Лекция 2

Физические основы беспроводной связи и технологии передачи данных WLAN

6B06201 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации

А.А. Хохлов • Алматы, 2026

Цель лекции

- Сформировать знания о физических процессах, лежащих в основе беспроводной передачи данных, и их влиянии на качество работы корпоративных WLAN.
- Изучить характеристики радиоволн, особенности распространения электромагнитных сигналов в различных условиях, влияние затухания, отражений, интерференции и многолучевого распространения.
- Рассмотреть принципы модуляции и кодирования, а также технологии OFDM и OFDMA, используемые для повышения эффективности передачи данных и рационального использования радиочастотных ресурсов.

Результаты обучения

По завершении лекции обучающийся сможет:

- Объяснять основные характеристики радиосигналов и факторы, влияющие на их распространение.
- Характеризовать принципы модуляции, кодирования и многолучевого распространения сигналов.
- Объяснять назначение технологий OFDM и OFDMA и их влияние на эффективность беспроводной связи.

Электромагнитная волна: основные параметры

Частота f

Число колебаний за секунду. Определяет диапазон радиосвязи.

Длина волны λ

Убывает с ростом частоты; влияет на свойства распространения и антенн.

Фаза и амплитуда

Определяют состояние колебания и влияют на сложение сигналов.

λ = c / f • 2,4 ГГц ≈ 12,5 см • 5 ГГц ≈ 6 см

Частотные диапазоны корпоративной WLAN

2,4 ГГц

Относительно хорошее распространение, но мало неперекрывающихся каналов и много соседних устройств.

5 ГГц

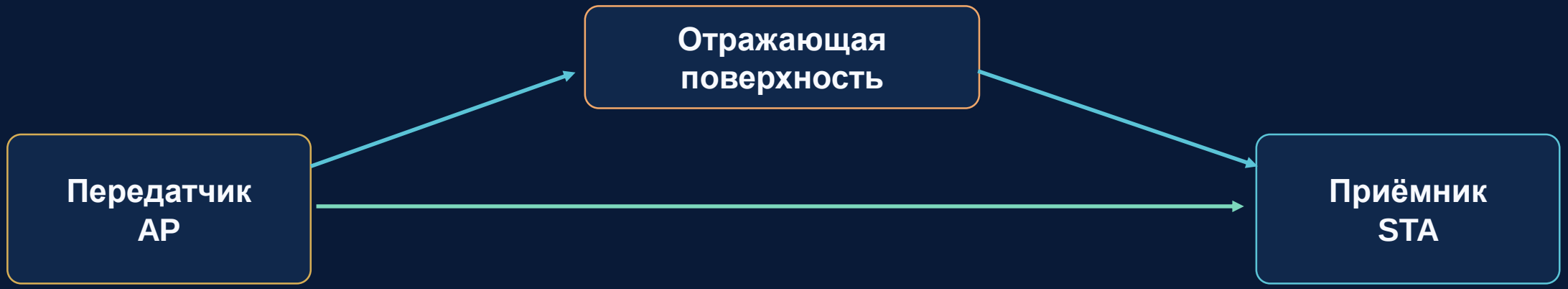
Больше каналов и возможностей частотного планирования; потери распространения обычно выше.

6 ГГц

Дополнительные ресурсы для широких каналов; использование зависит от регулирования страны.

Более высокая частота не означает автоматически более высокую мощность передатчика.

Многолучевое распространение и интерференция



- Разные пути создают копии сигнала с различными задержками и фазами.
- Интерференция может усиливать или ослаблять принимаемый сигнал.
- OFDM, защитные интервалы и MIMO помогают ограничить последствия.

Цепочка цифровой радиопередачи



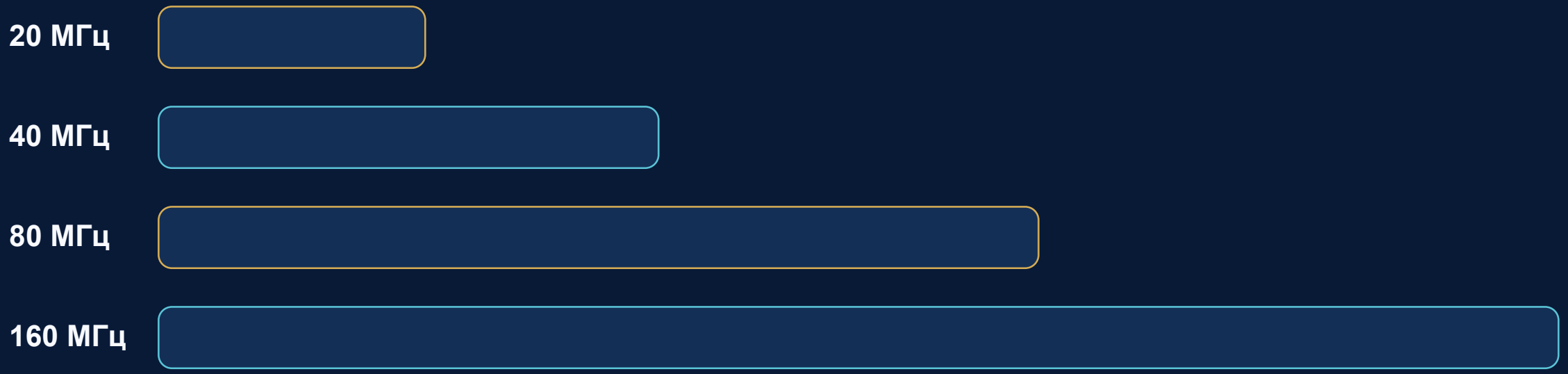
- Кодирование источника сокращает объём представления информации.
- Канальное кодирование вводит избыточность для защиты от ошибок.
- Демодуляция и декодирование восстанавливают переданные данные.

Модуляция: компромисс скорости и устойчивости

BPSK	QPSK	QAM
2 состояния	4 состояния	Амплитуда + фаза
1 бит/символ	2 бита/символ	Высокая плотность битов

Высокие порядки QAM требуют лучшего отношения сигнал/шум (SNR).

Радиоканалы, помехи и ширина полосы



- В диапазоне 2,4 ГГц широко используют каналы 1, 6 и 11 (20 МГц).
- Широкие каналы повышают потенциальную PHY-скорость.
- В плотных WLAN узкие каналы могут улучшать частотное повторное использование.

PHY и MAC: два уровня работы IEEE 802.11

PHY - физический уровень

Радиосигнал; модуляция и кодирование; частотный диапазон и ширина канала; передача и приём.

MAC - управление доступом

Доступ к общей среде; кадры; адресация; подтверждения; координация передачи.

PHY определяет, как передаётся сигнал; MAC - когда и кому передавать кадр.

OFDM и OFDMA: от поднесущих к пользователям

OFDM



Один пользователь / поток

OFDMA



Разные группы RU для разных пользователей

OFDMA эффективна при обслуживании большого числа устройств с небольшими пакетами.

CSMA/CA: как устройства делят радиоканал



- Если среда занята, отсчёт случайной отсрочки приостанавливается.
- IFS и механизм backoff уменьшают вероятность конфликтов.
- RTS/CTS помогает при проблеме скрытых узлов, но добавляет служебные расходы.

Агрегация кадров и Block ACK



- Меньше служебных расходов при передаче небольших кадров.
- Block ACK подтверждает группу кадров вместо отдельных подтверждений.

MIMO, MU-MIMO и Beamforming

SISO / SIMO / MISO

Разное число передающих и принимающих антенн.

MIMO / MU-MIMO

Несколько пространственных потоков; обслуживание одного или нескольких клиентов.

Beamforming

Управление фазой и амплитудой сигналов антенных элементов для усиления нужного направления.

Выигрыш ограничен свойствами радиоканала, SNR и возможностями устройств.

Wi-Fi 6: эффективность в плотной сети

OFDMA

Ресурсные единицы для разных клиентов

MU-MIMO

Параллельные пространственные потоки

BSS Coloring

Различение передач соседних BSS

TWT

Согласованные интервалы активности устройств

Wi-Fi 6 развивает не только скорость, но и суммарную эффективность WLAN.

Итоги и контрольные вопросы

- Радиоканал зависит от частоты, фазы, отражений, помех и SNR.
- Модуляция, кодирование, OFDM и MIMO повышают эффективность передачи.
- OFDMA и MU-MIMO позволяют обслуживать несколько пользователей.
- CSMA/CA, IFS и RTS/CTS координируют доступ к общей радиосреде.
- Реальная пользовательская скорость ниже максимальной PHY-скорости.

Вопрос: почему широкий канал не всегда лучше в плотной корпоративной WLAN?