

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

**Р.Р. Агишев**

**ЛАЗЕРНОЕ  
ЗОНДИРОВАНИЕ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ:  
методы и средства**



**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

**Р.Р. Агишев**

**ЛАЗЕРНОЕ  
ЗОНДИРОВАНИЕ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ:  
методы и средства**



**МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2019**

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 18-18-00058,  
не подлежит продаже*

**Агишев Р.Р. Лазерное зондирование окружающей среды: методы и средства.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 264 с. — ISBN 978-5-9221-1821-7.

Монография посвящена методам и средствам лазерного зондирования как перспективному направлению бесконтактной диагностики и дистанционного мониторинга окружающей среды. Представлены архитектура и принципы построения традиционных систем дистанционного зондирования атмосферы, особенности функционирования их подсистем, методы приема и обработки эхо-сигналов. Изложена методология обобщенного анализа лазерных систем дистанционной диагностики на основе разработанной концепции безразмерной параметризации лидаров. Показаны особенности ее использования для оценки потенциальных возможностей и сопоставления лидаров и их подсистем, включая чувствительность инструментов лазерного зондирования, дальность действия, помехоустойчивость и др.

На основе разработанной методологии проведен анализ лидарных фотодетекторов с внутренним усилением, предложены алгоритмы и модели для обоснования выбора типов оптических приемников для конкретных приложений при изменчивости атмосферы как объекта исследований и внешних воздействий. Раскрыты принципы построения и особенности реализации непрерывных частотно-модулированных лидаров как альтернативы традиционным импульсным системам лазерного зондирования.

Для научных работников и специалистов в области разработки и использования лазерных систем дистанционного зондирования и оптической локации, мониторинга окружающей среды и природных ресурсов, предотвращения чрезвычайных ситуаций, а также аспирантов и магистрантов соответствующих специальностей.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	9
<b>Раздел I. Лазерное дистанционное зондирование: основные принципы и подходы</b>	
<b>Глава 1. Основные принципы лазерного дистанционного зондирования . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1. Дистанционное зондирование, диагностика, мониторинг . . . . .	12
1.2. Лазерное зондирование: достоинства . . . . .	13
1.3. Укрупненная структура системы лазерного зондирования . . . . .	16
1.4. Оптические схемы зондирования рассеивающей среды . . . . .	16
1.5. Временные соотношения . . . . .	18
1.6. Показатели качества и тактико-технические параметры лазерного зондирования . . . . .	19
<b>Глава 2. Окружающий воздух и атмосферные явления как объекты исследования . . . . .</b>	<b>21</b>
2.1. Взаимодействие лазерного излучения с атмосферой и его основные эффекты . . . . .	21
2.1.1. Основные эффекты взаимодействия оптического излучения с атмосферой . . . . .	21
2.2. Особенности распространения лазерного излучения при разных атмосферных явлениях . . . . .	23
2.2.1. Поглощение в атмосфере . . . . .	24
2.2.2. Рассеяние в атмосфере . . . . .	27
2.3. Естественное освещение неба при мониторинге атмосферы . . . . .	28
2.3.1. Яркость неба и его изменчивость . . . . .	29
2.3.2. Яркость безоблачного неба . . . . .	31
2.3.3. Яркость облачного неба . . . . .	32
2.4. Яркое излучение неба: носитель информации и помеха . . . . .	33
2.5. Модели естественной освещенности окружающей атмосферы . . . . .	35
2.6. Фоновая помеха, состояние атмосферы и условия измерений . . . . .	38
2.6.1. Атмосферно-оптическая составляющая отношения сигнал/фон . . . . .	39
<b>Глава 3. Уравнение лазерного зондирования. Восстановление параметров исследуемой среды . . . . .</b>	<b>43</b>
3.1. Архитектура лидарной системы . . . . .	43
3.2. Лидарное уравнение как уравнение измерения при дистанционном зондировании . . . . .	44
3.2.1. Многократное рассеяние . . . . .	47
3.3. Интерпретация эхо-сигналов зондирования. Алгоритмы восстановления параметров среды по результатам измерений . . . . .	48

3.4. Достоверность восстановления параметров среды по результатам зондирования . . . . .	51
3.4.1. Примеры реконструкции параметров атмосферы . . . . .	51
3.4.2. Традиционные методы: оценка точности восстановления . . . . .	53
3.5. Анализ требований к лидарной системе для достоверного восстановления . . . . .	56
3.6. Влияние пространственной избирательности и фоновой помехи на достоверность . . . . .	59
3.6.1. Вклад пространственной избирательности . . . . .	59
3.6.2. Влияние фоновой помехи на точность реконструкции оптических профилей . . . . .	60
<b>Глава 4. Структура оптической системы лидара. Традиции и подходы . . . . .</b>	<b>63</b>
4.1. Обобщенная оптическая схема лазерного дистанционного зондирования. . . . .	63
4.2. Лидарные излучатели: традиционные структуры. Передающая оптика . . . . .	64
4.3. Структурная схема приемной оптической системы . . . . .	66
4.4. Разновидности приемных оптических систем. Формирование углового поля приемника . . . . .	67
4.5. Пространственная избирательность лидарных систем. . . . .	71
<b>Глава 5. Прием и обработка сигналов в приемном тракте лидаров</b>	<b>74</b>
5.1. Методы приема оптических сигналов зондирования . . . . .	74
5.2. Метод прямого фотодетектирования . . . . .	75
5.2.1. Режим счета фотонов . . . . .	76
5.2.2. Режим воспроизведения огибающей сигнала . . . . .	77
5.3. Гетеродинные приемники: особенности построения . . . . .	78
5.4. Согласование полей принимаемого сигнала и сигнала гетеродина. . . . .	79
5.5. Особенности борьбы с помехами в приемном тракте . . . . .	80
5.6. Традиционный подход к анализу отношения сигнал/шум . . . . .	83
5.7. Оценка отношения сигнал/шум при приеме сигналов в режиме счета фотонов . . . . .	85
<b>Раздел II. Моделирование лидарных систем: методология безразмерной параметризации</b>	
<b>Глава 6. Оценка эффективности лидаров: концепция мультипликативной параметризации . . . . .</b>	<b>88</b>
6.1. Как сопоставить эффективность и потенциал лидаров. Традиционный анализ лидарной системы . . . . .	88
6.2. Молекулярная атмосфера как опорная среда. . . . .	90
6.2.1. Опорный эхо-сигнал молекулярной атмосферы . . . . .	91
6.3. Декомпозиция отношения сигнал/шум. Нормированный эхо-сигнал разных типов лидаров. . . . .	92
6.3.1. Нормированный эхо-сигнал разных типов лидаров . . . . .	93
6.4. Структура мультипликативно-параметрической модели лидарной системы . . . . .	95
6.5. $V$ -, $Q_X$ -, $W$ -, $U$ - и $r$ -параметры лидара . . . . .	96

6.5.1. $V$ -параметр	96
6.5.2. $Q_x$ -параметр лидара	97
6.5.3. $W$ -параметр лидара	98
6.5.4. $U$ -параметр лидара	99
6.6. Сокращение дальности действия лидара в присутствии фона неба	100
6.7. Эквивалентный $V$ -параметр	102
<b>Глава 7. Приложения методологии безразмерной параметризации: дальность зондирования и пределы обнаружения атмосферных газов</b>	103
7.1. Лидар обратного рассеяния	103
7.1.1. Дальность действия при горизонтальном зондировании молекулярной атмосферы	103
7.1.2. Дальность действия практически реализуемого горизонтального лидара	105
7.1.3. Вертикальное зондирование	108
7.2. Лидар обратного рассеяния: оценка минимально обнаружимой концентрации газа	110
7.3. Топографический лидар: оценка диапазона детектируемых концентраций газа	113
7.3.1. Максимально детектируемая концентрация	113
7.3.2. Минимально обнаружимая концентрация	115
7.4. Обоснование необходимого потенциала для детектирования газов: $\tau$ - $V$ - $R$ -диаграммы	117
7.4.1. Метод $\tau$ - $V$ -диаграмм	117
7.4.2. Метод $\tau$ - $R$ -диаграмм	119
<b>Глава 8. Оценка эффективности лидарных систем: концепция унификации параметров среды и системных шумов</b>	122
8.1. Прогноз потенциала лидаров на основе развития безразмерно-параметрической методологии	122
8.2. Опорная среда и опорная яркость фона неба	124
8.2.1. Опорная яркость фона неба	125
8.3. Концепция унификации параметров как инструмент оценки эффективности лидаров	127
8.3.1. Нормировка эхо-сигнала лазерного зондирования	128
8.3.2. Парциальные отношения сигнал/шум	128
8.3.3. Избыточные шумы лидарной системы как степень превышения квантовых шумов	129
8.4. Безразмерный индикатор потенциала лидарной системы	130
8.5. Фактор влияния внешней фоновой помехи	133
8.6. Унификация и взаимосвязь параметров лидарной системы: структура модели	134
8.7. Моделирование влияния фоновой помехи на дальность действия	136
8.7.1. Сокращение дальности действия под влиянием интенсивной фоновой засветки	139
8.8. Сопоставление реальных лидарных систем	141

## Раздел III. Помехоустойчивость приемников лидарных систем

<b>Глава 9. Твердотельные кремниевые SiФЭУ — перспективный класс лидарных детекторов</b> . . . . .	143
9.1. Перспективы применения SiФЭУ при лазерном дистанционном зондировании . . . . .	144
9.1.1. SiФЭУ на смену традиционным ФЭУ и ЛФД . . . . .	144
9.2. Характеристики SiФЭУ как фотоприемников лазерного зондирования . . . . .	145
9.3. Зондирование лидаром с SiФЭУ в разных режимах детектирования. Примеры . . . . .	146
9.4. Лидар с SiФЭУ: первичная обработка и интерпретация сигналов зондирования . . . . .	147
9.5. Лидар с SiФЭУ: возможности и ограничения в реальных помеховых условиях . . . . .	150
9.6. Безразмерно-параметрическое моделирование: приложение к лидарам с SiФЭУ . . . . .	152
9.6.1. Объединенный $VU_{\text{equ}}$ -параметр . . . . .	152
9.6.2. Лидар с SiФЭУ: сравнительная оценка чувствительности . . . . .	154
9.6.3. Лидар с SiФЭУ: сокращение дальности действия в присутствии фона неба . . . . .	155
<b>Глава 10. Сопоставление SiФЭУ, ФЭУ и ЛФД как приемников лидарных систем</b> . . . . .	159
10.1. Ухудшение чувствительности лидарных детекторов в присутствии фоновой помехи . . . . .	159
10.1.1. $U$ -параметр лидара . . . . .	163
10.2. Сопоставление характеристик SiФЭУ, ФЭУ и ЛФД как лидарных детекторов . . . . .	163
10.2.1. Квантовая эффективность и внутренние шумы фотодетекторов . . . . .	163
10.2.2. Спектральные характеристики внутренних и квантовых шумов . . . . .	164
10.2.3. Мощность принятого сигнала, изменчивость погоды и чувствительность детекторов . . . . .	165
10.2.4. Лидары с фотодетекторами на ФЭУ, ЛФД и SiФЭУ: дальность действия и фон неба . . . . .	165
10.3. Лидары с SiФЭУ, ФЭУ и ЛФД: прогноз потенциала и чувствительности на основе унификации . . . . .	166
10.3.1. Нормированные избыточные шумы лидаров с разными фотодетекторами . . . . .	166
10.3.2. Искажение принимаемых лидарных сигналов избыточными шумами . . . . .	167
10.3.3. Доля фоновой составляющей в избыточных шумах разных лидарных детекторов . . . . .	169
10.3.4. Ухудшение чувствительности разных фотодетекторов к «оптической погоде» . . . . .	171

## Раздел IV. Непрерывные частотно-модулированные лидары как альтернатива импульсным методам зондирования

Глава 11. <b>Непрерывные ЧМ-лидары: принципы построения</b> . . . .	174
11.1. Альтернативный подход к построению лидаров и его предшественники . . . . .	174
11.1.1. Частотные дальномеры . . . . .	176
11.1.2. Лазерные измерители радиальной скорости. Методы и структуры . . . . .	178
11.2. Архитектура и функционирование частотно-модулированных лидаров . . . . .	180
11.2.1. Принцип действия ЧМН-лидара . . . . .	180
11.2.2. Выделение спектра дальномерных частот. Разновидности гетеродинирования в ЧМН-лидарах . . . . .	182
11.3. Тактические параметры ЧМН-лидаров. Требуемая полоса пропускания. . . . .	184
11.4. Уравнение ЧМН-лидара . . . . .	186
11.5. Требования к системе модуляции излучения. . . . .	188
Глава 12. <b>Сопоставление импульсных и непрерывных частотно-модулированных лидаров</b> . . . . .	189
12.1. Предпосылки формирования методики сопоставления . . . . .	189
12.2. Развитие концепции непрерывных частотно-модулированных лидаров . . . . .	191
12.2.1. Классификация разновидностей импульсных и ЧМН-лидаров . . . . .	191
12.2.2. Качественные показатели импульсных и ЧМН-лидаров . . . . .	191
12.2.3. Классификация лидаров на основе специфики методов приема и первичной обработки сигналов . . . . .	192
12.3. Приложение методологии безразмерной параметризации к сопоставлению импульсных и ЧМН-систем . . . . .	193
12.4. Дальность действия обобщенных ЧМН- и импульсных лидаров . . . . .	197
12.4.1. Широкополосные лидары . . . . .	197
12.4.2. Узкополосные лидары . . . . .	198
12.4.3. Характерные особенности узкополосных лидаров . . . . .	200
12.5. Выигрыш УП- над ШП-лидарами в полосе пропускания . . . . .	201
12.6. Выигрыш УП-лидаров над ШП-лидарами в дальности действия. . . . .	202
12.7. Чувствительность ШП- и УП-лидаров . . . . .	205
12.7.1. Пороговая чувствительность разных типов лидаров . . . . .	205
12.7.2. Радиочастотное гетеродинирование . . . . .	206
12.7.3. Оптическое гетеродинирование . . . . .	206
12.7.4. Оптоэлектронное гетеродинирование . . . . .	208
12.8. Влияние шумов и атмосферного ослабления на выигрыш в дальности действия и чувствительности . . . . .	209
12.9. Комплексное сопоставление непрерывных частотно-модулированных и импульсных лидаров . . . . .	213



## Раздел V. Оптико-электронные методы повышения помехоустойчивости лидарных систем

<b>Глава 13. Улучшение пространственной избирательности лидарных систем</b> . . . . .	214
13.1. Приемная система лидара как многофункциональный фильтр . . . . .	214
13.2. Критерий эффективности пространственной фильтрации . . . . .	216
13.3. Мгновенное угловое поле для принимаемого сигнала . . . . .	217
13.4. Эффективность пространственной фильтрации в лидарных системах	219
13.4.1. Круглая диафрагма . . . . .	219
13.4.2. Клиновидная диафрагма . . . . .	220
13.4.3. Компенсирующая диафрагма . . . . .	222
13.5. Оптимальное поле зрения биаксиального лидара . . . . .	223
13.6. Клиновидная диафрагма на практике . . . . .	225
13.7. Пространственная избирательность и устойчивость к внешним помехам . . . . .	227
13.8. Адаптация оптических параметров бистатистических лидаров к фоновой помехе . . . . .	228
13.8.1. Оценка точности измерений . . . . .	229
13.8.2. Юстировочные и вибрационные характеристики . . . . .	230
13.8.3. Фоновые характеристики . . . . .	231
13.8.4. Оптимизация углового поля приемной системы . . . . .	232
13.8.5. Практическая реализация адаптации . . . . .	233
<b>Глава 14. Оптико-электронные методы повышения помехоустойчивости лидаров</b> . . . . .	237
14.1. Метод пространственно-временной селекции лидарных эхо-сигналов . . . . .	237
14.2. Оптико-электронная обработка сигналов, совмещенная с противофоновой . . . . .	240
14.3. Возможности расширения диапазона измерительного преобразования приемников . . . . .	244
14.4. Амплитудно-временная адаптация приемной системы к фоновой помехе . . . . .	246
14.5. Практическая реализация фоноустойчивого фотоприемника . . . . .	248
14.6. Предотвращение потерь информации при переключениях поддиапазонов приемника . . . . .	249
14.7. Формирование световой характеристики фоноустойчивого приемника . . . . .	252
Заключение . . . . .	255
Список литературы . . . . .	256