

Аджемов С.С., Чиров Д.С.,  
Терешонок М.В.

# РАСПОЗНАВАНИЕ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ КОГНИТИВНОГО РАДИО

**Аджемов С.С., Чиров Д.С., Терешонок М.В.**

**РАСПОЗНАВАНИЕ ВИДОВ  
ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ  
СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ  
КОГНИТИВНОГО РАДИО**

**Москва, 2018**

УДК 621.376: 004.931: 519.67  
ББК 32.973

**Аджемов С.С., Чиров Д.С., Терешонок М.В.**

Распознавание видов цифровой модуляции в системах когнитивного радио. М.: МТУСИ, 2018. 224 с.: ил. 117. библ. 102.

В монографии рассматриваются методы распознавания цифровой модуляции радиосигналов в системах когнитивного радио по статистическим и структурным признакам. Проведен анализ существующих методов и описаны новые методы распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов, разработанные авторами. Рассмотрены вопросы применения интеллектуальных методов анализа данных (искусственных нейронных сетей, деревьев решений и др.) для решения этой задачи. Приведены результаты оценки эффективности различных методов распознавания.

Авторы надеются, что книга будет полезной для студентов, аспирантов, преподавателей и инженеров, специализирующихся в области телекоммуникационных систем.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-17-00002, не подлежит продаже.

**ISBN 978-5-903650-24-8**



© Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С., МТУСИ, 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. ТЕНДЕНЦИИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ</b> ....	9
1.1 История развития беспроводных телекоммуникационных систем ....	9
1.2 Современное состояние и развитие спутниковых каналов связи .....	16
1.3 Современное состояние и развитие систем наземной беспроводной связи .....	22
1.3.1 Стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11ac .....	22
1.3.2 Стандарт беспроводной связи IEEE 802.11ad .....	22
1.3.3 Стандарт беспроводной связи LTE .....	23
1.3.4 Сети «когнитивного радио» .....	28
<b>2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ КОГНИТИВНОГО РАДИО</b> .....	35
2.1 Формирование сигналов цифровой системы связи .....	35
2.1.1 Цифровая модуляция .....	36
2.1.2 Канальное кодирование .....	54
2.2 Прием сигналов цифровой связи в условиях априорной неопределенности его структуры .....	70
<b>3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ СВЯЗИ</b> .....	75
3.1 Предварительная оценка несущей частоты сигнала .....	75
3.1.1 Метод измерения мгновенной частоты .....	75
3.1.2 Метод измерения частоты на основе быстрого преобразования Фурье .....	76
3.2 Методы оценки тактовой частоты сигнала .....	82
3.3 Оценка сдвига несущей частоты сигнала .....	99
3.3.1 Алгоритм оценивания несущей частоты, инвариантный относительно вида модуляции, начальной фазы радиосигнала и информационной последовательности .....	107
3.3.2 Анализ эффективности алгоритма прогнозирования моментов выборки отсчетов и оценки несущей частоты .....	111
3.3.3 Устранение неоднозначности при оценивании несущей частоты в условиях априорной неопределенности .....	122

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. ТЕНДЕНЦИИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ</b> ....	9
1.1 История развития беспроводных телекоммуникационных систем ....	9
1.2 Современное состояние и развитие спутниковых каналов связи .....	16
1.3 Современное состояние и развитие систем наземной беспроводной связи .....	22
1.3.1 Стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11ac .....	22
1.3.2 Стандарт беспроводной связи IEEE 802.11ad .....	22
1.3.3 Стандарт беспроводной связи LTE .....	23
1.3.4 Сети «когнитивного радио» .....	28
<b>2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ КОГНИТИВНОГО РАДИО</b> .....	35
2.1 Формирование сигналов цифровой системы связи .....	35
2.1.1 Цифровая модуляция .....	36
2.1.2 Канальное кодирование .....	54
2.2 Прием сигналов цифровой связи в условиях априорной неопределенности его структуры .....	70
<b>3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ СВЯЗИ</b> .....	75
3.1 Предварительная оценка несущей частоты сигнала .....	75
3.1.1 Метод измерения мгновенной частоты .....	75
3.1.2 Метод измерения частоты на основе быстрого преобразования Фурье .....	76
3.2 Методы оценки тактовой частоты сигнала .....	82
3.3 Оценка сдвига несущей частоты сигнала .....	99
3.3.1 Алгоритм оценивания несущей частоты, инвариантный относительно вида модуляции, начальной фазы радиосигнала и информационной последовательности .....	107
3.3.2 Анализ эффективности алгоритма прогнозирования моментов выборки отсчетов и оценки несущей частоты .....	111
3.3.3 Устранение неоднозначности при оценивании несущей частоты в условиях априорной неопределенности .....	122

<b>4 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ</b> .....	126
4.1 Распознавание по характеристикам распределения мгновенной частоты, фазы и амплитуды сигнала .....	127
4.2 Распознавание с использованием кумулянтов (моментов) высокого порядка .....	143
4.3 Распознавание с использованием вейвлет коэффициентов .....	151
<b>5 МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО СТРУКТУРНЫМ ПРИЗНАКАМ</b> .....	153
5.1 Распознавание по виду фазового созвездия .....	154
5.2 Распознавание по виду энергетического спектра .....	158
5.3 Распознавание по вейвлет-гистограмме .....	164
5.4 Распознавание по гистограмме интервалов пересечения нулевого уровня .....	168
<b>6. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ</b> .....	176
6.1 Математический аппарат искусственных нейронных сетей .....	176
6.1.1 Многослойный персептрон .....	183
6.1.2 Сеть на радиальных базисных функциях .....	184
6.1.3 Самоорганизующаяся карта Кохонена .....	187
6.1.4 Гибридные нейронные сети .....	192
6.2 Математический аппарат деревьев решений .....	197
6.2.1 Структура деревьев решений .....	197
6.2.2 Алгоритмы построения деревьев решений .....	199
6.2.3 Преобразование дерева решений в набор правил .....	205
6.3 Использование интеллектуальных методов анализа данных для распознавания видов модуляции радиосигналов .....	207
6.3.1 Распознавание видов модуляции с использованием многослойного персептрона .....	207
6.3.2 Распознавание фазовых видов модуляции радиосигналов с использованием самоорганизующейся карты Кохонена .....	209
6.3.3 Распознавание видов модуляции с использованием деревьев решений .....	213
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	219