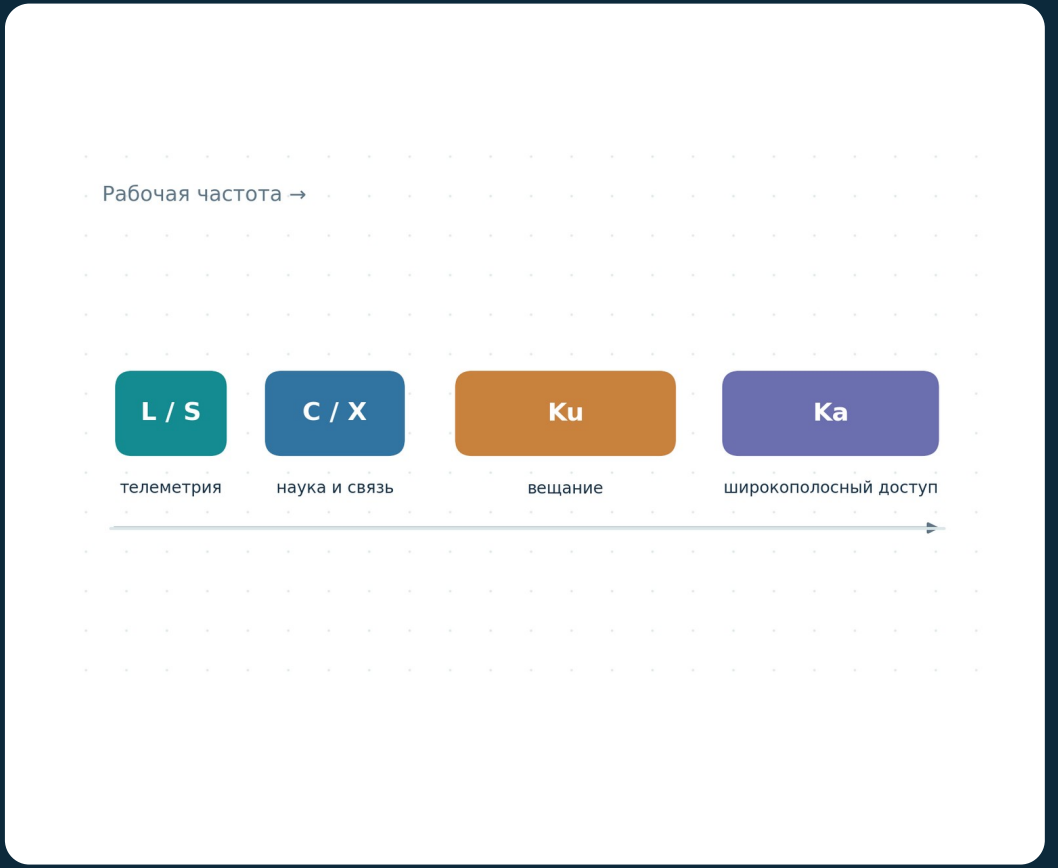
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 04

Радиочастотный спектр и частотное планирование

Диапазоны связи, дуплексирование, помехи и совместимость



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Освоить базовые правила выбора частоты и полосы для спутникового радиоканала с учётом физики распространения и регулирования.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Соотносить диапазоны VHF/UHF, S, X, Ku, Ka с инженерными задачами. Различать полосу, центральную частоту и защитный интервал. Объяснять необходимость координации радиочастот.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Частота и длина волны**
2. **Полоса и способ разделения каналов**
3. **Помехи и регулирование**
4. **Частотный план**
5. **Спектральная эффективность**
6. **Измерение спектра**

Частота и длина волны

РАЗДЕЛ 1 / 6

Частота сигнала связана с длиной волны выражением λ = c/f. При увеличении частоты для фиксированной физической апертуры можно получить более высокий коэффициент усиления, но возрастают требования к точности изготовления, наведению и учёту атмосферных эффектов. VHF/UHF удобно использовать для некоторых низкоскоростных каналов, а S- и X-диапазоны — для более высоких скоростей передачи данных; конкретное право работы определяется назначением службы и национальными разрешениями.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Частота

длина волны

VHF

01

Полоса и способ разделения каналов

РАЗДЕЛ 2 / 6

Спектральный ресурс ограничен. В системе необходимо назначить частоты uplink и downlink, ширину занимаемой полосы, тип модуляции, фильтрацию и допустимые внеполосные излучения. Частотное разделение FDD использует разные полосы для встречных направлений, а временное TDD — разные интервалы времени. На борту фильтры и дуплексеры защищают чувствительный приёмник от собственного передатчика.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Полоса

