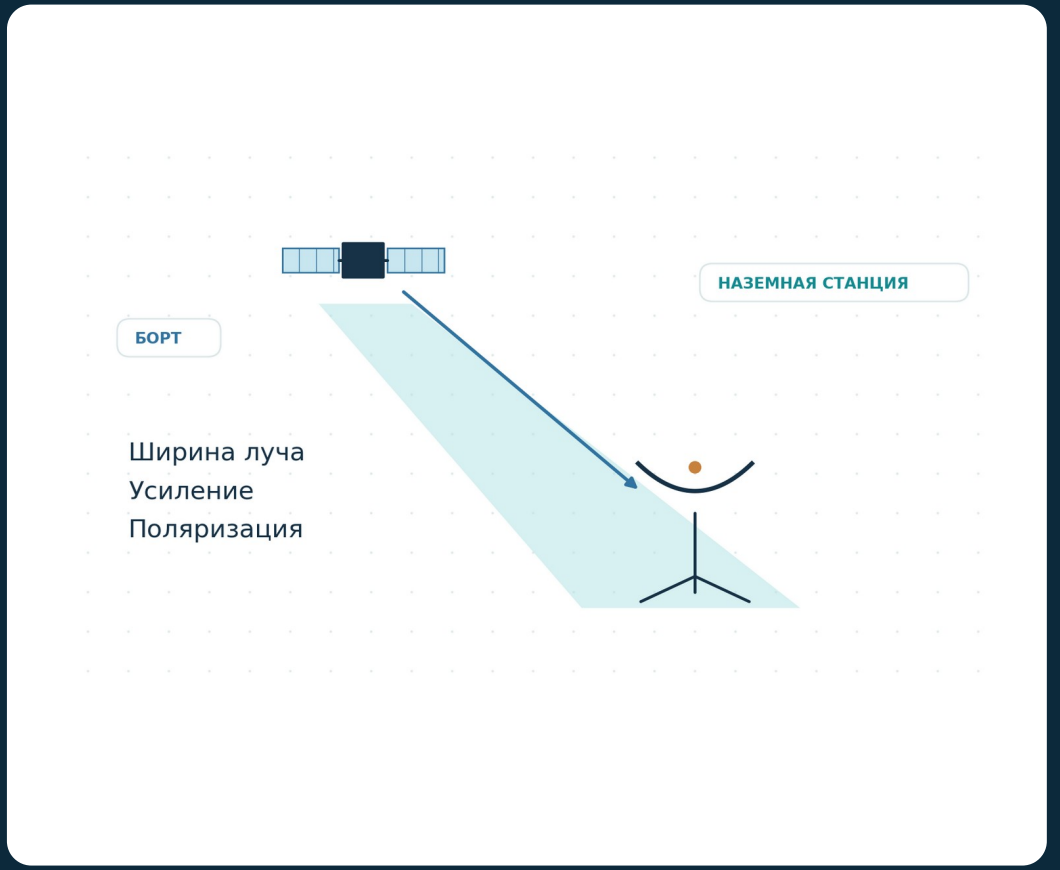
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 07

Антенны спутников и наземных станций

Усиление, диаграмма направленности, поляризация и сопровождение



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Связать свойства антенн с геометрией спутниковой линии и ограничениями космической платформы.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Выбирать тип антенны по задаче. Оценивать усиление и ширину луча. Объяснять влияние ошибок наведения и поляризации.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Антенна как преобразователь поля**
2. **Бортовые и наземные решения**
3. **Поляризация и несовпадение**
4. **Усиление апертурной антенны**
5. **Точность наведения**
6. **Электрические интерфейсы**

Антенна как преобразователь поля

РАЗДЕЛ 1 / 6

Антенна преобразует направляемую электромагнитную волну в распространяющуюся и обратно. Направленная антенна концентрирует мощность в определённом угловом секторе, обеспечивая повышенный коэффициент усиления. Однако усиление не создаёт дополнительной энергии, а перераспределяет её по направлениям. Для малых спутников важны габариты, масса, механизм развёртывания и способность работать при изменении ориентации.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Антенна как преобразователь поля

Диаграмма

Усиление

01

Бортовые и наземные решения

РАЗДЕЛ 2 / 6

Для командной связи CubeSat могут применять штыревые и дипольные антенны с широким угловым покрытием. Для передачи больших объёмов данных используют патч-антенны, антенные решётки и другие направленные структуры. Наземные станции оснащаются Yagi-Uda, спиральными, рупорными или параболическими антеннами. Увеличение апертуры станции облегчает энергетический бюджет, но усложняет конструкцию и требования к поворотной системе.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Бортовые

наземные решения

Усиление

02

Поляризация и несовпадение

РАЗДЕЛ 3 / 6

Линейная поляризация характеризуется фиксированным направлением вектора электрического поля, круговая — вращением вектора при распространении. Несовпадение поляризаций вызывает потери; для идеальных ортогональных линейных поляризаций приём может существенно ухудшиться. Круговая поляризация может снизить чувствительность к вращению аппарата, однако требует соблюдения правильного направления вращения и допустимого осевого отношения.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Поляризация

несовпадение

Апертура

03

Усиление апертурной антенны

РАЗДЕЛ 4 / 6

Для круглой апертуры $G \approx \eta(\pi D/\lambda)^2$ в линейных единицах, где η — КПД использования апертуры. При неизменных диаметре и КПД рост частоты повышает усиление и уменьшает ширину луча. В реальном проекте учитывают облучатель, затенение, ошибки поверхности и сопротивление ветровой нагрузке.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Усиление апертурной антенны

КПД

Ширина луча

04

Точность наведения

РАЗДЕЛ 5 / 6

На LEO азимут и угол места быстро меняются вблизи зенитного пролёта. Если луч слишком узок, погрешности TLE/эфемерид, энкодера или синхронизации могут вызвать падение уровня сигнала. Выбор антенны согласуют с точностью привода и алгоритмом сопровождения.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Точность наведения

Ширина луча

Поляризация

05

Электрические интерфейсы

РАЗДЕЛ 6 / 6

Параметры входного согласования антенны и фидера определяют отражённую мощность. При выборе коаксиального кабеля учитывают потери на заданной частоте, допустимую мощность, тип соединителя, защиту от влаги и механическую разгрузку.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Электрические интерфейсы

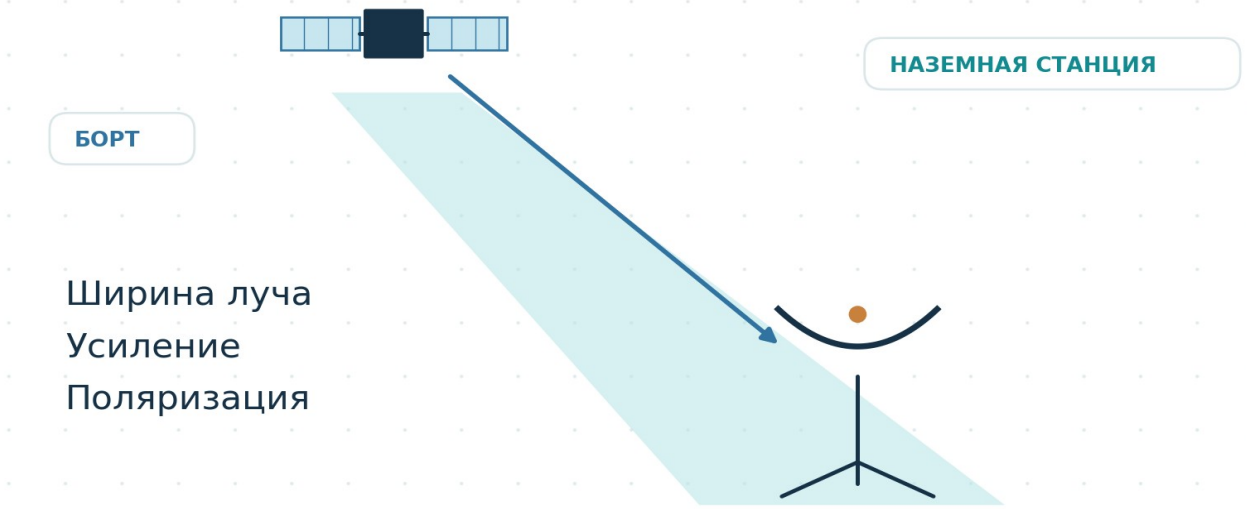
Поляризация

Наведение

06

Техническая иллюстрация

Антенны спутников и наземных станций



Обратите внимание

Усиление, диаграмма направленности, поляризация и сопровождение

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$G \approx \eta(\pi D/\lambda)^2$; $\theta_{3дБ}$ (град) $\approx 70\lambda / D$ (грубая оценка для многих параболических антенн).

Обратите внимание

Для круглой апертуры $G \approx \eta(\pi D/\lambda)^2$ в линейных единицах, где η — КПД использования апертуры.

Две наземные тарелки

Инженерный пример

Для одной частоты и одинакового КПД увеличение диаметра рефлектора с 1 м до 2 м повышает усиление примерно на $20\log_{10}(2) = 6$ дБ. Это существенно улучшает приём, но луч становится уже, и к наведению предъявляются более жёсткие требования.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Бортовая антенна работает на реальном проводящем корпусе, а не в бесконечном свободном пространстве. Солнечные панели, кабельные жгуты, выступающие конструкции и соседние антенны меняют диаграмму и поляризацию. У высоконаправленного downlink максимальное усиление часто достигается лишь после установления требуемой ориентации аппарата, поэтому режим передачи должен согласовываться с ADCS. Для наземной станции важна последовательность всего тракта: даже высокоэффективная тарелка потеряет преимущество при длинном кабеле с большими потерями до LNA. При построении бюджета удобно сравнивать влияние +3 дБ усиления и −3 дБ фидерных потерь: на уровне мощности они эквивалентны, но требуют разных конструктивных решений.

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

При выборе бортовой антенны важно учитывать не только максимальное усиление, но и реальные режимы ориентации. Направленный канал может быть недоступен во время безопасного режима; поэтому отдельный широконаправленный канал команд и телеметрии повышает устойчивость миссии.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Выберите бортовую и наземную антенны для условного CubeSat и объясните компромиссы по массе, усилению, поляризации и сопровождению.

Термины для повторения

Диаграмма • Усиление • Апертура • КПД • Ширина луча • Поляризация • Наведение • Фидер

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Чем усиление отличается от излучаемой мощности?

02 Как влияет апертура на ширину луча?

03 Когда полезна круговая поляризация?

04 Почему в safe mode нужен широконаправленный канал?

05 Какие требования предъявляются к приводу станции?

06 Что такое потери фидерного тракта?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Антенна преобразует направляемую электромагнитную волну в распространяющуюся и обратно.

2. Для командной связи CubeSat могут применять штыревые и дипольные антенны с широким угловым покрытием.

3. Линейная поляризация характеризуется фиксированным направлением вектора электрического поля, круговая — вращением вектора при распространении.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 ESA. Types of orbits

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан