'–124°40' з.д.) (Credit: Ward Carson, USDA Forest Service).

татам наземных измерений на пробных площадях представляется последующая детальная реконструкция геометрии крон отдельных деревьев с корректным разделением их по породам, а также определение местоположения стволов и отдельных морфоструктурных элементов крон, что достигается выполнением векторных операций и детальной визуализации точек лазерного сканирования лесного полога (рис. 97).

Методами автоматической классификации и сепарации лазерных импульсов, отраженных от поверхности земли и лесного полога, достигается полная трехмерная дигитализация рельефа поверхности, расположенной под кронами деревьев (рис. 98).

Принципиальным является вопрос оценки точности и корректности трехмерных компьютерных построений при проведении морфологического анализа.

С этой целью выполняется параметризация и верификация данных лазерной локации, по маршруту съемки закладываются наземные пробные пло-

щади, на которых проводятся сплошной пересчет и картирование древостоя, срубаются модельные деревья для определения фитомассы весовым методом (рис. 99, табл. 22, 23).

Анализ данных лазерной локации выявляет определенные закономерности в распределении лесной растительности по элементам рельефа и в зависимости от глубины залегания мерзлоты в почве по маршруту съемки, что, в частности, выражается в уменьшении среднего диаметра, объема стволов деревьев и общей продуктивности насаждений по мере их уда-

ленности от берегов водотоков (рис. 100, 101).



Рис. 99. Обмер модельного дерева и инструментальное весовое определение фитомассы на пробной площади №16 маршрута лазерной съемки в районе р. Бахта.

По данным наземных измерений на пробных площадях по маршруту лазерных трансектов в районе реки Бахта были выявлены и апробированы регрессионные зависимости для определения наземной биомассы лесных насаждений через общую площадь лесной растительности в границах лазерного профиля. Калибровка данных лазерного профилирования по наземным измерениям на пробных площадях показала относительно высо-

Таблица 22. Основные описательные статистики морфометрических показателей лиственничного древостоя (Центральная Эвенкия)

Показатель	N	M	P _{-95%}	P _{+95%}	mod.	min.	max.	σ^2	σ	σ_{x-bar}	S	σ_S	K	σ_K
D _{1,3}	205	2.74	2.35	3.13	мн.	0.40	9.50	4.11	2.03	0.12	1.35	0.24	1.35	0.47
H	205	4.05	3.68	4.42	4.00	1.30	9.50	3.67	1.92	0.19	1.14	0.24	0.83	0.47
Dкр.	205	1.26	1.16	1.37	1.00	0.40	3.30	0.31	0.56	0.05	1.27	0.24	1.66	0.47
Lкр.	205	3.11	2.79	3.43	2.80	0.60	8.40	2.75	1.66	0.16	1.19	0.24	1.04	0.47
Скр.	205	1.50	1.22	1.78	0.78	0.13	8.55	2.11	1.45	0.14	2.35	0.24	6.70	0.47

где N – количество наблюдений; M – средние значения показателей; P – доверительный интервал; mod. – модальность; min. – минимальное значение; max. – максимальное значение; σ^2 – квадратическое отклонение; σ – стандартное отклонение; σ_{x-bar} – стандартная ошибка; S – асимметрия; σ_S – стандартная ошибка асимметрии; K – эксцесс; σ_K – стандартная ошибка эксцесса.

кую степень регрессионной связи показателей биомассы насаждений от общей площади растительности. Рассчитаны регрессионные зависимости морфометрических показателей и фитомассы деревьев лиственницы, которые достаточно адекватно и эффективно аппроксимируются параболическими уравнениями вида: $y = ax^2 + bx + c$ (табл. 24).

Исследования, проведенные в лиственничных лесах в Центральной Эвенкии и Туруханском районе Красноярского края, показывают, что наиболее точно и достоверно структура и фитомасса древостоев по лазерно-локационным данным определяются по характеристикам рядов распределения деревьев по основным морфометрическим признакам – диаметру и высоте стволов, вертикальной и горизонтальной протяженности крон, которые взаимосвязаны и тесно коррелированы во всех случаях (рис. 102, 103, табл. 25; рис. 104, 105, табл. 26).

Таблица 23. Размеры и фитомасса модельных деревьев лиственницы
(Центральная Эвенкия)

Таксационные показатели и масса фракций деревьев	Модельные деревья									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Возраст (А), лет	30	30	30	30	30	30	29	29	27	25
Диаметр ($D_{1.3}$), см	10.3	7.8	6.0	5.0	4.0	3.1	2.1	1.0	0.5	0.3
Высота (Н), м	10.4	8.7	7.6	6.5	5.4	4.2	3.6	2.3	1.8	1.4
Диаметр кроны ($D_{кр.}$), м	3.5	2.1	1.9	1.8	1.4	1.3	0.9	0.6	0.5	0.3
Длина кроны ($L_{кр.}$), м	9.5	7.0	5.7	5.0	3.9	3.5	2.4	1.7	1.3	0.8
Площадь кроны ($S_{кр.}$), m^2	9.62	3.46	2.83	2.54	1.54	1.33	0.64	0.28	0.20	0.07
Объем ствола в коре ($V_{вк.}$), dm^3	35.80	22.20	11.90	8.20	4.50	2.22	0.94	0.52	0.10	0.026
Объем ствола без коры ($V_{бк.}$), dm^3	30.10	17.70	8.70	6.01	3.20	1.75	0.68	0.38	0.075	0.014
Объем коры (V_k), dm^3	5.70	4.50	3.20	2.19	1.30	0.47	0.26	0.14	0.025	0.012
Общая масса дерева, кг*	32.41	13.76	7.61	5.11	2.60	2.07	0.61	0.37	0.11	0.019
Ствол	22.58	10.29	5.70	3.69	1.67	1.15	0.37	0.23	0.07	0.010
Древесина	18.53	8.48	4.68	2.94	1.20	0.89	0.26	0.16	0.05	0.007
Кора	4.05	1.81	1.02	0.75	0.47	0.27	0.11	0.07	0.02	0.003
Крона	9.83	3.47	1.91	1.42	0.93	0.92	0.24	0.14	0.05	0.085
Скелетные ветви $\varnothing > 1$ см	3.11	1.05	0.21	0.14	0.07	0.31	0.07	0.04	0.01	0.002
Охвоенные ветви $\varnothing < 1$ см	2.38	1.19	0.89	0.65	0.41	0.23	0.03	0.017	0.004	0.002
Побеги текущего года	0.074	0.013	0.005	0.004	0.004	0.007	0.001	0.001	0.0001	–
Хвоя	3.13	0.66	0.55	0.43	0.31	0.23	0.11	0.065	0.020	0.004
Отмершие ветви	1.12	0.56	0.26	0.20	0.14	0.14	0.02	0.015	0.010	0.0005

*Фитомасса всех фракций приведена в кг, в абсолютно сухом состоянии.

– Отсутствие компонента фитомассы.

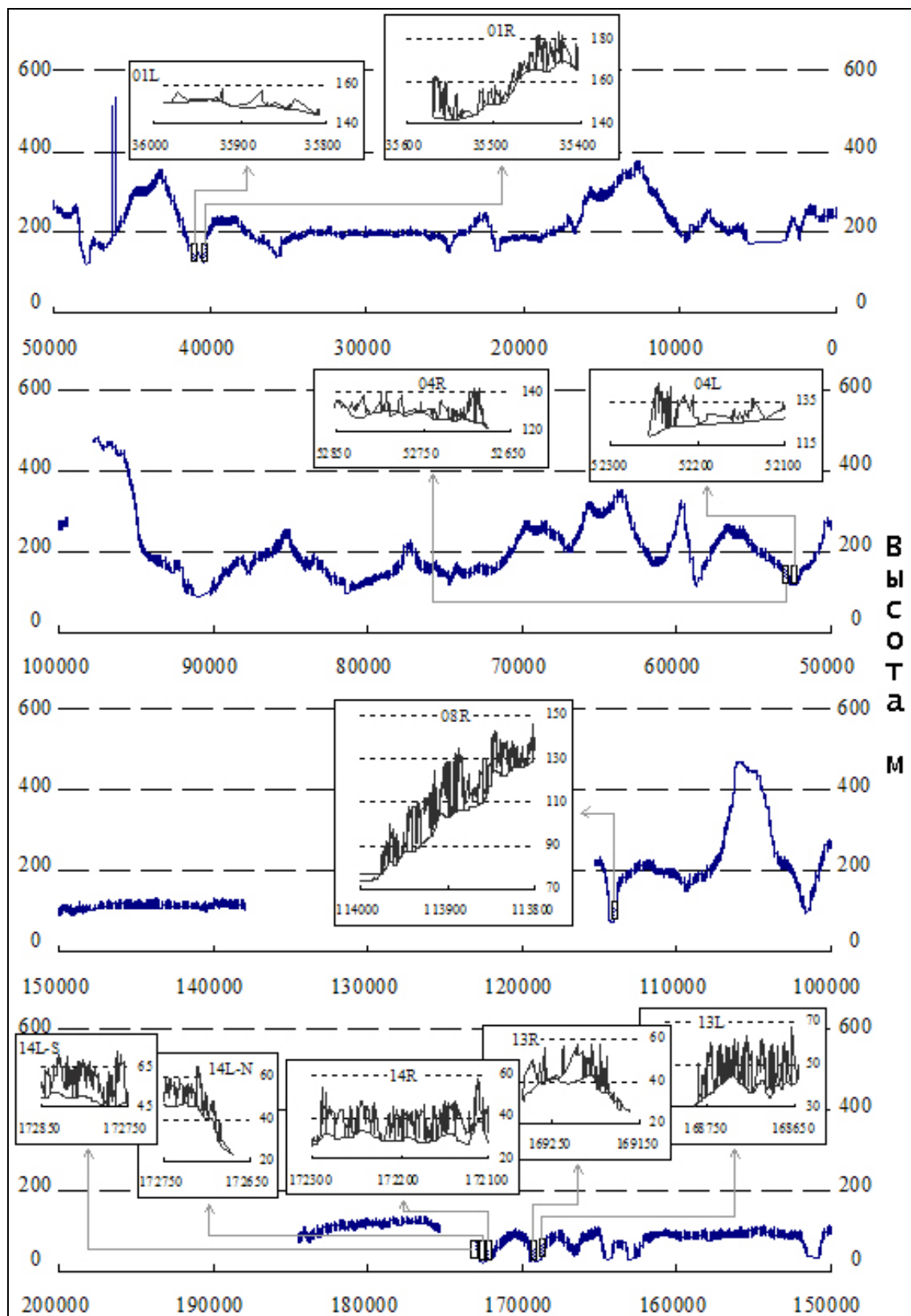


Рис. 100. Структура вертикальных (высотных) профилей лесной растительности, сопряженная с топографической поверхностью на маршруте лазерной съемки и тестовых участках на протяжении 200 км в бассейне реки Бахта (Красноярский край).

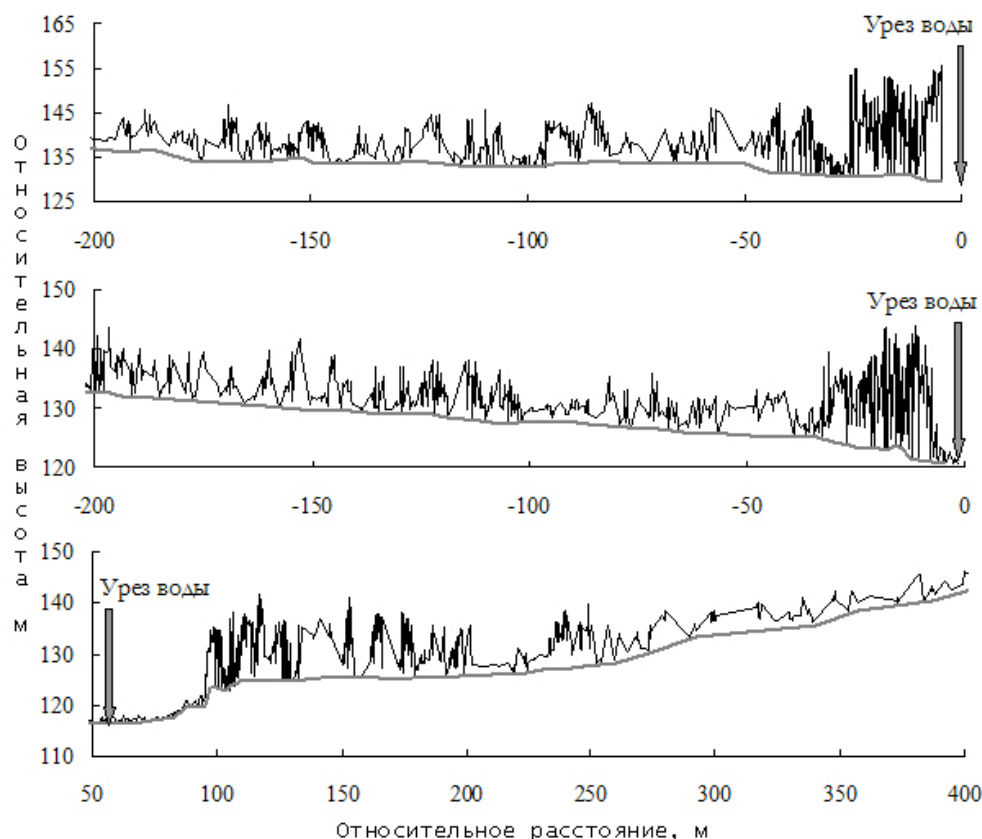


Рис. 101. Эффект «прибрежной зоны», регистрируемый на лазерной профилограмме лесной растительности.

Таблица 24. Коэффициенты регрессии морфометрических показателей и фитомассы деревьев лиственницы

Модель аппроксимации:	$P = aD_{1.3}^2 H$			$P = aD_k^2 H$		
Параметры уравнения:	a	S	R^2	a	S	R^2
Зависимая переменная:						
Надземная часть	0.029	0.505	0.996	0.266	2.122	0.964
Ствол	0.0203	0.055	0.999	0.187	1.750	0.951
Древесина	0.017	0.037	0.999	0.153	1.452	0.950
Кора	0.004	0.008	0.996	0.034	0.307	0.951
Крона	0.008	0.258	0.976	0.079	0.427	0.983
Ветви $\varnothing > 1$ см	0.003	0.068	0.940	0.024	0.217	0.959
Ветви $\varnothing < 1$ см	0.002	0.021	0.969	0.020	0.272	0.892
Побеги текущего года	0.0001	0.000	0.873	0.0001	0.005	0.966
Хвоя	0.003	0.089	0.917	0.024	0.074	0.995
Отмершие ветви	0.001	0.002	0.987	0.009	0.110	0.918

где P – вес фракции дерева в абсолютно сухом состоянии, кг;
 $D_{1.3}$ – диаметр ствола на высоте 1.3 м от его основания, см;
 H – высота дерева, м; D_k – диаметр кроны, м; a – константа уравнения;
 S – стандартная ошибка уравнения; R^2 – индекс детерминации.

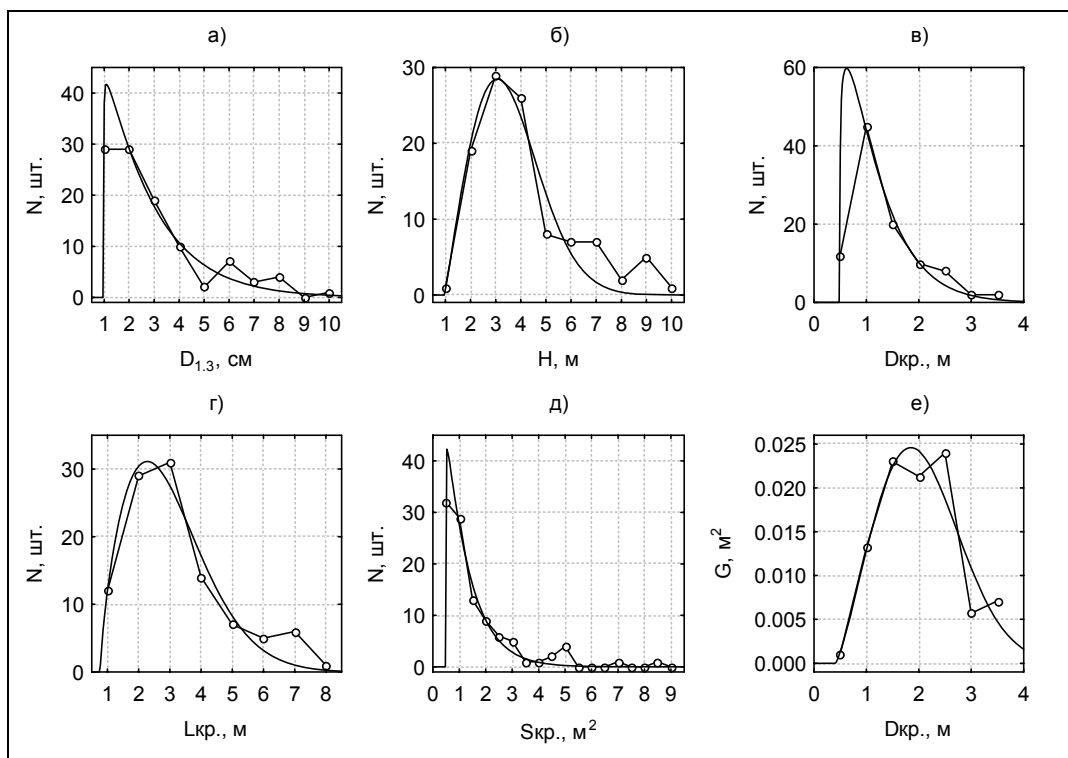


Рис. 102. Распределение деревьев лиственницы по морфометрическим показателям стволов и крон, аппроксимированное функцией Вейбулла: а) – $D_{1.3}$, б) – H , в) – $D_{кр.}$, г) – $L_{кр.}$, д) – $S_{кр.}$, е) – $Gf(D_{кр.})$.

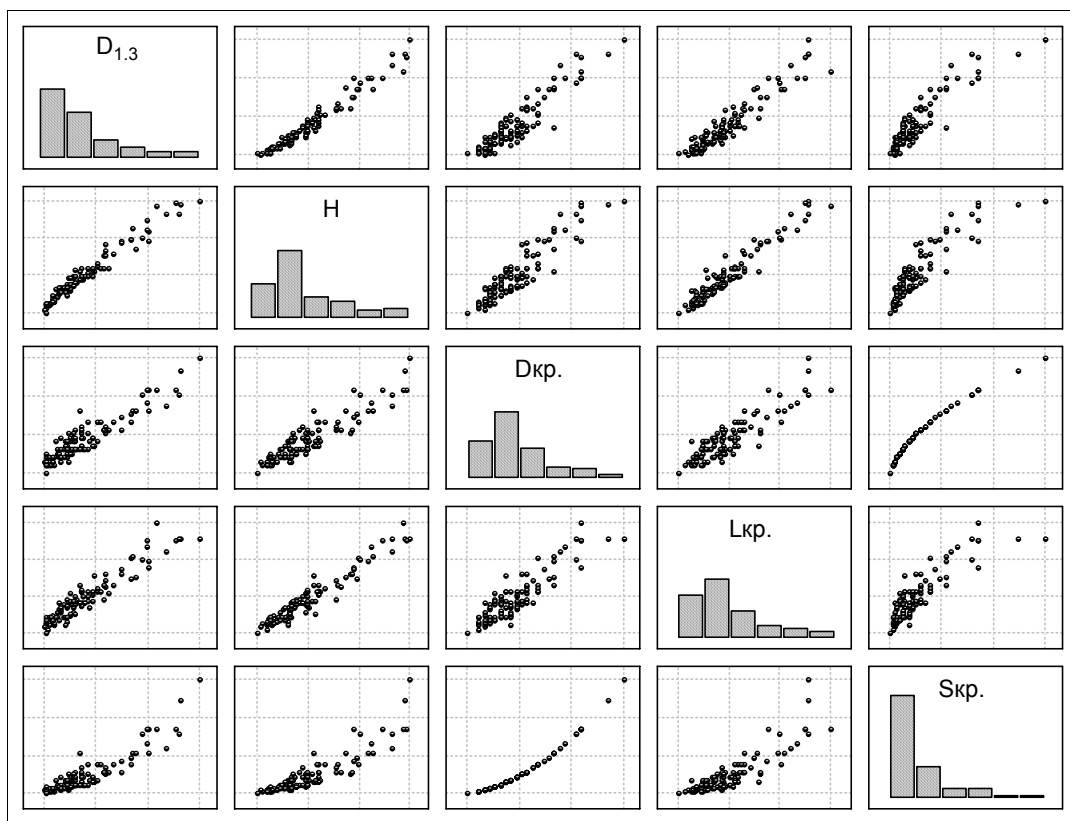


Рис. 103. Совмещенная матрица гистограмм распределения и коррелированных полей рассеяния основных морфометрических показателей лиственничного древостоя (Центральная Эвенкия).

Таблица 25. Корреляционная матрица (R) таксационных и морфометрических показателей лиственничного древостоя (Центральная Эвенкия)

Показатель	$D_{1,3}$	H	Дкр.	Лкр.	Скр.
$D_{1,3}$	1.00	0.98	0.93	0.95	0.91
H	0.98	1.00	0.92	0.96	0.89
Дкр.	0.93	0.92	1.00	0.90	0.97
Лкр.	0.95	0.96	0.90	1.00	0.87
Скр.	0.91	0.89	0.97	0.87	1.00
Среднее статистическое	2.74	4.05	1.27	3.11	1.50
Стандартное отклонение	2.03	1.92	0.56	1.66	1.45
Количество наблюдений	205	205	205	205	205

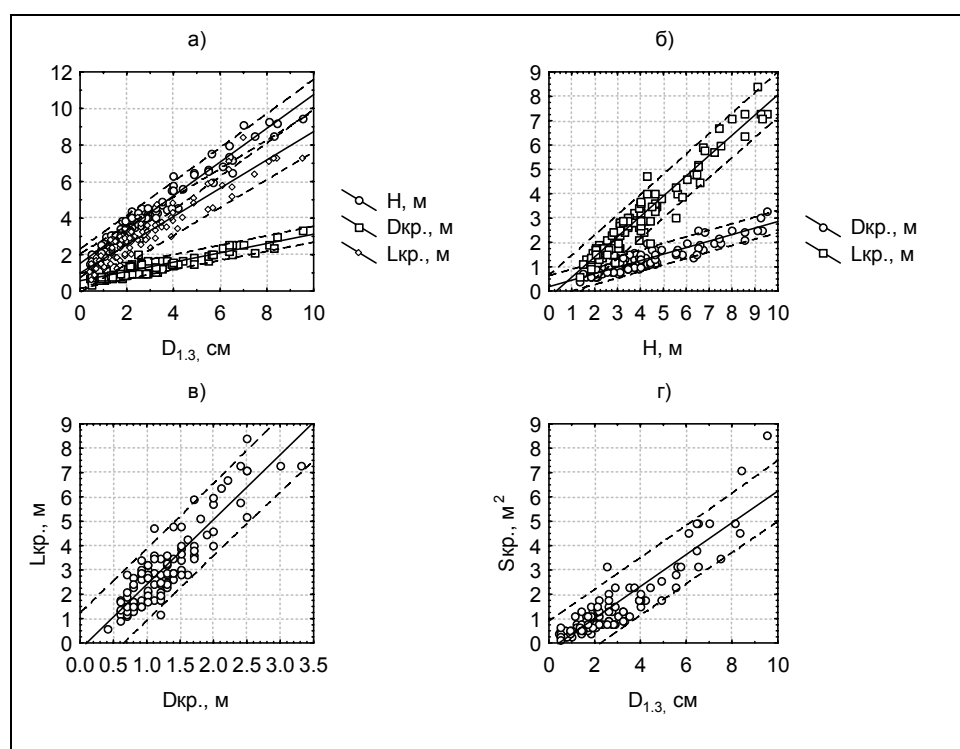


Рис. 104. Парные линейные зависимости между морфометрическими показателями деревьев лиственницы, полученные по лазерно-локационным данным, и наземным измерениям на координатных пробных площадях: а) – H, Лкр., Дкр. f ($D_{1,3}$); б) – Лкр., Дкр. f (H); в) – Лкр. f (Дкр.); г) – Скр. f ($D_{1,3}$), где H – высота дерева, м; Лкр. – длина кроны; Дкр. – диаметр кроны; $D_{1,3}$ – диаметр ствола на высоте 1.3 м от его основания; Скр. – площадь кроны.

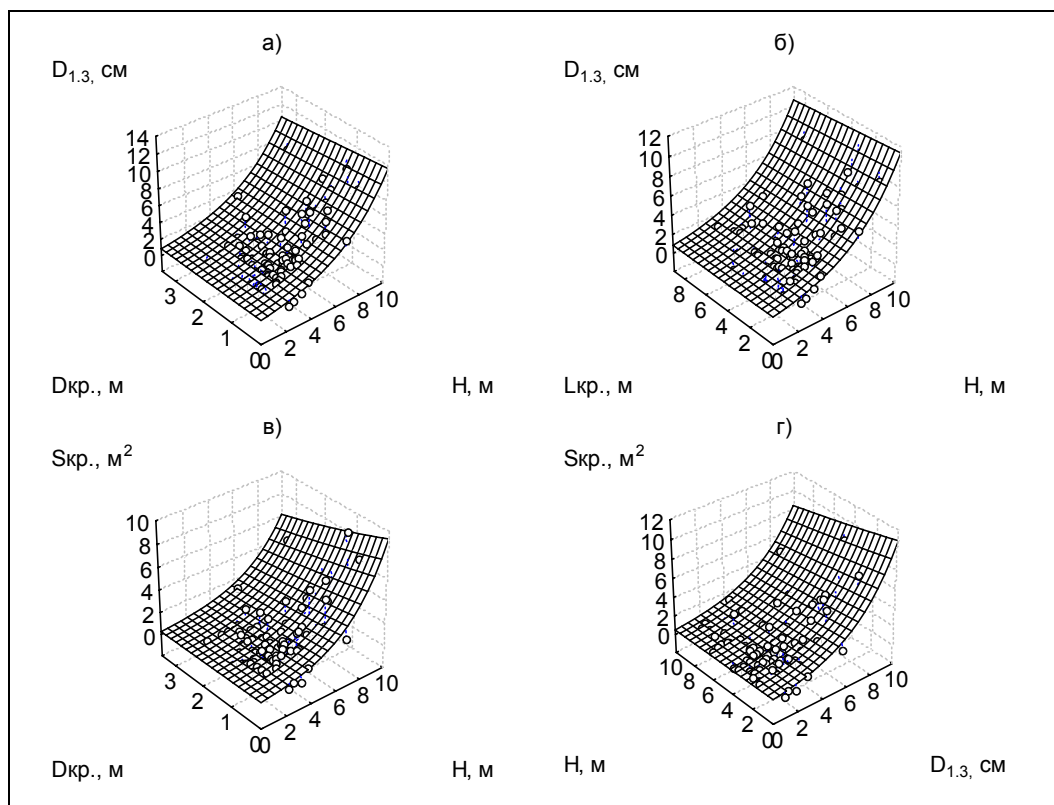


Рис. 105. Трехмерное поле распределения морфометрических параметров деревьев в лиственничнике, полученное в результате сопряженной регрессии лазерно-локационных и наземных данных: а) – $D_{1.3}$ f (H, Dкр.), б) – $D_{1.3}$ f (H, Lкр.), в) – Skр. f (H, Dкр.), г) – Skр. f (H, $D_{1.3}$).

Таблица 26. Корреляционная структура связи (R) размеров и массы фракций деревьев лиственницы (Центральная Эвенкия)

Показатели	$D_{1.3}$	H	Dкр.	Lкр.	Skр.	Vств.	P общ.	Ствол	Древесина	Кора	Крона	Ветви $\varnothing > 1$ см	Ветви $\varnothing < 1$ см	Поб. текущ. года	Хвоя	Ветви отмерш.
$D_{1.3}$	1.00	0.99	0.96	1.00	0.91	0.95	0.90	0.91	0.91	0.92	0.88	0.82	0.96	0.76	0.83	0.92
H	0.99	1.00	0.95	0.99	0.87	0.91	0.85	0.86	0.86	0.87	0.82	0.75	0.92	0.70	0.77	0.87
Dкр.	0.96	0.95	1.00	0.98	0.97	0.94	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.87	0.97	0.85	0.91	0.94
Lкр.	1.00	0.99	0.98	1.00	0.93	0.95	0.91	0.92	0.91	0.92	0.89	0.83	0.96	0.78	0.84	0.93
Skр.	0.91	0.87	0.97	0.93	1.00	0.96	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99	0.96	0.98	0.95	0.98	0.98
Vств.	0.95	0.91	0.94	0.95	0.96	1.00	0.98	0.99	0.99	0.99	0.96	0.93	0.99	0.87	0.92	0.99
P общ.	0.90	0.85	0.93	0.91	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.98	0.95	0.97	1.00
Ствол	0.91	0.86	0.93	0.92	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.99	0.94	0.97	1.00
Древесина	0.91	0.86	0.93	0.91	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.99	0.94	0.96	1.00
Кора	0.92	0.87	0.94	0.92	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.99	0.94	0.97	1.00
Крона	0.88	0.82	0.93	0.89	0.99	0.96	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.97	0.97	0.99	0.99
Ветви $\varnothing > 1$ см	0.82	0.75	0.87	0.83	0.96	0.93	0.98	0.97	0.97	0.97	0.99	1.00	0.93	0.98	0.98	0.97
Ветви $\varnothing < 1$ см	0.96	0.92	0.97	0.96	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.97	0.93	1.00	0.89	0.94	0.99
Побеги текущего года	0.76	0.70	0.85	0.78	0.95	0.87	0.95	0.94	0.94	0.94	0.97	0.98	0.89	1.00	0.99	0.93
Хвоя	0.83	0.77	0.91	0.84	0.98	0.92	0.97	0.97	0.96	0.97	0.99	0.98	0.94	0.99	1.00	0.96
Ветви отмершие	0.92	0.87	0.94	0.93	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.99	0.93	0.96	1.00

Приведенные выше зависимости имеют общий характер и основываются на закономерности, выявленной немецким лесоводом Ф. Эйхорном при составлении таблиц хода роста сомкнутых пихтовых древостоев и гласящей, что: «...общая фитомасса есть функция только высоты древостоя без учета его возраста и класса бонитета», т.е. «...одной определенной высоте для всех классов бонитета и возраста соответствует одна и та же общая фитомасса древостоя» (Eichorn, 1902) (цитировано по В.А. Усольцеву, 1998, с. 405).

Данная закономерность была многократно подтверждена эмпирически, апробирована для древостоев других пород (сосна, ель, бук) и впоследствии была интерпретирована как проявление закона аллометрии, согласно которому объем стволов (V) определяется как функция их высоты (H):

$$V = aH^b,$$

где a – константа начального роста, b – аллометрическая константа (Усольцев, 1998).

В нашем примере в приведенную выше аллометрическую функцию определения объемов стволов и фитомассы деревьев через их высоту, как наиболее точно определяемую по лазерно-локационным данным, дополнительно вводится диаметр стволов и крон деревьев. Диаметры крон с достаточно высокой точностью (± 10 – 15 см) определяются при лазерной локации лесного полога, а диаметры стволов – посредством аллометрических функций, через высоты стволов и диаметры крон. При этом, как было показано выше, детерминированность определения объемов стволов, их фитомассы, а также массы структурных элементов крон деревьев по рассчитанным уравнениям находится в пределах 87–99% ($R^2 = 0.87$ – 0.99 , табл. 24), что приближается к наземным весовым методам определения фитомассы.

