

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ и ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

Р. Р. АГИШЕВ

ЛИДАРНЫЙ
МОНИТОРИНГ
АТМОСФЕРЫ

51291



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2009

УДК 551.508.856:

551.501.816:

621.383

ББК 22.34+26.23+

32.85

А 24



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 08-08-07008*

Агишев Р.Р. Лидарный мониторинг атмосферы. —
М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 316 с. — ISBN 978-5-9221-1028-0.

В монографии рассмотрены современные методы и средства лазерного дистанционного зондирования атмосферы. Изложены традиционные принципы построения систем лидарного мониторинга, рассмотрены источники помех и особенности обработки эхосигналов. Раскрыты особенности разработанной автором обобщенной безразмерно-параметрической методологии оценки эффективности и потенциальных возможностей всех классов атмосферных лидарных систем. Показаны особенности применения разработанной методологии для широкого круга приложений лазерного дистанционного зондирования. Развита методика повышения эффективности атмосферных лидаров в сложной помеховой обстановке на основе улучшения пространственной избирательности и повышения фоновой устойчивости. Представлена теория непрерывных частотно-модулированных лидарных систем лазерного зондирования атмосферы с пространственным разрешением. На основе методологии безразмерной параметризации осуществлен комплексный сопоставительный анализ потенциальных возможностей двух основных классов лидаров: импульсных и непрерывных частотно-модулированных. Проведены комплексное сравнение важнейших разновидностей лидарных приемников на ФЭУ и ЛФД и прогнозирование их поведения в присутствии фоновых помех, характерных для атмосферных лидаров.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области разработки и использования систем дистанционного зондирования и оптической локации, исследования природных ресурсов, охраны окружающей среды и предотвращения чрезвычайных ситуаций, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Табл. 9. Ил. 127. Библиогр. 99 назв.



ISBN 978-5-9221-1028-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© Р. Р. Агишев, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Список обозначений	14
Введение. Особенности и достоинства лидарных методов дистанционного зондирования	18
Глава 1. Основные принципы лидарного мониторинга атмосферы	21
1.1. Атмосфера как исследуемая среда	21
1.1.1. Основные эффекты взаимодействия оптического излучения с атмосферой (21). 1.1.2. Особенно- сти распространения оптического излучения в атмосфе- ре (24).	
1.2. Укрупненная модель лидара. Лидарное уравнение	30
1.3. Оптические схемы лидаров и их подсистем	37
1.3.1. Оптическая схема лидара (37). 1.3.2. Оптиче- ские схемы зондирования рассеивающей среды (38). 1.3.3. Структурные схемы передатчиков. Передающая оптика (39). 1.3.4. Разновидности приемных оптиче- ских систем (42).	
Глава 2. Фоновые помехи при лидарных измерениях	47
2.1. Источники фоновых помех при лазерном зондировании атмосферы	47
2.2. Изменчивость яркости неба	48
2.2.1. Безоблачное небо (49). 2.2.2. Облачное небо (50).	
2.3. Модели фона	52
2.4. Мощность фоновой помехи на входе фотодетектора ...	57

Глава 3. Обработка сигналов в приемном тракте лидарных систем	60
3.1. Модель лидарного приемника как обобщенного фильтра	60
3.2. Эффективность фильтрации сигналов и помех в лидарном приемнике	63
3.3. Особенности пространственной фильтрации в лидарах	65
3.4. Особенности борьбы с помехами в электронном тракте	68
3.5. Методы приема оптических сигналов	72
3.5.1. Прямое фотодетектирование и способы регистрации фотоэлектронов (73). 3.5.2. Принципы построения гетеродинных приемников (78). 3.5.3. Требования к согласованию полей принимаемого сигнала и сигнала гетеродина (80).	
3.6. Методы расширения диапазона измерительного преобразования лидарных фотоприемников	82
Глава 4. Пространственная избирательность моноста- тических лидаров	86
4.1. Критерий эффективности пространственной филь- трации	87
4.2. Мгновенное угловое поле для принимаемого сигнала ..	88
4.3. Эффективность пространственной фильтрации типич- ных лидарных систем	90
4.3.1. Круглая диафрагма (90). 4.3.2. Клиновидная диафрагма (93). 4.3.3. Компенсирующая диафраг- ма (94).	
4.4. Оптимальное поле зрения биаксиального лидара	96
4.5. Практическое использование клиновидной диафрагмы	98
Глава 5. Точностные характеристики лидарных си- стем и интерпретация эхо-сигналов	102
5.1. Решение лидарного уравнения. Методы восстановления оптических параметров атмосферы	102
5.2. Точностные характеристики методов восстановления ..	106
5.2.1. Метод логарифмической производной (106). 5.2.2. Метод последовательных слоев (107). 5.2.3. Ме- тод интегрального накопления (109).	

5.3. Анализ требований к лидарной системе при интенсивном фоне	110
5.4. Влияние пространственной избирательности на точностные характеристики	114
5.5. Влияние фоновой помехи на точность восстановления оптических профилей	116
Глава 6. Прогнозирование поведения лидарных фотоприемников в присутствии фоновых помех	121
6.1. Традиционный подход	121
6.2. Ухудшение отношения сигнал/шум и чувствительности в присутствии фона	124
6.3. U-параметр лидара	128
6.4. Обобщенные спектральные модели лидарных фотодетекторов при интенсивном фоне	130
6.4.1. Определение обобщенных моделей ФЭУ и ЛФД (130). 6.4.2. Анализ отношения сигнал/шум (132).	
6.5. Сопоставительный анализ характеристик ФЭУ и ЛФД в присутствии фона	134
6.5.1. Общие соображения (134). 6.5.2. Влияние остаточного фона и вклад «шумящих» ЛФД (137).	
6.6. Сопоставление ФЭУ и ЛФД на длинах волн YAG-Nd-лазера	139
Глава 7. Методология безразмерно-параметрического моделирования лидарных систем	143
7.1. Традиционный анализ лидарной системы	143
7.2. Молекулярная атмосфера как опорная среда	145
7.3. Декомпозиция лидарного отношения сигнал-шум	148
7.4. Безразмерно-параметрическая модель лидарной системы	152
7.5. Сокращение дальности действия лидара в присутствии фона неба	158
7.6. Эквивалентный V-параметр	160

Глава 8. Приложение методологии безразмерной параметризации для оценки потенциальных возможностей лидаров	162
8.1. Лидар обратного рассеяния	162
8.1.1. Дальность действия при горизонтальном зондировании молекулярной атмосферы (162). 8.1.2. Дальность действия практически реализуемого горизонтального лидара (164). 8.1.3. Вертикальное зондирование (168).	
8.2. Оценка минимально обнаружимой концентрации газа для рамановского лидара	171
8.3. Оценка диапазона детектируемых концентраций газа для топографического лидара	174
8.3.1. Оценка максимально обнаружимой концентрации (175). 8.3.2. Оценка минимально обнаружимой концентрации (178).	
8.4. Обоснование необходимого потенциала лидарного детектора газов с помощью τ - V - R диаграмм	180
8.4.1. Метод τ - V -диаграмм (181). 8.4.2. Метод τ - R -диаграмм (183).	
Глава 9. Зондирование атмосферы частотно-модулированными непрерывными лидарами	187
9.1. Альтернативный подход к построению лидаров	187
9.1.1. Частотные дальномеры (189). 9.1.2. Лазерные измерители радиальной скорости. Методы измерения и особенности построения (190).	
9.2. Архитектура и функционирование частотно-модулированных лидаров	193
9.2.1. Принцип действия ЧМН-лидара (194). 9.2.2. Выделение спектра дальномерных частот. Разновидности гетеродинамирования в ЧМН-лидарах (195).	
9.3. Тактические параметры ЧМН-лидаров. Требуемая погрешность пропускания лидара	198
9.4. Уравнение ЧМН-лидара	201
9.5. Требования к системе модуляции излучения	204

Глава 10. Сопоставительный анализ импульсных и ЧМН-лидаров на основе безразмерной параметризации	206
10.1. Введение	206
10.2. Классификация разновидностей импульсных и ЧМН лидаров	209
10.2.1. Качественные показатели импульсных и ЧМН-лидаров (209). 10.2.2. Классификация лидаров на основе специфики методов приема и первичной обработки сигналов (210).	
10.3. Приложение методологии безразмерной параметризации лидаров к сопоставлению импульсных и ЧМН-систем	211
10.4. Дальность действия обобщенных ЧМН и ИН лидаров	216
10.4.1. Дальность действия широкополосных лидаров (217). 10.4.2. Дальность действия узкополосных лидаров (218). 10.4.3. Характерные особенности узкополосных лидаров (220).	
10.5. Выигрыш в полосе пропускания УП лидаров по сравнению с ШП лидарами	221
10.6. Выигрыш в дальности действия УП лидаров по сравнению с ШП лидарами	223
10.7. Чувствительность ШП и УП лидаров	227
10.7.1. Пороговая чувствительность разных типов лидаров (227). 10.7.2. Радиочастотное гетеродинирование (228). 10.7.3. Оптическое гетеродинирование (228). 10.7.4. Опто-электронное гетеродинирование (230).	
10.8. Влияние шумов и атмосферного ослабления на выигрыш в дальности действия и чувствительности	232
10.9. Комплексное сопоставление частотно-модулированных непрерывных и импульсных лидаров	234
Глава 11. Лидарные фотоприемники на ФЭУ при интенсивной фоновой помехе	238
11.1. Особенности применения и критерии выбора типа фотоприемника при интенсивном фоне	239

11.2. Фоновые характеристики фотоприемников на ФЭУ в паспортном режиме	240
11.2.1. Изменения крутизны световой характеристики (240). 11.2.2. Сужение диапазона измерительного преобразования (247).	
11.3. Фоновые характеристики стробируемых фотоприемников	253
11.3.1. Управление по модулирующему электроду (254). 11.3.2. Временные соотношения при резких изменениях уровня фона (258). 11.3.3. Динодное управление чувствительностью ФЭУ (260).	
11.4. Фоновые характеристики фотоприемников со ступенчато-линейной световой характеристикой	262
11.4.1. Расширение диапазона допустимых фоновых воздействий (263). 11.4.2. Фоновые изменения коэффициента расширения ДИП (267).	
Глава 12. Современные методы и средства повышения помехоустойчивости лидарных систем	271
12.1. Оптико-электронная обработка лидарных эхо-сигналов, совмещенная с противофоновой	271
12.2. Пространственно-временная селекция лидарных эхо-сигналов	276
12.3. Амплитудно-временная адаптация лидарной системы к фоновой помехе	280
12.4. Адаптация оптических параметров бистатических лидарных систем к фоновой помехе	283
12.4.1. Оценка точности измерений (284). 12.4.2. Юстировочные и вибрационные характеристики (286). 12.4.3. Фоновые характеристики (287). 12.4.4. Оптимизация углового поля приемной системы (289). 12.4.5. Практическая реализация адаптации (290).	
12.5. Предотвращение потерь информации при переключениях поддиапазонов лидарного приемника	294
12.6. Световая характеристика фоноустойчивого приемника	298
Заключение	302
Список литературы	303
Предметный указатель	311

АГИШЕВ Равиль Рустемович

ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРЫ

Оригинал-макет: *Е.В. Чернина*
Оформление переплета: *Н.В. Гришина*
Книга выходит в авторской редакции

Подписано в печать 14.01.09. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,75.
Уч.-изд. л. 19,75. Тираж 400 экз. Заказ № 5204.

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов в ПФ «Полиграфист»
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3
Тел.: (8172) 72-55-31, 72-61-75, факс: (8172) 72-60-72