

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Введение</b> .....	7
Литература .....	16
<b>2. Рефракционные свойства атмосферы Земли</b> .....	17
2.1. Векторное и скалярное волновое уравнение в вакууме .....	17
Литература .....	22
2.2. Рефракционные и рассеивающие свойства материальных сред .....	22
Определение показателя преломления. Закон Снеллиуса .....	22
Физическая оптика. Модель Лоренца .....	23
Уравнения Максвелла в среде .....	26
Формула Лоренца–Лоренца .....	29
Показатель преломления газа из молекул с дипольным моментом .....	31
Вращательные линии водяного пара .....	32
Соотношения Крамерса–Кронига .....	34
Молекулярное рассеяние .....	36
Рассеяние на аэрозольных частицах .....	38
Литература .....	41
2.3. Показатель преломления нейтральной атмосферы .....	41
Показатель преломления в приближении идеального газа .....	41
Учет сжимаемости .....	42
Уравнения гидростатики и состояния .....	43
Приближенный учет сжимаемости .....	45
Вклад капельной воды и кристаллов льда .....	46
Зондирование на крыле линии поглощения водяного пара .....	48
Модель распространения миллиметровых волн .....	48
Литература .....	51
2.4. Рефракционные свойства ионосферы .....	52
Общие сведения об ионосфере .....	52
Рефракционные свойства ионосферы на высоких частотах .....	53
Рефракционные свойства ионосферы на радиочастотах .....	54
Принцип действия ионозонда .....	56
Фазовая и групповая скорости электромагнитных волн .....	56
Анизотропия рефракционных свойств плазмы в магнитном поле .....	57
Распространение плоских волн в анизотропной среде .....	61
Перенос энергии электромагнитными волнами в анизотропной среде .....	65
Литература .....	66
<b>3. Распространение радиоволн</b> .....	67
3.1. Волновое уравнение в неоднородной среде .....	67
Исходное уравнение .....	67
Оценки масштабов физических лучей .....	68
Вывод уравнения Гельмгольца .....	73
Литература .....	76
3.2. Условия излучения и факторизация уравнения Гельмгольца .....	76

Литература . . . . .	79
3.3. Общее решение граничной задачи с условиями излучения в вакууме .	79
Литература . . . . .	83
3.4. Пространственные спектры волнового поля.	
Импульсное представление . . . . .	83
Литература . . . . .	87
3.5. Обращение волнового фронта, или обратное распространение . . . . .	88
Принципы взаимности и синтезированной апертуры . . . . .	88
Пример: радиозатменное зондирование колец Сатурна . . . . .	89
Анализ ионосферных неоднородностей . . . . .	93
Восстановление параметров нейтральной атмосферы . . . . .	95
Литература . . . . .	98
<b>4. Асимптотические методы решения волновых задач . . . . .</b>	<b>100</b>
4.1. Геометрическая оптика . . . . .	100
Исходные принципы . . . . .	100
Коммутация гамильтониана и осциллирующей экспоненты . . . . .	101
Асимптотическое разложение . . . . .	102
Гамильтонова механика. Принцип Ферма . . . . .	104
Условия применимости геометрической оптики . . . . .	107
Литература . . . . .	108
4.2. Лучевое многообразие и его проекции . . . . .	108
Литература . . . . .	112
4.3. Канонический оператор Маслова . . . . .	112
Вводные замечания . . . . .	112
Многообразия, векторные поля и дифференциальные формы . . . . .	113
Определение канонического оператора . . . . .	120
Коммутация гамильтониана и осциллирующей экспоненты . . . . .	122
Коммутация канонического оператора и оператора Гамильтона . . . . .	124
Заключительные замечания . . . . .	130
Литература . . . . .	131
4.4. Интегральные операторы Фурье . . . . .	131
Преобразование Фурье . . . . .	131
Общее определение интегральных операторов Фурье . . . . .	133
Групповые свойства интегральных операторов Фурье . . . . .	136
Литература . . . . .	139
4.5. Канонические преобразования в геометрической оптике . . . . .	139
Литература . . . . .	142
4.6. Канонические преобразования в волновой оптике . . . . .	143
Производящие и фазовые функции . . . . .	143
Коммутация интегральных операторов Фурье и псевдодифференциальных операторов . . . . .	144
Теорема Егорова . . . . .	147
Заключительные замечания и примеры . . . . .	148
Литература . . . . .	149
4.7. Пример: гармонический осциллятор . . . . .	150
Динамика гармонического осциллятора . . . . .	150
Интегральный оператор Фурье 2-го типа и его свойства . . . . .	151
Интегральный оператор Фурье 1-го типа . . . . .	152
Групповое свойство и точность представления . . . . .	153
Литература . . . . .	154

