Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 06

Цифровая модуляция и помехоустойчивое кодирование

BPSK, QPSK, 8PSK, FEC, BER и адаптивные режимы



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Показать, как параметры модуляции и кодирования определяют скорость, устойчивость и требования к радиолинии.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Сравнивать BPSK, QPSK и 8PSK. Объяснять роль FEC и кодовой скорости. Оценивать компромисс между скоростью и энергетикой.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Символьное представление информации**
2. **Корректирующее кодирование**
3. **Качество и адаптация**
4. **Синхронизация приёма**
5. **Полоса и формирование импульса**
6. **Ресурсная оценка**

Символьное представление информации

РАЗДЕЛ 1 / 6

При цифровой модуляции биты группируются в символы, которым соответствуют состояния несущей. BPSK использует две фазы, QPSK — четыре, 8PSK — восемь. При одинаковой символьной скорости схемы с большим числом состояний передают больше бит, но расстояние между точками созвездия уменьшается и повышается чувствительность к шумам и фазовым ошибкам.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

BPSK

QPSK

8PSK

01

Корректирующее кодирование

РАЗДЕЛ 2 / 6

Прямое исправление ошибок FEC добавляет избыточные проверочные биты. Приёмник использует их, чтобы обнаруживать и исправлять часть искажений без запроса повторной передачи. Кодовая скорость r = k/n показывает долю информационных бит. Понижение r увеличивает избыточность и часто улучшает помехоустойчивость, однако уменьшает полезную скорость при заданной символьной скорости.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Корректирующее кодирование

QPSK

8PSK

02

Качество и адаптация

РАЗДЕЛ 3 / 6

Вероятность ошибки битов BER зависит от Eb/N_o, модуляции, кодирования и характеристик канала. В адаптивной модуляции и кодировании ACM передатчик изменяет режим согласно измеренному качеству линии. Для спутниковых широкополосных систем применяется семейство DVB-S2, включающее сочетания модуляции и FEC. В научных миссиях могут использоваться другие стандартизованные или специально разработанные режимы.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Качество

адаптация

8PSK

03

Синхронизация приёма

РАЗДЕЛ 4 / 6

Приёмник должен определить частоту и фазу несущей, границы символов и начало кадра. Доплеровский сдвиг и нестабильность генераторов усложняют процедуру захвата. Учебный анализ качества включает спектр сигнала, диаграмму созвездия и статистику ошибок.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Синхронизация приёма

FEC

BER

04

Полоса и формирование импульса

РАЗДЕЛ 5 / 6

Фильтры с приподнятым косинусом ограничивают спектр и межсимвольную интерференцию. Коэффициент скругления roll-off влияет на занимаемую полосу. Упрощённо ширина спектра однонесущего канала зависит от символьной скорости R_s и коэффициента α: $B \approx R_s(1 + \alpha)$.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Полоса

формирование импульса

BER

05

Ресурсная оценка

РАЗДЕЛ 6 / 6

Скорость до служебных заголовков и других накладных расходов приближённо $R_b = R_s \times \log_2(M) \times r$. Для полезной производительности учитывают также пилоты, синхрослова и протокольные данные. При выборе режима необходимо сравнивать требуемый Eb/N_0 с доступным запасом радиолинии.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Ресурсная оценка

ACM

Roll-off

06

Техническая иллюстрация

Цифровая модуляция и помехоустойчивое кодирование



Обратите внимание

BPSK, QPSK, 8PSK, FEC, BER и адаптивные режимы

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$R_b \approx R_s \times \log_2(M) \times r;\ B \approx R_s(1 + \alpha).$$

Обратите внимание

Приёмник должен определить частоту и фазу несущей, границы символов и начало кадра.

Скорость QPSK с FEC

Инженерный пример

При R_s = 1 Мсимв/с, QPSK (M = 4) и r = 3/4 номинальная информационная скорость до прочих накладных расходов: 1 × 2 × 0,75 = 1,5 Мбит/с. При α = 0,25 ориентировочная занятая полоса — 1,25 МГц. Фактические показатели зависят от кадрирования и реализации.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

При выборе цифрового режима нельзя ограничиваться числом бит на символ. Должны одновременно учитываться кодовая скорость, фильтр формирования импульсов, фазовый шум, доплеровский сдвиг, линейность усилителя и служебные кадры. Схемы более высокого порядка особенно чувствительны к фазовым и амплитудным ошибкам, а работа усилителя близко к насыщению создаёт спектральное расширение. Поэтому паспорт радиомодема обычно содержит пороги качества для разных комбинаций модуляции и кода. В рабочем алгоритме адаптации используется измеренная метрика качества, но его переключения не должны вызывать нестабильность при колебаниях канала.

Алгоритм инженерной проверки

Последовательность действий



1. Определите исходные параметры и единицы.
2. Отделите измеренные значения от допущений и ориентировочных данных.
3. Проверьте расчёт и его применимость.
4. Оцените порядок величины, допущения и способ независимой проверки.

Последовательность проверки помогает связать расчёт, измерение и требования проекта.

Проектные ограничения

Что следует учитывать при реализации

В условиях ухудшения связи простое увеличение скорости передачи может повысить BER и в итоге уменьшить количество успешно доставленных данных. Эффективность системы оценивается не номинальной скоростью модулятора, а подтверждённым полезным потоком. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Сравните номинальную скорость QPSK r=1/2 и 8PSK r=2/3 при одной символьной скорости. Объясните, почему режим с большей скоростью не всегда лучше.

Термины для повторения

BPSK • QPSK • 8PSK • FEC • BER • ACM • Roll-off • Созвездие

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Сколько бит несёт символ QPSK?

02 Зачем нужен FEC?

03 Как кодовая скорость влияет на полезный поток?

04 Для чего используют диаграмму созвездия?

05 Что означает BER?

06 Почему ACM полезна на переменном канале?

Итоги лекции

Три основных положения

1. При цифровой модуляции биты группируются в символы, которым соответствуют состояния несущей.

2. Прямое исправление ошибок FEC добавляет избыточные проверочные биты.

3. Вероятность ошибки битов BER зависит от Eb/N_o, модуляции, кодирования и характеристик канала.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 DVB. ETSI EN 302 307-1 (DVB-S2)

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан