

ОПТИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИЯ

Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов

Под редакцией

Заслуженного изобретателя Украины,
доктора технических наук,
профессора

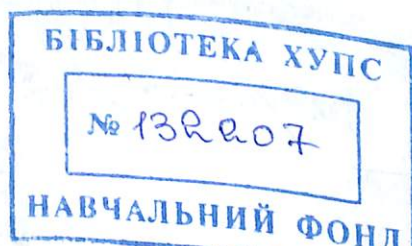
**Стрелкова
Александра Ивановича**

Оптическая локация.

Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов

Под редакцией
Заслуженного изобретателя
Украины,
доктора технических наук,
профессора
Стрелкова
Александра Ивановича

2010



УДК 621.37: 681.78

ББК 32.86

О 62

Рецензенты:

Шокало Владимир Михайлович - профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой основ радиотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники;

Стасев Юрий Владимирович - Заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба

Утверждена на научно-техническом совете
Украинской инженерно-педагогической академии
(Протокол № 4 от 07.12.10)

О 62 **Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов.** Под ред. Заслуженного изобретателя Украины, доктора технических наук, профессора А.И. Стрелкова: Монография. – Х. : Вировец А. П. «Апостроф», 2010. - 312 с.

ISBN 978-966-2579-37-6

Авторы:

Стрелков Александр Иванович - Заслуженный изобретатель Украины, доктор технических наук, профессор

Стрелкова Татьяна Александровна - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент

Лытюга Александр Петрович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Москвитин Сергей Васильевич - кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Рассматриваются вопросы теоретических основ приема и обработки оптических сигналов в системах оптической локации. Представлено описание оптических сигналов на основе комплексного подхода с позиций волной и корпускулярной теории света. Основное внимание уделено вопросам обнаружения и измерения параметров оптических сигналов на основе статистического анализа. Представлены методы обработки изображений.

Изложенный в монографии материал может быть полезен для исследователей, работающих в области создания систем приема и обработки оптических сигналов, инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся вопросами разработки оптико-электронных систем и методов обработки оптических сигналов и изображений.

ISBN 978-966-2579-37-6

© Стрелков А.И., Стрелкова Т.А.,
Лытюга А.П., Москвитин С.В., 2010

Содержание

	Стр.
Введение.....	9
Глава 1. Основные принципы оптической локации.....	15
1.1 Основные понятия и определения.....	15
1.2 Принципы получения локационной информации.....	18
1.2.1 Активная оптическая локация.....	18
1.2.2 Полуактивная оптическая локация.....	23
1.2.3 Пассивная оптическая локация.....	23
1.3 Общие особенности оптической локации.....	23
Глава 2. Цели и сигналы в оптической локации.....	29
2.1 Рассеяние оптических волн объектами.....	29
2.1.1 Математическое описание зондирующих сигналов...	29
2.1.2 Модель рассеивающей поверхности.....	31
2.1.3 Отраженный сигнал в картинной плоскости.....	39
2.2 Отраженный сигнал в апертурной плоскости.....	42
2.2.1 Элементы скалярной теории дифракции.....	42
2.2.2 Условие дальней зоны.....	44
2.2.3 Условие обобщенной дальней зоны.....	47
2.3 Статистические характеристики сигналов в апертурной плоскости, рассеянных неподвижными диффузными объектами, и методы их измерения.....	50
2.3.1 Пространственная корреляционная функция поля, рассеянного диффузно отражающим объектом.....	51
2.3.2 Интерферометрические методы приема оптических сигналов.....	54
2.3.3 Потенциальные возможности интерферометричес- кого метода построения изображений.....	58

2.3.4 Пространственная корреляционная функция интенсивности.....	60
2.3.5 Интерферометр интенсивностей.....	65
2.3.6 Метод голографии интенсивности.....	66
2.4 Статистические характеристики сигналов в апертурной плоскости, рассеянных подвижными объектами	69
2.4.1 Преобразование временной структуры отраженного сигнала движущимся объектом.....	69
2.4.2 Временная корреляционная функция сигнала, рассеянного диффузно отражающим объектом.....	71
2.4.3 Частотная корреляционная функция поля, рассеянного диффузно отражающим объектом.....	73
2.5 Локационные характеристики объектов.....	76
2.5.1 Эффективная площадь объекта.....	76
2.5.2 Блеск и звездная величина объекта.....	81
2.6 Учет поляризационных эффектов в оптической локации.....	86
2.6.1 Виды поляризации оптических сигналов.....	86
2.6.2 Описание поляризационной структуры оптического сигнала.....	86
2.6.3 Преобразование излучения в поляризационной системе.....	92
Глава 3. Обнаружение оптических сигналов.....	99
3.1 Структура обнаружителя оптических сигналов.....	99
3.2 Статистические характеристики сигналов на выходе фотоприемника.....	102
3.2.1 Характеристики сигнала при постоянной интенсивности светового потока.....	102
3.2.2 Характеристики сигнала при случайных флуктуациях интенсивности светового потока.....	103
3.2.3 Характеристики сигнала при детерминированном изменении интенсивности светового потока.....	105
3.2.4 Сравнительная характеристика законов распределения.....	106
3.2.5 Статистические свойства реальных сигналов и помех на выходе фотоприемника.....	106

3.3 Некогерентное (прямое) фотодетектирование оптических сигналов.....	107
3.3.1 Общая характеристика приемника прямого фотодетектирования.....	107
3.3.2 Вывод отношения правдоподобия для оптического сигнала с постоянной амплитудой.....	109
3.3.3 Анализ отношения правдоподобия при различных уровнях помех.....	110
3.3.4 Оптимальное обнаружение оптического сигнала со случайной амплитудой.....	112
3.4 Характеристики обнаружения оптических сигналов при прямом фотодетектировании.....	113
3.4.1 Характеристики обнаружения прямоугольного импульса с постоянной амплитудой.....	113
3.4.2 Анализ характеристик обнаружения при различных уровнях помех.....	114
3.4.3 Характеристики обнаружения прямоугольного импульса со случайной амплитудой.....	117
3.4.4 Характеристики обнаружения пачки импульсов.....	119
3.4.5 Методика расчета пороговой чувствительности приемного устройства при заданных параметрах фотоприемника и характеристиках обнаружения.....	123
3.5 Гетеродинный (когерентный) прием оптических сигналов.....	126
3.5.1 Общая характеристика гетеродинного приемника оптических сигналов.....	126
3.5.2 Оптимальное обнаружение оптических сигналов при гетеродинном приеме.....	128
3.6 Антенные свойства гетеродинного приемного устройства.....	130
3.6.1 Антенные свойства гетеродинного приемного устройства с коллимирующей оптикой.....	130
3.6.2 Антенные свойства гетеродинного приемного устройства с фокусирующей оптикой.....	132
3.7 Влияние амплитудно-фазовых искажений сигнала на эффективность гетеродинного приемного устройства.....	135
3.7.1 Эффективность гетеродинного приемного устройства с коллимирующей оптикой.....	136

3.7.2 Эффективность гетеродинного приемного устройства с фокусирующей оптикой.....	138
3.8 Методика расчета характеристик обнаружения и пороговой чувствительности гетеродинного приемного устройства.....	140
3.9 Дальность действия и зона действия оптико-электронных средств.....	141
3.9.1 Уравнение оптической локации для активных средств.....	142
3.9.2 Уравнение оптической локации для полуактивных средств.....	143
3.9.3 Проницающая способность полуактивных средств....	145
3.9.4 Методика расчета зоны действия ОЭС.....	146
3.10 Обнаружение оптических сигналов телевизионным приемным устройством.....	147
3.10.1 Физическая модель телевизионного фотоприемника.....	147
3.10.2 Математическая модель телевизионного фотоприемника.....	152
3.10.3 Алгоритмы обработки сигналов в телевизионном приемном устройстве с ограниченным динамическим диапазоном.....	158
3.11 Детерминированные методы ослабления световых потоков.....	164
Глава 4. Измерение параметров оптических сигналов.....	173
4.1 Измерение дальности и угловых координат объекта при прямом фотодетектировании оптического сигнала.....	173
4.1.1 Вывод и анализ отношения правдоподобия.....	173
4.1.2 Принципы построения дальномеров и оценка их потенциальной точности.....	174
4.1.3 Принципы построения измерителей угловых координат и оценка их потенциальной точности.....	178
4.2 Фотометрические измерения оптических сигналов.....	179
4.2.1 Связь параметров фотометрического сигнала с параметрами объекта.....	179
4.2.2 Влияние шумов и внешнего фона на параметры	

фотометрического сигнала. Методы выделения полезной составляющей.....	181
4.2.3 Методы первичной обработки фотометрического сигнала.....	184
Глава 5. Формирование и обработка изображений.....	189
5.1 Формирование изображения при когерентном и некогерентном освещении объекта.....	189
5.1.1 Обобщение представления о системах, формирующих изображение.....	189
5.1.2 Частотный анализ оптических систем.....	194
5.1.3 Сравнение формирования изображения при когерентном и некогерентном освещении.....	205
5.2 Формирование изображения в турбулентной атмосфере.....	211
5.2.1 Модели искажений волнового фронта оптического сигнала в турбулентной атмосфере.....	211
5.2.2 Влияние времени регистрации на структуру изображения.....	212
5.2.3 Сравнение влияния амплитудных и фазовых искажений волнового фронта на структуру мгновенного изображения точечного источника.....	215
5.2.4 Структура мгновенного изображения точечного источника.....	219
5.2.5 Оптическая передаточная функция системы "атмосфера - телескоп".....	222
5.2.6 Пространственная инвариантность системы "атмосфера - телескоп".....	224
5.2.7 Структура изображения протяженного объекта.....	226
5.3 Оптические изображения при слабом световом сигнале.....	227
5.4 Методы первичной обработки изображений.....	233
5.4.1 Задачи восстановления и улучшения качества изображения.....	234
5.4.2 Методы линейной фильтрации изображений.....	237
5.4.3 Методы спекл-интерферометрии.....	243
5.5 Методы вторичной обработки изображений.....	248
5.5.1 Покадровая и межкадровая обработка	

изображений.....	248
5.5.2 Межкадровая обработка изображений в бинокулярном дальномере.....	249
5.5.3 Межкадровая обработка при идентификации изображений.....	251
5.6 Обработка изображений при подсвете объекта зондирующим сигналом с заданной пространственно- временной структурой.....	253
5.6.1 Формирование лазерного сигнала с пространственной модуляцией поляризации и его свойства.....	254
5.6.2 Обработка регистрирующего изображения.....	257
5.7 Требования к цифровым системам обработки изображений.....	260
5.8 Оценка эффективности систем формирования и обработки изображений.....	262
Литература.....	269
Приложения.....	281
Приложение 1. Фундаментальные физические константы.....	281
Приложение 2. Классификация спектра электромагнитных ко- лебаний оптического диапазона.....	282
Приложение 3. Единицы физических величин, относящихся к светотехнике.....	281
Приложение 4. Коэффициент отражения различных поверхно- стей.....	289
Приложение 5. Распределение энергии в спектре Солнца и сол- нечная постоянная.....	290
Приложение 6. Энергетический расчет ОЭС с телевизионным приемным устройством.....	291
Приложение 7. Импульсный отклик положительной линзы.....	298
Приложение 8. Влияние турбулентной атмосферы на характери- стики оптических сигналов.....	305

ВВЕДЕНИЕ

***Наука не является, и никогда не будет
являться законченной книгой.***

Альберт Эйнштейн

Оптическая локация – это совокупность методов обнаружения, измерения координат, а также распознавания формы удаленных объектов с использованием электромагнитных волн оптического диапазона. Оптическая локация позволяет с высокой точностью определять расстояние до космических объектов различного происхождения, надводных и подводных объектов, исследовать распределение аэрозольных слоев в атмосфере. Основными преимуществами оптических локаторов является большая точность определения координат объектов, высокая разрешающая способность по дальности, угловая разрешающая способность, то есть способность различать два соседних равноудаленных объекта. Все выше перечисленное дает возможность широкого применения оптико-электронных систем во многих областях науки и техники, например, в астрономии, системах технического зрения, биологии.

Большой объем и разнообразие литературы, посвященной сложной области оптической локации включает вопросы приема и обработки получаемой информации. Однако, области применения локаторов настолько широки, что человечество постоянно совершенствует, расширяет возможности данных систем. Совершенствование систем требует углубленных теоретических знаний о физических процессах распространения, приема и обработки оптического излучения. В основе создания таких систем лежит глубокое понимание физических процессов воз-

никновения, распространения оптического излучения, а также теории приема и обработки оптических сигналов с учетом особенностей их пространственно-временной структуры, волновых и корпускулярных свойств. Учет дополнительных свойств оптического излучения вызывает необходимость разработки более полных математических моделей, новой элементной базы оптико-электронных систем, оптимизации алгоритмов приема и обработки оптических сигналов.