В программной оболочке Altaxis измерения могут производиться как по всему маршруту съемки («сплошной пересчет»), так и выборочно – методом статистически достоверной репрезентативной выборки, на определенных (указанных) оператором участках маршрута съемки. При этом общий запас древостоя и его фитомасса могут быть определены в автоматическом режиме путем суммированием показателей объемов стволов и фитомассы отдельных деревьев ($M = V_1 + V_2 + \dots + V_n$; $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$), рассчитанных по уравнениям.

Необходимое количество пробных площадей и модельных деревьев для расчета регрессионных уравнений в каждом конкретном случае устанавливается, исходя из разнообразия представленных типов насаждений и варьирования таксационных показателей в пределах элементарной учетной единицы (пробной площади, таксационного выдела, фации и пр.) в районе съемки.

Пробные площади закладываются по принципу репрезентативного представительства типов насаждений, а модельные деревья отбираются по принципу ступенчатого (по высоте, диаметрам стволов и диаметрам крон) представительства.

Эмпирически было установлено, что для расчета статистически достоверных и эффективных аппроксимаций на маршруте съемки протяженностью 200 км в Средней Сибири достаточно 15–20 таксационных пробных площадей, на каждой из которых отбиралось и обмерялось по 10–15 модельных деревьев.

Для упрощенного определения запасов древесины в объемных и весовых показателях через средние значения диаметров крон и высот древостоев рассчитаны обобщенные уравнения, значения которых находили по результатам

замеров на лазерных профилограммах и цифровых аэроснимках 20 случайно отобранных деревьев по маршруту съемки (табл. 27).

Таблица 27. Обобщенные коэффициенты регрессии морфометрических и продукционных параметров древостоев лиственницы

Тип уравнения*	Соотношение	Коэффициенты регрессии			R
		c	a	b	
1	$M f(D_k)$	12.459	18.417	–	0.90
1	$M f(H)$	–73.211	25.440	–	0.94
2	$M f(D)$	–9.337	24.990	–0.298	0.90
1	$P f(D_k)$	2.915	58.551	–	0.68
2	$P f(H)$	–20.034	13.193	–0.085	0.94
2	$P f(D)$	8.796	13.307	–0.229	0.92
1	$P f(M)$	21.158	0.442	–	0.99

* 1: $y = a + bx$; 2: $y = a + bx + cx^2$,
где M – запас стволовой древесины, м³/га;
D_к – средний диаметр крон древостоя, м;
H – средняя высота древостоя, м;
D – средний диаметр древостоя, см;
P – надземная фитомасса древостоя, т/га (в абсолютно сухом состоянии).

Обобщенная зависимость между запасом и надземной фитомассой лиственничных древостоев и насаждений, рассчитанная по данным пробных площадей маршрута лазерного сканирования, показана на рисунке 106.

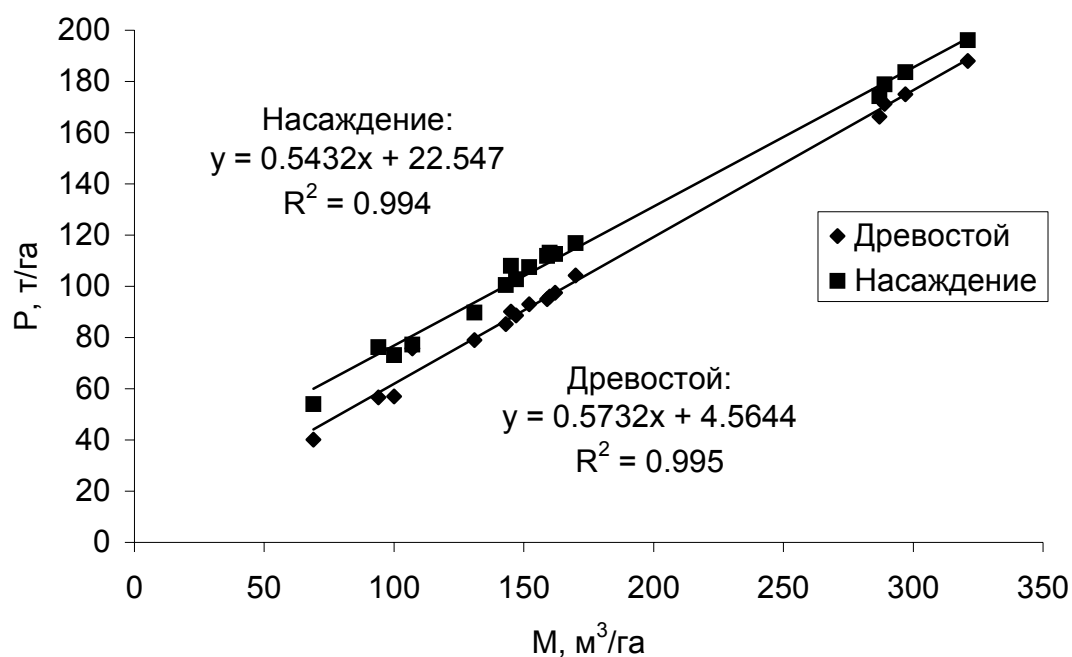


Рис. 106. Зависимость между древесным запасом (M) и общей надземной фитомассой (P) древостоев и насаждений пробных площадей маршрута лазерного профилирования в районе р. Бахта (Красноярский край).

Данная взаимосвязь по своим показателям и устойчивости близка к функциональной ($R^2 = 0.994-0.995$).

Проверка точности метода на таксационно-дешифровочных пробных площадях показала, что среднеквадратическая ошибка при определении запаса и фитомассы древостоев не превысила $\pm 10\%$, что удовлетворяет точности дешифровочной таксации простых по составу древостоев применительно к III разряду лесоустройства согласно действующей лесоустроительной инструкции (Инструкция, 1995).

В целом точность лазерных определений биометрических и таксационных показателей деревьев и древостоев с использованием аллометрических функций оказалась выше, чем при традиционных наземных лесоинвентаризационных работах (табл. 28).

Таблица 28. Объемы стволовой древесины и фитомасса (абсолютно сухая масса) лиственничных древостоев, фактические и вычисленные по лазерно-локационным данным (Красноярский край)

№ п.п.	Координаты центров пробных площадей	Состав и возраст (лет) древостоев по породам	Густота, деревьев/га	Объемы стволовой древесины, м ³ /га		Отклонение		Надземная фитомасса древостоя, тонн/га		Отклонение	
				факт.	вычисл.	м ³	%	факт.	вычисл.	тонн	%
1	63°27'00"с.ш. 91°43'23"в.д.	9Л(210)1К(190) +Е(170)	386	145	148	3.0	2.1	90.1	91.8	1.7	1.9
2	63°27'55"с.ш. 91°36'09"в.д.	7Л(180)3К(180) ед. Е(110)Б(100)	550	69	66	-3.0	-4.3	40.1	38.9	-1.2	-3.0
3	63°30'22"с.ш. 91°16'53"в.д.	10Л(200)	360	143	145	2.0	1.4	85.2	86	0.8	0.9
4	63°32'13"с.ш. 91°02'26"в.д.	9Л(200)1Е(180) +Б(90)	380	152	155	3.0	2.0	93.0	93.5	0.5	0.5
5	63°32'40"с.ш. 90°58'47"в.д.	9Л(140)1Е(120) +К(120)	418	170	173	3.0	1.8	104.3	106.7	2.4	2.3
6	63°34'08"с.ш. 90°47'15"в.д.	10Л(160)+К(160)	547	131	137	6.0	4.6	79.0	80.3	1.3	1.7
7	63°36'24"с.ш. 90°29'55"в.д.	9Л(200)1Е(170) ед. К(170)Б(100)	200	94	95	1.0	1.1	56.6	57.2	0.6	1.1
8	63°38'26"с.ш. 90°14'35"в.д.	9Л(220)1Е(200)	220	159	161	2.0	1.3	95.0	96.0	1.0	1.1
9	63°39'55"с.ш. 90°03'06"в.д.	9Л(180)1К(160) ед. Е(160)Б(80)	412	297	293	-4.0	-1.3	175.0	173.1	-1.9	-1.1
10	63°40'50"с.ш. 89°56'30"в.д.	10Л(210) ед. К(200)	227	160	161	1.0	0.6	96.0	97.5	1.5	1.6
11	63°37'54"с.ш. 89°44'05"в.д.	10Л(260) +К(270)	225	162	157	-5.0	-3.1	97.5	95.6	-1.9	-2.0
12	63°27'01"с.ш. 89°33'21"в.д.	7Л(200)3К(200) ед. Е(170)Б(90)	395	287	296	9.0	3.1	166.3	170.0	3.7	2.2
13	63°17'23"с.ш. 89°23'55"в.д.	10Л(210) ед. К(250)Е(180)	209	100	99	-1.0	-1.0	57.0	56.5	-0.5	-0.9
14	63°09'05"с.ш. 89°15'42"в.д.	9Л(250)1Е(200) +Б(100)	380	147	150	3.0	2.0	88.6	89.5	0.9	1.0
15	63°07'17"с.ш. 89°14'06"в.д.	9Л(160)1Е(140)	470	289	291	2.0	0.7	171.3	172.6	1.3	0.8
16	63°06'29"с.ш. 89°13'14"в.д.	6Л(240)3К(210) 1Е(200) ед. Б(80)	410	321	316	-5.0	-1.6	188.0	186.0	-2.0	-1.1
17	63°04'47"с.ш. 89°11'33"в.д.	9Б(40)1Ос(40) ед. Е(30)	690	107	109	2.0	1.9	75.8	77.0	1.2	1.6

Оценка параметров лесного покрова на канадском трансекте проводилась методом регрессии с индексом листовой поверхности (LAI – Leaf Area Index), или листовым индексом, который понимается как показатель фотосинтезирующей биомассы, равный площади освещенных листьев, приходящейся на единицу поверхности почвы. Максимальная чистая продукция соответствует LAI, близкому к 4, т.е. когда площадь освещенных листьев в 4 раза больше площади, занятой растениями, тогда как максимум валовой продукции достигается при LAI, равном 8–10, уровне, характерном для лесов (Remote Sensing, 2003).

Индекс листовой поверхности определяется по данным наземных (на пробных площадях) и бортовых измерений, с учетом параметров структуры и биоразнообразия насаждений бореальной зоны страны и позволяет получать приемлемые по точности оценки изменения структуры лесной растительности и ее биомассы на достаточно больших площадях в широком географическом градиенте – от сухих прерий до границы притундровых бореальных лесов (Remote Sensing, 2003, Wulder et al., 2004) (табл. 29, рис. 107, 108).

Таблица 29. Характеристика пробных площадей канадского лазерного трансекта

№ п.п.	Координаты пробной площади	Ярус	Древесная порода*	Средние			Густота, деревьев/га	Σg , м ² /га	М, м ³ /га
				А, лет	D _{1.3} , см	Н, м			
1	58° с.ш. 109.3° з.д.	Верхний	Pb	40	6.3	8.5	2244	7.88	41.6
2	58° с.ш. 109.5° з.д.	Верхний	Pb	90	12.5	9.6	936	12.35	81.2
3	57.3° с.ш. 111.5° з.д.	Верхний	Pt	35	10.3	14.2	1844	16.19	98.5
		Нижний	Pg	40	6.9	5.5	1721	8.00	35.1
4	57.2° с.ш. 111.5° з.д.	Верхний	Pb	65	13.2	14.3	1161	17.62	119.3
5	56.9° с.ш. 111.6° з.д.	Верхний	Pm	45	4.5	8.2	8843	21.01	138.7
6	56.9° с.ш. 111.4° з.д.	Верхний	Pg	120	24.0	26.6	857	45.56	565.8
7	56.6° с.ш. 111.1° з.д.	Верхний	Pt	45	11.6	21.6	3140	37.55	379.5
8	56.5° с.ш. 111.1° з.д.	Верхний	Pm	9	0.5	1.5	22752	1.75	5.3
9	56.3° с.ш. 111.2° з.д.	Верхний	Pt	80	28.7	28.7	519	34.5	364.8
10	56.2° с.ш. 111.5° з.д.	Верхний	Pg	100	21.0	24.2	1053	43.34	304.1
11	55.8° с.ш. 112° з.д.	Верхний	Pm	100	20.0	22.0	1025	41.31	298.5
12	55.5° с.ш. 112.5° з.д.	Верхний	Pb	15	2.0	4.0	53191	18.87	65.2
13	55.4° с.ш. 112.5° з.д.	Верхний	Pt	10	2.1	3.2	32663	12.96	58.4
14	55.3° с.ш. 112.3° з.д.	Верхний	Pt	60	13.2	19.3	1912	28.0	237.1
		Нижний	Pg	65	10.5	9.9	450	1.33	7.9

*Pb – *Pinus banksiana*, Pt – *Populus tremuloides*, Pg – *Picea glauca*, Pm – *Picea mariana*.

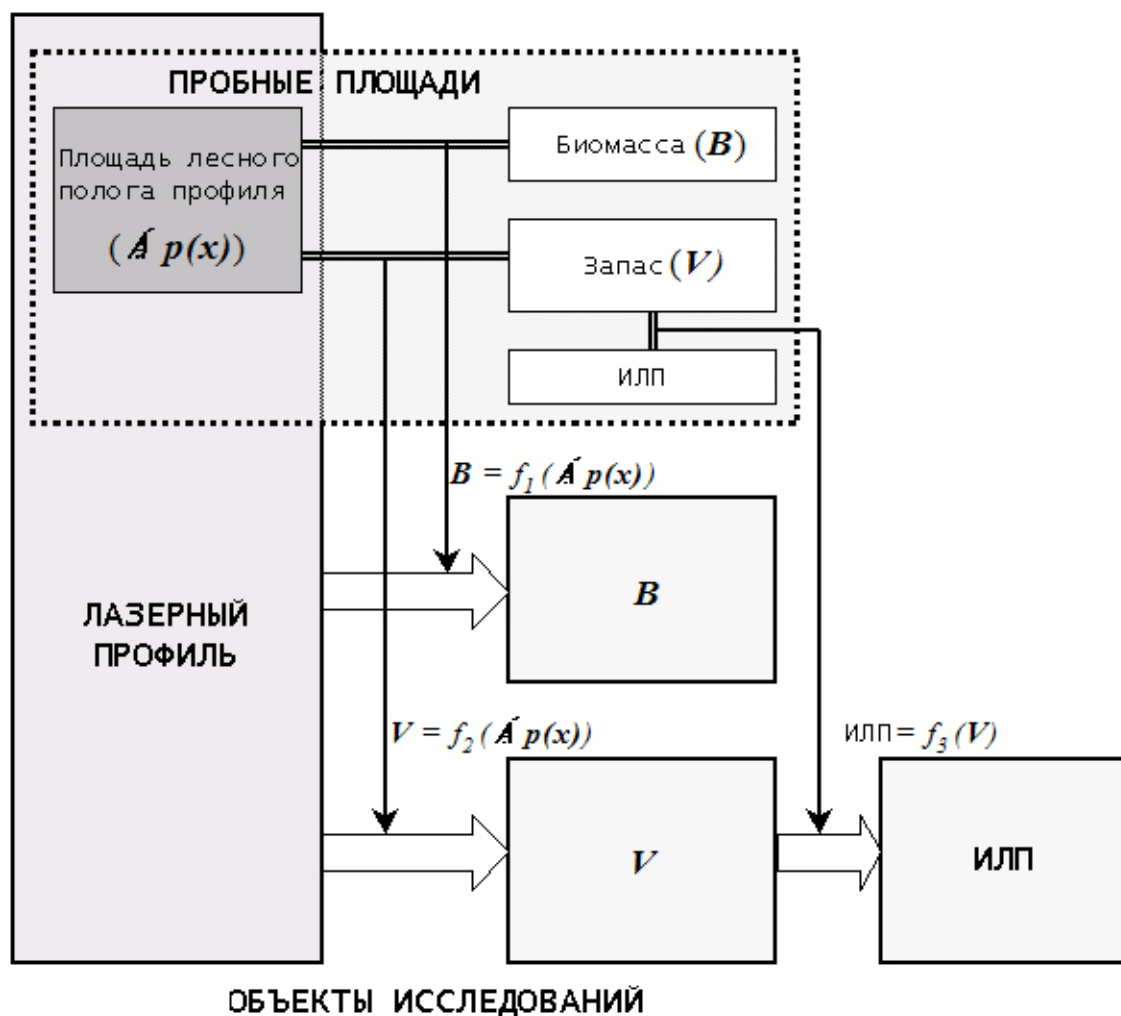


Рис. 107. Общая схема оценки биомассы, древесного запаса и индекса листовой поверхности (ИЛП) на канадском лазерном трансекте.



Рис. 108. Изменение значений индекса листовой поверхности (ИЛП) на маршруте лазерного профилирования в канадских провинциях Альберта и Саскачеван.

Вместе с тем нужно отметить, что метод определения древесного запаса и фитомассы через индекс листовой поверхности и общую площадь растительности на лазерном трансекте значительно уступает по точности определения параметров методу регрессионных зависимостей при более детальной оценке морфоструктуры лесного полога и биомассы на уровне отдельного древостоя или дерева, ввиду значительной генерализации получаемых данных (Данилин, 2003).

Результаты практической апробации метода лазерной локации в сочетании с материалами аэро- и космической съемки высокого разрешения свидетельствуют о высокой перспективности его использования для целей анализа и моделирования структуры лесных насаждений средствами трехмерной компьютерной графики, а также для лесоинвентаризации и оперативного экологического мониторинга.

Некоторые выводы по разделу

Структура, объемные показатели стволов, запас и фитомасса деревьев и древостоев по лазерно-локационным данным («лазерным портретам» деревьев и древостоев) определяются с высокой степенью достоверности и точности средствами визуализации и трехмерной компьютерной графики и моделированием аллометрическими функциями на основе регрессионных связей с морфометрическими показателями деревьев – высотой и диаметром стволов, диаметром и вертикальной протяженностью крон.

При лазерном сканировании лесного покрова оценка запасов и фитомассы древостоев в каждом конкретном случае сводится к определению соотношений между объемами стволов и фитомассой по породам и их высотой и диаметрами крон, которые, в свою очередь, составляют 87–99% объясненной изменчивости различных фракций надземной фитомассы (стволов деревьев, скелета крон и хвои).

При включении в регрессионные модели высот и диаметров крон деревьев остается некоторая доля неучтенного варьирования, что характерно для высоко сомкнутых насаждений, где диаметры стволов на «лазерных портретах» древостоев читаются нечетко или неполностью. В данных случаях наиболее важную характеристику запаса и фитомассы древостоев – распределение стволов по толщине – рекомендуется аппроксимировать через распределение по диаметрам крон, которым характерна автокорреляция и высокая степень регрессионной сопряженности.

При сравнении расчетных (лазерных) значений запасов и фитомассы древостоев с соответствующими фактическими (определенными на пробных площадях весовым методом) варьирование оказалось невысокое. Лазерные данные находятся в пределах $\pm 10\%$ от фактических наземных определений. Разброс объясняется варьированием диаметров стволов в сомкнутых насаждениях, где происходит частичная «потеря» отраженных импульсов от крон деревьев низких рангов и подчиненной части полога древостоев. Данная проблема устранима применением лазеров с большей тактовой частотой и количеством импульсов в единицу времени (лазеры, обеспечивающие до 100 тыс. и более импульсов в секунду и наибольшую плотность точек сканирования, порядка 1 точки на 5–10 см, имеются в промышленности уже сегодня), что обеспечит максимально возможную проникаемость лазерного луча сквозь толщу крон, регистрацию возвращенных сигналов и достоверный, четкий лазерный портрет древостоев со сложной вертикальной и горизонтальной структурой полога.

Применение методологии и технологии бортовой лазерной съемки, совмещенной со спутниковой навигацией и геопозиционированием, а также с информацией, получаемой с воздушных и спутниковых цифровых снимков и интегрированных в геоинформационных системах для целей мониторинга и лесоинвентаризации, позволяет с высокой степенью точности проводить дистанционную таксацию лесов в режиме реального времени, при минимуме наземных работ и значительной экономии времени и материальных средств.

Экономическая эффективность метода обеспечивается принципиальным повышением точности результатов измерений и возможности их повторимости (проверки), не возвращаясь на объект, а также значительным снижением трудоемкости и сложности выполнения работ (как полевых, так и камеральных дешифровочных) за счет высокого уровня автоматизации обработки данных, получаемых в процессе лазерной съемки. Объем полевых работ при этом значительно сокращается и необходим лишь для калибровки результатов лазерного сканирования, поддержки интерактивного дешифрирования и установления базовых закономерностей изучаемого объекта (табл. 30).

Таблица 30. Экономическая эффективность метода лазерной таксации леса по укрупненным показателям (в расчете на 1 млн. га, III разряд лесоустройства)

Традиционные технологии			Лазерная таксация	
Виды работ	Стоимость, тыс. руб.			
	Наземное лесоустройство	Наземная таксация с камеральным дешифрированием аэрофотоснимков	Виды работ	Стоимость, тыс. руб.
Аналоговая аэрофотосъемка М 1:25000, с печатью аэроснимков	3250	3250	Лазерная, цифровая аэро- и видеосъемка с обработкой и представлением данных	1450
Подготовительные	304	304	Подготовительные	304
Полевые	8000	4000	Полевые	250
Камеральные	3200	3200	Камеральные	3000
ИТОГО:	14754	10754	ИТОГО:	5004
В переводе на 1 га, руб.	14.8	10.8	В переводе на 1 га, руб.	5.0
Превышение стоимости по сравнению с лазерной таксацией, в переводе на 1 га, руб.	+9.8	+5.8		0

Выполненные нами исследования по лазерной локации лесного покрова обеспечивают основу для разработки методологии обработки, дешифрирования и эффективного использования трехмерных данных дистанционного зондирования высокого и сверхвысокого разрешения в системе мониторинга лесов, касающихся закономерностей пространственного распределения структурных компонентов и биомассы лесных экосистем и в том числе динамики растительных горючих материалов. Ожидается, что дальнейшее развитие данной методологии позволит создавать достоверные и высокоточные лесные карты и базы данных различного тематического содержания, которые найдут применение в различных сферах использования, включая оперативный мониторинг природных экосистем, стратегическое и тактическое планирование лесо- и природо-

пользования, объективную оценку параметров состояния и динамики лесных насаждений, включая их биомассу, моделирование развития и распространения катастрофических лесных пожаров и оценку различных природных рисков.

Дальнейшее продолжение исследований в данном направлении будет способствовать получению новых знаний и выявлению закономерностей структурно-функциональной организации и биологической продуктивности лесных экосистем бореальной зоны и окажет существенное воздействие на развитие различных областей науки и новых технологий. Полученные результаты послужат основой для развития принципиально новой методологии и технологии дистанционного зондирования лесного покрова и формирования геоинформационных систем природно-ресурсного и природоохранного содержания и, в перспективе имеют высокую потенциальную коммерческую ценность на рынке дистанционного зондирования и геоинформационных услуг.

7.3. Программный комплекс ALTEXIS

Программный комплекс ALTEXIS разрабатывается компанией «Геокосмос» и предназначен для обработки данных комбинированной воздушной лазерно-локационной и цифровой аэрофотографической съемки, а также для метрологического обеспечения аэросъемочных работ с использованием лазерно-локационной аппаратуры. Летом 2006 года вышла новая версия 2.0 программного комплекса ALTEXIS. Версия 2.0 является дальнейшим развитием линейки программных продуктов семейства ALTEXIS компании «Геокосмос», используемой в качестве базового программного средства обработки геопространственных данных как элемента геоинформационной технологии крупномасштабного картирования реального времени, предложенной и активно развиваемой компаниями «Геокосмос» в последние годы (Медведев, 2005, Пестов, 2005).

Программный комплекс ALTEXIS выполняет задачи по метрологическому обеспечению аэросъемочного комплекса, в частности по проведению калибровочной процедуры лазерного локатора и цифрового аэрофотоаппарата, он может быть использован для контроля качества пилотирования и оценки степени достоверности собранных аэросъемочных данных. Кроме того, ALTEXIS реализует широкий набор алгоритмов камеральной обработки аэросъемочных данных: геоморфологический анализ и выделение рельефа, создание ортофотокарт, автоматическая селекция лазерных точек, выделение географических объектов, моделирование ЛЭП, оценка лесотехнических параметров и многое другое.

Новая версия программного комплекса ALTEXIS обладает рядом существенных *преимуществ* по сравнению с предыдущими версиями:

- используется принципиально новая схема организации интерфейса пользователя, в значительно большей степени приближенная к устоявшимся нормам интерфейса программ обработки геопространственных данных;
- внесены значительные коррективы в файловую структуру хранения данных, причем как первичных аэросъемочных данных, так и данных, прошедших определенные стадии программной обработки. Это позволяет более экономно распоряжаться дисковым пространством, что крайне актуально, принимая во внимание значительно возросшую производительность авиационных лазерно-локационных систем и увеличение формата цифровых аэрофотоснимков;
- используются обновленные алгоритмы выделения истинного рельефа по лазерно-локационным данным, что значительно повышает качество геоморфологического анализа сцены наблюдения;

- реализована новая технология совместного накопления и обработки лазерно-локационных и аэрофотографических данных. Значительно возросла точность автоматического геопозиционирования аэрофотоснимков;
- обеспечена полная совместимость с предыдущими версиями ALTEXIS на уровне форматов данных и используемого математического аппарата.

Использование в программной среде ALTEXIS Constellation режима визуализации с различными типами цветовых шкал позволяет добиться высокой наглядности и создать условия для качественного камерального дешифрирования даже без использования аэрофотографических данных.

В программном комплексе ALTEXIS поддерживается многооконный режим манипулирования данными, обеспечивающий максимальную эффективность всех видов контроля и обработки. Используется иерархический принцип структурирования данных. Поддерживается набор растровых векторных и трехмерных (3D) слоев, адекватно отображающих весь комплекс данных, получаемых в ходе проведения аэросъемочных работ. Используются слои первичных и регистрированных лазерно-локационных данных, растровые топографические карты, ортофотомозаика, пилотажно-навигационные данные, набор векторных слоев, представляющих объектовую ситуацию, слой поверхности истинного рельефа в TIN и GRID представлении, слой растительности, а также модели ЛЭП.

Особое внимание при разработке программного комплекса ALTEXIS версии 2.0 было уделено вопросам совместной обработки лазерно-локационных и аэрофотосъемочных данных. Средствами ALTEXIS обеспечивается автоматическое ортотрансформирование и геопривязка аэрофотоснимков с точностями до 0.2 м. В программной среде ALTEXIS Constellation предусмотрен широкий набор инструментов для автоматического и ручного выделения географических объектов, используя обоих видов данных.

Работа с точками лазерного сканирования

Программный комплекс ALTEXIS обеспечивает возможность обработки лазерно-локационных данных, поставляемых аппаратурой всех ведущих мировых производителей – Optech, Leica, TopoSys и др. Для этой цели разработан гибкий интерфейс импорта ASCII данных, обеспечивающий ручную настройку на любой формат представления результатов лазерно-локационной съемки. Так, могут быть подгружены данные с произвольным количеством откликов для каждого зондирующего импульса, а каждая используемая лазерная точка может быть обеспечена как координатами, так и значением интенсивности отраженного импульса. Предусмотрена возможность подгрузки данных только на выбранную территорию, или только данных, полученных в определенном временном интервале.

Возможна подгрузка данных с прореживанием, а также с некоторым постоянным сдвигом на произвольный, заданный оператором вектор в пространстве. Также предусмотрено большое количество настраиваемых фильтров, решающих две основные задачи – исключение неинформативных лазерных точек и преодоление возможных ошибок в формате представления исходных данных (оборванные или склеенные строки, недопустимые значения координат, немотонность временного представления и др.).

Имеется возможность импорта данных, представленных в формате международного стандарта LAS. В результате выполнения операции импорта первичные лазерно-локационные данные преобразуются к внутреннему формату

ALTEXIS – бинарному файлу ALX типа, который, как правило, в 5–7 раз компактнее соответствующего файла с исходными данными.

При импорте первичных лазерно-локационных данных, равно как и в дальнейшей работе, могут быть использованы различные геодезические системы координат (СК). ALTEXIS штатно поддерживает СК двух референц-эллипсоидов WGS-84, Красовского и две картографические проекции Гаусса-Крюгера и UTM. Задание любых других СК осуществляется пользователями в специальном окне настройки.

Навигация с помощью окна траектории

Для обеспечения наибольшего удобства манипулирования с аэросъемочными данными проекта, который может быть значительного объема, используются навигационные данные. Эти данные определяют положение летательного аппарата в процессе съемки на фоне растровой топографической карты района выполнения аэросъемочных работ. С их помощью можно быстро перейти к нужному фрагменту данных, например с помощью простого щелчка мыши в нужной точке траектории. Другой альтернативой при перемещении по данным является прямое указание требуемых геодезических координат либо момента времени, когда была выполнена съемка нужного фрагмента. В ALTEXIS предусмотрен широкий набор инструментов перемещения по данным, который наряду с традиционными включает имитацию пролета над данными, круговой облет выбранного фрагмента и ряд других средств, призванных обеспечить максимум удобства и информативности для пользователя.

Аэросъемочные данные проекта разбиты на проходы. Каждый проход соответствует набору лазерно-локационных данных, накопленных за одно включение лазерного сканера. Как правило, проход соответствует законченному фрагменту данных – отдельному маршруту, одному анкерному пролету ЛЭП и т.д. Программная среда ALTEXIS обеспечивает возможность отдельной индикации траекторных данных, принадлежащих различным проходам, т.е. возможность выбора цвета, которым изображаются точки того или иного прохода, а также включения/выключения индикации всего прохода в целом. Кроме того, поддерживается режим индикации уровня качества пилотирования для того или иного фрагмента траектории. Под качеством пилотирования понимается выполнение заданных условий выполнения аэросъемочного полета – истинной скорости, величины бокового крена и др. пилотажно-навигационных параметров.

Таким образом, роль навигационных данных в Altexis может быть определена как:

- визуализация траекторных маркеров (соответствующих секундным GPS отметкам) в плановом и профильном видах;
- цветовая индикация траекторных маркеров в соответствии с выполнением (невыполнением) заданных условий съемки;
- информационно-поисковые операции по обнаружению фрагментов данных с определенными значениями пилотажных параметров;
- подготовка отчетов;
- динамическая визуализация.

Создание групп. Типы данных и способы их представления

Группой называется совокупность связанных окон. Группа может состоять из одного и более плановых окон и связанных с ними профильного окна, 3D окна и окон таблиц. Все окна группы имеют общую центральную точку и угол пла-

нового поворота. При перемещении или повороте какого-либо из окон группы центральная точка группы или угол поворота изменяется и, соответственно, все окна группы перерисовываются с новыми параметрами.

Каждое окно группы может быть использовано для представления любых видов данных, поддерживаемых Altexis. Для диспетчеризирования работы с данными различных видов используется менеджер слоев.

Программный комплекс ALTEXIS ориентирован на обработку двух основных видов данных:

- лазерно-локационные данные в виде дискретного множества лазерных точек;
- растровые двумерные прямоугольные изображения (в первую очередь цифровые аэрофотоснимки), с выраженными фотограмметрическими свойствами, т.е. для которых возможно выполнить абсолютное ориентирование в геодезическом пространстве и геопозиционирование. Кроме аэрофотоснимков, могут быть использованы тепловизионные (ИК) и спектрально-аналитические изображения, и в принципе любые другие изображения.

Кроме основных видов данных, в ALTEXIS могут быть загружены и обработаны данные дополнительных видов. Полная информация по всем видам данных, поддерживаемых программным комплексом ALTEXIS, сведена в таблицу 31.

Таблица 31. Виды данных, поддерживаемых программным комплексом ALTEXIS

Категория данных	Вид данных	Пояснение
Лазерно-локационные данные	Point	Первичные (нерегулярные) лазерные точки, включая интенсивность отражения
	Regular	Регулярные лазерные точки, включая интенсивность отражения
Топографические данные	TIN	Триангуляционная модель поверхности истинной земли
	GRID	Регулярная модель истинной земли и растительности
	Аэрофотоснимки	Ортотрансформированные и геопривязанные аэрофотоснимки
	Навигационные данные	Пилотажно-навигационные параметры, используемые для оценки качества пилотирования
	Векторные объекты	Векторное представление географических объектов, в том числе ЛЭП
Дополнительные виды данных	Map	Растровые топографические карты
	Table	Атрибутивные (символьные, числовые) данные в виде таблиц, характеризующие векторные объекты
	Tower Model	Каркасные модели опор ЛЭП

Благодаря использованию менеджера слоев возможно изменить режим визуализации различных видов данных. Например, имеются следующие способы отображения POINT данных:

- «Height» = по высоте. Все точки красятся вне зависимости от семантических кодов в градации серого. Шкала подбирается автоматически по текущей рабочей области.

- «Pass» = по проходам. Блоки точек получают цвет согласно своей принадлежности к проходу. Цвет прохода в пространственных окнах совпадает с цветом, назначенном в окне траектории.

- «Scale» = градации цвета по высоте с учетом семантического кода точки. Каждый элемент слоя имеет свой цвет. Элементы слоя, для которых градация по высоте не предусмотрена, рисуются одним цветом.

- «Range» = элементы слоя с градацией по высоте рисуются в шкале заданных цветов. Шкала высот элемента слоя определяется для всего проекта. Элементы слоя, для которых градация по высоте не предусмотрена, рисуются одним цветом.

- «Pseudo colored intensity» = по величине интенсивности отражения сигнала. В псевдоцвете.

- «Code» = по семантическому коду точек. Цвета не зависят от высоты.

- «Time» = отбор точек по времени.

В менеджере слоев предусмотрены специальные режимы визуализации для всех других видов данных.

Управление группой

В каждом окне активной группы обеспечивается индикация геодезических координат текущего положения курсора (для плановых окон) либо геодезической высоты точки, на которую указывает курсор (для профильных окон). Это позволяет определять геодезические координаты любого объекта, который может быть идентифицирован по лазерно-локационным или аэрофотографическим данным. Также может использоваться режим, при котором индицируется отклонение текущего положения курсора от центра активного окна.

Для выполнения перемещений (*browsing*) по данным используется несколько инструментов:

- Инструмент «шагомер»  позволяет перемещаться («шагать») по любому из пространственных окон. Для перепозиционирования группы достаточно щелкнуть инструментом в произвольном месте любого из плановых окон группы. После этого точка щелчка становится центром окон группы и все открытые окна группы перерисовываются. Размер окна, масштаб и географическая ориентация данных, а также все прочие установки полностью сохраняются. Совершенно аналогично можно выполнить перепозиционирование с помощью щелчка в окне траектории. По щелчку в профильном окне программа определяет значение геодезической высоты, соответствующей точке щелчка. Профильное окно позиционируется таким образом, что центр окна оказывается на уровне определенной таким образом высоты.

- Инструмент «рука»  сдвигает изображение в направлении движения курсора. Инструмент позволяет перемещаться по любому из пространственных окон. Горизонтальное перемещение инструментом рука в профильном окне приводит к перепозиционированию группы в плоскости планового окна.

- Инструмент «вертолет»  позволяет «пролететь» над данными в заданном направлении и с заданной скоростью. Это удобный способ быстрого про-

смотра любого типа данных в плановом и профильном пространственных окнах.

– Кнопка «автопилот»  активирует режим автоматического «облета» данных. В этом режиме данные открытого окна/группы окон плавно перерисовываются согласно траектории, в порядке возрастания времени съемки. Программа автоматически перерисовывает открытое пространственное окно/окна руководствуясь навигационными марками. Когда программа доходит до последней марки/блока, показ продолжается в обратном порядке.

Зумирование окон, плановые и фронтальные повороты и наклоны

ALTEXIS поддерживает разнообразные процедуры зумирования (изменения масштаба) плановых и профильных окон, а также выполнения поворотов и наклонов данных для изменения режима визуализации:

– Инструмент «Zoom In»  (увеличить) приближает к точке, где произведен щелчок, или растягивает область, которую захватывает растягиваемый прямоугольник, на все окно;

– Инструмент «Zoom Out»  (уменьшить) отодвигает от точки, где произведен щелчок, или вписывает текущий экстенд данных окна в область, которую захватывает растягиваемый прямоугольник. Текущий масштаб непрерывно показывается в шапке окна. Изменение масштаба одного окна не влияет на связанные с ним окна, если центр окна остался неизменным.

Применение инструментов масштабирования в окне траектории и профильном окне происходит аналогично. В профильном окне они меняют коэффициент масштабирования по оси Z, который также показывается в шапке профильного окна.

Инструмент задания угла поворота данных работает следующим образом. Ориентацию (угол планового поворота) группы можно изменить, задав в пределах планового окна линию поворота при помощи инструмента . В результате выполнения этой операции данные во всех окнах группы будут повернуты на заданный угол. Изменение положения планового окна будет отражено при помощи значка компаса в плановых и профильных окнах. Чтобы восстановить первоначальное положение север-юг, необходимо воспользоваться пунктом контекстного меню планового окна: «zero angle».

Если активен инструмент задания планового поворота и нажата клавиша «Ctrl», можно поворачивать данные по часовой или против часовой стрелки с шагом 5.0 при помощи колесика мыши, вращая его соответственно на себя или от себя. Если вместо клавиши «Ctrl» нажата «Shift», шаг увеличится до 10.0. Выйти из режима приближения (при повороте колесиком перерисовка данных, как правило, немного запаздывает), можно по клавише «Esc».

Изменение угла поворота любого планового окна группы влияет на связанные с ним окна. Инструмент поворота неприменим к окну траектории. Из профильного окна можно менять угол планового поворота группы так же, как из планового окна при помощи колесика мыши. В заголовке каждого планового или профильного окна содержится информация по имени группы, типу окна, значение текущего масштаба.

Настройки проекта

Имеется ряд изменяемых параметров, которые относятся не к конкретным проектам, а к работе ALTEXIS в целом. Параметры, выставляемые в диалоговом окне, приводятся в таблице 32.

Таблица 32. Параметры, выставляемые в диалоговом окне ALTEXIS

Название конфигурации	Название параметра	Значение по умолчанию	Наименьшее значение	Наибольшее значение
Настройка видеорежима (Videodriver)	"Show group number in trajectory"	false	–	–
	"Swap buffers when invalidate"	false	–	–
Размер точки (Point size in pixels)	"Point"	1	1	15
	"Regular"	5	1	15
	"Trajectory"	4	1	15
	"TIN vertex"	4	1	15
	"Attachment Point"	4	1	15
	"3D vertex"	8	1	15
Ограничения масштабов и масштабных коэффициентов (Scale limits)	"Minimal vertical scale"	0.01	0.0001	1
	"Maximal vertical scale"	100	1	1000000
	"Minimal plane scale"	5	0.01	100
	"Maximal plane scale"	100000000	100	100000000000
	Group vertical half-size	1000	1	10000
Скорость перерисовки (Intervals and increments)	"Information delay, ms"	9000	1000	20000
	"Autorotate interval, ms"	50	1	10000
	"Autoflight interval, ms"	50	1	10000
	"Autorotate mode increment, deg."	8	1	45
	"Autoflight mode increment, m"	75	1	1000
Чувствительность колеса мыши (Mouse wheel sensitivity)	"Zoom, %"	5	1	100
	"Zoom extended, %"	12	1	100
	"Rotation, deg."	4	1	45
	"Rotation extended, deg."	8	1	45
Прореживание (Decimation)	"Coefficient"	3	1	100
Параметры вспомогательных объектов (Corrections)	"Half width, m"	200	1	10000
	"Auto sliding, %"	10	1	100
Географические системы координат и формат времени (Reference and time format)	"Geodetic system"	UTM/Geographic	–	–
	"Time format"	GPS time/Day HH:MM:SS	–	–
Настройка отображения векторных объектов (Selection)	"Screen buffers marker capacity"	1000	1	1000000000

Автоматическое перемещение (browse, navigate) по данным

Наряду с традиционными методами перемещения по данным используются специальные режимы «автопилот» и «карусель».

В режиме «автопилот»  данные открытого окна/группы окон плавно перерисовываются согласно траектории, в порядке возрастания времени съемки. Программа автоматически перерисовывает открытое пространственное окно/окна, руководствуясь навигационными марками.

В режиме «карусель»  данные открытого окна/группы окон плавно перерисовываются, поворачиваясь по часовой стрелке вокруг центральной точки окна.

Пространственная селекция

Инструмент «GL»  (коридор) используется для «отсечения» данных по местоположению. Его можно применять к плановому (в дальнейшем «плановый коридор») и к профильному окну (в дальнейшем «профильный коридор»). В проекте может быть задан только один плановый и один профильный коридор. Ввод нового коридора того же типа отменяет прежний коридор.

При активном плановом коридоре плановое окно будет визуализироваться в обычном режиме с изображением заданного коридора двумя зелеными линиями. В профильном окне, в зависимости от типа отображаемых данных, будут появляться только данные следующих типов, находящиеся внутри заданного планового коридора.

При активной профильной «GL» профильное окно будет визуализироваться в обычном режиме с изображением заданного коридора двумя зелеными линиями. В каждом плановом окне данной группы, в зависимости от типа отображаемых данных, будут появляться данные следующих типов, находящиеся внутри заданного профильного коридора.

Настройки остаются в силе для последующих запусков программы.

К плановому коридору можно перейти по опции «Go to GL» контекстного меню планового окна. При этом программа перерисовывает окно таким образом, что первый вертекс оси планового коридора оказывается в центре окна. Масштаб и прочие настройки не меняются.

Также для пространственной селекции используется инструмент «Полигон», который можно применять к плановому и к профильному окну. «Полигон» может быть произвольной формы. Действие «Полигона» аналогично GL.

Способы отображения объектов в ALTEXIS

Способы отображения объектов в ALTEXIS рассмотрим на примере опор линий электропередач, поскольку эти опции на сегодняшний день разработаны и реализованы программными средствами наиболее полно.

Опоры ЛЭП в ALTEXIS изображаются каркасными моделями, которые должны быть предварительно определены. Все численные параметры определяются относительно внутренней системы координат опоры (рис. 109).

Если на данную модель опоры существует каркасная модель, опора изображается в виде соответствующей трехмерной конструкции, если же такой модели нет, то она показывается в виде столбика.

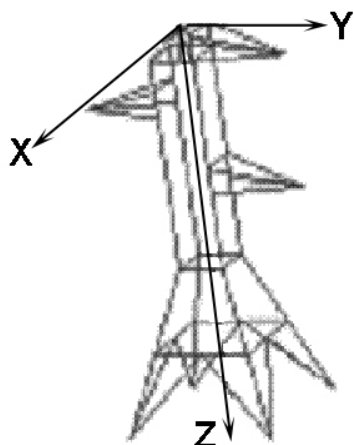


Рис. 109. Внутренняя система координат «Tower».



Рис. 110. Окно атрибутивной информации по опоре.



Рис. 111. Окно параметров пространственного положения провода и его свойств.

Измерения

Для проведения трехмерных измерений используется инструмент «Линейка», который включает в себя 3 составляющие: измерение по вертикали, измерение по горизонтали и наклонное измерение. Измерения можно проводить в любом из пространственных окон. Если при проведении измерений держать нажатой клавишу «Shift», то измеряется горизонтальная составляющая. Если же нажата клавиша «Ctrl» – то вертикальная. Результаты измерений отображаются в активном окне.

Получение информации по объекту ЛЭП

С помощью щелчка на маркере опоры может быть открыто специальное окно, содержащее атрибутивную информацию по данной опоре (рис. 110). Аналогично может быть получена информация по другим составляющим модели ЛЭП – проводам, точкам подвеса (табл. 33).

Кроме того, при визуализации «TOWER» – окошка возможно начать выполнение некоторых процедур редактирования «TOWER». Для этого необходимо выбрать одно из действий, показанных в таблице 34.

Аналогичное окошко для объекта «WIRE». Окошко «WIRE» содержит набор параметров, характеризующих пространственное положение провода и его механические и электротехнические свойства (рис. 111).

Таблица ЛЭП

«TOWER TABLE» является удобным и эффективным средством редактирования топологической модели линии электропередач.

В верхней части таблицы сгруппированы инструменты работы с опорами, проводами и точками подвески и линиями (рис. 112).

Block	Number	Name	Type	Model	Distance, m	Line turn, degree
No	1	Попран	KoГР3С	No	89.47	0.0
No	2	1	У2ак_л+12	No	472.94	-32.19
No	3	2	У2+24	Yes	185.63	0.18
No	4	3	У2+12	Yes	289.08	10.37
No	5	4	ПВС500-2	Yes	208.44	-0.20
No	6	5	У2	Yes	280.07	-9.99
No	7	6	ПВС500-2	Yes	0.0	0.0

Рис. 112. Окно таблицы ЛЭП.

Таблица 33. Информация по составляющим модели ЛЭП

Параметр	Описание
Line	Выводится имя LINE, к которой относится данная TOWER
Number	Имя опоры
Type	Тип опоры
Orient	Плановая ориентация опоры в линии в градусах
GRID base	Высота основания опоры по GRID модели Земли

Таблица 34. Процедуры редактирования «Tower»

Действие	Описание процедуры
«Move»	Поступательное перемещение TOWER в плановом или профильном окнах. Редактирование параметров, определяющих геодезическую высоту положения опоры
«Orient»	Изменение параметра ориентации TOWER Orient
«Add AP»	Добавляет к TOWER точку подвески AP
«Bottom»	Изменение значения геодезической высоты основания

Далее выводится строчка с информацией по текущей LINE, содержимое которой отображается в данный момент. Инструменты панели работы с линиями предназначены для работы с линией как совокупностью опор (рис. 113).



Рис. 113. Инструменты панели для работы с линиями.

С помощью инструментов панели линии можно выполнить сле-

дующие операции:

- добавить/импортировать/переименовать/удалить линию;
- ориентировать опоры согласно направлению линии;
- создать коридор;
- перекодировать точки;
- провести моделирование погодных условий;
- экспортировать объекты ЛЭП и таблицы;
- а также сохранить текущую версию модели линии в файл.

Панель работы с опорами находится в верхнем ряду инструментов в таблице опор. Инструменты данной панели предназначены для работы с опорами (рис. 114).

Инструменты панели позволяют:

- добавлять опоры в конец линии или в указанный пролет;
- удалять опоры;
- редактировать опору или их блок;



Рис. 114. Инструменты панели для работы с опорами.

- позиционировать группу на опору или блок опор и др.



Рис. 115. Инструменты панели для работы с проводами и точками подвески.

Панель работы с проводами и точками подвески находится справа, в верхнем ряду инструментов в таблице опор. Инструменты данной панели предназначены для работы с проводами (и точками подвески) (рис. 115).

На панели собраны инструменты для выполнения следующих операций:

- автоматической и ручной навески проводов;
- для удаления проводов;
- процедуры их идентификации и стыковки с образованием точек подвески;

- для задания механических параметров провода и для расчета габаритов.

Линию электропередачи можно экспортировать в векторный формат для внешних ГИС приложений. В качестве базового формата был выбран формат Shapefile. Основными экспортируемыми объектами ЛЭП являются опоры и провода. Объект «линия» и «точка» подвески включены в «шейп файлы» проводов и опор опосредованно. Точки подвеса (если они присутствуют в экспортируемой линии) становятся концами провода, а принадлежность линии прописывается как атрибутивная информация. В качестве атрибутивной информации передается вся соответствующая информация по каждому типу объектов.

Таблица семантики

«Semantic Table» является удобным и эффективным средством навигации и экспорта векторных топографических объектов.

Name (DOWN)	Type	North, m	East, m
no name 1	ROAD	6108153.58	41366749.17
no name 10	RIVER	6122150.62	41364549.84
no name 14	BORDER	6112314.37	41365832.77
no name 2	ROAD	6120586.94	41365775.91
no name 4	RIVER	6110205.47	41367495.29
no name 6	RIVER	6110441.62	41367658.13
no name 9	RIVER	6122103.32	41364571.45
р.Бишкиль 25	RIVER	6106766.54	41366215.09
р.Бишкиль 26	RIVER	6106902.73	41366313.22
р.Бишкиль 5	RIVER	6107763.76	41366627.37
р.Мнасс 3	RIVER	6110525.69	41367700.99
р.Мнасс 7	RIVER	6110650.12	41367800.81

Рис. 116. Окно таблицы навигации и экспорта векторных топографических объектов.

объектов в проекте.



Рис. 117. Инструменты панели для работы с векторными топографическими объектами.

ного объекта;

- позиционирование центра группы и подбор масштаба таким образом, чтобы в область видимости группы вписался весь объект целиком.

В верхней части таблицы сгруппированы инструменты работы векторными объектами. Далее выводится строка с информацией по текущей группе объектов, которая отображается в данный момент (рис. 116).

Панель работы с векторными топографическими объектами находится в верхнем ряду инструментов в таблице объектов (рис. 117). Инструменты данной панели предназначены для навигации, удалению, импорту и сохранению

Через таблицу объектов можно позиционировать группу, к которой данная таблица относится. Различают два вида позиционирования:

- позиционирование центра группы в точку первого вертекса выбранного объекта;

Нажатие кнопки  вызывает переход на первый вертекс выбранного объекта. При этом выполняются следующие действия:

- центр группы устанавливается в соответствии с координатами X, Y, Z первого вертекса активного объекта;
- размеры области видимости, а также все прочие установки сохраняются неизменными.

При нажатии кнопки  группа позиционируется на выбранный объект, с учетом его экстента.

Размер экстента группы рассчитывается таким образом, чтобы в него оказался вписан весь объект целиком. Центр группы определяется как центр объекта. Масштаб данных, угол планового поворота и прочие настройки визуализации не меняются.

В ALTEXIS возможна работа с полигональными векторными топографическими объектами, созданными в любом внешнем приложении (ГИС пакетах Arc-View, Панорама, MapInfo, CAD пакетах и пр.). Для этого в него встроено универсальное средство импорта векторных топографических объектов из обменного формата MIF-MID. Это текстовый (ASCII) формат, поэтому файлы в таком формате можно редактировать, достаточно легко генерировать, причем они будут работать в любых поддерживающих его системах. Для того, чтобы импортировать файлы формата MIF-MID, можно воспользоваться инструментом .

Климатическое моделирование

В результате выполнения лазерно-локационной съемки определяется фактическое положение проводов и тросов, которые они занимали в момент съемки. По данным съемки осуществляется аппроксимация проводов, определение значений стрел провеса, координат точек подвески и габаритов. В некоторых случаях при создании ALTEXIS проекта требуется оценить возможное изменение положения снятых проводов и тросов, которое может случиться в результате воздействия следующих факторов:

- изменение электрической нагрузки и как следствие изменение температуры провода;
- климатические воздействия, такие, как появление гололеда и ветра.

В программном комплексе ALTEXIS имеется инструмент моделирования, который позволяет пересчитать положение провода в пространстве при изменении упомянутых выше факторов.

Изменение положения провода по результатам моделирования может контролироваться визуально. Кроме того, появляется возможность пересчитать все стандартные интерфейсные таблицы, в которых используется информация о положении провода, а также выполнять операции по поиску критически близких фрагментов растительности с учетом возможного изменения пространственного положения проводов.

В программной среде ALTEXIS изменение положения провода (троса) по результатам моделирования выражается в следующих формах:

- изменение величины стрелы провеса;
- бокового отклонения плоскости провода.

Для каждого провода специфицируются значения, показанные в таблице

Таблица 35. Спецификации параметров проводов

Параметр	Обозначение	Единицы
Удельный вес	W	Кг/м
Коэффициент температурного удлинения	a	Б/р
Модуль упругости	E	Кг /мм ²
Площадь поперечного сечения	S	мм ²
Внешний диаметр	D	мм

При выполнении моделирования в программной среде ALTEXIS предполагается, что в ходе выполнения аэросъемочных работ прямым или косвенным методом была замерена температура проводов и тросов в момент съемки «T real». В ходе моделирования может быть установлено новое значение «T model», для которого и будет выполнено моделирование. Значение «T model» может быть установлено большим, меньшим или равным «T real». Специфицируются значения климатических условий, показанные в таблице 36.

Таблица 36. Спецификации климатических условий

Параметр	Обозначение	Единицы
Боковая составляющая ветра	V	М/с
Толщина стенки гололеда	C	мм
Температура в момент съемки	T real	°C
Модельная температура	T model	°C

Для выполнения моделирования необходимо задать параметры проводов и тросов и климатические условия. Задание параметров моделирования в программной среде ALTEXIS осуществляется перед запуском расчета по кнопке . После этого появляется диалоговое окно, в котором пользователю предлагается заполнить климатические параметры, для которых будет произведен расчет (рис. 118). Все остальные операции будут выполнены автоматически.

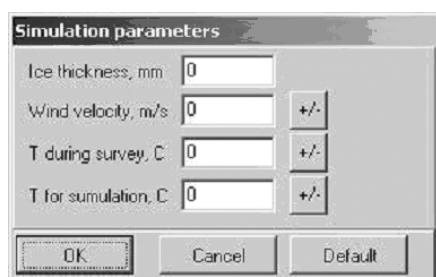


Рис. 118. Диалоговое окно заполнения климатических параметров.

Провода и тросы, для которых полностью определены параметры и заданы климатические условия, будут изображаться дважды – в первоначальном виде и в виде пунктирной линии, соответствующей положению провода по результатам моделирования.

Оценка качества пилотирования

Навигационные марки строятся на основе файла, содержащего сглаженную траекторию, полученную в результате совместной обработки данных бортового приемника, базовых станций и инерциальной системы. Траектория определяется для блока IMU (инерциальной системы) и

включает информацию о времени, положении, углах поворота, скорости и ускорения носителя.

При задании диапазона допустимых изменений пилотажно-навигационных параметров используется диалоговое окно, изображенное на рисунке 119.



Рис. 119. Диалоговое окно пилотажно-навигационных параметров.

Данное окно предназначено для указания критериев оценки качества пилотирования и выявления участков траектории с определенными, заранее заданными значениями пилотажных параметров. В качестве этих параметров могут служить высота над поверхностью истинной Земли H , м, скорость движения относительно Земли V , м/с, значение угла крена $Roll$, град. и значение угла сноса $Wander$, град.

Навигационные марки, параметры которых нарушают хотя бы одно из заданных условий поиска, будут индизироваться красным цветом. Зеленым цветом будут показаны те марки, параметры которых не нарушают ни одно из заданных условий поиска (рис. 120).

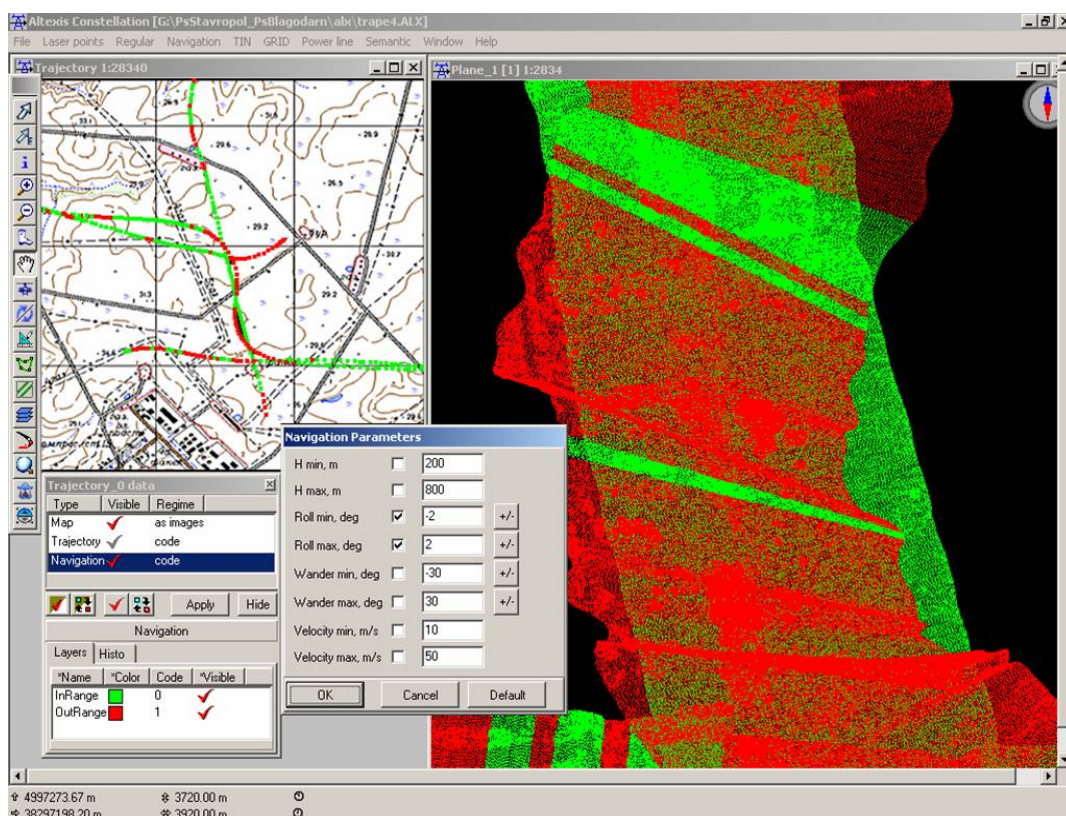


Рис. 120. Отображение навигационных марок и блоков лазерных точек по качеству пилотирования.

Диалоговое окно сохраняет значения параметров последней осуществленной операции поиска. По результатам выполнения процедуры оценки качества пилотирования формируется отчет. В отчет выводятся результаты последней операции оценки качества пилотирования. В начале приводится шапка с указа-

нием названия отчета и имени проекта. Далее для каждого использованного в процессе поиска пилотажного параметра выводятся граничные значения, а также таблица записей, в которой содержится информация временных интервалов, внутри которых имеет место выход данного параметра за заданные границы (табл. 37).

Таблица 37. Отчет последней операции оценки качества пилотирования

Пример отчета:									
Navigation Quality Report									
Source file: D:NavigateTestnavical.ALX									
Condition: H > 200.000									
Time H North East Roll Wander									
*****No Items*****									
Condition: -1.500 < Roll < 1.500									
Time H North East Roll Wander Velocity									
379171.312	637.153	4987028.861	38376730.111	-0.006	-0.420	38.347			
379173.692	635.737	4986966.608	38376796.808	-0.008	-0.420	38.364			
Maximal deviation: -1.618									
379174.447	635.467	4986947.079	38376818.203	-0.002	-0.420	38.399			
379174.447	635.467	4986947.079	38376818.203	-0.002	-0.420	38.399			
Maximal deviation: -1.502									
379189.547	637.411	4986568.571	38377244.321	-0.012	-0.420	36.624			
379192.267	636.179	4986503.518	38377319.434	-0.001	-0.420	36.546			
Maximal deviation: 1.725									

На рисунке 121 показан пример создания в ALTEXIS карты распределения лесной растительности по высотам на основе лазерно-локационных данных.

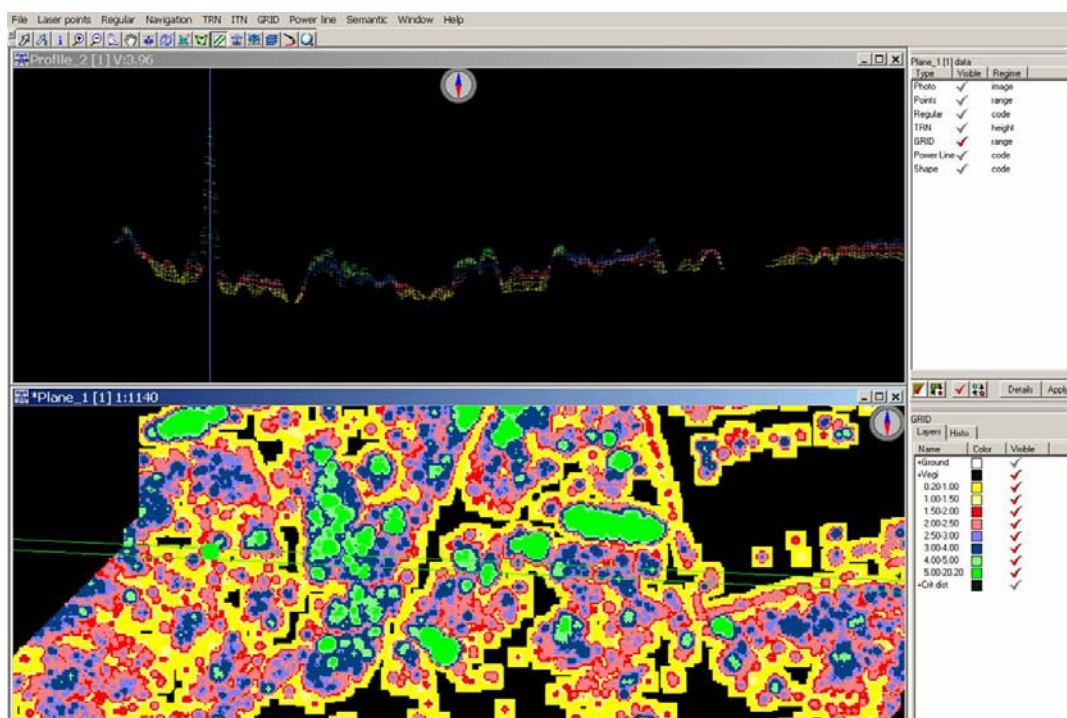


Рис. 121. Лазерно-локационная карта распределения лесной растительности по высотам.

8. ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД В ТОПОГРАФИИ И СИСТЕМЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Концепция лазерно-локационного метода в топографии уже обсуждалась во вводной главе (1.5). Настало время обсудить этот и связанные с ним вопросы более детально с учетом информации, полученной читателем в предыдущих главах. Уже много раз по ходу изложения было отмечено, что применение лазерно-локационной технологии позволяет предложить принципиально новые методики топографо-геодезической и инженерно-изыскательской деятельности, и вообще всех прикладных дисциплин, связанных со сбором и обработкой геопространственных данных. В том числе, впервые появляется возможность радикально интенсифицировать все составляющие технологического цикла производства топографических карт и планов крупных масштабов. Это позволило некоторым авторам говорить о появлении на базе лазерно-локационного метода *систем картографирования реального времени*. Этот термин, конечно, нуждается в уточнении, так как категорию *реального времени* не следует понимать буквально – топографический план не появляется непосредственно в ходе проведения лазерно-локационной съемки. Однако этот термин выражает главную отличительную черту используемой технологии и программно-аппаратных систем, которые эту технологию реализуют – переход на методы картографирования, при которых продолжительность этапов камеральной обработки аэросъемочных данных сравнима с продолжительностью сбора данных, т.е. выполнения собственно аэросъемочных работ. Перед тем как продолжить обсуждение, необходимо отметить, что современный лазерно-локационный метод в топографии предполагает использование не только собственно лазерных локаторов, но и других средств сбора геопространственных данных, прежде всего цифровых аэрофотоаппаратов, а также массу других аппаратных и программных средств. Однако мы находим, что название «лазерно-локационный» правильно отражает существо метода, так как именно наличие этого специфического вида данных в наибольшей степени отличает его от других топографо-геодезических методов (Медведев, 2005).

8.1. Технологическая основа лазерно-локационного метода

Говоря о технологической основе, мы имеем в виду, прежде всего, совокупность базовых технологий сбора и обработки геопространственных данных, лежащих в основе метода. Такими технологиями являются:

- 1) собственно лазерно-локационная съемка;
- 2) цифровая аэрофототопография;
- 3) технология прямого геопозиционирования аэросъемочных данных.

Каждая из перечисленных базовых технологий представляет собой совокупность типовых аппаратных и программных средств и методик их использования. Можно также сказать, что каждая из таких технологий предполагает наличие одного основного средства сбора данных (прибора), который в наибольшей степени определяет как содержание, так и логику работы всей технологии. Так в лазерной локации, как следует из самого названия технологии, таким прибором является лазерный локатор или лидар. В цифровой аэрофототопографии это аэрофотоаппарат, а в технологии прямого геопозиционирования – гибридные GPS/INS системы.

Обратимся к рисунку 122, представляющему роль каждой технологической составляющей лазерно-локационного метода.

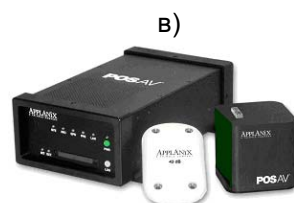


Рис. 122. Технологическая составляющая лазерно-локационного метода: а) лидар – предоставляет лазерно-локационные данные. Назначение: ЦМР, ЦММ, выделение контуров, дешифрирование; б) цифровой аэрофотоаппарат – предоставляет цифровые аэрофотоснимки. Назначение: традиционное; в) система GPS/IMU – предоставляет элементы внешнего ориентирования аэрофотоснимков и ЛЛ данных. Назначение: прямое геопозиционирование (геопривязка).

Перед тем как продолжить обсуждение лазерно-локационного метода в топографии, необходимо сделать два важных замечания:

1. Как уже было отмечено выше, название метода вовсе не означает доминирование лазерного локатора, т.е. лидара как источника геопространственных данных. Правильней будет говорить, что именно наличие лидара отличает этот метод от других.

2. Лазерно-локационный метод является не альтернативой, а дальнейшим развитием традиционных аэрофототопографических методов.

Содержание технологий лазерной локации и GPS/INS систем подробно рассмотрены в предшествующих главах. Поэтому для того, чтобы правильно воспринять технологическое содержание лазерно-локационного метода и систем картографирования реального времени, необходимо более подробно познакомиться с инструментами и методами современной цифровой аэрофототопографии.

8.2. Состояние и перспективы развития современной цифровой аэрофототопографии

Общие соображения

Начнем с определений. «Аэрофототопография – раздел топографии, изучающий методы создания топографических карт по материалам авиационных съемок» (БСЭ, 1978). Предлагаемое определение может быть и не столь изящно, но оно, тем не менее, верно описывает суть аэрофототопографии, как прикладной дисциплины. Предельно упрощая проблему, можно также сказать аэрофототопография – это наука о том, как по аэрофотоснимкам сделать карту.

Исходя из приведенных определений, можно уже сейчас обратить внимание на ряд интересных обстоятельств, существенных для всего дальнейшего изложения.

Обстоятельство №1: аэрофототопография – это всего лишь раздел общей топографии, то есть всегда имеется возможность создавать топографические карты и планы не только аэросъемочными, но и всеми другими доступными и законными методами. Однако многие находят аэрогеодезические методы изящными, производительными и экономически эффективными. Возможно поэтому, эти самые методы

как в чисто топографических, так и в «околотопографических» приложениях, безраздельно доминировали в течение всего 20 века. И в 21 веке их доминирование пока сохраняется.

Обстоятельство №2: аэрофотоаппарат (т.е. в простейшем случае любой фотоаппарат, устанавливаемый на летательный аппарат с целью съемки Земли) является во многом определяющим компонентом всего аэрофототопогра-

фического процесса. Речь идет не только о чисто этимологической близости терминов: аэрофотоаппарат – аэрофотография. В геодезии масса подобных примеров – теодолитная или тахометрическая, а также мензульная, лазерно-локационная и, конечно, GPS-съемки. Здесь, как и в случае с аэрофототопографией, существенно наличие *главного* средства измерения или сбора данных, которое не только дает имя методу, но и, исходя из своей собственной логики, во многом определяет логику всего этого метода. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно. И поэтому, коль скоро нашей целью является познание современной аэрофототопографии, наибольшее внимание нам придется уделить именно аэрофотоаппарату, его функциональности, логике практического использования, фотографическому и фотограмметрическому качеству и, конечно же, стоимости.

Обстоятельство №3, возникшее по результатам анализа предложенных канонических определений аэрофототопографии, перед началом рассмотрения дела по существу. Аэрофототопография – это такой вид человеческой деятельности, в которой правильным считается начать с установки фотоаппарата на борт летательного аппарата, а закончить производством полноценной топографической карты.

Признание этого факта позволяет изобразить «технологический каркас» аэрофототопографии следующим образом: оптическое приборостроение ⇒ аэрофотосъемка и фотограмметрия ⇒ геодезия ⇒ картография.

Как следует из приведенной выше схемы, исследование современного состояния и перспектив развития современной аэрофототопографии не сводится к оценке исключительно аэрофотоаппаратов – обособленно от тех задач, для решения которых их создают и потом покупают.

Классический подход и его носители

Классический подход к аэрофототопографии представлен фундаментальным трудом А.Н. Лобанова (1983). Приведем несколько классических положений, весьма существенных для правильного усвоения современного взгляда на аэрофототопографию:

- считающийся базовым в классической аэрофототопографии, т.н. стереотопографический метод, предполагает использование аэросъемочных данных (то есть аэрофотоснимков) для создания как рельефной, так и контурной части карты;

- масштаб создаваемой топографической карты (плана) и морфология объекта съемки – два главных обстоятельства, оказывающих наиболее существенное влияние как на выбор аэрофотоаппарата (в частности, величины фокусного расстояния), так и режима съемки (высота, скорость, величина перекрытий);

- достижение нормативной точности выходного топографического материала в значительной степени зависит от качества наземных геодезических работ по планово-высотному обоснованию (определению координат опознаков) и развития фототриангуляционной сети. А последнее, в свою очередь, находится в очень сильной зависимости от качества пилотирования и выполнения аэросъемки в целом.

О текущем моменте

Что же нового произошло в аэрофототопографии за последние 20 лет, и не нашло своего отражения в трудах классиков? Перечислим основные тенденции:

1) обязательным стало использование систем спутниковой навигации GPS/GLONASS как для определения пространственных координат точки фотографирования каждого аэрофотоснимка, так и для контроля пилотажно-навигационных параметров и управления аэрофотосъемочным процессом в целом;

2) активно стали применяться так называемые интегральные навигационные комплексы типа GPS/IMU, которые позволяют с достаточной точностью определять значения всех шести параметров внешнего ориентирования каждого аэрофотоснимка, как линейных, так и угловых. В некоторых случаях это позволяет полностью отказаться от работ по абсолютному пространственному ориентированию аэрофотоснимков, которое, как известно, выполняется с целью их последующего ортотрансформирования и геопозиционирования. В большинстве случаев наличие GPS/IMU данных позволяет существенно упростить и ускорить процедуру создания фототриангуляционной сети;

3) чрезвычайно существенным обстоятельством является возможность выполнять одновременно аэрофотографическую и лазерно-локационную съемку;

4) Ну, и наконец, нельзя не отметить то, что практически все основные компоненты современной аэрофототопографии уже де-факто являются цифровыми. «Цифровизация» началась с картографии и фотограмметрии и, на сегодняшний день, можно сказать, победила окончательно. Цифровые методы доминируют и в геодезии, как в полевой, так и в камеральной фазе. В настоящее время разворачивается активный процесс перехода с аналоговых на цифровые аэрофотоаппараты.

8.3. Аналоговые и цифровые аэрофотоаппараты

Сравнение аналоговых и цифровых аэрофотоаппаратов предварим двумя замечаниями, соответствующими точке зрения авторов на эту проблему:

- практически по всем параметрам цифровые камеры превосходят аналоговые;

- даже неискушенный в аэрофотографии читатель из своего повседневного жизненного опыта хорошо представляет, чем бытовые цифровые камеры отличаются от аналоговых. И это обстоятельство значительно облегчает задачу авторов.

Таким образом, агитацию в пользу внедрения цифровых методов аэрофотосъемки можно вести на двух уровнях:

1. «Обывательском» – почти дословно повторяя аргументы, приводимые ведущими производителями цифровой фототехники. Все эти аргументы в полной мере справедливы и в нашем случае.
2. «Профессиональном». Этот уровень агитации требует большего учета специфики метода использования фотоаппаратов для решения топографо-геодезических задач.

Традиционно главным доводом в пользу использования цифровых топографических аэрофотокамер является их *технологичность*. Считается, что:

- цифровые камеры более надежны в работе по сравнению с аналоговыми;

- данные, поставляемые цифровыми камерами, т.е. цифровые аэрофотоснимки достовернее аналоговых в информационном отношении (рис. 123);

- использование цифровых камер значительно сокращает длительность технологического цикла аэрофототопографического производства, т.к. при производстве цифровых аэрофотоснимков исключаются «мокрые» процессы, свя-

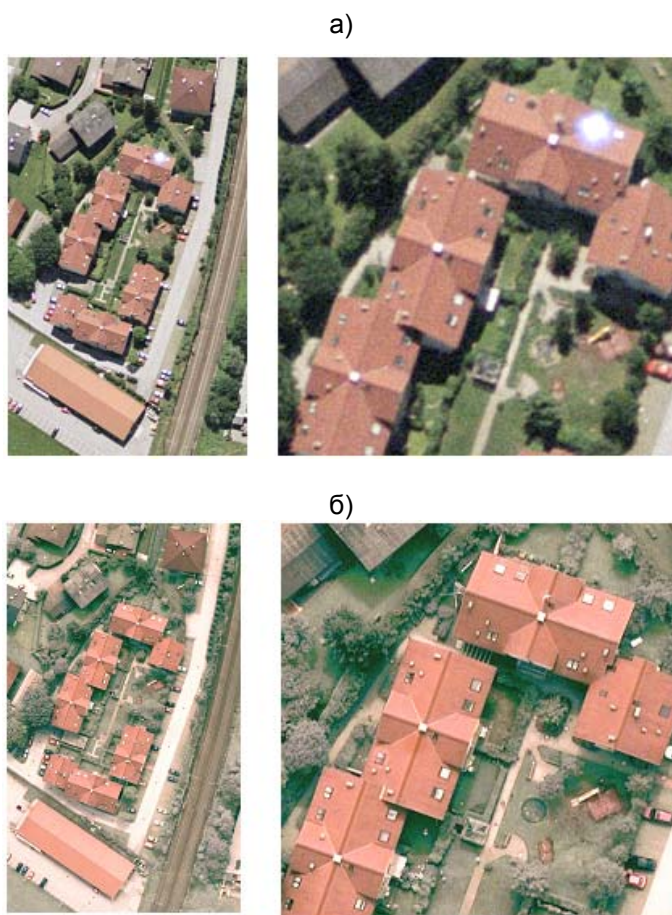


Рис. 123. Сравнение фотографического качества фрагментов: (а) аналогового – Leica RC-30; (б) цифрового – Vexcel UltraCAM D аэрофотоснимков одинакового масштаба.

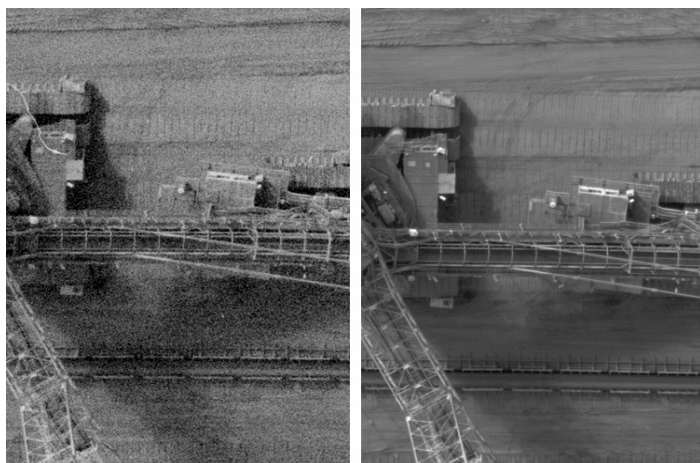


Рис. 124. Сравнение фотографического качества аэро- снимков по зернистости: аналогового – Leica RC-30 (ле- вый снимок); цифрового – Vexcel UltraCAM D (правый).

— обеспечивается возможность получения как панхроматических, так цветных и спектральных снимков в видимом и ближнем инфракрас-

занные с проявкой, закрепле- нием, сенситометрическим кон- тролем и др. Также исключает- ся процедура дигитализации негативов;

— использование цифро- вых топографических аэрофо- токамер более экономично, несмотря на их высокую стои- мость;

— цифровые аэрофотос- нимки по сравнению с анало- говыми полностью свободны от «зернистости» (рис. 124);

— современные цифровые топографические аэрофотока- меры обеспечивают получе- ние цветных аэрофотоснимков с широким динамическим диа- пазоном, который, как прави- ло, составляет 12-14 бит. Это позволяет успешно выполнять дешифрирование в пределах одного снимка объектов, на- ходящихся в принципиально различных условиях освещен- ности (рис. 125);



Рис. 125. Широкий фотомет- рический динамический диа- пазон аэрофотоснимков, по- лученных современными ци- фровыми аэрофотокамера- ми.



Рис. 126. Возможность получения панхроматических, цветных и спектрональных аэрофотоснимков.

ом диапазонах спектра (рис. 126).

– у большинства цифровых аэрофотокамер интервал фотографирования составляет менее 1 сек. Это позволяет при необходимости выполнять крупномасштабную аэрофотосъемку объектов многоэтажной застройки с продольным перекрытием 80-90% (рис. 127).



Рис. 127. Крупномасштабная аэрофотосъемка объектов многоэтажной застройки с продольным перекрытием 80-90%.

8.4. Методы классификации и основные технические характеристики современных цифровых аэрофотоаппаратов

Говоря о современных цифровых топографических аэрофотоаппаратах можно предложить базовый набор критериев оценки их производительности и качества (табл. 38). Приведенный список является далеко неполным, а сами критерии достаточно условными и требующими дополнительных комментариев. Однако они, в целом, верно отражают «пользовательский» подход к оценке качества предлагаемых средств цифровой аэрофотосъемки и целесообразности их использования взамен традиционных аналоговых средств.

Опять же, опираясь на «пользовательский» подход можно предложить следующие критерии сравнения цифровых топографических аэрофотоаппаратов друг с другом:

1. Стоимость покупки и эксплуатационные расходы.
2. Способ формирования кадра.
3. Общие и частные фотографические и фотограмметрические свойства.
4. Весогабаритные характеристики.

Пользуясь этими критериями, ниже будут обсуждаться цифровые аэрофотоаппараты, коммерчески доступные сегодня.

Нельзя не отметить, что в основном все имеющиеся сегодня (особенно широкоформатные)

цифровые аэрофотоаппараты характеризуются некоторым набором общих свойств, а именно:

Таблица 38. Набор пользовательских критериев оценки производительности и качества современных цифровых аэрофотоаппаратов

Фотографическое качество	динамический диапазон, интенсивность шумов, качество цветопередачи
Фотограмметрическое качество	стабильность параметров внутреннего ориентирования, достижимая точность выполнения фототриангуляции
Производительность	по количеству информации – в мегабайтах/сек; по площади картографируемой территории – в км ² /час
Технологичность	возможность адаптации традиционных технологических процессов, наличие квалифицированного персонала

1. Использование CCD (ПЗС в русской транскрипции) приемников излучения, матричного или линейного типа.

2. Синтезированный кадр (для широкоформатных аэрофотоаппаратов). Т.е. результирующий кадр системы формируется из набора субкадров, соответствующих отдельным CCD матрицам (линейкам) приемников.

3. GPS/INS поддержка. Т.е. пространственные линейные и угловые координаты системы координат аэрофотоаппарата (элементы внешнего ориентирования) определяются с использованием средств инерциальной навигации и систем спутникового геопозиционирования GPS и (или) ГЛОНАСС.

4. Широкий динамический диапазон 12–14 бит.

5. Наличие компенсации сдвига изображения в течение времени экспозиции («смаз»). Для обозначения этого свойства в англоязычной литературе укрепился термин FMC – Forward Motion Compensation.

6. Использование гиросtabilизации для поддержания планового положения аппарата в процессе съемки.

Вместе с тем современные цифровые аэрофотоаппараты различаются по целому ряду параметров. Укажем главные:

1. Геометрия приемника – матрица CCD или линейка CCD.

2. Метод синтеза кадра.

3. Способ компенсации «смаза» – механический или электронный.

Первые два указанных различия носят концептуальный характер и в значительной степени определяют «идеологию» как самих аэрофотоаппаратов, так и методик их использования.

В таблице 39 представлен один из возможных подходов к классификации цифровых аэрофотоаппаратов, когда в качестве основного критерия используется размер выходного кадра (аэрофотоснимка):

Таблица 39. Классификация цифровых аэрофотоаппаратов по размеру результирующего кадра

Класс аэрофотоаппаратов	Размер результирующего кадра в мегапикселях
Малоформатные	до 16
Среднеформатные	16–64
Широкоформатные	более 64

Отметим, что такой метод классификации является весьма условным и не отражающим существа дела. Мы приводим его исключительно из-за того, что он, несмотря на свою ограниченность, является весьма распространенным. Кроме этого, данный метод классификации пригоден только по отношению к кадровым системам. Однако по традиции линейные фотографические сканеры (Leica ADS-40, Jena-Optronik JAS-150) принято относить к широкоформатным аэрофотоаппаратам.

Малоформатные камеры активно использовались для аэросъемочных целей до конца 90-х годов прошлого столетия. Сейчас их роль весьма ограничена. Некоторые примеры аппаратов этого класса приведены на рисунке 128.



Рис. 128. Малоформатные цифровые камеры.

Среднеформатные цифровые метрические камеры сегодня являются основным инструментом получения цифровых геопространственных данных с авиационных носителей. Точная статистика отсутствует, но можно с уверенностью сказать, что сегодня в мире используются сотни таких камер. Главным доводом в

пользу камер этого типа является их «умеренная» ценовая ниша, компактность, малое энергопотребление и, как следствие, возможность быстрой адаптации к существующим носителям. Такие камеры управляются с использованием обычных персональных компьютеров, которые часто используются и как средства накопления аэрофотоснимков (рис. 129).



Рис. 129. Среднеформатные цифровые топографические камеры.

Отметим главные технологические ограничения среднеформатных цифровых фотоаппаратов, в смысле их аэрофотосъемочного использования:

1. Используется только один матричный CCD приемник, что ограничивает размер результирующего кадра. С января 2006 г. фотоаппараты компании Rollei будут поставляться с приемниками, обеспечивающими получение кадра размером 39 мегапикселей и минимальным интервалом фотографирования около 2 с. На сегодняшний день это самый лучший показатель.

2. Режим компенсации сдвига изображения в среднеформатных камерах не используется, что накладывает определенные ограничения при выборе условий проведения аэрофотосъемочных работ (высоты, скорости, длительности экспозиции).

На рисунке 130 представлены модели цифровых широкоформатных аэрофотоаппаратов, а в таблице 40 показаны их основные характеристики.



Z/I Imaging (DMC)



Leica (DSW700)



VEXCEL (UltraCamX)



DIMAC SYSTEMS (DiMAC)



Jena-Optronik (JAS150)

Рис. 130. Крупноформатные цифровые топографические камеры.

Таблица 40. Основные параметры крупноформатных камер

ПАРАМЕТР	DMC, INTERGRAPH	DSW 700, LEICA	DIMAC SYSTEMS
Тип	кадровый	Линейный и кадровый	кадровый (модульный)
Размер кадра, пикселей	7680×13824	4000×2700	от 4080×5440 до 8080×10800 в зави- симости от количе- ства модулей
Фокусное рас- стояние, мм	120/25	80/120	на заказ
Минимальный интервал съем- ки, секунд	от 2.1	от 1.2 мкс на линию сканирования	2
Компенсация «смаза»	есть	есть	есть, пьезомеханическая
Сенсор	CCD матрицы	CCD линейки	CCD матрица в каждом модуле



Рис. 131. Цифровая аэрофототопографическая камера UltraCAM X компании Vexcel Imaging.

На рисунке 131 показан внешний вид сенсорного блока, а в таблице 41 основные технические характеристики аэрофотоаппарата UltraCAM X австрийской компании Vexcel Imaging, являющейся на сегодняшний день самой производительной крупноформатной камерой в своем классе.

Интегральный формат цифрового кадра UltraCAM X составляет 14430×9420 , т.е. – 136 мегапикселей. При этом с интервалом фотографирования 1.35 сек. обеспечивается выдача полноформатных цветных или даже спектрозональных аэрофотоснимков. Признавая, что произво-

дительность не единственный технический параметр аэрофотоаппарата, все же заметим, что он один из самых важных, в том числе и с экономической точки зрения. В этой связи нельзя не отметить, что на сегодняшний день UltraCAM X австрийской компании Vexcel Imaging – самая производительная цифровая аэрофотокамера в мире, существенно превосходящая своих главных конкурентов – DMC компании Intergraph и ADS-40 компании Leica Geosystem, а также и все другие камеры.

С появлением камер такого класса вполне уместно ставить вопрос о сравнении разрешающей способности и суммарной информационной емкости цифровых и аналоговых широкоформатных аэрофотоаппаратов.

Для этой цели проведем следующие вычисления. Возьмем стандартный аналоговый аэрофотоснимок в форме негатива размером 180×180 мм. Подвергнем его оцифровке в фотограмметрическом сканере с принятым в России шагом 20 микрон. Могут использоваться различные модели фотограмметрических сканеров. Количество информации на один оцифрованный аэрофотоснимок составит:

$$M_a = \left(\frac{180}{20 \cdot 10^{-3}} \right)^2 = 81 \cdot 10^6,$$

т.е. – 81 мегапиксель. Сравнивая полученное значение с форматом кадра UltraCAM X, который, как указано выше, составляет 136 мегапикселей, убеждаемся, что UltraCAM X в практическом смысле обеспечивает большее количество информации на один кадр. Конечно, лучшие аналоговые аэрофотоаппараты обладают разрешением, позволяющим проводить оцифровку с шагом 10 и даже 5 мкм. Поэтому цифровым аэрофотоаппаратам пока «далеко» до теоретического предела информативности. Тем не менее, такие рассуждения показывают, что по такому важному параметру как информативность, цифровые топографические камеры сравнимы с лучшими аналоговыми, а по всем другим пользовательским параметрам их превосходят.

Обратимся к таблице 42, представляющую динамику продаж широкоформатных цифровых аэрофотоаппаратов с момента их появления.

Таблица 41. Основные технические характеристики цифровой топографической аэрофотокамеры UltraCAM X

ОПИСАНИЕ ВЫХОДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Формат изображения	Аналог пленочного формата of 23×15 см
Выходные форматы изображений	JPEG; TIFF 8, 12 или 16 bit, scan-line, stripped or tiled
Форматы изображений после уровня 2	Панхроматические снимки полного разрешения, отдельные снимки по цветовым каналам
Форматы изображений после уровня 3	Спектрозональные, цветные и/или панхроматические снимки полного разрешения
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРНОГО БЛОКА КАМЕРЫ	
Размер панхроматического изображения	14430×9420 пикселей
Размер элемента изображения	7.2 мкм
Физический размер матрицы	104×68 мм
Фокусное расстояние для панхроматического канала	100 мм
Максимальная диафрагма панхроматического канала	f = 1/5.6
Угол обзора поперек полета (вдоль полета)	55°(37°)
Количество цветовых каналов (спектрозональная съемка)	4 канала – RGB&NIR
Размер спектрозонального изображения	4992×3328 пикселей
Диапазон выдержек	от 1/500 до 1/32
Компенсация продольного смаза изображения (FMC)	есть, TDI controlled
Максимальная величина компенсации смаза	50 пикселей
Размер пиксела на земле при высоте полета 500 м (300 м)	3.6 см (2.2 см)
Минимальный интервал съемки	1.35 секунд
Разрядность АЦП	14 бит
Динамический диапазон чувствительности	>12 бит
Габаритный размер сенсорного блока камеры, см	45×45×60
Вес	< 45 кг
Максимальное электропотребление	150 Вт
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВОГО БЛОКА НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СНИМКОВ (SCU)	
Емкость накопителей	> 17 Терабайт с возможностью замены в полете
Максимальная емкость в изображениях одного накопителя	> 3900 снимков
Конфигурация блока	Многопроцессорная параллельная архитектура
Избыточность хранения информации	Дублирование изображений на двух дисках
Возможность переноса и обработки данных на земле	Транспортабелен, приспособлен для обработки данных в офисе
Габаритный размер блока, см	40×55×65
Вес	~ 65 кг
Максимальное электропотребление	700 Вт
ПРОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Максимальное время съемки (70% перекрытие, разрешение 20 см – масштаб съемки 1:10000)	> 8.5 часов при использовании одного накопителя
Перенос данных с борта в офис	С помощью специального накопителя или перенос бортового блока
Установка камеры на борту	С помощью переходных колец на многие известные установки (исключая Z/I T-AS)
Поддержка планирования полета	Совместим с большинством коммерческих систем (CCNS-4, Trackair, Vega и др.)
Поддержка систем IMU	Совместима с IGI's Aero-Control и Applanix' POS/AV
Совместимость с фотограмметрическими продуктами	Совместим со всеми фотограмметрическими системами
Внутренняя точность изображения	< 2 мкм

Таблица 42. Динамика продаж «тяжелых» аэрофотосъемочных камер Leica ADS-40, Intergraph DMC, Vexcel UltraCAM D(X) по данным на май 2006 г.
(По материалам конгресса ASPRS в Рино, США, 2006)

Год продажи	Leica	Intergraph	Vexcel	HRSC/TLS	Всего продано за год	Накопление по годам
2000	Объявлено	Объявлено	–	–	0	0
2001	1	–	–	–	1	1
2002	5	–	–	–	5	6
2003	7	3	Объявлено	–	10	16
2004	10	11	13	–	34	50
2005	9	16	22	2	49	99
2006	8	7	12	–	27	126
Итого	40	37	47	2	126	

В таблице 42 представлены данные, в том числе и по двум главным конкурирующим продуктам DMC компании Intergraph и ADS-40 компании Leica Geosystems. В настоящее время компания Vexcel поставила уже более 50 цифровых аэрофотокамер. Начиная с 2006 года, две такие камеры используются в странах бывшего СССР. С 2002 г. в России используются два линейных фотографических сканера ADS-40.

Очевидно, однако, что Vexcel, благодаря четко выверенной маркетинговой стратегии занял лидирующую позицию в деле производства и поставки цифровой аэрофотосъемочной техники. Сегодня есть все основания считать, что давно предсказуемый перелом в пользу цифровых аэрофотосъемочных средств произошел и, в значительной степени, благодаря активной деятельности в этой сфере российских компаний Геокосмос и ГеоЛИДАР (рис. 132).

Перед тем как продолжить обсуждение, представим еще один возможный способ классификации цифровых (в том числе широкоформатных) аэрофотоаппаратов, исходя из принципов формирования результирующего изображения. Как было сказано выше, такой подход представляется существенно более конструктивным. Ключевую роль при таком методе классификации играет архитектура приемника. Итак, по способу формирования изображения, цифровые топографические фотоаппараты бывают:

- 1) с одиночным матричным приемником (*matrix*);
- 2) с композитным приемником, состоящим из нескольких физических матричных приемников;
- 3) с приемником в виде одного или нескольких CCD приемников линейного типа. Приемники такого типа называют также линейками или гребенками.



Рис. 132. Генеральный директор компании Геолидар Е.М. Медведев (в центре) с президентом и основателем компании Vexcel Imaging профессором Францем Леберлом и его супругой Гертрудой.

Главное, что в отличие от матрицы, такие приемники имеют одномерную структуру. Важное замечание – первые два типа приборов, как уже отмечалось выше, могут быть названы кадровыми, так как формируют традиционный аэрофотоснимок квадратной или прямоугольной формы. Приборы третьего типа кадровыми не являются. Они формируют непрерывные последовательности данных, которым больше подходит название «полоса». Множество примеров аэро съемочных данных такого рода можно найти на сайте компании Leica Geosystem: www.leica-geosystems.com.

В таблице 43 представлено распределение наиболее известных цифровых топографических аэрофотоаппаратов в соответствии с предложенной классификацией.

Таблица 43. Классификация наиболее известных цифровых аэрофотоаппаратов по способу формирования изображения

Способ формирования изображения	Аэрофотоаппараты (производитель)
Одиночный матричный приемник	AIC modular LS (Rollei) DSS (Applanix) DigiCAM (IGI)
Композитный матричный приемник	UltraCAM-D, UltraCAM-X (Vexcel Imaging) DiMAC (DiMAC systems) DMS (Intergraph)
Линейка	ADS-40 и DSW700 (Leica Geosystem) JAS-150 (Optronik)

8.5. Кадровые и линейные цифровые фотографические системы

Термин «линейный сканер» применительно к аэрофотографическим системам не является общепризнанным. Многие утверждают, что это термин неверно отражает суть приборов этого типа. Тем не менее, мы будем пользоваться именно этим привычным для нас термином.

Производители, как правило, ориентируются только на один из двух указанных типов. Современные технологии разработки и создания цифровых метрических аэрофотоаппаратов слишком сложны и ресурсозатратны, чтобы позволить себе «роскошь» поддержки сразу двух концепций. Различия концепций касаются не только принципов построения оптических и электронных компонентов приборов, но и всей идеологии их использования, включая полевые, аэрофотосъемочные, фотограмметрические и камеральные работы.

Концептуальные различия на техническом уровне вылились в существенные расхождения рыночных концепций, стратегий продвижения и поддержки своих продуктов, реализуемых компаниями-производителями. Существует мнение даже о возникновении рыночных войн, например, между Leica и Intergraph.

Для того чтобы придти к объективному заключению представим наиболее распространенные доводы в пользу линейных фотографических сканеров:

1. Технология фотографических линейных сканеров первоначально была разработана для установки на космических аппаратах и, лишь потом была «адаптирована» для аэросъемочных целей. Именно по этому принципу сегодня работает большинство спутников дистанционного зондирования Земли.

2. Эта технология обеспечивает исключительно высокое качество цвето-передачи за счет отсутствия различий в разрешающей способности «цветных» и панхроматических сенсоров.

3. Линейные приемники «сильней» матричных по соотношению сигнал/шум. Данные съемки, полученные с помощью сканеров, имеют более широкий фотометрический динамический диапазон.

4. Приборы, работающие по принципу линейного сканирования, обеспечивают формирование непрерывных «полос» данных, получаемых практически при постоянном угле визирования. В отличие от систем кадрового типа, в линейных сканерах не наблюдается «скачка ракурса» от снимка к снимку. Вместе с тем, за счет использования нескольких линейек сенсоров, ориентированных под различными продольными углами к надиру имеется возможность как стереоскопического наблюдения данных, так и возможность проведения практически всех видов стереофотограмметрической обработки, в том числе, развитие фототриангуляционных сетей.

Приведенные аргументы следует признать справедливыми. Однако перед тем как продолжить обсуждение и перейти к объективному анализу преимуществ и недостатков кадровых и линейных систем, рассмотрим более подробно чисто фотограмметрические аспекты формирования изображений для обоих типов аэрофотоаппаратов. В системах кадрового типа принцип формирования изображения может рассматриваться как традиционный, основанный на законах центральной проекции (Лобанов, 1983). Представим необходимые пояснения по фотограмметрическим принципам формирования изображений в системах линейного типа.

Ошибочно считается, что линейные фотографические сканеры, в частности ADS-40 компании Leica, значительно уступают кадровым аэрофотоаппаратам, причем как цифровым, так и аналоговым в результирующей фотограмметрической точности, так как в случае линейных сканеров для геопривязки данных используются GPS/INS системы (например, для ADS-40 это POS/AV компании Aprplanix), которые заведомо обеспечивают меньшую точность, чем классические фототриангуляционные процедуры формирования и уравнивания блоков (маршрутов) аэрофотоснимков. Подобные утверждения основаны на предположении, что упомянутые фотограмметрические процедуры просто неприменимы к данным линейных сканеров, так как в сознании многих центральное понятие фотограмметрии, связка лучей, прочно ассоциируется с кадром. Раз нет кадра, значит нет и связки, а значит нет и всего остального.

Однако, это совершенно не так. Подобные утверждения – не более чем недоразумение. Использование технологии прямого геопозиционирования, т.е. GPS/INS систем в качестве окончательного средства геопозиционирования съемочных данных, есть атрибут средств лазерной локации. В случае же с линейными фотографическими сканерами GPS/INS средства наличествуют и действительно используются для геопозиционирования аэросъемочных данных. Однако в этом случае такое геопозиционирование является во многом предварительным, а вовсе не окончательным, как в случае с лазерной локацией. Кстати сказать, GPS/INS системы используются и во всех современных цифровых, и аналоговых аэрофотоаппаратах кадрового типа. В том числе и в двух главных конкурирующих с ADS-40 продуктах – DMC компании Intergraph и UltraCam-X компании Vexcel Imaging. Везде параметры внешнего ориентирования, определяемые с помощью GPS/INS систем, используются только в качестве начального приближения. Окончательные (точные) значения этих параметров опреде-

ляются, как и при традиционном подходе, с использованием фотограмметрических процедур, хотя, конечно, значительно быстрее и достовернее – с использованием априорной информации, чем без нее. Отметим, что поддержку режима учета априорных данных по элементам внешнего ориентирования, предоставляемых GPS/INS системами, сегодня представляют практически все фотограмметрические пакеты, например, BAE или Photomod. Роль GPS/INS данных в технологии линейных фотографических сканеров, конечно же, значительней, чем применительно к традиционным кадровым системам. Ведь именно эти данные позволяют «собрать» воедино отдельные строки изображения, приведя их к виду, пригодному для визуального анализа. Однако было бы совершенно неверно утверждать, что такая форма определения пространственных координат является окончательной. Она обязательно уточняется на последующих этапах обработки. А что касается жестких связей проецирующих лучей, то они существуют как в кадровом, так и в линейном случаях, хотя в последнем не столь явно и все же с некоторым вспоможением со стороны GPS/INS систем. Ниже приведены некоторые рассуждения, помогающего осмыслить этот нетривиальный факт. Обратимся к простейшей схеме линейного фотографического сканера, предполагающего возможность выполнения полноценной фотограмметрической обработки.

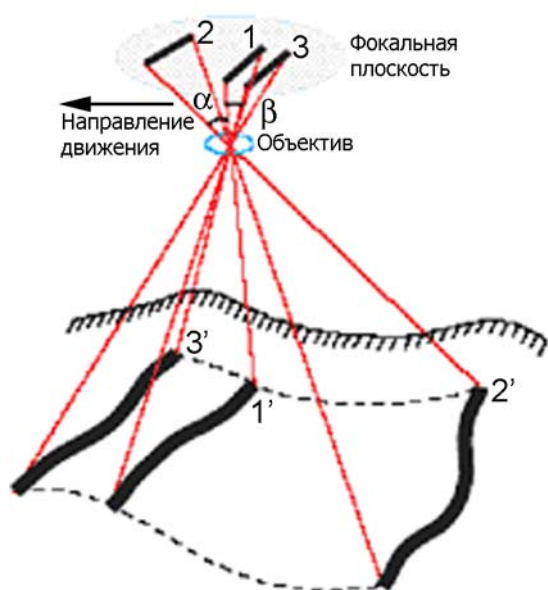


Рис. 133. Схема работы линейного сканера.

На рисунке 133 показан сканер с тремя линейками сенсоров, расположенных, естественно, в фокальной плоскости объектива и обозначенных на рисунке 133 как 1, 2, 3. Соответственно, следы (проекции) сенсоров на поверхности сцены обозначены на рисунке как 1', 2', 3'. Каждый такой след соответствует одной линии сканирования, получаемой одновременно. Частота сканирования (съемка информации с линейки) достаточно высока и, например, в ADS-40 может составлять 800 Гц. Последовательная временная совокупность линеек формирует непрерывное изображение сцены (полосу), отдельно для каждого линейного сенсора. Для примера, изображенного на рисунке 133 мы будем иметь три полосы.

Попутно отметим, что для выполнения равенства продольного и поперечного разрешения необходимо согласованно выбрать значения частоты сканирования F , высоты съемки H и скорости движения носителя V . Но это детали, главное же состоит в следующем:

- в каждый конкретный момент времени линейный сенсор выполняет проецирование поверхности сцены на фокальную (картинную) плоскость оптической системы сканера, причем строго подчиняясь закону центральной проекции.
- взаимное пространственное и угловое положение линейных сенсоров в фокальной плоскости известно абсолютно точно и неизменно, т.е. его можно считать таковым для целей настоящего исследования. Иными словами, вполне корректно говорить, что и для линейного сканера также как и для фотоаппарата

кадрового типа определены все те же 6 элементов внутреннего ориентирования (по крайней мере, шесть, а может быть и больше).

Вообще, в части геометрии приемника различия между кадровыми и линейными системами не так уж и велики. Действительно, в рассматриваемом нами примере используются три линии сенсоров, расположенных в фокальной плоскости объектива. Ничто не мешает нам трактовать их как часть матричного (кадрового!) приемника, из которого удалены все строчки, за исключением именно этих трех.

А вот в чем, линейные и кадровые системы действительно различаются, так это в принципах формирования изображений:

- В случае кадровой системы каждый аэрофотоснимок представляет собой одномоментный «слепок», полученный из единого центра проекции. Т.е. камеру можно считать неподвижной в течение всего времени совершения съемки. Строго говоря, это, конечно, не совсем так – носитель продолжает непрерывное движение в течение всего времени экспозиции, т.е. времени, когда открыт затвор. Но это не меняет существа дела – кадровую систему можно считать в принципе неподвижной в момент совершения снимка.

- В случае линейного сканера также формируется изображение земной поверхности, обладающее вполне определенным набором изобразительных и метрических свойств. Как и в случае с метрическими камерами на таких изображениях можно выделить хорошо определяемые точечные (контурные) объекты, характеризующиеся вполне конкретными геодезическими координатами. Как и в случае с кадровыми системами, такие точки можно и нужно использовать в качестве опознаков или связующих точек при фототриангуляционном развитии съемочной сети. Но: в случае линейных сканеров изображения этих точек и всех других объектов *принципиально всегда* получены в разные моменты времени, т.е. с различным положением главной точки и ориентацией системы координат (СК) аппарата.

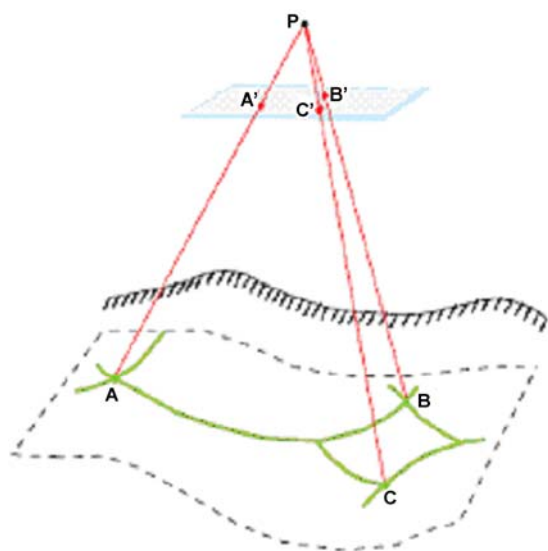


Рис. 134. Формирование изображения кадровой камерой.

можно обойтись без нее.

Случаю с кадровой системой съемки, соответствует ситуация, изображенная на рисунке 134. Три опознака А, В, С, т.е. три дешифрируемые на аэрофотоснимке точки земной поверхности с определенными геодезическими координатами всегда позволяют однозначно выполнить абсолютное ориентирование аэрофотоснимка, т.е. определить пространственные координаты центра проекции P_x , P_y , P_z и углы ориентации СК камеры ϖ , ω , ξ , т.е. решить главную фотограмметрическую задачу. Наличие на борту GPS/INS системы может в общем случае помочь, т.к. сообщит априорные значения P'_x , P'_y , P'_z , ϖ' , ω' , ξ' . Наличие такой априорной информации упростит задачу, но в таких данных нет настоящей необходимости. При желании

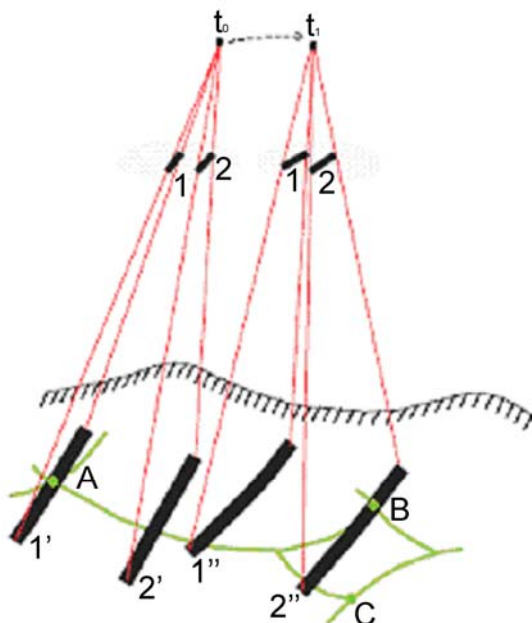


Рис. 135. Формирование изображения линейным сканером.

Совершенно иначе обстоит дело с линейными сканерами (рис. 135). Изображения опознаков А, В, С будут гарантированно получены. Весьма вероятно с существенно более высоким, чем в кадровом случае, соотношением сигнал/шум, цветопередачей, контрастом и т.д. Однако, как будет показано ниже, крайне неблагоприятным обстоятельством является тот факт, что изображения опознаков будут получены не одновременно, а в течение некоторого временного интервала. В течение этого интервала аэросъемочная система будет, хотя и под контролем инерциальной системы, продолжать хаотическое движение.

Приведенные подробные разъяснения принципиальных различий фотограмметрических концепций кадровых и линейных систем хорошо известны всем специалистам по современной аэросъемке.

Однако выводы делаются разные. Некоторые эксперты относят эту особенность формирования изображений к одному из четырех своих «убийственных аргументов» против линейных сканеров: ни о какой реальной точности фотограмметрических данных, опирающихся существенно на кинематические GPS и инерциальные измерения говорить невозможно. Другие специалисты считают, что это совершенно не так: современные GPS/INS системы настолько точны, что им вполне можно доверять.

Мы же, несмотря на пристрастие к кадровым системам и глубокое уважение к профессору Леберлу, склонны поддержать тех, кто не делает трагедии из существенной зависимости линейных сканеров от GPS и инерциальных данных.

Наша позиция основана, в том числе, и на многолетнем личном опыте использования систем прямого геопозиционирования. Мы не склонны рассматривать линейные сканеры как «тупиковое направление» развития современной цифровой аэрофотографии.

В конечном итоге, нас интересует, в какой мере связку проецирующих лучей полученных, как показано выше неодновременно, можно считать «жесткой», пригодной для фотограмметрических построений и вычислений. Эта проблема иллюстрируется на рисунке 136.

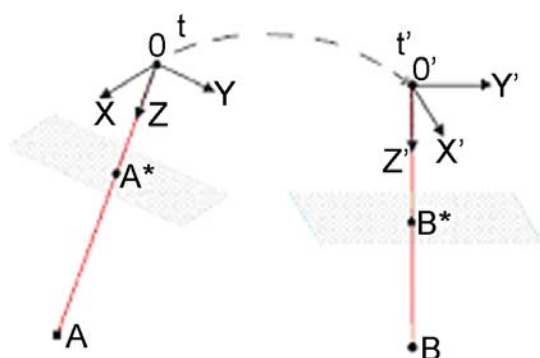


Рис. 136. Связка проекции лучей линейного сканера в моменты времени t и t' .

Связка проецирующих лучей $0-A^*-A$ и $0'-B^*-B$, полученных линейным сканером в два различных момента времени t и t' можно считать достаточно «жесткой», если с достаточной точностью известны параметры взаимного положения и ориентации СК сканера, соответственно, в моменты времени t и t' .

Однако выводы делаются разные. Некоторые эксперты относят эту особенность формирования изображений к одному из четырех своих «убийственных аргументов» против линейных сканеров: ни о какой реальной точности фотограмметрических данных, опирающихся существенно на кинематические GPS и инерциальные измерения говорить невозможно. Другие специалисты считают, что это совершенно не так: современные GPS/INS системы настолько точны, что им вполне можно доверять.

Практический опыт подсказывает, что современные системы прямого гео-позиционирования GPS/INS типа, такие как POS/AV 610 компании Applanix или AeroCONTROL 2 компании IGI удовлетворяют этому требованию в полной мере. Кроме прочего, в пользу линейных сканеров здесь работают два обстоятельства:

1) малость интервала $\Delta t = t' - t$;

2) тот факт, что нас интересует относительная ориентация СК OXYZ и O'X'Y'Z' друг относительно друга, а не их абсолютные положения и ориентация в геодезическом пространстве. Первая выше второй на 1-2 порядка.

Продолжая обсуждение взаимных достоинств и недостатков кадровых и линейных цифровых аэрофотосъемочных систем, отметим, что вопрос результирующей геодезической точности должен быть признан ключевым при проведении анализа.

Высокая точность, безусловно, необходимый (хотя, быть может, и недостаточный) признак профессионального аэрофотоаппарата. Это замечание весьма существенно при обсуждении достоинств и недостатков различных концепций современного аэрогеодезического оборудования.

По не вполне понятным для нас причинам вопрос реальной геодезической точности того или иного типа или конкретной модели цифровой аэрофотосъемочной системы часто «выпадает из контекста» или рассматривается вскользь, в ряду прочего. Мы не собираемся повторять этой ошибки, а начнем с самой сути: какой подход, кадровый или линейный, обеспечивает достижение большей точности определения геодезических координат наземных объектов. Мы отвечаем на этот вопрос следующим образом: безусловно, кадровый, причем его превосходство носит принципиальный, если угодно, концептуальный характер.

Здесь уместно отметить, что категория геодезической точности считается, во многом, определяющей при классификации аэросъемочного оборудования на две большие группы: фотограмметрические средства и средства дистанционного зондирования. Считается, что первые позволяют по данным съемки определять координаты наземных объектов с некоторым гарантированным уровнем точности и достоверности. Для средств дистанционного зондирования, в отличие от фотограмметрических, вопрос о точности геопозиционирования данных и точности геометрических измерений является, хотя и существенным, но не главным. Во втором случае существенно более важным является качество цветопередачи, спектрального представления, изобразительность, возможность проведения специального вида дешифрирования и другие категории, не имеющие непосредственного отношения к геодезической точности. Конечно, такое деление, во многом условно и в наибольшей степени соответствует западному стилю, чем российскому. Тем не менее, для целей нашего исследования приведенное замечание существенно. Не следует забывать, что в случае UltraCAM-X, ADS-40, DMC мы имеем дело именно с фотограмметрическими средствами, а не средствами дистанционного зондирования.

В свете вышеизложенного, хотелось бы обратить внимание читателей на ту настойчивость, с которой сторонники линейных сканеров, в частности Leica, пропагандируют получаемое качество цветопередачи. Признавая важность этого вопроса, считаем необходимым отметить, что весь прошедший XX век аэрофотография и фотограмметрия с успехом решали все стоящие перед ними задачи с помощью панхроматических (черно-белых) аэроснимков. Цветные и спекторозональные пленки использовались для целей фотографического картографирования крайне редко, по причине своего низкого, в сравнении с пан-

хроматическими пленками, разрешения. В случае же с современными линейными аэросъемочными системами – не будет преувеличением сказать, что высокое качество цветопередачи спектральной чувствительности каналов и ряд других преимуществ линейных сканеров, в значительной степени, достигнуты в ущерб фотограмметрической точности прибора.

Кроме того, упомянутые выше «неоспоримые» преимущества линейных сканеров над кадровыми системами нуждаются в серьезном изучении. Критики кадровых систем указывают на следующие обстоятельства:

- уже упомянутая выше более высокая чувствительность линейных CCD приемников и, соответственно, лучшее соотношение сигнал/шум в сравнении с матричными приемниками;

- кадровые системы обеспечивают «искусственное, ненатуральное» (термины критиков) цветовое покрытие аэрофотоснимка: используется Байеровская схема (Manual, 2004), при которой мозаично размещаются по полю кадра «зеленые», «синие» и «красные» пиксели с помощью спектральных оптических фильтров. Такая схема характерна для аэрофотосъемочных систем среднего класса.

В широкоформатных кадровых цифровых аэрофотоаппаратах (Intergraph DMC, Vexcel UltraCAM-D и UltraCAM-X), наряду с основным панхроматическим кадром высокого разрешения, формируются четыре «спектральных» (зеленый, синий, красный, ближний, инфракрасный) изображения. Естественно, поля зрения панхроматического и «цветовых» сенсоров совпадают, что позволяет «синтезировать» полноформатное цветное RGB или спектрозональное изображение. С математической точки зрения такая процедура ни что иное, как интерполяция, позволяющая искусственно «раскрасить» все пиксели изображения по фактически зафиксированной цветности соседнего пикселя (Байеровский метод) либо группы пикселей (метод разнесенных спектральных каналов). Критики усматривают в таких методах формирования цвета источник множества негативных моментов, в частности, возникновение эффекта бахромы (*fringe*) и других явлений, затрудняющих визуальный анализ аэрофотоснимков и проведение камерального дешифрирования.

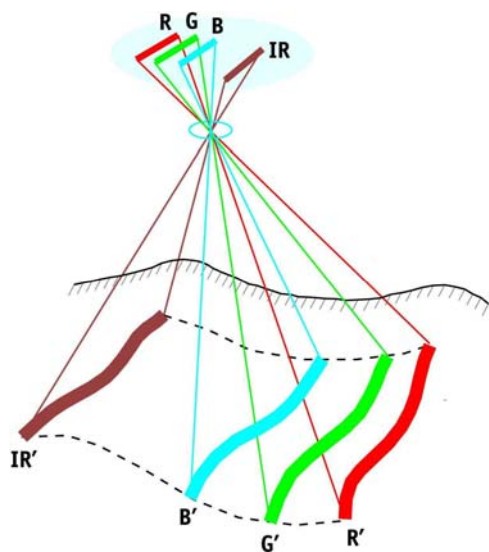


Рис. 137. Формирование цветности линейным сканером.

Вместе с тем:

- 1) В линейных сканерах тоже, как правило, используются «цветные» сенсоры с разрешением меньшим, чем у основного монохромного канала. Поэтому все сказанное выше о проблемах интерполяции цвета, в разной степени, справедливо и по отношению к линейным сканерам.

- 2) Естественность цветопередачи в линейных сканерах при внимательном рассмотрении также оказывается нарушенной. Если, например, линейки RGB размещены в непосредственной близости друг от друга (т.е. практически в одном месте), а линейка сенсора ближнего инфракрасного диапазона отстает от них на 10° (рис. 137).

При синтезе спектрозонального изображения будут использованы значения спектральных интенсивностей излучения, соот-

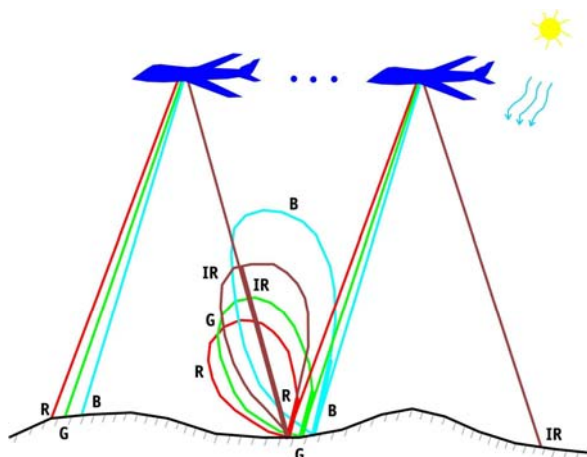


Рис. 138. Формирование спектральных интенсивностей излучения при различных углах визирования линейного сканера.

ветствующих различным углом визирования. Это неблагоприятное обстоятельство, особенно, для поверхностей с существенно недиффузной индикатрисой рассеяния (рис. 138).

За время, необходимое летательному аппарату для преодоления расстояния D , условия освещенности сцены могут измениться самым радикальным образом. При высоте $H=1000$ м и скорости $V=50$ м/с это время составит 4 с. С учетом этого обстоятельства коэффициент доверия к спектрально-аналитическим данным «линейного» типа еще более снижается.

С учетом вышеизложенного, можно утверждать аппараты кадрового типа, гарантирующие одномоментность получения данных, как по панхроматическому, так и по всем спектральным (цветовым) каналам и принципиально без искажений, вызванных недиффузной индикатрисой рассеяния, представляются заслуживающими большего доверия в вопросах достоверности цветопередачи.

3) Не подтверждается, безусловно, и тезис о превосходстве линейных сканеров по радиометрическому разрешению и соотношению сигнал/шум. Мы уже признавали наличие этого превосходства, но только по отношению к ССД приемникам, а не к приборам в целом. В целом ряде случаев удается достичь принципиального улучшения чувствительности оптическими, схемотехническими или, наконец, программными методами.

Кроме того, не следует пренебрегать такой формой анализа как визуальный контроль данных различных источников, как это показано на рисунке 139.



Рис. 139. Сравнение результатов съемки различными системами: а) снимок сделан цифровым АФА Leica ADS-40 (разрешение 20 см); б) снимок сделан цифровым АФА Vexcel UltraCAM-D (разрешение 20 см); в) снимок сделан цифровым АФА Vexcel UltraCAM-D (разрешение 8 см. В данном случае, такое качество практически не достижимо для ADS-40).

8.6. Системы картографирования реального времени

Термин «Системы Картографирования Реального Времени» (СКРВ) вызывает неоднозначное отношение со стороны различных представителей топографо-геодезического сообщества. Очень многие усматривают в нем элемент пропаганды и рекламы, а не научно-техническую категорию. Мы, тем не менее,

будем придерживаться этого термина, так как он верно отражает главное назначение и характер использования определенной категории современных цифровых аэросъемочных систем. Однако, мы согласны, что этот термин нуждается в некоторых уточнениях. Представим их.

Ответ на вопрос: «Что такое «Системы Картографирования Реального Времени?», начнем с указания на том, чем такие системы не являются. Итак:

- это не «ГОСТИрованное» понятие;
- это не рекламный слоган.

Используемый термин предложен авторами и не претендует на то, чтобы быть частью единой и стандартизированной терминологии по топографо-геодезическим и геоинформационным дисциплинам. В тоже время, авторы категорически возражают, что этот термин носит исключительно рекламный характер. Как уже частично показано выше и как будет дополнительно показано ниже, все четыре слова в аббревиатуре СКРВ имеют конкретное содержание.

Еще несколько комментариев, уточняющих и конкретизирующих категорию СКРВ:

- Такая система разработана первоначально в компаниях «Геокосмос» и «ГеоЛИДАР» и в настоящее время активно применяется на практике.

- Такие системы, как правило, подразумевают предельно конкретную совокупность аппаратных, программных и методических средств. Как уже неоднократно подчеркивалось выше, основными источниками данных в СКРВ являются авиационные аэросъемочные лидары, цифровые аэрофотоаппараты и системы прямого геопозиционирования. Сегодня уже можно утверждать, что и в области программного обеспечения и методологии СКРВ характеризуются устоявшимися схемами.

- Такие системы в своем развитии уже вышли из научно-исследовательской и опытно-конструкторской фазы. Сегодня это уже законченные промышленные образцы. Как следствие, СКРВ имеют вполне определенное экономическое содержание, сложилась цена на такие системы.

- Такая система по своей сути является аэросъемочной.

- И, наконец, главное содержание категории СКРВ: такие системы призваны решать следующую главную задачу: *радикальная интенсификация работ по крупномасштабному топографическому картографированию.*

Ниже будет показано, что функции СКРВ не сводятся исключительно к решению топографических и картографических задач. С использованием таких систем уже сегодня решаются многие задачи инженерной геодезии, экологии, таксации леса и др. Вообще, с использованием СКРВ возможно получение принципиально новых агрегатов данных, не имеющих аналогов в классических аэрогеодезических технологиях.

Несомненно, главный вопрос, возникающий при анализе СКРВ и их роли среди других современных геоинформационных технологий, может быть сформулирован следующим образом: *Насколько радикальна предлагаемая интенсификация?*

Естественно корректный ответ на этот вопрос возможен только при корректном выборе базы для сравнения. В качестве альтернативных классическим технологиям топографического картографирования могут рассматриваться:

1. Наземная топографическая съемка.
2. Аэрофототопография – фотограмметрия.
3. Радиолокация.
4. Космическая съемка.

В ходе изложения достоинства и недостатки, а также главные ограничения всех указанных выше базовых технологий топографического картографирования уже неоднократно обсуждались. Также многократно было заявлено, что все приведенные выше методы картографирования на самом деле относятся к своим экологическим нишам(!) и представляют разные аспекты общей задачи сбора и интерпретации геопространственных данных.

Следует отметить, что за последние 2–3 года заметной тенденцией стало использование космических данных ДЗЗ для обновления топографических карт и решения других задач геоинформатики.

Бесспорно, использование космических данных обладает рядом серьезных преимуществ, особенно, в части легкости и удобства доступа к архивным данным, оформление заказа на съемку той или иной территории и др. Успехи космических методов ДЗЗ даже способствовали распространению мнения, что применительно к топографо-геодезическим и геоинформационным задачам авиационные методы в ближайшее время будут полностью вытеснены космическими. Обсуждение этого важного вопроса выходит за рамки нашей книги. Отметим, тем не менее, что для подобных выводов, на самом деле, нет никаких оснований. Разумней было бы говорить не о вытеснении одной технологии другой, а о существенном перераспределении их функций и сфер приложений с учетом сегодняшних реалий. Отвлекаясь от чисто инженерного аспекта, обратимся к опыту стран с развитыми рыночными институтами. Статистика, которой мы располагаем, говорит, что соотношение потребностей и фактического «потребления» данных обоих видов существенно разнятся:

- Так, в России соотношение объемов используемых космических и аэросъемочных данных, примерно, втрое выше, чем в остальном цивилизованном мире. Т.е. Россия использует для топографо-геодезических и, вообще, для геоинформационных целей непропорционально много космических данных «в ущерб» авиационным. Этот феномен требует вдумчивого анализа.

- Во всем мире цифровая аэрофотосъемочная техника внедряется в реальное производство столь же активно, как и технологии, связанные с использованием спутниковых данных. Дискуссия о возможной конкуренции этих двух видов дистанционного зондирования там закончилась 5–7 лет назад и с тех пор не возобновлялась. Считается, что две технологии твердо обозначили свои существенно различные экологические ниши и в продолжение дискуссии нет особой необходимости.

Авторы не берутся дать исчерпывающее объяснение сложившейся ситуации, однако намерены поделиться с читателями некоторыми своими соображениями:

- Представляется, что описанные явления, в значительной степени, проявление общего технологического отставания нашей страны, в том числе и в вопросах геоинформатики. В России наиболее востребованными на сегодняшний день являются работы, связанные с обновлением (*не созданием!*) топографических карт масштабов 1:25000 (и мельче). Эти работы, в основном, выполняются по материалам космической съемки, что, по нашему мнению, и привело к столь значительному росту их доли по отношению к аэросъемочным.

- В то же время, во многих странах аэросъемочные данные высокого и сверхвысокого разрешения, причем как в форме плановых, так и наклонных аэроснимков, в сочетании с данными наземной фотографической съемки используются для создания принципиально новых геоинформационных продуктов, не являющимися картами и планами в традиционном понимании. Речь идет о

трехмерных текстурированных моделях реалистического вида, навигационных визуальных системах, «пиктометрических» моделях, данных форматов Cyber-City, Virtual Earth и т.п.

– Серьезные исследования по реальной точности геопозиционирования космических данных без использования наземных геодезических измерений не проведены. В этом смысле совершенно не обоснованными выглядят утверждения о возможности использования таких данных для обновления планов масштаба 1:5000 и даже 1:2000.

– Следует признать, что в нашей стране накоплен большой успешный опыт обновления топографических карт по космическим материалам. В основном такие работы связаны с выделением «твердых» контуров. Остается дискуссионным вопрос: в какой мере эти данные пригодны для создания, а не только обновления топографических карт и планов? И в частности, возможна ли практическая реализация стереофотограмметрического метода съемки рельефа и измерений по третьей координате? И если все-таки это возможно, то какова его точность и в каких случаях целесообразно его применение?

– Наконец, всем непредвзятым исследователям очевидно, что фотографическое качество аэрофотоснимков и соответственно возможность проведения дешифрирования несравненно выше, чем данных космического ДЗЗ.

Вопрос о роли и месте двух основных видов современного ДЗЗ, конечно, значительно глубже и заслуживает отдельного серьезного обсуждения.

Корректное сравнение в смысле исследования технологической интенсификации, которая достигается за счет применения СКРВ, возможно при использовании в качестве базы классической аэрофототопографической технологии, которая в свою очередь основана на использовании стереотопографического метода создания карт и планов (Лобанов, 1983, Книжников и др. 2004а, Серапинас, 2005).

С учетом представленных выше разъяснений, можно дать следующий ответ на поставленный выше вопрос о степени интенсификации работ по крупномасштабному топографическому картированию, достигаемому при использовании СКРВ: *при корректном методе сравнения речь может идти об ускорении в разы и даже на порядки.*

Иными словами, если при использовании традиционных аэротопографических технологий картографирование определенной территории в заданном масштабе могло потребовать месяц, то с использованием СКРВ эта же работа заняла не более нескольких дней. Подчеркнем, что и в первом и во втором случаях речь идет именно о всем комплексе работ, включая геодезические, аэро-съемочные и камеральные.

