

В

ДЛЯ ВУЗОВ

В.А. Соломатин

ЛИДАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие для вузов

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии в качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего образования по направлениям подготовки магистратуры 12.04.02 «Оптотехника»

МОСКВА
Инновационное машиностроение
2024

УДК 681.782.473
ББК 32.85
С60

Рецензенты:

д-р техн. наук *Н.И. Аржененко*,
д-р физ.-мат. наук *Н.Л. Истомина*

Соломатин В.А.

С60 Лидарные технологии. М.: Инновационное машиностроение,
2024. – 144 с.

ISBN 978-5-907523-73-9

Рассмотрены принципы построения, схемы, параметры современных лидаров и лидарные технологии дальнометрии, сканирования, спектрального анализа.

Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению подготовки 12.04.02 «Оптотехника», студентов и аспирантов смежных направлений и специальностей. Может быть полезна специалистам, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией лидаров.

УДК 681.782.473
ББК 32.85

Учебное издание

Соломатин Владимир Алексеевич

ЛИДАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Редактор *Н.В. Бухарова*

Компьютерная верстка *Л.В. Софeyчук*

Сдано в набор 20.06.24. Подписано в печать 30.08.24.

Формат 60×88¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитур Newton.

Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,00.

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение».

107076, Москва, Колодезный пер., 2А, стр. 2

www.mashin.ru

Отпечатано в ООО «Канцлер».

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

ISBN 978-5-907523-73-9

© ООО «Издательство «Инновационное
машиностроение», 2024

© Соломатин В.А., 2024

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускается только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

Оглавление

Предисловие	5
Глава 1. Структура лидара	8
1.1. Принципиальная схема лидара	8
1.2. Элементы и узлы лидара	9
1.2.1. Лазеры	9
1.2.2. Преобразователи частоты излучения	13
1.2.3. Лазерные усилители	15
1.2.4. Оптические системы формирования лазерных пучков ...	17
1.2.5. Объективы	26
1.2.6. Спектроанализаторы	28
1.2.7. Поляризационные элементы	39
1.2.8. Волоконно-оптические элементы	44
1.2.9. Приемники излучения	46
1.2.10. Энкодеры	53
<i>Контрольные вопросы</i>	57
Глава 2. Технология лазерной дальнометрии	58
2.1. Методы приема лазерного излучения	58
2.2. Фазовая дальнометрия	61
2.3. Импульсная дальнометрия	63
2.4. Частотная дальнометрия с линейной модуляцией	66
<i>Контрольные вопросы</i>	67
Глава 3. Технологии лидарного сканирования	68
3.1. Наземные лазерные сканеры	68
3.2. Авиационные лазерные сканеры	73
3.2.1. Структурная схема авиационного лазерного сканера	73
3.2.2. Принципы глобального спутникового позиционирования	76

3.3. Многолучевые лидары	77
3.4. Моноимпульсные лидары	82
3.5. Пространственно-частотные соотношения при лазерном сканировании	87
3.5.1. Выборка и свертка при сканировании рельефа	88
3.5.2. Рельефно-частотная характеристика	94
3.6. Частотно-временные соотношения при лазерном сканировании	97
<i>Контрольные вопросы</i>	100
Глава 4. Технологии спектрального анализа	101
4.1. Взаимодействие лазерного излучения с атмосферой и отражающей поверхностью	101
4.1.1. Структура и состав атмосферы	101
4.1.2. Физические процессы взаимодействия лазерного излучения с атмосферой	104
4.1.3. Энергетическое уравнение лидара	107
4.2. Лидары с узкополосной спектральной фильтрацией	112
4.3. Флюоресцентные лидары	126
4.4. Доплеровские лидары	132
4.5. Гиперспектральные лидары	140
<i>Контрольные вопросы</i>	142
Список литературы	143

Предисловие

Технологии использования лидаров (лидарные технологии) находят применение в самых различных областях – от бытовой до космической техники. Под лидаром понимают сегодня прибор, устройство, а часто и сложный оптико-электронный комплекс, в котором ключевую роль играет лазерный дальномер. Однако первоначально лидар (LIDAR – англ. *Light Detection and Ranging*, (в переводе световое обнаружение и определение дальности) – это технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения и рассеяние излучения.

Принцип измерений, реализуемый лидарами, во многом аналогичен принципу действия радаров, поэтому иногда лидары называют «лазерными радарными», что не вполне корректно, так как в системах ближнего радиуса действия (например, предназначенных для работы в помещениях), главные свойства лазера (когерентность, монохроматичность, высокая направленность излучения) могут быть не востребованы, а излучателями в таких системах могут служить светодиоды или иные источники излучения. Аббревиатура LIDAR впервые появилась в работе Миддлтона и Спилхауса «Метеорологические инструменты», опубликованной в 1953 г., задолго до изобретения лазеров [12, 31].

Первые лидары использовали в качестве источников света обычные или импульсные лампы со скоростными затворами, формировавшими короткий импульс. В СССР в 1960-е годы существовало два семейства лидарных метеорологических приборов, предназначенных для использования на аэродромах (в обоих семействах источниками зондирующего светового потока были импульсные лампы): светолокаторы, используемые для измерения

высоты нижней границы облаков, и измерители дальности видимости. Однако сегодня в основных сферах применения лидаров используются лазеры. Все более широкое применение лидаров напрямую связано и даже определяется развитием лазерных технологий.

Первые лазерные дальномеры, появившиеся в начале 1960-х годов, имели военное применение и при этом слишком высокую стоимость для широкого распространения. Но уже в это время появляются и первые уникальные лазерные приборы для научных исследований. В 1969 г. с помощью лазерного дальномера и мишени, установленной на космическом аппарате Аполлон-11, было измерено расстояние от Земли до Луны. В СССР аналогичные измерения систематически велись начиная с 1973 г. В конце 1970-х — начале 1980-х годов в СССР осуществлялись эксперименты по лазерной локации искусственных спутников Земли. Были запущены спутники со специальными уголковыми отражателями на борту, использовался разработанный советскими учеными лазерный дальномер «Крым». В 1980-е годы лазерная дальнометрия выделилась в отдельную от лидаров область техники. Тогда же аббревиатура LIDAR стала именем нарицательным — *lidar*.

Основными технологиями, применяемыми в лидарах, являются дальнометрия, сканирование и спектральный анализ сигналов, которые в соединении определяют специфику этих устройств, позволяют создавать и использовать лидары при решении самых различных задач.

Вот лишь несколько характерных примеров.

Исследование атмосферы. Это одно из наиболее развитых направлений лидарных технологий. Исследования проводятся как со стационарных наземных станций, так и с космических платформ. Исследуются, в частности, динамика развития и распространения аэрозольных слоев техногенного происхождения, загрязнения атмосферы промышленными газами, озоновый слой атмосферы, содержание водяных паров, распределение скорости ветра по высоте.

Лидарная (лазерно-локационная) съемка поверхности Земли. Съемка ведется прежде всего для сбора геопространственных данных по рельефу с авиационных и космических платформ. Главные

цели такой съемки – создание и обновление топографических карт и создание цифровых моделей рельефа. Кроме этого, возможны и другие приложения, например, таксация леса, исследование ледникового покрова и др.

Гидрография. Гидрографические лидары используются для измерения глубины водоемов, определения содержания хлорофилла в воде, обнаружения косяков рыб, обнаружения и слежения за перемещением нефтяных пленок на поверхности воды, обнаружения мин.

Строительство и архитектура. Лидары, используемые для получения 3D-моделей наземных объектов, выделены в отдельный класс оптико-электронных систем, известных как наземные лазерные сканеры. По результатам сканирования может осуществляться планировка и контроль за ходом строительства, могут быть определены планы, разрезы, площади зданий и сооружений, мониторинг состояния объектов, представляющих культурные ценности, планирование интерьеров и коммуникаций.

Навигация транспортных средств. В настоящее время активно внедряются беспилотные транспортные средства, оснащенные лидарами кругового обзора, в частности беспилотные автомобили. Системами технического зрения на основе лидаров оснащаются и военная техника.

Мониторинг ветровой обстановки (ветровые лидары). Лидарный мониторинг ветровой обстановки применяется для обеспечения безопасности в авиации, ветроэнергетике и других областях.

В бытовой технике. Лидарные технологии начинают применять и в быту. Лазерные рулетки-дальномеры стали вполне доступны для практического использования при выполнении несложных обмеров. На очереди смартфоны, оснащенные лидарами, позволяющими измерять расстояния и осуществлять портретную съемку.