

А.А. Потапов

# ФРАКТАЛЫ В РАДИОФИЗИКЕ И РАДИОЛОКАЦИИ:

Топология выборки



Москва  
«Университетская книга»  
2005

УДК 530.1:537.86+621.396.96

ББК 22.311

П64

*Федеральная целевая программа «Культура России»  
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)*

**Потапов А.А.**

П64      Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология вы-  
борки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Университетская книга,  
2005. – 848 с.: ил.

**ISBN 5-98699-015-3**

Освещается современное состояние нового бурно развивающегося направления в теории детерминированного хаоса – теории фракталов в приложении к радиофизике и радиолокации. Дано введение в теорию фракталов. Рассмотрены диффузионные процессы во фрактальных пространствах, описания фрактальных поверхностей, методы решения задач дифракции волн на фрактальной поверхности и во фрактальных средах, самоподобие турбулентности, молний, дождей, облаков, атмосферных аэрозолей, сложных систем, пространственных структур геосистем в дистанционном зондировании, современные фрактальные антенны и их синтез, пути решения проблем нетрадиционной фрактальной обработки изображений при различных отношениях сигнал/шум и обнаружения малоконтрастных объектов, подходы к фрактальному моделированию в космической радиофизике и космологии. В основу изложения положен общий подход, опирающийся на идеи фрактальной геометрии, дробного интегрирования и размерностей дробного порядка. Представлены материалы о недифференцируемых функциях и множествах, о разнообразных типах фрактальных антенн. Отдельная глава посвящена результатам исследований по созданию новых информационных технологий с использованием текстурных и фрактальных мер на основе синергетических принципов нелинейной динамики. Обновлен и уточнен перечень перспективных направлений исследований.

Для физиков, математиков, интересующихся проблемой фракталов в радиофизике и радиолокации. Может использоваться в учебном процессе высших учебных заведений при подготовке специалистов и магистров по направлениям и специальностям 511600 «Прикладная математика и физика», 511500 «Радиофизика».

ББК 22.311

ISBN 5-98699-015-3

© Потапов А.А., 2002, 2004

© «Университетская книга», 2005

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9
Введение .....	10
<b>Глава 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ .....</b>	<b>15</b>
1.1. Меры фрактальной размерности и показатели Ляпунова .....	15
1.2. Стохастическое описание мультифракталов .....	32
1.3. Вычисление на ЭВМ значений фрактальных размерностей, показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова .....	37
1.4. Экспериментальное определение фрактальных размерностей .....	47
1.5. Эмпирический закон Херста для временных рядов .....	54
<b>Глава 2. СЛУЧАЙНЫЕ ФРАКТАЛЫ И ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>57</b>
2.1. Фрактальный анализ сигналов .....	57
2.2. Интегралы и производные дробного порядка во фрактальной геометрии .....	73
2.3. Диффузия во фрактальных пространствах .....	83
2.4. Недифференцируемые, или фрактальные, функции и множества .....	101
<b>Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....</b>	<b>131</b>
3.1. Пространственные спектры мощности поверхностей .....	131
3.2. Фрактальные размерности параметров окружающей среды .....	136
3.3. Фрактальные размерности микроповерхностей .....	139
3.4. Морская поверхность как фрактальная структура .....	144
<b>Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАССЕЙНИЯ ВОЛН ФРАКТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ .....</b>	<b>154</b>
4.1. Модель с фрактальными высотами неровностей .....	154
4.2. Радиолокационные рассеивающие характеристики в модели с фрактальными высотами неровностей .....	166
4.3. Модель с фрактальными наклонами неровностей .....	172
4.4. Индекс мерцаний при рассеянии волн экраном с фрактальными наклонами .....	186
4.5. Фрактоидная модель рассеяния волн .....	196
4.6. Обобщенное рэлеевское решение задачи рассеяния волн фрактальной поверхностью .....	208
4.7. Индикатрисы рассеяния фрактальных поверхностей в приближении Кирхгофа .....	220
4.8. Рассеяние импульсов фрактальной поверхностью .....	233