<b>5. Моделирование радиозатменных экспериментов</b> . . . . .	155
5.1. Интегрирование уравнений геометрической оптики . . . . .	155
Вычисление лучей, фазы и амплитуды . . . . .	155
Методы возмущений в геометрической оптике . . . . .	158
Системы координат. Двумерное приближение . . . . .	159
Уравнения лучей в полярных координатах . . . . .	161
Угол рефракции . . . . .	162
Сверхрефракция и волноводное распространение . . . . .	164
Определение углов рефракции по измерениям фазы . . . . .	166
Амплитуда радиозатменных сигналов . . . . .	168
Определение углов рефракции по измерениям амплитуды . . . . .	170
Определение фазы и амплитуды по профилю угла рефракции . . . . .	171
Определение поглощения по измерениям амплитуды и фазы . . . . .	172
Приближение вертикальной геометрии и неподвижного источника . . . . .	173
Моделирование поля показателя преломления в атмосфере . . . . .	177
Литература . . . . .	182
5.2. Метод фазовых экранов . . . . .	184
Дифракционная модель радиозатменных экспериментов . . . . .	184
Определение области распространения радиоволн . . . . .	185
Метод фазовых экранов . . . . .	186
Модель распространения радиоволн . . . . .	187
Метод цилиндрических фазовых экранов . . . . .	189
Литература . . . . .	189
5.3. Асимптотическое прямое моделирование . . . . .	190
Каноническое преобразование 2-го типа к лучевым координатам . . . . .	190
Линеаризованное каноническое преобразование . . . . .	193
Прямое моделирование с использованием оператора 2-го типа . . . . .	195
Распространение волн в вакууме . . . . .	196
Литература . . . . .	200
<b>6. Обратная задача радиопросвечивания атмосферы</b> . . . . .	201
6.1. Радиозатменное зондирование атмосфер планет и Земли . . . . .	201
Литература . . . . .	203
6.2. Решение обратной задачи в приближении геометрической оптики. . . . .	207
Обращение углов рефракции . . . . .	207
Влияние волноводов . . . . .	209
Восстановление метеопараметров . . . . .	210
Восстановление комплексного показателя преломления . . . . .	211
Обращение комплексного показателя преломления . . . . .	212
Литература . . . . .	213
6.3. Восстановление лучевой структуры волнового поля . . . . .	213
Общие замечания . . . . .	213
Каноническое преобразование 1-го типа . . . . .	214
Каноническое преобразование 2-го типа . . . . .	217
Литература . . . . .	221
6.4. Общая схема обработки данных измерений . . . . .	222
Исходные данные . . . . .	222
Демодуляция фазовой задержки в канале L1 . . . . .	223
Предварительная обработка данных измерений . . . . .	224
Обработка фазовой задержки в канале L2 и контроль качества . . . . .	225
Определение углов рефракции в каналах L1 и L2 . . . . .	226

Оценка погрешностей углов рефракции . . . . .	227
Статистическая регуляризация и контроль качества . . . . .	227
Восстановление профиля сухой температуры . . . . .	228
Обращение и оценка погрешностей восстановленной температуры . . . . .	229
Литература . . . . .	229
<b>6.5. Методы вариационного усвоения . . . . .</b>	<b>231</b>
Вводные замечания . . . . .	231
Общие принципы прямого вариационного усвоения . . . . .	232
Линеаризованная модель поля показателя преломления . . . . .	234
1-мерная линеаризованная модель угла рефракции . . . . .	238
3-мерная линеаризованная модель угла рефракции . . . . .	240
Другие подходы к усвоению . . . . .	246
Литература . . . . .	247
<b>7. Нелинейные представления волновых полей . . . . .</b>	<b>248</b>
7.1. Волновое поле и связанное с ним фазовое пространство . . . . .	248
Литература . . . . .	249
7.2. Спектрограмма как плотность на фазовом пространстве . . . . .	249
Литература . . . . .	256
7.3. Общий подход к фазовым плотностям осциллирующих сигналов . . . . .	257
Литература . . . . .	259
7.4. Плотности и наблюдаемые в классической механике . . . . .	260
Литература . . . . .	261
7.5. Исчисление функций от некоммутирующих операторов . . . . .	262
Принцип соответствия классической и квантовой механики . . . . .	262
Экспоненциальные функции от операторов . . . . .	262
Вейлевские и упорядоченные символы операторов . . . . .	263
Асимптотические формулы для символа коммутатора двух операторов . . . . .	264
Связь между ядром и символом . . . . .	265
Связь между вейлевским и упорядоченным символами . . . . .	266
Примеры . . . . .	268
Литература . . . . .	269
7.6. Плотность и наблюдаемые в квантовой механике . . . . .	269
Оператор плотности . . . . .	269
Символ оператора плотности и средние значения наблюдаемых . . . . .	271
Матрица плотности и нелинейные представления . . . . .	273
Литература . . . . .	274
7.7. Томографическое определение плотности . . . . .	274
Литература . . . . .	279
7.8. Приложение к радиозатменным данным . . . . .	279
Свойства квантовой плотности Вигнера . . . . .	279
Оконная плотность Вигнера . . . . .	281
Приложение к радиозатменным данным . . . . .	281
Обработка искусственных данных . . . . .	281
Обработка экспериментальных данных . . . . .	283
Литература . . . . .	286
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>288</b>