

М.Е.Горбунов

**ФИЗИЧЕСКИЕ
И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
ПРИНЦИПЫ
СПУТНИКОВОГО
РАДИОЗАТМЕННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ
АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**



Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук

М.Е. Горбунов

**ФИЗИЧЕСКИЕ
И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
СПУТНИКОВОГО РАДИОЗАТМЕННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

Москва
ГЕОС
2019

УДК 551.5/532.5

ББК 26.323

Г 12

Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019. 290 с. ISBN 978-5-89118-780-1

В монографии дается обзор современного состояния радиозатменного зондирования атмосферы, включающий методы интерпретации и усвоения измерений в модели глобальной циркуляции атмосферы. Изложен оригинальный подход к решению обратной задачи радиозатменного зондирования атмосферы, основанный на восстановлении лучевой структуры волновых полей. Для этой цели привлекается аппарат линейных и нелинейных представлений. Линейные представления строятся с использованием интегральных операторов Фурье. Нелинейные представления основаны на квантовых плотностях Вигнера и Кирквуда. Изложены принципы вариационного усвоения радиозатменных данных в модели глобальной циркуляции атмосферы. Задача спутникового радиопросвечивания атмосферы сформулирована и решена, исходя из первых принципов, которыми являются уравнения Максвелла и физические свойства газов, составляющих атмосферу. Решение доведено до приложений в области исследования общей циркуляции атмосферы.

Для студентов, аспирантов и научных работников, специализирующихся на вопросах распространения радиоволн, радиофизического спутникового зондирования атмосферы Земли и моделирования численного прогноза погоды. Книга может служить введением для физиков в такие темы, как канонический оператор Маслова, интегральные операторы Фурье и квантовая плотность Вигнера.

Ответственный редактор
академик Г.С. Голицын

Рецензент *д.ф.-м.н. В.А. Банах*

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований,
по проекту № 18-15-00031 Д



Издания РФФИ не подлежат продаже.

© М.Е. Горбунов, 2019

© ООО "Издательство ГЕОС", 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	7
Литература	16
2. Рефракционные свойства атмосферы Земли	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
3. Распространение радиоволн	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
4. Асимптотические методы решения волновых задач	100
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

5. Моделирование радиозатменных экспериментов	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
6. Обратная задача радиопросвечивания атмосферы	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
6.5. Методы вариационного усвоения	231
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
7. Нелинейные представления волновых полей	248
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
Заключение	288