способ разделения каналов

UHF

02

Помехи и регулирование

РАЗДЕЛ 3 / 6

Космические радиосистемы работают в общей радиочастотной среде. Источниками помех бывают соседние каналы, наземные радиослужбы, другие спутники и интермодуляция в нелинейных трактах. Выбор частот проводят по распределению радиослужб и процедурам координации, учитывая требования ITU и национального регулятора. Наличие популярного модуля приёмопередатчика само по себе не означает, что его частоту разрешено использовать с космического аппарата.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Помехи

регулирование

S/X/Ka

03

Частотный план

РАЗДЕЛ 4 / 6

Инженерный частотный план содержит центр полосы, минимальную и максимальную частоту, ширину канала, поляризацию, уровень мощности, тип антенны и описание всех режимов работы. Отдельно оценивают доплеровский сдвиг на LEO и стабильность опорных генераторов.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Частотный план

FDD

TDD

04

Спектральная эффективность

РАЗДЕЛ 5 / 6

Спектральная эффективность $\eta_s = R_b/B$ показывает количество передаваемых бит в секунду на герц полосы. Высокий показатель обычно требует лучшего отношения сигнал/шум и более сложного оборудования. Кодирование увеличивает устойчивость, но занимает дополнительные символы.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Спектральная эффективность

TDD

Полоса

05

Измерение спектра

РАЗДЕЛ 6 / 6

При проверке радиомодуля оценивают занятую полосу, побочные излучения, стабильность несущей, фазовый шум и работу усилителя в линейном режиме. Измерения выполняют через аттенюаторы и согласованные нагрузки, предотвращая повреждение анализатора спектра.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Измерение спектра

Полоса

Доплер

06

Техническая иллюстрация

Радиочастотный спектр и частотное планирование



Обратите внимание

Диапазоны связи, дуплексирование, помехи и совместимость

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$\lambda = c / f;\ \eta_s = R_b / B;\ \Delta f_{Доплер} \approx (v_r/c) f_0.$$

Обратите внимание

Инженерный частотный план содержит центр полосы, минимальную и максимальную частоту, ширину канала, поляризацию, уровень мощности, тип антенны и описание всех режимов работы.

Сравнение длины волны

Инженерный пример

Для 433 МГц длина волны примерно 0,693 м; для 2,2 ГГц — 0,136 м; для 8,4 ГГц — 0,0357 м. При одинаковой длине антенны меняется её электрический размер. Поэтому переход к другой частоте требует перепроектирования антенного и фидерного трактов, а не только настройки радиомодуля.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Выбор диапазона удобно представлять как многокритериальную задачу. Низкая частота позволяет использовать более простые радиомодули, но требует физически больших резонансных элементов и даёт ограниченный доступный ресурс для высоких скоростей. Более высокая частота может повысить направленность компактной апертуры, однако обостряет вопросы потерь в фидере, доплеровской стабильности, изготовления печатных элементов и точности наведения. На уровне спектральной совместимости требуется учитывать не только центральные частоты, но и ширину полосы, соседние радиослужбы и побочные излучения. Всегда разделяйте учебный частотный план и план с официально разрешёнными параметрами эксплуатации.

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

Частота передачи выбирается по совокупности пропускной способности, размера антенны, доступной аппаратуры, требований к наземной станции и разрешённого использования спектра. Для учебного проекта всегда отделяйте расчётный вариант от частот, допущенных к реальной эксплуатации.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Составьте учебный частотный план с раздельными uplink и downlink. Укажите центральные частоты, полосу, ограничения и перечень необходимых согласований.

Термины для повторения

VHF • UHF • S/X/Ka • FDD • TDD • Полоса • Доплер • ЭМС

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Как связаны частота и длина волны?

02 Для чего нужен защитный частотный интервал?

03 Чем FDD отличается от TDD?

04 Почему на LEO важен доплеровский сдвиг?

05 Что отражает спектральная эффективность?

06 Почему нужна радиочастотная координация?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Частота сигнала связана с длиной волны выражением $\lambda = c/f$.
2. Спектральный ресурс ограничен.
3. Космические радиосистемы работают в общей радиочастотной среде.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 ESA. Types of orbits

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан