

УДК 621.383:681.7.01
ББК 32.854
М81

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/6368/>

Мосягин, Г. М.

М81 Теория оптико-электронных систем : учебное пособие / Г. М. Мосягин ; под ред. В. Я. Колючкина. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 348, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5260-6

Настоящее пособие подготовлено к изданию на основе конспекта лекций профессора Г.М. Мосягина по дисциплине «Теория оптико-электронных систем», которые он читал студентам кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Целью дисциплины является эффективное освоение методов математического моделирования оптико-электронных приборов, используемых при выполнении базовых проектных процедур анализа и параметрической оптимизации.

Для студентов оптических специальностей, а также инженеров, занимающихся разработкой оптико-электронных приборов различного назначения.

УДК 621.383:681.7.01
ББК 32.854

ISBN 978-5-7038-5260-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора	5
Список сокращений	7
Введение	9
Ч I. Математические основы теории оптико-электронных приборов	24
1. Описание детерминированных сигналов	24
1.1. Функции, используемые при описании сигналов	24
1.1.1. Экспоненциальные функции	24
1.1.2. Прямоугольные функции	27
1.2. Ряд Фурье и его основные свойства	29
1.2.1. Вещественный ряд Фурье	29
1.2.2. Комплексный ряд Фурье	30
1.2.3. Свойства ряда Фурье	34
1.3. Интеграл Фурье и преобразования Фурье	36
1.3.1. Вывод формул преобразования Фурье	36
1.3.2. Свойства преобразования Фурье	39
1.4. Дельта-функция Дирака	46
1.4.1. Определение дельта-функции	47
1.4.2. Основные свойства дельта-функции Дирака	49
1.4.3. Фурье-образ дельта-функции Дирака	50
1.4.4. Преобразование Фурье от единичной функции	51
1.4.5. Фурье-образ двух дельта-функций, расположенных симметрично относительно начала координат	53
1.4.6. Изменение масштаба дельта-функции	54
1.4.7. Производные дельта-функции	54
1.4.8. Дополнительные свойства дельта-функции	55
1.4.9. Дельта-функция двух переменных	55
1.4.10. Преобразование Фурье от периодической функции	56
1.4.11. Функция единичного скачка (функция Хевисайда)	57
1.5. Гребенчатые функции	57
1.5.1. Гребенчатые функции одной переменной	57
1.5.2. Гребенчатые функции двух переменных	61
1.6. Интегральные операции свертки, ковариации и корреляции	63
1.6.1. Свертка функций. Преобразование Фурье от свертки, важные приложения свертки	63

1.6.2. Взаимная ковариация. Преобразование Фурье от функции взаимной ковариации	68
1.6.3. Корреляция. Преобразование Фурье от функции корреляции (взаимной корреляции)	70
1.6.4. Преобразование Фурье от произведения двух функций	72
1.6.5. Теорема Парсеваля	72
1.7. Дискретно-выборочное представление детерминированных сигналов с ограниченным спектром	73
2. Описание случайных сигналов	78
2.1. Элементы теории вероятностей	78
2.2. Элементы теории случайных процессов	98
3. Преобразование сигналов линейными системами	108
3.1. Преобразование детерминированных сигналов	108
3.1.1. Понятие линейной системы	108
3.1.2. Передаточная функция линейной инвариантной системы	111
3.2. Преобразование случайных сигналов линейными инвариантными системами	113
3.2.1. Корреляционный метод расчета	114
3.2.2. Спектральный метод расчета	115
Ч. II. Преобразование оптических сигналов элементами обобщенной схемы оптико-электронного прибора	118
4. Оптические волны как носители сигналов	118
4.1. Волновое уравнение	119
4.2. Плоские гармонические волны	120
4.2.1. Уравнение плоской волны	120
4.2.2. Частные случаи распространения плоской волны	124
4.2.3. Фурье-образ плоской волны	125
4.3. Сферические гармонические волны	127
4.3.1. Уравнение сферической волны	127
4.3.2. Сферическая волна в параксиальном приближении	129
5. Преобразование когерентных сигналов слоем пространства	132
5.1. Угловой спектр волны как суперпозиция плоских волн	132
5.1.1. Понятие углового спектра	132
5.1.2. Влияние препятствия на угловой спектр волны	133
5.1.3. Когерентная передаточная функция слоя пространства	135
5.1.4. Когерентная передаточная функция слоя пространства в приближении Френеля	141
5.1.5. Дифракция в приближении «тени»	142
5.2. Дифракционные интегралы	143
5.2.1. Дифракционный интеграл Рэлея — Зоммерфельда	143
5.2.2. Дифракционный интеграл Френеля	145
5.2.3. Дифракционный интеграл Фраунгофера	149

6. Преобразование сигналов оптической системой	150
6.1. Когерентные, частично когерентные и некогерентные оптические системы	150
6.1.1. Когерентное излучение и когерентная оптическая система	150
6.1.2. Частично когерентное излучение и частично когерентная оптическая система	152
6.1.3. Некогерентные сигналы и некогерентная оптическая система	155
6.2. Преобразование оптического сигнала тонкой линзой	156
6.2.1. Комплексные амплитудные коэффициенты пропускания и отражения тонких оптических элементов	156
6.2.2. Комплексный коэффициент пропускания тонкой линзы ...	158
6.2.3. Преобразование Фурье, выполняемое тонкой линзой	164
6.2.4. Формирование изображения тонким однолинзовым объективом при когерентном освещении	175
6.2.5. Формирование изображения однолинзовым объективом при некогерентном излучении объектов	183
6.3. Преобразование оптического сигнала реальной оптической системой	185
6.3.1. Обобщенная модель оптической изображающей системы ...	185
6.3.2. Формирование изображения реальной оптической системой при когерентном излучении	186
6.3.3. Формирование изображения реальной оптической системой при некогерентном излучении	196
6.3.4. Связь оптической передаточной функции с когерентной передаточной функцией	203
6.3.5. Связь волновых и геометрических aberrаций	207
6.3.6. Влияние монохроматических aberrаций на когерентную передаточную функцию	214
6.3.7. Влияние монохроматических aberrаций на оптическую передаточную функцию	215
6.3.8. Влияние аподизации объектива на когерентную и оптическую передаточные функции	220
6.3.9. Аппроксимация функций рассеяния и передаточных функций оптических систем при некогерентном освещении	223
6.3.10. Преобразование случайного поля яркости оптической системой	229
6.4. Размерности физических величин, описывающих детерминированные и случайные оптические сигналы	239
7. Преобразование оптических сигналов модулятором анализатора изображения	241
7.1. Назначение и принцип действия модулятора анализатора изображения	241
7.2. Преобразование детерминированных сигналов модулятором анализатора изображения	244

7.2.1. Поток излучения и его пространственно-частотный спектр на выходе неподвижного модулятора анализатора изображений	245
7.2.2. Способы описания пространственной передаточной функции модулятора анализатора изображений	248
7.2.3. Поток излучения и его частотно-временной спектр на выходе подвижного модулятора анализатора изображения	254
7.2.4. Особенности описания сигнала и его пространственно-частотного спектра в угловых координатах	266
7.3. Преобразование случайных оптических сигналов модулятором анализатора изображения	269
7.3.1. Преобразование случайного поля облученности неподвижным модулятором анализатора изображения	270
7.3.2. Преобразование случайного поля облученности подвижным модулятором анализатора изображения	278
7.4. Размерности физических величин	285
8. Преобразование оптических сигналов приемниками излучения	288
8.1. Общие сведения о приемниках излучения	288
8.1.1. Назначение приемников излучения	288
8.1.2. Математическая модель одноэлементного приемника излучения	290
8.2. Преобразование одноэлементным приемником излучения сигналов на выходе подвижного модулятора анализатора изображения	293
8.2.1. Преобразование одноэлементным приемником излучения детерминированных сигналов	293
8.2.2. Преобразование одноэлементным приемником излучения случайных сигналов	298
8.3. Преобразование сигналов многоэлементными приемниками излучения	300
8.3.1. Общие сведения о многоэлементных приемниках излучения и постановка задачи описания преобразования сигналов приемниками излучения	300
8.3.2. Описание преобразования оптических сигналов матричным приемником излучения	302
8.3.3. Описание преобразования оптических сигналов линейкой приемников излучения	307
9. Преобразование сигналов электронной системой	314
9.1. Назначение и методы обработки сигналов в электронной системе оптико-электронных приборов	314
9.2. Преобразование детерминированных сигналов линейной электронной системой	315
9.3. Преобразование случайных сигналов линейной электронной системой	316
9.4. Преобразование детерминированных сигналов нелинейной электронной системой	318

10. Преобразование сигналов видеоконтрольными устройствами	319
10.1. Назначение и примеры видеоконтрольных устройств	319
10.2. Постановка задачи модельного описания видеоконтрольного устройства	320
10.3. Математическое описание преобразования сигналов видеоконтрольным устройством	320
11. Элементы теории обнаружения сигналов	324
11.1. Оценка эффективности оптико-электронных приборов	324
11.2. Постановка задачи обнаружения сигналов	325
11.3. Байесовский алгоритм обнаружения сигнала	327
11.3.1. Классический байесовский алгоритм обнаружения	328
11.3.2. Байесовский алгоритм обнаружения при априори неизвестных значениях параметров сигнала	335
Литература	343

Учебное издание

Мосягин Геннадий Михайлович

Теория оптико-электронных систем

Редактор *Л.Т. Мартыненко*

Художник *Э.Ш. Мурадова*

Корректор *О.Ю. Соколова*

Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*

Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 23.12.2019. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 22,0. Тираж 500 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com