<b>Глава 5. АНАЛИЗ САМОПОДОБИЯ ПРИ ОПИСАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ГИДРОМЕТЕОРОВ, МОЛНИЙ И АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ</b> .....	244
5.1. Фрактальность турбулентности .....	244
5.2. Фрактальные модели дождей и облаков .....	260
5.3. Компьютерное моделирование фракталами молний в атмосфере .....	272
5.4. Экспериментальное моделирование фрактальных аэрозолей и аэрогелей .....	279
<b>Глава 6. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ВО ФРАКТАЛЬНЫХ СРЕДАХ</b> .....	294
6.1. Плоская волна в среде с фрактальной диэлектрической проницаемостью .....	294
6.2. Диапазонно ограниченная фрактальная модель флуктуаций коэффициента преломления тропосферы .....	299
6.3. Волновые взаимодействия в многослойной канторовой среде распространения .....	308
6.4. Дифракция плоской волны на диапазонно ограниченном фрактальном фазовом экране .....	325
6.5. Распространение гауссова пучка излучения в диапазонно ограниченной фрактальной среде .....	338
6.6. Рассеяние звука объемными неоднородностями с фрактальным спектром в океане .....	352
6.7. Дифракция волн на фрактальных зубчатых апертурах .....	355
6.8. Рассеяние волн частицами неоднородной формы на основе фрактального приближения .....	366
6.9. Рассеяние волн диэлектрическими фрактальными волокнами	379
6.10. Поглощение и рассеяние волн скоплениями фрактальных частиц дыма .....	385
6.11. Многократное рассеяние волн фрактальными средами .....	405
6.12. Теории катастроф и фракталов в случайных волновых полях	416
<b>Глава 7. ФРАКТАЛЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И КОММУНИКАЦИЙ</b> .....	423
7.1. Фрактальный анализ сложных компьютерных систем .....	423
7.2. Метод фрактальных графов в синтезе сложных систем .....	433
7.3. Фрактальный характер линий железнодорожной сети большого города .....	435
<b>Глава 8. ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ГЕОСИСТЕМ</b> .....	440
8.1 Фрактальные размерности геосистем на основе космических и самолетных снимков .....	440

8.2. Самоподобные свойства зеленых насаждений в большом городе .....	452
8.3. Анализ самоподобного фрактального множества морских льдов .....	455

<b>Глава 9. ЦИФРОВАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ .....</b>	<b>462</b>
9.1. Фрактальные модели изображений земной поверхности .....	462
9.2. Анализ и синтез фрактальных карт местности .....	466
9.3. Сегментация текстур с помощью фрактального анализа .....	473
9.4. Фрактальная кластеризация данных дистанционного зондирования .....	481
9.5. Многоуровневая фрактальная модель для характеристики объектов .....	491
9.6. Различение человеком-оператором фрактальных текстур .....	501
9.7. Детерминированный хаос в сигнатурах и радиолокационных изображениях земной поверхности .....	506
9.8. Стохастические сигналы и преобразование Радона в цифровом радиолокаторе с фрактальной обработкой информации .....	521
9.9. Фрактальное обнаружение целей на изображениях земной поверхности .....	541
9.10. Фрактальное распознавание целей .....	560
9.11. Фрактальное кодирование изображений .....	567

<b>Глава 10. ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКЕ И КОСМОЛОГИИ .....</b>	<b>583</b>
10.1. Кластеризация во Вселенной .....	583
10.2. Модель структурной функции пространственного распределения галактик .....	587
10.3. Стохастический подход к кластеризации во Вселенной .....	591
10.4. Модификация тестов и алгоритма Манделъброта моделирования распределений галактик фрактального типа .....	601
10.5. Скейлинговые свойства флуктуаций космических лучей .....	606
10.6. Фрактальная модель солнечных пятен и роль кластеров в их эволюции .....	609
10.7. Фрактальные свойства турбулентности солнечного ветра и магнитных конфигураций .....	614

<b>Глава 11. ФРАКТАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ И МЕТОДЫ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....</b>	<b>620</b>
11.1. Фрактальные антенные решетки .....	620
11.2. Многодиапазонные фрактальные антенны Серпинского .....	626
11.3. Расчет фрактальных антенн на основе .....	

итерационной модели линии передачи .....	637
11.4. Фрактальные кольцевые и эллиптические несимметричные антенны .....	648
11.5. Древоподобные фрактальные антенны .....	662
11.6. Микрополосковые фрактальные антенны на основе снежинки Коха .....	665
11.7. Синтез фрактальных диаграмм направленности антенных решеток на основе обобщенных функций Вейерштрасса .....	675
11.8. Синтез фрактальных диаграмм направленности линейных антенн с использованием преобразования Фурье–Вейерштрасса ...	683
11.9. Фрактальные решетки Фурье–Вейерштрасса .....	690
11.10. Синтез фрактальных диаграмм направленности реконфигурируемых антенных решеток .....	695
11.11. Методы синтеза многодиапазонных фрактальных антенных решеток на основе оконной фильтрации .....	703
11.12. Примеры синтеза многодиапазонной фрактальной антенной решетки методами оконной фильтрации .....	710
11.13. Моделирование поверхностного импеданса фрактальных структур .....	716
11.14. Фрактальные фотонные и магнонные кристаллы .....	718

## **Глава 12. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРНЫХ И ФРАКТАЛЬНЫХ СИГНАТУР**

<b>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ: ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ .....</b>	<b>731</b>
12.1. Некоторые актуальные задачи радиолокации и статистической радиофизики: проблема малоконтрастных целей ...	731
12.2. Текстуры меры и сигнатуры .....	734
12.3. Фрактальные меры и сигнатуры .....	740
12.4. Избранные результаты исследований по фрактальной фильтрации малоконтрастных объектов .....	743
12.5. Топология выборки .....	755
12.6. Странный аттрактор в радиолокационном сигнале от растительных покровов и паретианы .....	767
12.7. Фракталы и мультифракталы на нечетких множествах .....	777
12.8. Конструирование фрактальных антенн и фрактальных частотно-селективных поверхностей и объемов ....	778
12.9. Фрактальные методы передачи информации .....	783

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>785</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>788</b>