Технологическая основа систем картирования реального времени описана выше в разделе 8.1. Там же указаны основные источники данных для систем картографирования реального времени. Напомним, что их 3: лазерные локаторы, цифровые аэрофотоаппараты и системы прямого геопозиционирования.

Все три указанные выше основные источники данных, в равной мере символизируют и три, в значительной степени независимые технологии сбора и обработки геопространственных данных, соответственно – прикладную лазерную локацию, цифровую аэрофототопографию и современную инерциальную спутниковую навигацию. Каждая из этих технологий обладает самостоятельной значимостью в современной геоинформатике, но именно их синтез позволил появиться СКРВ.

Значительную роль в теории и практике СКРВ играет также ряд других базовых прикладных дисциплин и технологий, таких как:

- цифровая фотограмметрия;
- геодезия;
- гравиметрия;
- математическая картография;
- в качестве отдельного направления сегодня уже можно выделить: методы математической (программной обработки) данных лазерно-локационной съемки совместно с цифровыми аэрофотосъемочными данными.

С учетом вышеизложенного можно представить следующие рекомендации по правильному толкованию термина «реальное время», входящего в определение СКРВ:

– Было бы неправильно утверждать, что при практическом использовании СКРВ топографический план «рождается» сразу на борту самолета-аэросъемщика. По крайней мере, сегодня, это еще невозможно.

– СКРВ не отменяют ряд важнейших технологических процессов, такие как камеральное дешифрирование и все другие процессы, связанные с созданием семантической составляющей карты. Представляется, что их в принципе нельзя отменить!

– Однако не будет преувеличением сказать, что важнейшим результатом применения СКРВ на практике является следующий факт: длительность цикла производства законченной рельефной части карты и выделения многих контуров географических объектов и ортофотомозаики (трансформированных и геопривязанных аэрофотоснимков) сопоставима по продолжительности фазы аэросъемки. Иными словами, все данные, собранные за каждый аэросъемочный день, могут быть обработаны до начала следующего дня.

Обсудим еще раз важнейшие тенденции в развитии современных аэросъемочных технологий, определяющие успех практического использования СКРВ.

Рост производительности лазерно-локационных систем по годам

- 1993 ALTM 1020 (5 кГц)
- 1997 ALTM 1025 (25 кГц)
- 2001 ALTM 3033 (33 кГц)
- 2002 ALTM 2050 (50 кГц)
- 2002 ALTM 30/70 (70 кГц)
- 2003 ALTM 3100 (100 кГц)
- 2006 ALTM 3100EA (100 кГц) – точность измерения наклонной дальности 2-3 см

• 2007 ALTM Gemini – более 100 кГц максимальная высота съемки 4000 м, возможность съемки на высоте 2000 м с максимальной производительностью.

Предполагается, что рост производительности авиационных лидаров продолжится.

Совершенствование алгоритмов селекции «лазерных точек»

Селекция лазерных точек предполагает установление принадлежности каждой отдельной точки или группы тому или иному морфологическому компоненту: поверхности рельефа, растительности, зданиям, ЛЭП и другим классам объектов.

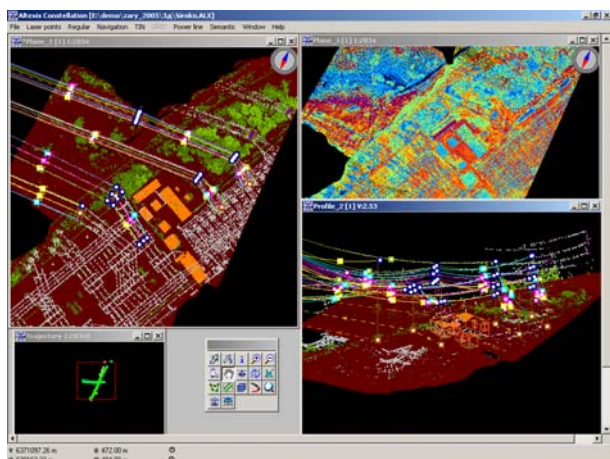


Рис. 140. Алгоритмы морфологической селекции позволяют в автоматическом режиме выделять многие классы объектов: поверхность земли, растительность, провода и опоры ЛЭП, здания и др.

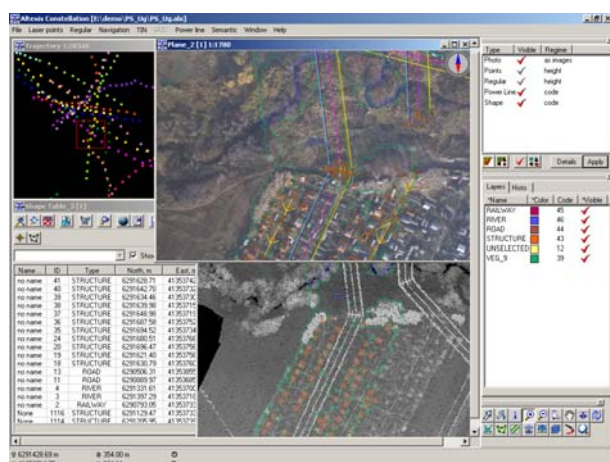


Рис. 141. Селекция лазерных точек и распознавание объектов.

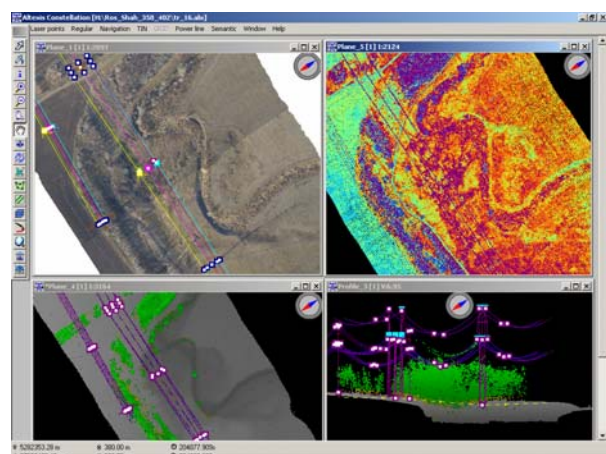


Рис. 142. Совместная визуализация и обработка лазерно-локационных и аэрофотографических данных.

Автоматическая селекция функционально связана с построением векторных моделей географических объектов. Успехи в совершенствовании алгоритмов селекции прямо сказываются в повышении степени автоматизации и следовательно производительности как самих лазерно-локационных систем, так и СКРВ, построенных на их основе.

На рисунках 140–142 приведены примеры использования лазерно-локационных данных в форме «интенсивности» отраженного сигнала. Было заявлено, что такие данные представляют собой по сути цифровые ортофотопланы в истинных геодезических координатах. С увеличением производительности воздушных лазерных локоаторов можно рассчитывать на повышение разрешения на местности таких «квазиортофотопланов». Наличие такой информации позволяет выполнять многие дешифровочные работы без привлечения аэрофотоснимков, а также выполнять совместные анализ и обработку лазерных и аэрофотографических данных.

Стереоскопическое представление лазерно-локационных данных

Большое значение имеет возможность автоматизации процедуры приведения лазерно-локационных, аэрофотографических и других видов данных дистанционного зондирования к единой геодезической системе координат. Возможность стереоскопического наблюдения данных всех видов, причем как раздельно, так и совместно, способствует повышению достоверности камеральных работ (рис. 143).

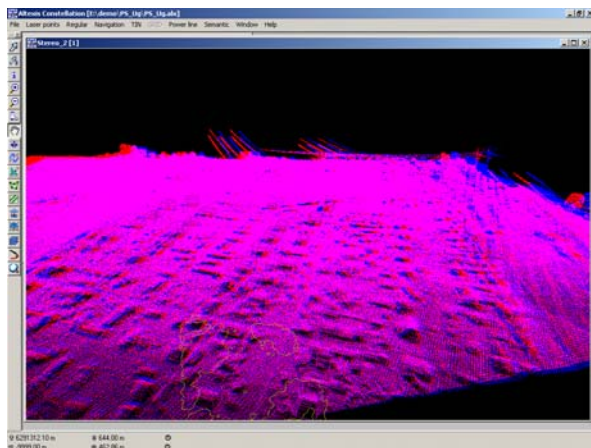


Рис. 143. Стереоскопическое представление лазерно-локационных данных.

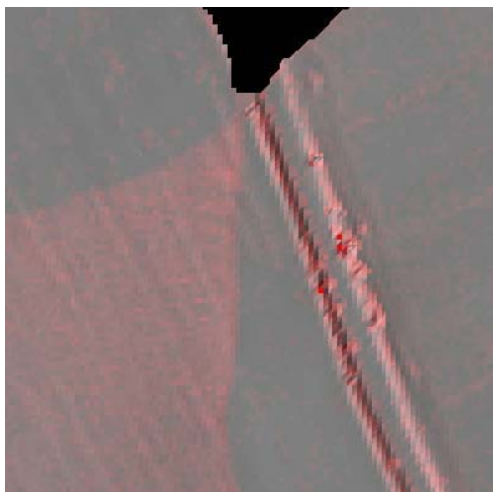
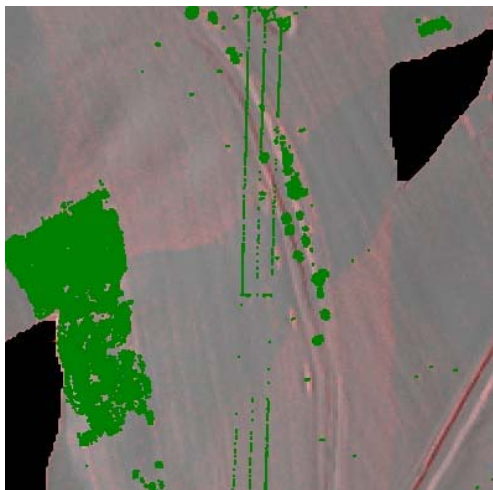


Рис. 144. Фрагменты цифровой модели рельефа, построенных по лазерно-локационным данным в программной среде ALTEXis.

Построение поверхностей истинного рельефа

Выделение поверхности истинного рельефа с использованием алгоритмических процедур позволяет уверенно восстанавливать форму поверхности рельефа даже под густыми кронами деревьев, находящимся в фазе вегетации. Это позволяет значительно расширить границы применимости лазерно-локационного метода и СКРВ в целом. Необходимые пояснения и иллюстрации читатель может найти в журнале «Геодезия и картография», №8, 2006 г.

Значительные успехи достигнуты в последние годы как в повышении точности лазерно-локационного метода в целом, так и в повышении достоверности и общей информативности выходных топографических материалов. Так в 2006 году компания Optech – мировой лидер в области производства авиационных лидаров, предложила новые модели ALTM 3100EA и ALTM Gemini, обеспечивающие точности измерения наклонной дальности на уровне 3-5 см. Вместе с тем, современные алгоритмы выделения поверхности истинной земли и других важнейших топографических и структурных поверхностей и контуров позволяют добиться точности геопозиционирования этих поверхностей и контуров на уровне первых сантиметров, естественно при обеспечении достаточной плотности сканирования.

Немаловажно и то, что современные математические методы наряду с построением самих поверхностей и контуров позволяют получать статистические оценки точности и достоверности их пространственного положения. Примеры представлены на рисунке 144.

Аналитическая форма генерации и анализа ЦМР, позволяет добиться максимальной точности и достоверности. Впервые появляется возможность количественной оценки (в см!) точности восстановления

рельефа. На рисунке 144 градиациями красного тона представлены статистические численные оценки точности определения пространственного положения

ния поверхности истинного рельефа. Области с более ярким красным тоном, соответствуют большим погрешностям определения пространственного положения поверхности рельефа.

На рисунках 145–147 показаны примеры использования «лазерной» ЦМР.

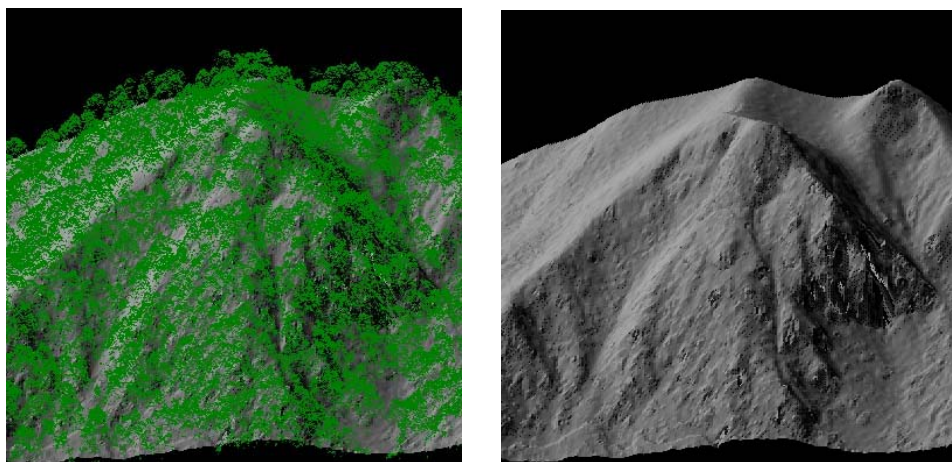


Рис. 145. Выделение рельефа под кронами деревьев по лазерно-локационным данным.

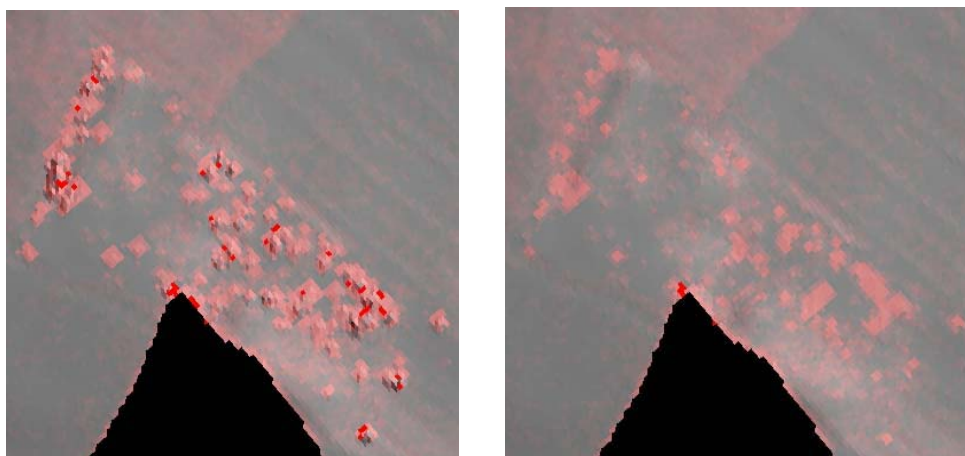


Рис. 146. Индикация «неблагополучных» фрагментов ЦМР (участки под густой растительностью с большим количеством пространственных шумов) и их автоматическое сглаживание (подавление шумов).

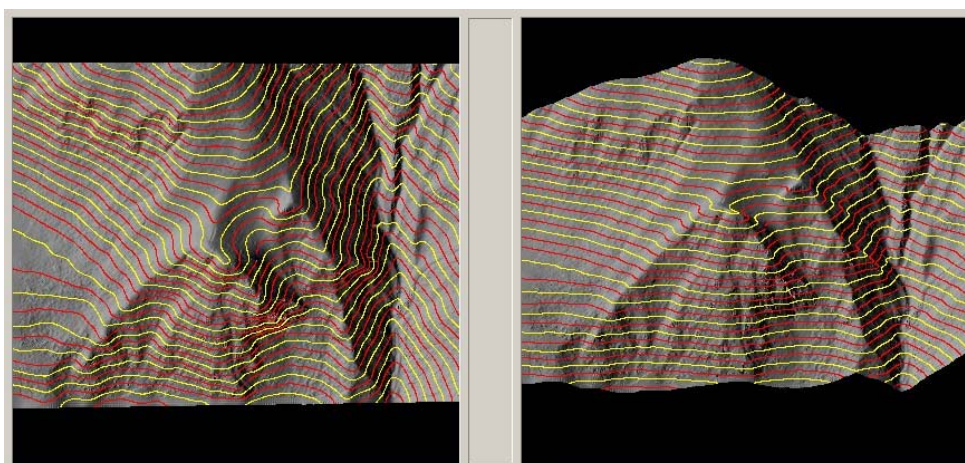


Рис. 147. Аналитическая генерация изолиний рельефа без артефактов.

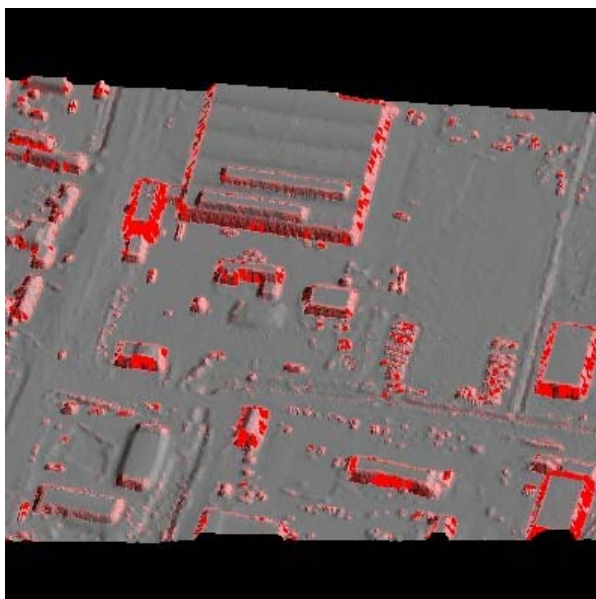


Рис. 148. Автоматизированное выделение структурных линий рельефа по лазерно-локационным данным.

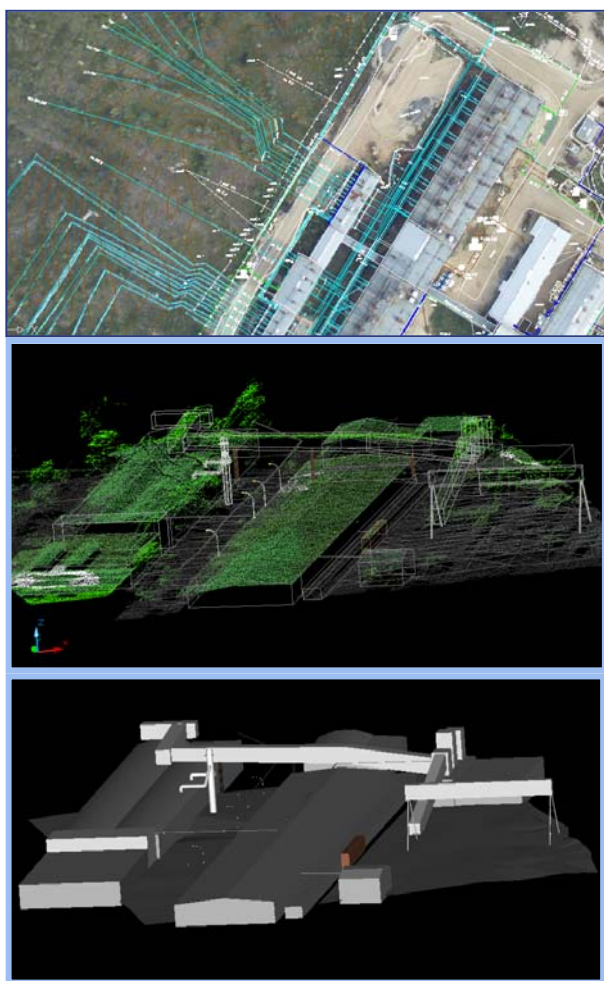


Рис. 149. Цифровые трехмерные модели, построенные по результатам воздушной и наземной лазерно-локационной съемки и цифровой аэрофотосъемки.

Данные методы аналитической обработки могут оказаться чрезвычайно полезными на практике. Такая возможность принципиально отсутствует, в случае если ЦМР получена стереофотограмметрическим или любым другим традиционным методом.

Использование «аналитического» подхода позволяет свести процедуры выделения структурных линий рельефа (*break lines*) к классическим операциям Фурье и Вейвлет-анализа (Matheson, 1988, Данилин, Сведва, 2001) (рис. 148).

Весьма перспективным и все более активно применяемым на практике является совместное использование данных наземного и воздушного лазерного сканирования (локации) и цифровой аэрофотосъемки. Такой подход особенно эффективен при обследовании объектов, включающих сложные инженерные сооружения, например, электрические подстанции, нефтегазоперекачивающие станции и сооружения и др. (рис. 149–151).

Заканчивая обсуждение вопросов, связанных с разработкой и практическим внедрением СКРВ, повторим содержание главы кратко, в тезисном изложении:

- «Лазерная» ЦМР – заслуживающий доверие объект, с абсолютной геодезической точностью не хуже 15 см.
- «Локальная» точность такой ЦМР и важнейших контуров и точек даже выше – иногда 5–7 см.
- Генерация ЦМР сегодня – рутинный процесс. Автоматизированы практически все главные технологические операции, как на этапе сбора, так и на этапе обработки. Но в то же время *геоинформационная ценность «лазерной» ЦМР очень велика.*
- Цифровая аэрофотография самое уместное дополнение лазерным данным как средство камерального дешифрирования.

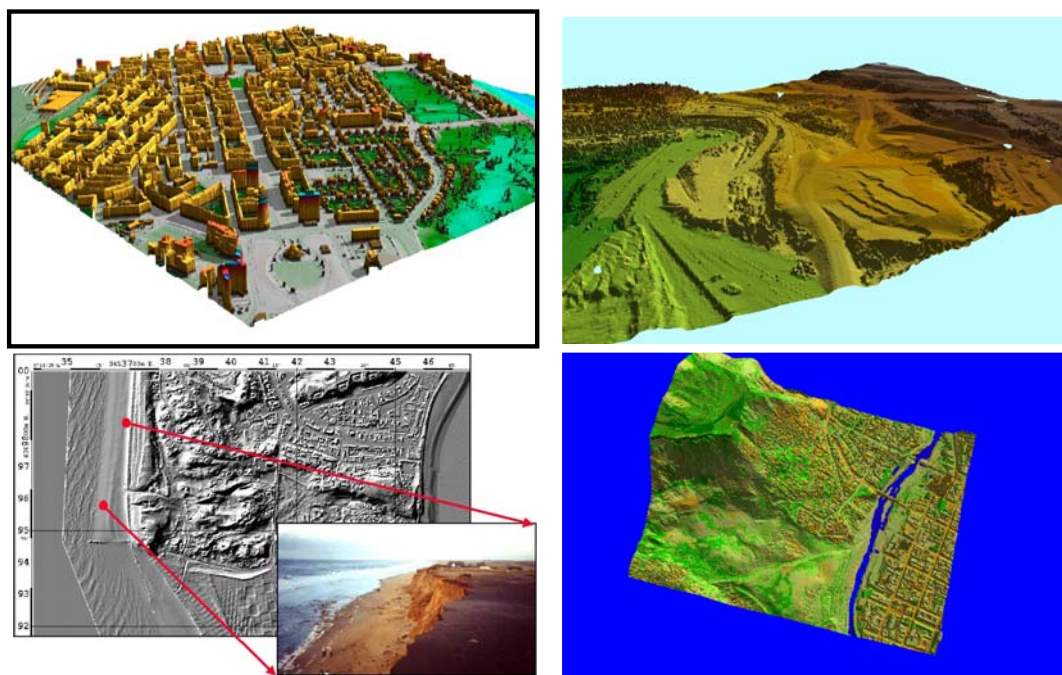


Рис. 150. Варианты визуализации цифровых моделей рельефа и различных объектов по лазерно-локационным данным.

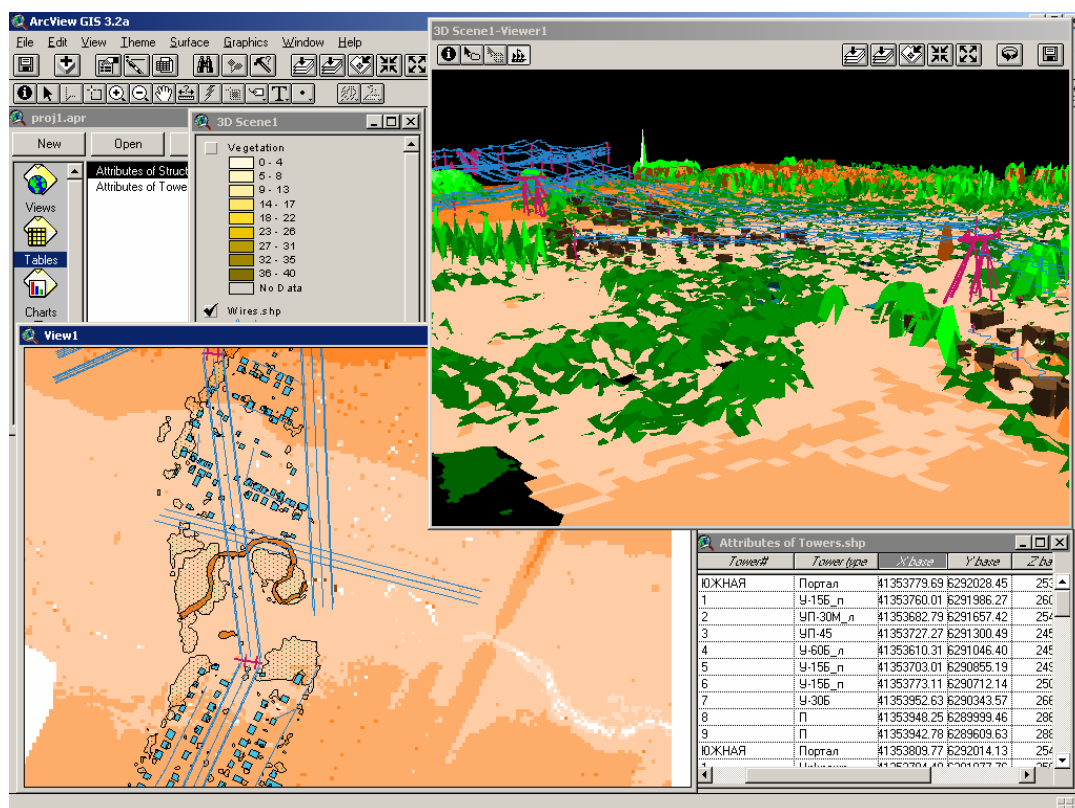


Рис. 151. ГИС-представление аэрофотосъемочных и лазерно-локационных данных.

• ЛИДАР и цифровой аэрофотоаппарат – два независимых источника геопространственных данных с сопоставимым уровнем точности. Это обстоятельство можно использовать для взаимного контроля этих двух видов аэросъемочных данных.

• Наличие лазерных и навигационных (GPS+Инерциальных данных) позволяет «оптимизировать» классический цикл фотограмметрической обработки: Опознаки → Блок (Маршрут) → Соответственные точки → Фототриангуляция → Уравнивание → Модельные координаты → Геодезические координаты → «Стереофотограмметрическая» ЦМР → Ортотрансформирование.

• «Оптимизация» есть полная автоматизация!

• Используемые методы сбора, обработки данных – только цифровые.

• От наземных геодезических работ по плано-высотному обоснованию можно полностью отказаться (но не от развития съемочной сети).

• Можно постараться отказаться от работ по полевому дешифрированию.

А также:

• Все прочие достоинства Лазерной Локации!

• Все прочие достоинства Аэрофототопографии!

Перейдем к двум основным выводам:

Вывод №1: Все сказанное выше о системах картографирования реального времени позволяет дать окончательный ответ на давно поставленный вопрос:

Для чего нужна лазерная локация (лидары)?

Традиционные варианты ответов:

1. Построение ЦМР.
2. Прогнозирование зон затопления.
3. Таксация леса.
4. Инвентаризация ЛЭП.
5. Оценка объемов горных выработок.
5. Мониторинг процессов эрозии береговой линии.
6. Прогнозирование лавинной опасности.
7. Создание цифровых топологических моделей сложных инженерных объектов и ... многих других приложений.

Самый правильный ответ: Лазерная локация есть важнейший компонент Систем Картографирования Реального Времени – функционально полного и универсального средства создания и обновления топографических карт и планов в масштабах вплоть до 1:1000 (1:500)

Вывод №2: Лидарные и аэрофототопографические (фотограмметрические) технологии мирно уживаются внутри систем картографирования реального времени. Более того, они сотрудничают, взаимно обогащая друг друга. Поэтому: *Попытки противопоставить друг другу лазерно-локационные и фотограмметрические методы абсолютно безосновательны.*

Однако, с чисто практической точки зрения, можно утверждать, что лазерно-локационный метод создания и обновления карт включает в себя стереотопографический как подмножество. Поэтому – *лазерно-локационный метод принципиально по всем позициям «сильней» стереотопографического.*

P.S.: Читатели, которых заинтересовали положения и выводы настоящей главы по проблемам цифровой аэрофототопографии и СКРВ, могут получить более полную информацию в прилагаемом списке литературы и на Интернет-сайтах компаний «ГеоЛИДАР»: www.geolidar.ru, Геокосмос: www.geokosmos.ru и ГеоПОЛИГОН: www.geopolygon.ru.

8.7. Наземное лазерное сканирование



Рис. 152. Схема работы лазерного дальномера.

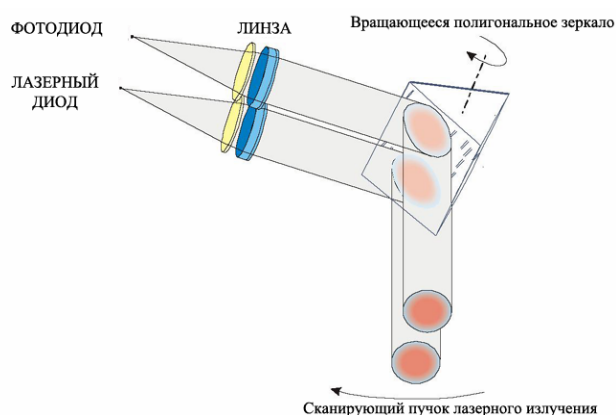


Рис. 153. Система вертикальной развертки лазерного сканера.

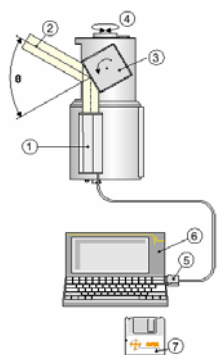


Рис. 154. Лазерная измерительная система: 1. Лазерный дальномер; 2. Лазерный луч; 3. Вертикальная развертка - вращающаяся полигональная зеркальная призма; 4. Горизонтальная развертка - вращающаяся оптическая головная часть; 5. Кабель передачи данных; 6. Компьютер; 7. Программное обеспечение Riegl 3D RiSCAN.

В данном разделе представлен ряд основных сведений о работе наземного лазерного сканера. Основным его элементом являются: лазерный дальномер, система вертикальной и горизонтальной развертки луча сканирования.

На рисунке 152 показана принципиальная схема работы лазерного дальномера. Дальномер импульсный и расстояние измеряется по интервалам времени испускания и приема сигнала – лазерного импульса.

На рисунке 153 показана принципиальная схема вертикальной развертки сканирующего пучка лазерного излучения. Горизонтальная развертка выполняется в результате медленного вращения на 360 градусов головной части

прибора.

На рисунке 154 показан общий состав наземной лазерной измерительной системы.

В таблице 44 приводятся основные характеристики растровых лазерных сканеров и профилографов фирмы RIEGL. Одним из наиболее производительных сканеров, является модель LMS-Z420i. Именно этот сканер сочетает высокую точность и значительную дальность работы (рис. 155).

На рисунке 156 показан пример наземного лазерного скана. В данном случае - это не фотография, а каждый «пиксел» изображения, который имеет полный набор пространственных координат. Все видимые элементы растительности доступны для измерения параметров в камеральных условиях. Именно эти качества наземной лазерной съемки позволяют рекомендовать ее для на-

учных и практических работ по таксации лесов, совместно с воздушной лазерной съемкой. Эти задачи также актуальны при выделении цифровой модели рельефа и представляют научный и практический интерес для лесных приложений лазерной локации (Thies and Spiecker, 2004).

Таблица 44. Основной ряд лазерных сканеров RIEGL

Параметры	Растровые сканеры			Профилографы		
	LMS-Z210i	LMS-Z360i	LMS-Z420i	LPM-25HA	LPM-800HA	LPM-2KA
Максимальное измеряемое расстояние, м	400	200	1000	60	800	2500
Минимальное измеряемое расстояние, м	4	1	2	2	10	10
Точность измерения положения точки: – одиночного импульса – среднее, мм	25 15	12 6	10 5	25 –	12 –	10 –
Скорость сканирования, точек/сек	от 8000 до 12000	от 8000 до 12000	от 8000 до 12000	от 1000	от 1000	от 4
Поле зрения сканирования, градусов	80×360	90×360	80×360	300×360	160×360	195×360
Расходимость лазерного луча, мрад	3	2	0.25	1.2	1.3	1.2
Класс защиты	IP 64	IP 64	IP 64	IP 65	IP 64	IP 64
Рабочее напряжение тока, вольт	12–28	15–28	15–28	11–18	11–18	11–18
Потребляемая мощность, ватт	до 50	до 60	до 70	до 50	до 50	до 50
Диапазон рабочих температур, град. С	-25/+50	-5/+50	-25/+50	-5/+50	-5/+50	-5/+50
Основные размеры, мм	210×435	210×490	210×463	250×300×320	287×300×320	232×300×320
Вес, кг	13.5	13.5	14.5	9.5	15	14.6



Рис. 155. Лазерный сканер RIEGL LMS-Z420i.

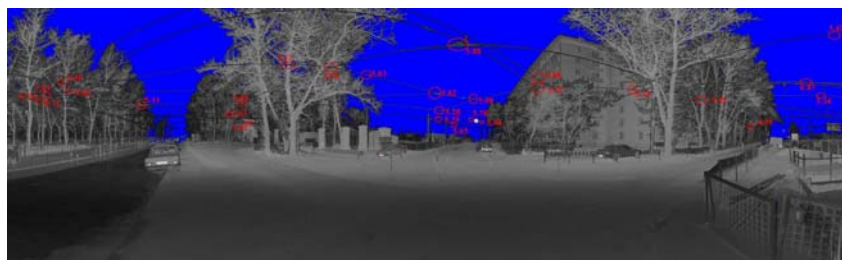


Рис. 156. Лазерно-локационная сцена элементов городской застройки и растительности.

Для изучения характеристик рельефа и лесной растительности, наибольший интерес представляет разность полигональных моделей, представленных на рисунках 157-160. Сравнивая общий объем точек лазерных отражений с цифровой моделью рельефа, можно выполнять те измерения, которые относятся только к растительности.

На основе методов топологического анализа моделей лазерных съемок и исследований, проводимых в настоящее время совместно с Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, будут получены новые решения по оценке основных параметров лесной растительности (Науменко, 2005).

Лазерные сканеры (ЛС) наземного базирования позволяют получать данные, которые обрабатываются в автоматическом или полуавтоматическом ре-

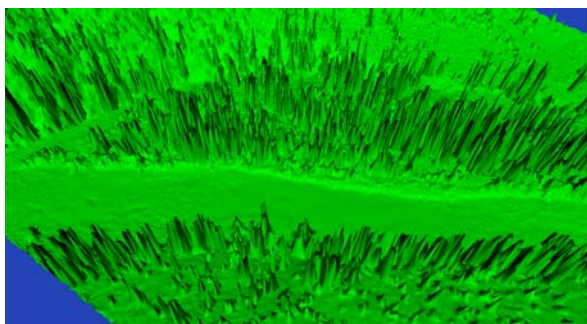


Рис. 157. Лазерно-локационная цифровая полигональная модель лиственного насаждения.

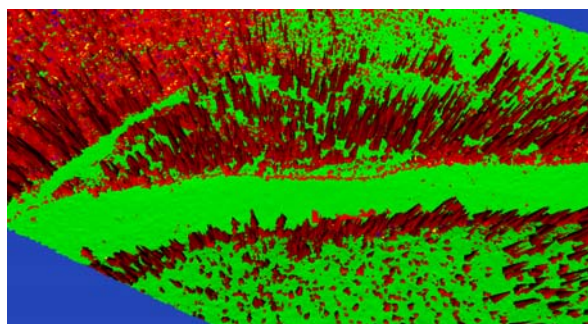


Рис. 158. Результат автоматизированного дешифрирования и классификации насаждений по лазерно-локационной цифровой полигональной модели.

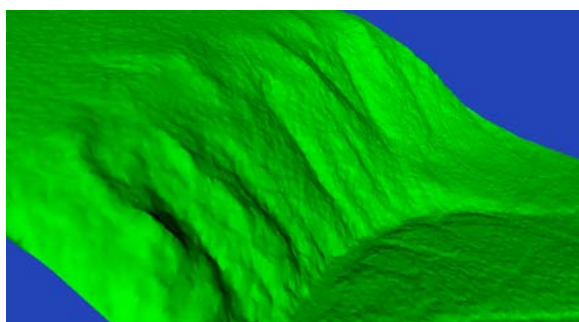


Рис. 159. Предварительная цифровая модель рельефа, полученная по лазерно-локационной полигональной модели.

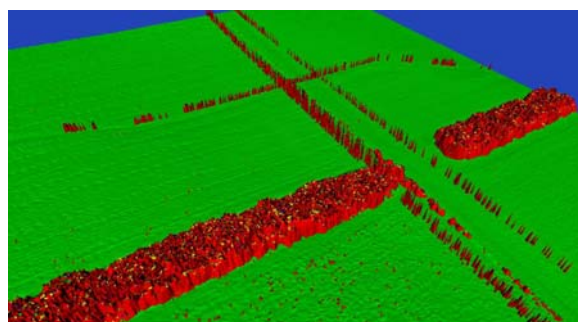


Рис. 160. Цифровая модель сельскохозяйственных полей и лесополос, полученная по лазерно-локационным данным.

жине. Результатом съемки являются текстурированная трехмерная (пространственная) триангуляционная модель объекта, трехмерные ортофотоснимки объекта.

ЛС представляет собой высокоточный, полностью автономный, портативный прибор способный в короткое время получать исчерпывающие данные. Сканер обеспечивает уникальную и непревзойденную технологию сбора информации об объекте. Принцип действия ЛС основан на сплошном высокоскоростном измерении расстояний до объекта. Измерения проводятся со скоростью 2000–200000 импульсов в секунду и одновременно заносятся во внутреннюю память сканера.

При использовании ЛС не нужен непосредственный доступ к объекту, не нужны отражатели или другие приспособления, необходима лишь прямая видимость.

Результатом съёмки является пространственная модель объекта, описанная огромным количеством точек, каждая из которых имеет координаты X , Y , Z . Четвертой характеристикой для каждой точки является значение интенсивности отраженного сигнала. Это очень удобно для визуализации измерений. Интенсивность отраженного сигнала зависит от составляющего материала объекта, его структуры цвета и т.д.

Пространственная модель объекта, описанная множеством точек, называется «облаком точек». С помощью специального программного обеспечения полученные «облака точек» «сшиваются» друг с другом. Объединенное «облако точек» может быть трансформировано в любую требуемую систему координат.

На полученной пространственной модели выполняют измерения различных геометрических параметров (расстояния, углы, диаметры, радиусы кривизны и т.д.). Также «облако» можно вращать, виртуально меняя положение наблюдателя и угол зрения.

После первичной обработки данных наземного сканирования, выполняется построение векторных моделей. Это осуществляется построением треугольников с вершинами в точках «облака» (триангуляционная или полигональная модель), либо используется набор примитивов (точка, вектор, плоскость, цилиндр, сфера и т.д.). Полученные векторные данные экспортируются в программы, которые работают с трехмерной векторной графикой, такие как: AutoCad, ArcView, MicroStation и другие.

ЛС дает существенное преимущество в сравнении с аналогичным геодезическим оборудованием, при съемке замкнутых областей, примером которых могут служить нефтеналивные резервуары и технологически сложные производственные помещения.

Сферы применения наземного лазерного сканирования (НЛС)

Архитектура и строительство. Данные ЛС с успехом используются для составления проектов надстроек или реконструкции сооружений и памятников. Отпадает необходимость проводить сложные обмерные работы или съёмку труднодоступных фасадов. Имея трёхмерную модель сложной поверхности, оператор может виртуально дорабатывать модель до требуемого результата, тем самым, определяя необходимую степень доработки.

Горнодобывающая промышленность. Путём совмещения моделей, созданных по данным разных циклов, вычисляются величина и направление деформации практически в любой точке поверхности. Многие объекты горной отрасли и строительства, начиная с отвалов горной породы и заканчивая дорожной отсыпкой или строительными котлованами, требуют определения объёмов. Выполнить съёмку и вычислить объём даже протяжённого и недоступного объекта с погрешностью менее 1% можно в течение нескольких часов (Геокосмос, 2007).

Инвентаризация объектов недвижимости. На основе данных НЛС выполняется расчет напряженно-деформированного состояния зданий, разрабатываются рекомендации по восстановлению эксплуатационной надежности (Inigeo, 2006).

Лесное хозяйство и лесная промышленность. С помощью НЛС и цифровых фотокамер, возможно, определять следующие характеристики: видовой состав насаждений, диаметры стволов на любой высоте без валки дерева, высоту деревьев, площадь проекции, горизонтальную и вертикальную протяженность кроны, наличие пороков и повреждений вредителями, количество сучков на единицу площади ствола. НЛС возможно применять при обследовании мест рубок, на предмет наличия оставленных порубочных остатков и их запаса. На нижних и верхних складах лесозаготовительных предприятий, с целью определения точного объема заготовленной древесины. При закладке постоянных пробных площадей, составлении таблиц хода роста (Haala et al., 2004, Thies and Spiecker, 2004).

Маркшейдерия. Высокая производительность и оперативность процесса лазерного сканирования совместно с возможностью оперативного контроля полевых измерений позволяет решать задачи по предупреждению различного рода аварий. Отдельной сферой применения технологии лазерного сканирования

является контрольно-учетная функция, например, получая трехмерную цифровую модель карьера, решаются задачи вычисления объемов добычи полезного ископаемого. Имея данные, полученные при помощи лазерного сканера, возможно постоянное редактирование модели карьера после каждого взрыва очередного блока и выемки породы или руды. Многие сканеры позволяют получать модель объекта с точностью от сантиметра и меньше, что более чем достаточно, для поверхности склонов карьеров имеющих не простую форму (Маркшейдерские технологии, 2006).

Нефтегазодобывающая промышленность. Результаты лазерного сканирования сооружений нефтегазового комплекса могут быть использованы для решения целого ряда задач: восстановление исполнительной документации, инвентаризация оборудования, обнаружение проектных несоответствий, проектирование дополнительных установок, деформационный мониторинг сооружений, определение реальных объемов емкостей и многое другое (Геокосмос, 2007).

Оценка последствий чрезвычайных ситуаций, пожаров, аварий и т.п. С помощью лазерных сканирующих систем можно не только осуществлять мониторинг сложных зданий и сооружений, но и фиксировать состояние мест аварий и катастроф с получением реальной картины произошедшего. Также возможно осуществлять привязку реальной картины произошедшего, к опорной системе координат (Геокосмос, 2007).

Электроэнергетика. С помощью лазерного сканирования выполняется съемка технологических площадок и определение геометрических параметров высоковольтного оборудования, математическое моделирование существующих ЛЭП в части изменения стрел провеса, габаритов, натяжений проводов, величин механической нагрузки на опоры и др. в условиях изменения климатических условий и электрической нагрузки. Мониторинг состояния растительности и выявление проблемных участков возможных замыканий. Подготовка данных для планирования мероприятий по очистке полосы отчуждения (ГеоПОЛИГОН, 2007).

Наземные лазерные сканеры также с успехом применяются в землеустройстве, геологии и археологии.

Характеристики приборного обеспечения для наземного лазерного сканирования представлены в таблице 45.

Программное обеспечение (ПО) для обработки данных наземного лазерного сканирования

Данные лазерного сканирования представляют собой «облако точек» с набором характеристик для каждой точки. Для обработки материалов сканирования и создания по первично обработанным материалам моделей объектов, используется специализированное программное обеспечение ПО. Условно ПО можно разделить на 2 класса – базовое и дополнительное. Базовое программное обеспечение зависит от используемой аппаратной части и поставляется производителем оборудования. К базовому ПО относятся программы, основными функциями которых являются управление конкретным прибором, аккумуляция данных измерений, генерация пространственных координат точек, трансформация сканов, экспорт данных в обменные форматы. Эти программы обычно «производят» облако точек высокой плотности или триангуляционную сеть. Дополнительные программные средства являются универсальными, с точки зрения используемого оборудования, их основное предназначение, это

Таблица 45. Современные системы наземного лазерного сканирования

Фотография прибора	Характеристики
	Производитель: Optech (Канада) Модель: ILRIS-3D Максимальное измеряемое расстояние: 1500 метров Длинная волны лазера: 1500 нм Встроенная цифровая камера 2 миллиона пикселей Поле зрения сканирования: 40×40° Метод измерений: фазовый Точность измерения расстояния: 7 мм на 100 метров Скорость сканирования: 2000 точек/сек www.optech.ca
	Производитель: Optech (Канада) Модель: ILRIS-360 Максимальное измеряемое расстояние: 1500 метров Длинная волны лазера: 1500 нм Встроенная цифровая камера 6 миллионов пикселей Поле зрения сканирования: 360×360° Метод измерения: фазовый Точность измерения расстояния: 7 мм на 100 метров Скорость сканирования: 2000 точек/сек. www.optech.ca
	Производитель: iQvolution (Германия) Модель: FARO iQsun 880 Максимальное измеряемое расстояние: 76 метров Длинная волны лазера: 785 нм Поле зрения сканирования: 320×360° Метод измерений: фазовый Точность измерения расстояния: 3 мм на 10 метров Точность определения положения в пространстве: 3.5 мм на 10 метров Скорость сканирования: > 120000 точек в секунду Полный вес системы: 27.5 кг www.jena.ru
	Производитель: Leica Geosystems (США) Модель: CyraX HDS2500 Максимальное измеряемое расстояние: до 100 метров Поле зрения сканирования: 40×40° Метод измерений: импульсный Точность измерения расстояния: 4 мм на 50 метров Точность определения положения в пространстве: 6 мм на 50 метров Скорость сканирования: 1000 точек/сек. Полный вес системы: 28 кг www.leica-geosystems.com
	Производитель: Leica Geosystems (США) Модель: HDS3000 Максимальное измеряемое расстояние: 100 метров Длинная волны лазера: 532 нм Поле зрения сканирования: 270×360° Метод измерения: импульсный Точность измерения расстояния: 4 мм на 100 метров Точность определения положения в пространстве: 6 мм на 50 метров Скорость сканирования: до 1800 точек/сек. Полный вес системы: 50 кг www.leica-geosystems.com

	Производитель: Leica Geosystems (США) Модель: CyraX HDS4500 Максимальное измеряемое расстояние: 53.5 метров Длина волны лазера: 690 нм Поле зрения сканирования: 310×360° Метод измерений: фазовый Точность измерения расстояния: > 3 мм на 100 метров Точность определения положения в пространстве: > 6 мм на 10 метров Скорость сканирования: до 500000 точек/сек. Полный вес системы: 34.5 кг. www.leica-geosystems.com
	Производитель: Leica Geosystems (США) Модель: HDS6000 Максимальное измеряемое расстояние: 53.5 метров Поле зрения сканирования: 310×360° Метод измерений: фазовый Скорость сканирования: 500000 точек/сек. Интерфейс передачи данных: Ethernet/Bluetooth/USB 2.0 www.leica-geosystems.com
	Производитель: Riegl LMS (Австрия) Модель: LMS-Z210i Максимальное измеряемое расстояние: до 400 метров Минимальное измеряемое расстояние: 4 метра Поле зрения сканирования: 80×360° Метод измерений: импульсный Точность измерения расстояния: 15 мм на 400 метров Точность определения положения в пространстве: 6 мм на 100 метров Скорость сканирования: до 12000 точек/сек. Полный вес системы: 31 кг www.riegl.ru
	Производитель: Riegl LMS (Австрия) Модель: LMS-Z360i Максимальное измеряемое расстояние: до 200 метров Минимальное измеряемое расстояние: 1 метр Поле зрения сканирования: 90° x 360° Метод измерений: импульсный Точность измерения расстояния: 6 мм на 200 метров Точность определения положения в пространстве: 6 мм на 100 метров Скорость сканирования: до 18000 точек/сек. Полный вес системы: 31 кг www.riegl.ru
	Производитель: Mensi-Trimble (США) Модель: GS200 Максимальное измеряемое расстояние: 350 метров Минимальное измеряемое расстояние: 1 метр Встроенная цифровая камера: 9 миллионов пикселей Поле зрения сканирования: 60×360° Метод измерения: импульсный Точность измерения расстояния: 1.4–6,5 мм Скорость измерения: более 5000 точек в секунду Полный вес системы: 37 кг www.navgeocom.ru

	Производитель: Trimble (США) Модель: GX 3D Максимальное измеряемое расстояние: 350 метров Поле зрения сканирования: 60×360° Метод измерения: импульсный Точность измерения расстояния: 7 мм на 100 метров Точность определения местоположения: 12 мм на 100 метров Скорость измерения: до 5000 точек в секунду www.trimble.com
	Производитель: Callidus Precision Systems GmbH (Германия) Модель: Callidus 3D Максимальное измеряемое расстояние: до 80 метров Поле зрения сканирования: 140×360° Метод измерений: импульсный Точность измерения расстояния: до 32 метров ± 5 мм Скорость измерения: 1750 точек в секунду Сканер сертифицирован Госстандартом РФ как средство измерений. www.navgeocom.ru
	Производитель: Zoller+Fröhlich GmbH (Германия) Модель: IMAGER 5003 Максимальное измеряемое расстояние: 53 метра Минимальное измеряемое расстояние: 1 метр Поле зрения сканирования: 310×360° Метод измерений: фазовый Точность измерения расстояния: < 5 мм на 50 метров Скорость измерения: до 500000 точек/сек www.zf-laser.com
	Производитель: Zoller+Fröhlich GmbH (Германия) Модель: IMAGER 5006 Максимальное измеряемое расстояние: 79 метров Поле зрения сканирования: 310×360° Метод измерений: фазовый Точность измерения расстояния: ≤ 1 мм на 100 метров Скорость измерения: 500000 точек/сек Интерфейс передачи данных: Ethernet/Bluetooth/USB 2.0 www.zf-laser.com

построение трехмерных моделей или планов (разрезов, сечений и т.п.) на основе облака точек или исходной сети. Сегодня такое разделение является весьма условным, поскольку производители базового ПО стремятся встраивать в него функции моделирования, классификации точек, распознавания объектов и т.п.

3Dipsos (поставляется со сканерами Trimble, США). Средство для моделирования технологических установок и промышленных площадок. Используется для создания трехмерных моделей сложных технологических установок, промышленных площадок, цехов. Программа представляет собой мощное профессиональное средство как для создания модели, состоящей из графических примитивов, так и для создания триангуляционных нерегулярных сетей. В настоящее время 3Dipsos используется для моделирования сложных промышленных установок, состоящих из огромного количества труб, профилей, фланцев, вентилях и т.д.

Real Works Survey (поставляется со сканерами Trimble, США). Назначение программного обеспечения – обработка данных наземного лазерного сканирования. Обработка включает в себя сшивку (геопривязку), подготовку точечной

модели (чистку, разрезание) и непосредственно обработку, вид которой зависит от способа представления конечного результата. Основные особенности RWS, отличающие этот продукт от аналогичных – универсальность, высокая скорость освоения и простота работы.

PolyWorks (поставляется со сканерами Optech, Канада). Программный продукт PolyWorks не является Cad-системой или графическим редактором, а предназначен для визуализации облаков точек, уравнивания (сшивки отдельных сканов в единое облако, оценки точности сшивки), трансформации данных в заданную систему координат, построения трехмерных моделей объектов, анализа данных и экспорта в ПО заказчика. PolyWorks состоит из нескольких модулей, которые позволяют работать с очень большими объемами данных. Все модули находятся под руководством оболочки Module Access Center, где и осуществляются основные настройки системы.

Riscan PRO (поставляется со сканерами Riegl LMS, Австрия). Программное обеспечение является проектно ориентированным продуктом, весь объем данных, полученных в рамках одного проекта по проведению измерений, организуется и хранится в соответствии с проектной структурой программного обеспечения RiSCAN PRO. Программный комплекс предназначен для сокращения времени получения данных в поле, при этом предлагая средства визуальной проверки полноты данных прямо в поле в трехмерном виде. Автоматизированные сканы опорных точек (например, отражающих объектов) позволяют пользователю легко размещать данные сканирования в заранее определенной системе координат с высоким разрешением. Помимо сбора данных, программное обеспечение RiSCAN PRO предлагает возможности для постобработки данных. В базовый комплект программного обеспечения входят такие функции как построение ячеек по облакам точек, представляющим данные сканирования, наделение каждого лазерного измерения информацией о цвете, создание неискаженных, а также объединенных изображений с высоким разрешением для текстурирования ячеек, прореживание облаков точек, построение объекта по облакам точек и многое другое.

Cyclone (поставляется со сканерами Leica Geosystems, США). Программный комплекс предназначен для обработки данных наземного лазерного сканирования. Возможности отдельных модулей программного комплекса: Scan – настройка сканера, Register – уравнивание отдельных «облаков точек», Model – обработка точечных данных и CloudWorx – вывод и обработка «облака точек» в программе AutoCAD и MicroStation.

iQscene 1.1 (поставляется со сканерами iQvolution, Германия). Программный комплекс призван проводить первичную обработку данных, объединять их в единую систему и хранить эту уникальную информацию для последующего экспорта в системы проектирования мировых лидеров этой индустрии. Поддерживается множество форматов. Экспорт возможен как всего точечного пространства, так и по наиболее важным фрагментам. Кроме того, она позволяет оперативно пользоваться промышленным виртуальным пространством, за счёт той интереснейшей функции, про которую шла речь выше (когда каждый инженер на предприятии в состоянии посетить самые удалённые уголки, не теряя времени на прогулки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии на практических примерах мы показали, что метод лазерной локации Земли и леса перспективен, интенсивно развивается и совершенствуется во многих странах мира, а также и в России. На сегодняшний день метод апробирован, технологически пригоден и адаптирован для практики инвентаризации и мониторинга земель и лесов. Использование лазерного зондирования, трехмерной компьютерной графики и математического моделирования позволяют вывести изучение структуры земных покровов и лесных насаждений на принципиально новый уровень.

Вместе с тем еще имеется ряд задач теоретического плана, решение которых позволит поднять лазерную локацию на более высокий уровень совершенства.

В частности требуется развитие общей теории лазерного зондирования леса, включая вычленение листовой поверхности из средней свободной компоненты лазерного луча, проходящего через оптически дисперсные структуры крон деревьев.

Другое важное направление исследований – моделирование лесного полога с целью более полной интерпретации спектральной плотности получаемых данных, так как математическая теория сама по себе не может обеспечить все необходимые ключи для получения достоверных результатов.

Наши исследования показали, что даже в насаждениях с регулярной структурой полога, состоящих из деревьев с одинаковыми размерами крон, преобразование Фурье обычно не приводит к получению одного спектрального максимума в длине волны, соответствующей одному диаметру кроны. Моделируемая траектория полета не всегда проходит через центр кроны, разделяя ее на две равные части, а чаще рассекает кроны асимметрично – на две неравные части. В результате преобразования Фурье профиль полога представляет собой преимущественно мультимодальные спектральные кривые, а не единичные спектральные максимумы, соответствующие диаметру кроны. Спектральный «портрет» значительно сложнее в насаждениях с высокими коэффициентами изменчивости диаметров крон. На изменение спектральной плотности оказывают влияние распределение по диаметрам крон и характер пространственного размещения деревьев в древостое.

На наш взгляд, очень перспективно дальнейшее развитие и совершенствование приборной базы и параметризации лазерной локации и синергетического использования сенсоров различных типов (радаров, многоспектральных сканеров, тепловизоров и др.) для определения биомассы лесной растительности и ее пирологических характеристик в различных приложениях.

На данном этапе технологического развития наибольший интерес для производства лазерной съемки земных и лесных покровов представляют приборы серии ALTM (2050/2070/3100/3100EA/Gemini) производства канадской компании Optech Inc., которые на сегодняшний день являются наиболее совершенными в мире воздушными лазерными сканирующими системами и, в отличие от других моделей, обеспечивают наивысшую достижимую частоту сканирования – более 100 тыс. измерений в секунду. Наибольшая плотность точек сканирования при этом составляет 1 точка на 5–7 см поверхности, что принципиально важно для съемки и измерений леса.

Другое не менее важное направление – верификация результатов лазерной съемки с данными наземных измерений как единственного способа оценки

истинной точности результатов локации. Здесь требуется проведение дополнительных исследований по выявлению и определению параметров наземной калибровки лазерно-локационных данных.

С некоторым сожалением мы должны констатировать, что российские исследования в области применения методов лазерного зондирования Земли и леса в настоящее время явно не достаточны, что в значительной мере объясняется скудностью государственного финансирования науки в данной области и невыраженной заинтересованностью основных потенциальных пользователей и заказчиков новейших и высокоэффективных технологий дистанционного мониторинга, прежде всего Министерства природных ресурсов РФ, а также ряда других министерств и ведомств.

Мы надеемся, что публикация данного учебного пособия будет способствовать успешному развитию метода лазерной локации в России. Вместе с тем, авторы отдают себе отчет в том, что настоящее учебное пособие не лишено недостатков и будут признательны читателям за высказанные замечания и предложения, которые обязательно будут учтены в дальнейшем, при переизданиях этой книги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникин И.В., Аджели М.А., Онегов В.Л.** Метод нечеткого выделения контуров изображений. Казань: Казанский гос. техн. ун-т, 2003.
- Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н. Васильев А.П.** Радиогеодезические и электроннооптические измерения. М.: Недра, 1985. 303 с.
- Большая Советская Энциклопедия (БСЭ).** М., Т.1. 1978.
- Бруевич П.Н.** Фотограмметрия: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1990. 285 с.
- Геокосмос.** www.geokosmos.ru, 2007.
- ГеоЛИДАР.** www.geolidar.ru, 2007.
- ГеоПОЛИГОН.** www.geopolygon.ru, 2007.
- Данилин И.М.** Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири. Автореф. дис. докт. с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2003. 34 с.
- Данилин И.М., Красиков И.И.** Определение фитомассы древостоев лазерно-локационным методом // Лесн. таксация и лесоустройство, 2001, 1 (30). С. 138–140.
- Данилин И.М., Медведев Е.М.** (а) Мониторинг лесов в режиме реального времени на основе лазерной локации и цифровой аэро- и космической съемки. Лидерство высоких технологий в таксации и контроле лесопользования // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семина с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 119–127.
- Данилин И.М., Медведев Е.М.** (б) Оценка структуры и состояния лесного покрова на основе лазерного сканирования и цифровой аэро- и космической съемки // География и природные ресурсы, 2005, 3. С. 109–113.
- Данилин И.М., Медведев Е.М.** Современные концепции дистанционного мониторинга лесных экосистем. Основные подходы и решения // ГЕО-Сибирь-2006. Т.2. Экономика природопользования и недвижимости. Землеустройство, лесоустройство и кадастры. Ч.2: Сб. мат. междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24–28 апреля 2006 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2006. С. 194–204.
- Данилин И.М., Медведев Е.М., Абэ Н.И. и др.** Высокие технологии XXI века для аэрокосмического мониторинга и таксации лесов. Задачи исследований и перспективы использования // Лесн. таксация и лесоустройство, 2005, 1 (34). С. 28–38.
- Данилин И.М., Сведда Т.** Лазерное профилирование лесного полога // Лесоведение, 2001, 6. С. 64–69.
- Данилин И.М., Черкашин В.П., Михайлова И.А.** Компьютерное картографирование и дистанционное зондирование в геоинформационных системах: Учеб. пособ. Красноярск: СибГТУ, 1998. 98 с.
- Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России.** М: ВНИИЦлесресурс, 1995. Часть 1. 175 с.; Часть 2. 112 с.
- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Балдина Е.А. и др.** (а) Цифровая стереоскопическая модель местности: экспериментальные исследования. М.: Научный мир, 2004. 244 с.
- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.** (б) Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Academia, 2004. 333 с.
- Лобанов А.Н.** Фототопография. М.: Недра, 1983.
- Маркшейдерские технологии – основа качества, производительности и безопасности,** М.: Фирма «Г.Ф.К.», 2006. 14 с.
- Медведев Е.М.** Основные тенденции развития и практического применения прикладной лазерной локации и систем картографирования реального времени // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семина с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 110–118.
- Медведев Е.М.** Разработка и исследование технологий топографо-геодезических работ при инвентаризации и реконструкции воздушных линий электропередачи по материалам авиационной лазерно-локационной съемки. Автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.34. М.: МИИГАиК, 2003. 23 с.
- Медведев Е.М., Григорьев А.В.** С лазерным сканированием на вечные времена // Геопрофи, 2003, 1. С. 5–10.
- Медведев Е.М., Мельников С.Р.** Можно ли дальше жить без лазерного сканирования? // Маркшейдерский вестн., 2002, 4. С. 4–9.

- Медведев Е.М., Мельников С.Р.** Преимущества применения лазерных сканирующих систем наземного и авиационного базирования // Горн. пром-сть, 2002, 5. С. 2–4.
- Мельников С.Р.** Концепция использования современных аэросъемочных и геоинформационных технологий в компании «Геокосмос» // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семина. с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 106–109.
- Мельников С.Р.** Лазерное сканирование. Новый метод создания трехмерных моделей местности и инженерных объектов // Горн. пром-сть, 2001, 5. С. 3–5.
- Науменко А.И.** Наземное лазерное сканирование // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семина. с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 130–131.
- Общие сведения о ГЛОНАСС.** Координационный научно-информационный центр. М.: МО РФ, 2005. 7 с.
- Основы импульсной лазерной локации:** Учебное пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др. Под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 512 с.
- Пестов К.А.** Программные средства обработки воздушных лазерно-локационных данных на примере программного комплекса Altexis // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семина. с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 127–129.
- Программный комплекс ALTEXIS.** М.: Геокосмос, 2007.
<http://www.geokosmos.ru/technologies/airborne/altexis/>
- Серапинас Б.Б.** Математическая картография. Учебник для вузов. М.: Академия, 2005. 336 с.
- Серапинас Б.Б.** Основы спутникового позиционирования. М.: Изд-во МГУ, 1998. 82 с.
- Солодухин В.И., Жуков А.Я., Мажугин И.Н.** Возможности лазерной аэрофотосъемки профилей леса // Лесн. хоз-во, 1977, 10. С. 53–58.
- Сухих В.И.** Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: Учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
- Столяров Д.П., Солодухин В.И.** О лазерной таксации леса // Лесн. журн., 1987, 5. С. 8–15.
- Усольцев В.А.** Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.
- Фарбер С.К., Соколов В.А., Данилин И.М. и др.** Метод ландшафтно-статистической лесоинвентаризации на основе лазерного зондирования и космической съемки лесного покрова // Лесоведение, 2003, 5. С. 1–7.
- Шануров Г.А.** Радиогеодезические и электроннооптические измерения. Светодальномеры. М.: МИИГАиК, 1991. 46 с.
- Шануров Г.А., Мельников С.Р.** Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ: Учеб. пособ. М.: МИИГАиК, 2001. 136 с.
- Andersen H.E., McGaughey R.J., Reutebuch S.E.** Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data // Rem. Sens. Environ., 2005, 94: 441–449.
- Choi C., Jennings A., Hulskamp J.** Learning to segment using fuzzy boundary cell features // Complexity Int., 1996, 6 (Web publ.) <http://www.csu.edu.au/ci/vol03/csc96f/csc96f.html>
- Danilin I.M., Medvedev E.M.** Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia) // Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci., 2004, XXXVI (8/W2): 139–144.
- Danilin I., Medvedev E., Sweda T.** Use of airborne laser terrain mapping system for forest inventory in Siberia // Precision Forestry. Proc. First Int. Precision Forestry Cooperative Symp., Seattle, Washington, June 17–20, 2001, University of Washington. P. 67–75.
- Eichorn F.** Ertragstafeln fuer die Weisstanne. Berlin, 1902.
- Erdas** Imagine Professional for Windows. Version 8.5. Copyright © 2002 ERDAS, Inc.
<http://www.erdas.com/home.asp>
- Falkenried L.** Positionierung im Wald mithilfe von Satelliten // AFZ DerWald, 2004, 23 (6): 1240–1241.
- Gobakken T., Næsset E.** Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data // Scand. J. For. Res., 2004, 19 (6): 529–542.
- Inigeo**, 2006. http://www.inigeo.ru/rus/pub_txt1.html

- Haala N., Reulke R., Thies M., Aschoff T.** Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigation in forest applications and tree species recognition // [http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2004/Panoramic Dresden thies.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2004/Panoramic_Dresden_thies.pdf)
- Haralick R.M., Stanley R.S., Xinhua Z.** Image analysis using mathematical morphology // IEEE Transact. Pattern Anal. Machine Intelligence, 1987, 9 (4): 532–550.
- Harding D.J., Lefsky M.A., Parker G.G., Blair J.B.** Laser altimeter canopy height profiles, methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests // Rem. Sens. Environ., 2001, 76: 283–297.
- Hill J.M., Graham L.A., Henry R.J. et al.** Wide-area topographic mapping and applications using airborne light detection and ranging (LIDAR) technology // Photogram. Eng. Rem. Sens., 2000, 66(8): 908–960
- Holmgren J.** Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning // Scand. J. For. Res., 2004, 19 (6): 543–553.
- Holmgren J., Persson A.** Identifying species of individual trees using airborne laser scanner // Rem. Sens. Environ., 2004, 90 (4): 415–423.
- Hudak A.T., Lefsky M.A. et al.** Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height // Rem. Sens. Environ., 2002, 82 (2/3): 397–416.
- Hyde P., Dubayah R., Walker W. et al.** Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy // Rem. Sens. Environ., 102, (1-2), 2006: 63-73.
- Kulešis A., Bajorunas A.** GPS technologiju taikymo matuojant miskų plotus tyrimai (Использование GPS-технологии при съёмке лесов) // Geod. Ir. kartogr., (Lietuva), 2001, 27 (3): 118–125.
- Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment.** Proc. ISPRS working group VIII/2, Freiburg, Germany, Oct., 3-6 2004. Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci., 2004, XXXVI (8/W2). ISSN 1682–1750. 344 p.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Harding D.J. et al.** Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes // Global Ecol. & Biogeogr., 2002, 11 (5): 393–400.
- Lefsky M.A., Turner D.P., Guzy M., Cohen W.B.** Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity // Rem. Sens. Environ., 2005, 95 (4): 549–558.
- Lim K.S., Treitz P.M.** Estimation of aboveground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators // Scand. J. For. Res., 2004, 19 (6): 558–570.
- Lim K.S., Treitz P.M., Wulder M.A. et al.** Lidar remote sensing of forest structure // Progress in Physical Geography, 2002, 27: 88–106.
- Maltamo M., Eerikainen K., Pitkanen J. et al.** Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions // Rem. Sens. Environ., 2004, 90 (3): 319–330.
- Manual of Photogrammetry**, 5th Edition, ASPRS, 2004.
- Matheron G.** Filters and lattices // Image Analysis and Mathematical Morphology. Vol. 2 / J. Serra ed., Theor. Adv., Chpt. 6. Acad. Press, Inc., 1988.
- Means J.E., Acker S.A., Fitt B.J. et al.** Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar // Photogram. Eng. & Rem. Sens., 2000, 66 (11): 1367–1371.
- Means J.E., Hopkins P.F., Jensen J.R. et al.** Industry and academia explore remote sensing applications // J. For., 2001, 99 (6): 4–6.
- Medvedev E.M.** Digital automatic orthophoto production with laser locator and aerial photography data // Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci., 2003, XXXII (6W8/1).
- Medvedev E.M.** Simultaneous recording of LIDAR and aerial imagery // GIM Int., 2002, 1.
- Morsdorf F., Meier E., Kötz B. et al.** LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management // Rem. Sens. Environ., 2004, 92 (3): 353–362.
- Næsset E., Bollandsås O. M., Gobakken T.** Comparing regression methods in estimation of biophysical properties of forest stands from two different inventories using laser scanner data // Rem. Sens. Environ., 2005, 94 (4): 541–553.
- Næsset E., Gobakken T., Holmgren J. et al.** Laser scanning of forest resources: the Nordic experience // Scand. J. For. Res., 2004, 19 (6): 482–499.
- Nelson R., Short A., Valenti M.** Measuring biomass and carbon in Delaware using an airborne profiling LIDAR // Scand. J. For. Res., 2004, 19 (6): 500–511.
- Optech Incorporated official website**, 2007. <http://www.optech.ca/>
- Pal S.K., Ghosh A.** Fuzzy geometry in image analysis // Fuzzy sets and systems, 1992, 48.

- Patenaude G., Hill R. A., Milne R. et al.** Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing // *Rem. Sens. Environ.*, 2004, 93 (3): 368–380.
- Persson Å., Holmgren J., Söderman U.** Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanning // *Photogram. Eng. & Rem. Sens.*, 2002, 68 (9): 925–932.
- Proceedings** of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, Sept. 3-4, 2003, Umeå, Sweden. Working Paper 112 2003. Swedish Univ. of Agricultural Sci. Dpt. For. Res. Manag. & Geomatics. ISSN 1401–1204. 273 p.
- Remote Sensing** of Forest Environments. Concepts and Case Studies / Ed. by M.A. Wulder and S.E. Franklin, Kluwer Acad. Pub., 2003, 519 p.
- Riano D., Chuvieco E., Condes S. et al.** Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar // *Rem. Sens. Environ.*, 2004, 92 (3): 345–352.
- St-Onge B., Jumelet J., Cobello M., Vega C.** Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar // *Can. J. For. Res.*, 2004, 34 (10): 2122–2130.
- Soille P.** Morphological image analysis: principles and applications. Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- Thies M., Spiecker H.** Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories // *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci.*, 2004, XXXVI (8/W2): 192–197.
- Wulder M.A., Hall R.J., Coops N.C., Franklin S.E.** High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // *BioScience*, 2004, 54 (6): 511–521.
- Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Maltamo M.** Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning // *Rem. Sens. Environ.*, 2004, 90 (4): 451–462.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Список используемых сокращений

Русские

АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
БНК	Бортовой навигационный комплекс
ГИС	Геоинформационная система
ИС	Инерциальная система
ЛЛ	Лазерный локатор, лазерно-локационный
ЛЭП	Линия электропередачи
МПЗ	Мгновенное поле зрения
ОЭБ	Опико-электронный блок
РЛ	Радиолокация, радиолокационный
СБВ	Специализированный бортовой вычислитель
СК	Система координат
ЦМР	Цифровая модель рельефа

Английские

ALTM	Airborne Laser Terrain Mapper
CAD	Computer Aided Design
DTM	Digital Terrain Model
GIS	Geographical Information System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigational System
IRS	Inertial Reference System
POS	Position and Orientation System
PPS	Pulse Per Second
RTK	Real Time Kinematic
TIM	Time Interval Meter
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS-84	World Geodetic System
3D	Three Dimensional

**Приложение 2. Обзор воздушных лазерных сканеров
(по данным журнала «GIM International», декабрь 2006)**

Примечания:

1. Продукты в таблице расположены так, как в источнике, т.е. в порядке английского алфавита по названиям компаний производителей.
2. В таблице представлены только данные, которые компании сами официально представили в качестве характеристик производимых ими лидаров. Т.е. представленные данные выражают мнение каждой компании о своем продукте и поэтому они не могут считаться вполне объективными.
3. Данная таблица дает самое общее представление о производительности и других технических характеристиках аэросъемочных лидаров, так как почти все приведенные технические параметры нуждаются в дополнительной интерпретации для того, чтобы выступать в качестве объектов анализа. Есть основания полагать, что некоторые данные не соответствуют действительности.
4. Достоверность приведенных данных по продукту ALTM 3100 Optech Inc. гарантируется компанией ГеоЛИДАР.
5. Публикуется с сокращениями.

Производитель	Leica Geosystems GIS & Mapping	Mosaic Mapping Systems Inc.	Optech Incorporated	Riegl LMS GmbH	Riegl LMS GmbH	Terra Point USA, Inc.	TopEye	TopEye	TopoSys GmbH
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование	ALS-50 Airborne Laser Scanner	ALMIS 350	ALTM 3100	LMS-Q140i	LMS-Q280i	ALTMS 4036	TopEye MK 1	TopEye MK II	Falcon
Дата ввода в эксплуатацию / последнее обновление	1–2003/ 2–2006	2000/ 2006	02–2004	2002	02-2004	1998 / 2006	1996	2004	1996/ 2006
Лазер									
Тип/класс лазера	Class IV	Class I	Class IV	Class I	Class I	Class IV	Diod pumped Dd: YAG/ Class IIIB	Fiber laser /Class IIIB	Class IV
Расстояние, безопасное для зрения, м	< 200 м для незащищенных глаз, ~1000 м бинокль	0	80	0	0	70 (в полете)	40/60/120/220/450 в зависимости от режима	41/60/120/220 в зависимости от режима	0.27
Метод сканирования	Осциллирующее зеркало	Вращающееся зеркало	Осциллирующее зеркало	Вращающееся зеркало	Вращающееся зеркало	Вращающееся зеркало	Двойная система зеркал	Вращающееся зеркало Helix	Волоконно-оптический метод
Частота сканирования (min-max), КГц	83	30	33–100	30	24	0–40	7	100	83
Рабочая длина волны, мкм	1.064	0.9	1.064	Ближняя инфракрасная зона спектра	Ближняя инфракрасная зона спектра	1.064	1.064	1.064	1.56
Длина импульса, нс	~12	15	7	Не определена	Не определена	10	6–8	4	5
Расходимость луча (милирадианы)	0.33	3	0.3 или 0.7	3	0.5	0.75	1, 2, 4 или 8	1	1
Максимальный угол сканирования (град)	75	60	50	40	22.5	36	20	20	7.2
Максимальное число регистрируемых откликов на каждый импульс	3 первых	1	4, включая последний	Первый или последний	Первый или последний	4	4	3	9

Окончание Приложения 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дополнительные измерения	Интенсивность возвращенного сигнала	Интенсивность возвращенного сигнала	Интенсивность возвращенного сигнала, регистрация формы волны отражения (до 15 отсчетов)	Интенсивность возвращенного сигнала	Интенсивность возвращенного сигнала	Интенсивность возвращенного сигнала	Интенсивность возвращенного сигнала	Тип/интенсивность возвращенного сигнала / полная форма волны	Интенсивность возвращенного сигнала
Производитель	Leica Geosystems GIS & Mapping	Mosaic Mapping Systems Inc.	Optech Incorporated	Riegl LMS GmbH	Riegl LMS GmbH	TerraPoint USA, Inc.	TopEye	TopEye	TopoSys GmbH
Система позиционирования									
Тип GPS	12-канальный, двухчастотный	Двухчастотный	Любой двухчастотный GPS приемник с выходным форматом Rinex	N/A	N/A	Двухчастотный	Trimble 4700	Trimble 4700	Trimble 4700
Навигационная система (INS)/ частота, Гц	Applanix POS/AV 200 Гц	100 Гц	Applanix POS/AV 200 Гц	N/A	N/A	200 Гц	HS 764 50 Гц	HS 764 50 Гц	Applanix POS/ AV
Программное обеспечение для постобработки GPS / INS	Applanix POSPAC	Собственное ПО	Applanix POSPAC	N/A	N/A	Собственное ПО	Trimble TTC +TEPP	Trimble TTC + TEPP	Applanix POSPAC
Точность и разрешение									
Угловая точность (roll/pitch/heading), град.	0.005/0.005/0.008	0.02/0.02/0.05	0.005/0.005/0.008	N/A	N/A	0.008/0.008/0.03	N/A	N/A	0.01/0.01/0.02
Разрешение по дальности, I σ, см	1.5	2.5	1.0	2.5	2.0	0.75	2.0	2.0	1.4
Точность по геодезической высоте, I σ, см	15	4	15 (высота до 1000 м) 35 (высота до 3500 м)	N/A	N/A	15	10	10	10
Точность плановых координат, I σ, см	~1/6000 от высоты полета	20	~1/6000 от высоты полета	N/A	N/A	30	10	10	25
Габариты и электропитание									
Лазерный блок, кг, см×см×см	30 кг, 37×56×24	N/A	24 кг, 26×19×57	6 кг, 37.5×14×14	10 кг, 56×20×20	55 кг, 80×50×75	184 кг	184 кг	45 кг
Весь комплекс, кг, см×см×см	64 кг, 48×52×64	30 кг, 50×50×25	76 кг	N/A	N/A	140 кг, 70×55×100	285 кг	285 кг	100 кг
Электропитание	26 A @ 28 В	15 A @ 24 В	35 A @ 28 В	30 Вт	100 Вт	25 A @ 24 В	20–70 A @ 28 В	20–70 A @ 28 В	16 A @ 28 В
Эксплуатация									
Высота полета (минимальная – максимальная, м)	200–4000	0/275/350	80–3500 номинальная, до 4000 м фактическая	300–400	800–1000	500/1000/3000	60/200/960	60/200/960	300/1200/1600
Максимальная продолжительность непрерывной съемки, час	4	Ограничена запасом топлива/аппаратом	7	N/A	N/A	Ограничена запасом топлива/аппаратом	3	4	6
Программное обеспечение для планирования маршрута полета	AeroPlan, ASCOT	Собственное ПО	ALTM Nav.	N/A	N/A	Собственное ПО	MDL приложения	MDL приложения	TopPIT - Mission

Приложение 3. Сравнительные результаты деятельности некоторых ведущих производителей аэросъемочных лидаров

Объем продаж и уровень технической поддержки в России указан на 30.12.2006

Параметр сравнения	Optech	Leica	IGI	TopoSys
Всего продано в мире, начиная с 1995 г.	101	28	Нет данных (достоверно известно об одной продаже в США)	3
Всего продано в России и СНГ	13 (еще 2 заказаны)	1	0	0
Эксплуатируются в настоящее время в России	13	0	0	0
Наличие представительства в России (эксклюзивность)	Да ГеоЛИДАР (эксклюзивный)	Да DATA+ (нет данных)	Нет	ПРИН (нет данных)
Наличие у представителя персонала с опытом практической деятельности	Да	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Наличие авторизованного сервисного центра в Москве	Да	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Наличие сертификата средства измерения в России	Да	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Наличие согласования на установку на летательных аппаратах в России	Да для Ми-8 и его модификаций, Ка-226, Ан-30 ожидается до конца 2006 г.	Нет данных	Нет данных	Нет данных

Приложение 4. Сравнительная таблица технических характеристик наиболее распространенных аэросъемочных лидаров

Примечания:

1. Все представленные в таблице данные получены из технических спецификаций приборов, размещенных на сайтах компаний или предоставленных во время выставок, конференций, презентаций.
2. Некоторые данные противоречат данным из Приложения 1. Это типичное явление для современной лазерной локации.
3. Автор комментариев Е.М. Медведев.

Характеристики	Optech ALTM 3100	Leica ALS-50	IGI Lite- Mapper 2800	TopoSys Falcon	Комментарий
1	2	3	4	5	6
Максимальная информативность (частота лазерных импульсов), кГц	100	83	Более 20 (до 66 в зависимости от высоты)	83	Важнейший параметр. С учетом возможности настройки параметров развертки определяет общую информативность аэрофото-съемочного комплекса, стоимость бита данных, максимальный темп сбора аэросъемочных данных
Количество регистрируемых откликов	4	3	2	2	Дополняет значение частоты лазерных импульсов. С учетом этого параметра максимальная производительность ALTM 4×100 измерений в секунду, ALS 50 3×83 и т. д. Чрезвычайно важен при съемке в условиях покрытых лесом территорий
Регистрация интенсивности	Да	Да	Да	Да	Способствует более полному дешифрированию
Гарантированная регистрация последнего отклика	Да	Нет	Да	Да	Чрезвычайно важно при съемке рельефа в условиях покрытых лесом территорий
Возможность использования различных частот лазерных импульсов	Да 100, 70, 50, 33 кГц	Да	Да	Нет	Позволяет эффективно использовать информационную производительность сканера на различных высотах
Максимальная ширина поля зрения	50°	50°	45° либо 60° (с уменьшенной дальностью и скоростью сканирования)	14.3°	Определяет максимальную ширину полосы захвата
Возможность настройки ширины полосы захвата	Да, от 0 до максимально- го значения	Да, от 0 до максимально- го значения	Нет, только два фиксированных значения	Нет	Наличие такой возможности в сочетании с опцией «компенсации крена» позволяет обеспечить заданную плотность сканирования для любых условий при «щадящих» требованиях к качеству пилотирования. Особенно актуально при выполнении площадной съемки
Класс опасности для зрения	4	4	1	1	В ALTM безопасные условия обеспечиваются наличием двойной дивергенции (снижает безопасную высоту до 80 м) и автоматическим отключением лазера при снижении высоты меньше допустимой. LiteMapper и Falcon полностью безопасны для зрения, так как водянистое тело глаза полностью поглощает излучение. По этой же причине эти приборы «слепы» при наличии даже легкой дымки в атмосфере, либо влаги на поверхности земли
Возможность работы на сверхнизких высотах < 100 м	Да	Нет	Да	Да	В ALTM эта возможность обеспечена наличием режима двойной дивергенции. В LiteMapper и Falcon за счет полной безопасности по зрению

Окончание Приложения 4

1	2	3	4	5	6
Максимальная высота съемки, м	3500	3500	900	1600	Наряду с максимальной шириной поля зрения определяет максимальный захват
Частота лазерных импульсов при работе на максимальной высоте, кГц	33	24	Нет данных	Нет данных	Определяет информативность при максимальной площади покрытия
Наличие гибкой системы развертки (настройка параметров сканирования в зависимости от условий съемки)	Да	Да	Нет	Нет	Важнейший параметр, влияющий на универсальность, т.е. возможность работы в различных приложениях
Возможности по обеспечению равенства продольной и поперечной плотности сканирования	Высокие	Высокие	Отсутствуют	Отсутствуют	Также сильно влияет на универсальность. Наличие такой возможности позволяет выполнять однородное сканирование с любых высот и при любых скоростях
Однородность плотности распределения лазерных точек вдоль линии сканирования	96%	87%	Не определено (фиксированная развертка)	Не определено (фиксированная развертка)	ALTM – практически равномерное распределение точек вдоль линии сканирования, ALS-50 – существенно неравномерно, причем плотность на краях полосы захвата в два раза выше, чем в центре (за счет синусоидальной развертки)
Тип развертки	Пилообразный	Синусоидальный	Фиксированная развертка на базе вращающейся призмы. Параллельные линии	Фиксированная развертка на базе волоконно-оптической схемы. Специальный волнообразный рисунок развертки	Определяет: – возможность настройки (ALTM, ALS-50); – обеспечение равенства продольной и поперечной плотности; – обеспечение однородности вдоль линии сканирования
Фактическое разрешение по дальности между двумя последовательными откликами, м	2.1	2.8	Нет данных	Нет данных	Важный параметр при съемке насыщенных сцен (например, лес)
Возможность изменения дивергенции зондирующего луча	Да	Нет	Да	Нет	Наличие такой возможности позволяет: – расширить диапазон рабочих высот; – получать отклики от тонких объектов (провода распределительных линий, контактная сеть, листва и т.д.)
Возможность установки на внешней подвеске	Да	Нет	Да	Нет	Расширяет номенклатуру летательных аппаратов, позволяет выбирать легкие и дешевые
Наличие изолирующего кожуха (тепло и влагозащита)	Да (рабочий диапазон - от -10°C до +35°C)	Нет	Нет данных	Нет	Позволяет работать в зимних условиях, защищает от влаги при установке на внешней подвеске
Компенсация крена	Да	Да	Нет	Нет	Крайне эффективно при выполнении площадной съемки (эффект гироскопа)
Регистрация формы отраженной волны	Да	Нет	Нет данных	Нет	Чрезвычайно расширяет информативность (в настоящее время нет серьезного математического обеспечения)
Настройка положения сканерного блока	Да	Нет	Да	Нет	В значительной степени способствует универсальности. В наклонном положении можно снимать провода и опоры ЛЭП, стены зданий, лес и т.п.)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
MOSCOW STATE UNIVERSITY ON GEODESY AND CARTOGRAPHY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH
V.N. SUKACHEV INSTITUTE OF FOREST

MINISTRY OF AGRICULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION
KRASNOYARSK STATE AGRICULTURAL UNIVERSITY

INTERNATIONAL INSTITUTE ON FOREST ECOSYSTEM MONITORING

GROUP OF COMPANIES "GEOKOSMOS", "GEOLIDAR", "GEOPOLIGON"

E.M. Medvedev, I.M. Danilin, S.R. Mel'nikov

LASER LOCATION OF EARTH AND FOREST

Textbook

Second Edition, Revised and Enlarged

Recommended by Ministry of Education and Science of the Russian Federation
for interuniversity use as a basis textbook for students learned on following specialities:
120301 "Land Planning", 120302 "Land Cadastre", 120303 "City Cadastre",
260400 "Forest and Forest Park Management", 020800 "Ecology and Nature Management",
013600 "Geoecology", 650400 "Photogrammetry and Remote Sensing",
080800 "Exploration of Natural Resources by Aero-Space Methods",
650300 "Geodesy", 300100 "Applied Geodesy", 300300 "Aerophototopography",
013700 "Cartography", 071900 "Information Systems in Geodesy and Cartography",
072300 "Laser Engineering and Laser Processing",
131200 "Laser Systems in Missile Engineering and Cosmonautics",
190700 "Optoelectronic Instruments and Systems"

MOSCOW – KRASNOYARSK
2007

UDC 528.7(075.8); 621.37; 629.78; 630.52:587/588; 634.0.2
BBK 43.4B672
M 42

E.M. Medvedev, I.M. Danilin, S.R. Mel'nikov.

Laser Location of Earth and Forest: Textbook. – 2-nd edition, revised and enlarged. – Moscow: Geolidar, Geokosmos; Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 2007. – 230 p. (in Russian with summary in English): Fig. 160; Tabl. 45; Ref. 87; Suppl. 4.

ISBN 5-903055-09-5

In this book the matter and principles of laser location are discussed. The data on instrument securing of aerial laser and digital photography survey and results on different projects' implementation in Russia and in foreign countries are shown. Advantages of the newest laser location high-tech methods for earth and forest survey are shown on actual materials, an examples of three dimensional analysis of land surface, forest structure and biomass by laser location data and global positioning system are discussed.

The use of laser location method, combined with digital photography and video, satellite navigation and global positioning, and accompanied with satellite filming in optical and radio diapasons and integrated to geoinformation systems for remote sensing of natural environments, land- and forest planning, make it possible to conduct remote sensing monitoring of lands and forests with high efficiency, minimizing ground-based works and significant time and money saving.

The textbook is written with considering State Educational Standard for the technical and natural sciences disciplines and is meant for completing by students graduate and term papers, guiding laboratory studies and practical works on the following specialities and disciplines: "Land Planning", "Land Cadastre", "City Cadastre", "Monitoring of Natural Resources", "Forest and Forest Park Management", "Aerospace Methods in Forest Management and Landscape Building", "Photogrammetry and Remote Sensing", "Exploration of Natural Resources by Aerospace Methods", "Ecology and Nature Management", "Geoecology", "Geodesy", "Applied Geodesy", "Aerophototopography", "Cartography", "Information Systems in Geodesy and Cartography", "Laser Engineering and Laser Processing", "Laser Systems in Missile Engineering and Cosmonautics", "Optoelectronic Instruments and Systems".

The textbook might be in use by specialists in the field of land- and forest planning, remote sensing methods, geodesy and cartography, ecology and nature management, agriculture and forestry, nature protection, by high school lecturers, scientists, post-graduate and graduate students of land planning, forestry, cartography, geodesy, geography, biological faculties and departments of classical and specialized universities, technological, agricultural, forest technical and polytechnic institutes of higher education.

Scientific Editor

A.S. Isaev – Academician of the Russian Academy of Sciences

Reviewers:

A.P. Guk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department on Photogrammetry and Remote Sensing, Siberian State Geodesy Academy (Novosibirsk);

Yu. F. Knizhnikov – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of Laboratory on Aerospace Methods Geographical Faculty, Moscow State University (Moscow);

V.I. Sukhikh – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Leading Research Scientist for Center on Problems of Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences (Moscow);

N.Ya. Shaparev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department on Computing Physics, Institute on Computing Modeling, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch (Krasnoyarsk)

Approved for publication by Academic Council of V.N. Sukachev Institute of Forest,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

All materials published in this book are protected by copyright, which covers the exclusive rights to reproduce and distribute the materials, as well as all translation rights. No materials published in this book may be reproduced by any forms and means without first obtaining written permission from the owner of author rights.

ISBN 5-903055-09-5

© E.M. Medvedev, I.M. Danilin, S.R. Mel'nikov, 2007

CONTENTS

FOREWORD FOR THE SECOND EDITION	4
INTRODUCTION	6
1. LASER LOCATION AS APPLIED BRANCH OF SCIENCE	6
1.1 Matter and General Principles of Laser Location	6
1.2 History Reference on Laser Location	15
1.3 Pulse and Phase Method for Distance Metrology	16
1.4 Laser Location and Traditional Methods for Topographical Survey	23
1.5 The Concept for Laser Location Method of Gathering Geospatial Data	25
1.6 Economic Perspectives for the Usage of Laser Location Instruments	28
2. LASER LOCATION INSTRUMENTS	32
2.1 The Methods for Getting Laser Location Images. Basic Principles for Functioning of Typical Aerial Survey Lidar	32
2.2 The Method for Detection of Laser Points' Coordinates During Implementation of Laser Location Survey	36
2.3 The Functional Scheme of Typical Laser Locator on an Example of ALTM by Optech	41
2.4 The Methods for Scanning Executing	47
3. PHYSICAL BASES OF LASER LOCATION	49
3.1 The Probing Properties of Laser Radiation	49
3.2 Reflection of Laser Beam from Surface Objects	52
3.3 Mathematical Modeling of Laser Location Measurement	58
3.4 Questions of the Lidar Usage Safety	61
4. NAVIGATION SECURING OF LASER LOCATION	64
4.1 Principles of Functioning of the Onboard Navigation Complex	64
4.2 Determination of the Angle Parameters	64
4.3 Systems for Geopositioning GPS and GLONASS	70
4.4 Basic Principles of GPS/IMU Systems' Functioning	80
4.5 Integral Navigation Solution	85
5. LASER LOCATION DATA AND THEIR INFORMATION CHARACTERISTICS	89
5.1 Categories of Laser Location Data	89
5.2 Physical Limits for Laser Location Method and Ways for Their Overcoming	90
5.3 General Questions on Information Value of Laser Location Data	94
5.4 The Questions of Laser Location Data Accuracy	98
6. AERIAL LASER LOCATION SURVEY	101
6.1 Critical Parameters of Laser Location and Optimization of the Survey Regimes	101
6.2 Stages of Laser Location Survey and Main Procedures of Metrological Support	104
6.3 Measurement of Instrumentation Parameters of Scanner Block	106
6.4 General Principles of the Flight Calibration Procedure Gauge	108
6.5 On Board Mounting of Aerial Photography Equipment	112
7. CONTEMPORARY METHODS AND TECHNOLOGIES FOR LASER LOCATION OF EARTH AND FOREST AND DATA PROCESSING SOFTWARE	117
7.1. Investigation of Earth Surface and Forest Cover Structure by Laser Location and Digital Aerial- and Space Photography	117
7.2. Assessment of Timber Stock and Stand Phytomass by Laser Location Method	139
7.3. ALTEXIS Software	161
8. LASER-LOCATION METHOD IN TOPOGRAPHY AND SYSTEMS OF REAL TIME MAPPING ...	176
8.1 Technological Background for Laser-Location Method	176
8.2 The State and Prospects for Development of Contemporary Digital Aerial Phototopography	177
8.3 The Analog and Digital Aerial Photographic Cameras	179
8.4 The Methods of Classification and Background Technical Characteristics of Modern Digital Aerial Photographic Cameras	181
8.5 Frame and Linear Digital Photographic Systems	188
8.6 Systems of Real Time Mapping	195
8.7 Terrestrial laser scanning (by A.I. Naumenko and A.I. Danilin)	206
CONCLUSION	215
REFERENCES	217
SUPPLEMENTS	221

Учебное издание

**Медведев Евгений Михайлович
Данилин Игорь Михайлович
Мельников Сергей Рафаэлевич**

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ ЗЕМЛИ И ЛЕСА

Учебное пособие

Издание второе, переработанное и дополненное

*Опубликовано при финансовой поддержке компании «Геокосмос» и
Международного института мониторинга лесных экосистем*

Технический редактор *Ю.М. Попова*
Компьютерная верстка *И.А. Михайлова*
Корректор *Л.С. Мемнонова*
Дизайн обложки *В.А. Богоутдинов*
Художник-оформитель *Л.С. Шкуратова*

Подписано в печать 15.01.2007 г. Формат 60×90/8.
Гарнитура Arial. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 24.4. Усл. печ. л. 29.3. Тираж 1000 экз.
Заказ №247

Компания ГеоЛИДАР
115035, Москва, ул. Софийская набережная, д. 30, стр. 3
Тел.: (495) 953-0100; факс: (495) 953-0470; info@geolidar.ru
www.geolidar.ru

Компания Геокосмос
110017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 14, стр. 1
Тел.: (495) 953-0074; факс: (495) 959-4093; info@geokosmos.ru
www.geokosmos.ru

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
Тел./факс: (391) 433-686; institute@forest.akadem.ru
<http://forest.akadem.ru>

Отпечатано с оригинал-макета в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.
Качество печати соответствует качеству оригинал-макета