В монографии основное внимание уделяется теоретическим основам взаимодействия электромагнитного излучения с элементами оптико-электронных систем. Описание методов регистрации, обнаружения и обработки сигналов основано на учете стохастического характера оптических сигналов, обусловленного наличием случайных помех, а также стохастическим характером потока фотонов, составляющих принимаемый полезный сигнал.

Предложен подход к систематизации теоретических знаний методов описания оптических сигналов при их регистрации и составлению алгоритмов обработки информации в оптико-электронных системах с совместным использованием корпускулярного и волнового описания оптических сигналов.

В *первой главе* изложены основные принципы получения локационной информации. Рассмотрены особенности активной и пассивной оптической локации.

Вторая глава посвящена теоретическим вопросам описания регистрации оптических сигналов. Приведено математическое описание сигналов с позиции волновой теории света. Предложена модель рассеивающей поверхности зондируемых объектов. Проведено математическое описание отраженных сигналов в картинной и апертурной плоскости с использованием теории дифракции. Рассмотрены статистические характеристики сигналов в апертурной плоскости, рассеянных неподвижными и подвижными диффузными объектами. Учтены временные и пространственные корреляционные функции поля и интенсивности излучения отражающих объектов. Описаны локационные характеристики изучаемых объектов с учетом интерференционных и поляризационных эффектов. Приведены расчеты эффективной площади объектов различных форм, а также энергетических характеристик излучения наблюдаемых объектов.

Третья глава посвящена обнаружению оптических сигналов. Предложены методы обнаружения оптических сигналов с учетом корпускулярных и статистических свойств оптического излучения. Обсуждаются методы и характеристики обнаружения оптических сигналов при прямом и гетеродинном приеме сигнала. Рассчитаны характеристики обнаружения оптического сигнала при случайных флуктуациях принимаемого светового потока. Выведено отношение правдоподобия для оптического сигнала с постоянной и случайной амплитудой и про-

веден анализ для различных уровней помех. Приведены характеристики обнаружения оптических сигналов при различных уровнях помех. Рассматривается методика расчета пороговой чувствительности фотоприемника при прямом фотодетектировании и гетеродинного приемного устройства при заданных характеристиках обнаружения. Рассчитана дальность и зона действия активных и пассивных оптических локационных средств. Составлена физическая модель телевизионного фотоприемника для пассивных систем с учетом статистических свойств принимаемого оптического сигнала. Рассмотрены алгоритмы обработки сигналов в оптико-электронных системах телевизионного типа, позволяющие расширить их динамический диапазон.

В *четвертой главе* обсуждаются вопросы измерения параметров оптического сигнала с помощью фотометрических систем. Рассматриваются вопросы построения и оценки потенциальных возможностей систем измерения дальности и угловых координат. Представлены методы выделения полезной составляющей на фоне внутренних шумов и внешних помех различной интенсивности с учетом статистических свойств сигнальной и фоновой составляющих.

Пятая глава посвящена методам формирования и обработки телевизионных изображений при когерентном и некогерентном освещении объектов. Методы построены как на основе волнового, так и корпускулярного представления. Приведены передаточные функции системы с учетом аберраций системы. Рассчитана разрешающая способность систем при когерентном и некогерентном освещении объектов. Составлены модели формирования изображений с учетом искажений волнового фронта сигнала в турбулентной атмосфере и времени регистрации. Проведен сравнительный анализ влияния амплитудных и фазовых искажений волнового фронта сигнала при регистрации точечного и протяженного изображения объекта. Составлены математические модели формирования изображения при регистрации слабого оптического сигнала. Обсуждаются методы первичной и вторичной обработки получаемой информации с целью восстановления и улучшения качества телевизионных изображений. Проведен анализ влияния различных методов фильтрации на качество изображения. Представлены результаты применения покадровой и межкадровой обработки изображений. Рассмотрены оценки эффективности систем формирования и обработки изображений.

Научные труды авторов, вошедшие в список литературы, являются теоретическим и практическим продолжением рассмотренных вопросов.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам доктору технических наук, профессору *Владимиру Михайловичу Шокало* и доктору технических наук, профессору *Юрию Владимировичу Стасеву* за большое внимание к материалу монографии, его плодотворное обсуждение и полезные рекомендации.



Стрелков Александр Иванович
Заслуженный изобретатель Украины,
доктор технических наук, профессор



Стрелкова Татьяна Александровна
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, доцент



Лытюга Александр Петрович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник



Москвитин Сергей Васильевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник