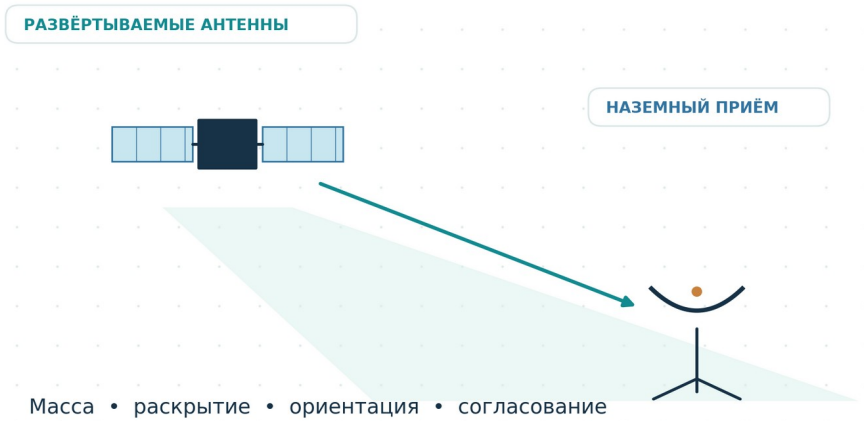
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 10

Проектирование спутниковых и развёртываемых антенных систем

Антенная компоновка, развёртывание, испытания и надёжность



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Объединить теорию антенн с реальным проектным циклом для бортовых и наземных спутниковых систем.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Составлять технические требования антенны. Планировать электромагнитные и механические испытания. Объяснять влияние интеграции на характеристики излучателя.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Спецификация антенны миссии**
2. **Выбор архитектуры**
3. **Этапы проектирования**
4. **Договорённости по интерфейсам**
5. **RF-проверка после интеграции**
6. **Риск и изменение проекта**

Спецификация антенны миссии

РАЗДЕЛ 1 / 6

Техническое задание должно содержать рабочие частоты и полосу, нужные направления, максимальную и среднюю мощность, поляризацию, минимальный коэффициент усиления в заданном секторе, уровень S11, габариты, массу и условия эксплуатации. Для развертываемой конструкции добавляют время и вероятность раскрытия, допустимые вибрации и термоциклы. Требования связывают с радиобюджетом и режимами ориентации спутника.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Спецификация антенны миссии

ТЗ

ICD

01

Выбор архитектуры

РАЗДЕЛ 2 / 6

Для командно-телеметрической связи предпочтение часто отдают широкому угловому покрытию и надёжности: используются монополи, диполи, спирали. Для высокоскоростного downlink подходят направленные patch, антенные решётки и рефлекторы — выбор определяется массой и энергией платформы. В проекте могут сосуществовать несколько антенн для разных частот и режимов. Одновременная работа каналов требует анализа электромагнитной совместимости и взаимного влияния.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Выбор архитектуры

ICD

CAD

02

Этапы проектирования

РАЗДЕЛ 3 / 6

Рабочий процесс включает сбор требований, аналитическую оценку, полноволновое моделирование антенны на реальном корпусе, проектирование питания, изготовление образца и измерение. После этого проводят системную интеграцию и квалификацию: вибрационные, температурные и функциональные проверки согласно требованиям миссии. Любое изменение геометрии, материалов или разъёма требует оценки влияния на уже подтверждённые параметры.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Этапы проектирования

CAD

Квалификация

03

Договорённости по интерфейсам

РАЗДЕЛ 4 / 6

В ICD фиксируют геометрическую базу, разъёмы, полярность, напряжение исполнительного механизма, ток, схему управления, крепление, порядок раскрытия и запретные зоны. Для печатной конструкции — стек печатной платы, толщину меди и материал. Без согласованной финальной версии модели и чертежа возникает риск механического конфликта.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Договорённости по интерфейсам

Квалификация

S11

04

RF-проверка после интеграции

РАЗДЕЛ 5 / 6

Моделирование отдельной антенны и измерения после установки на КА могут отличаться из-за соседних металлических деталей, кабелей и солнечных панелей. Приёмочные испытания должны подтвердить S11, диаграмму, поляризацию и развязку между портами в финальной конфигурации.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

RF-проверка после интеграции

S11

Диаграмма

05

Риск и изменение проекта

РАЗДЕЛ 6 / 6

Для каждого изменения устанавливают владельца, причину, затронутые документы и необходимые повторные испытания. При высокой стоимости изменений на поздней стадии особенно важно своевременно выпускать согласованную ревизию ICD и CAD-модели.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

изменение проекта

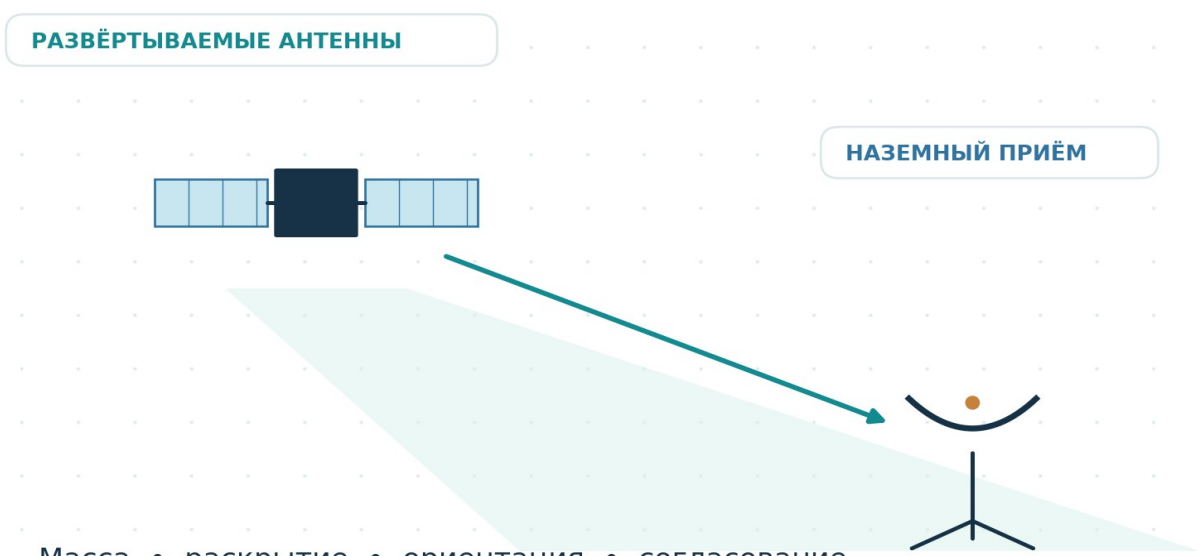
Диаграмма

Развёртывание

06

Техническая иллюстрация

Проектирование спутниковых и развёртываемых антенных систем



Обратите внимание

Антенная компоновка, развёртывание, испытания и надёжность

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

Инженерный критерий: подтверждённый запас антенны = измеренный параметр − минимальное требование.

Обратите внимание

В ICD фиксируют геометрическую базу, разъёмы, полярность, напряжение исполнительного механизма, ток, схему управления, крепление, порядок раскрытия и запретные зоны.

Проверка требования к сектору

Инженерный пример

Пусть по заданию усиление антенны в секторе ±60° должно быть не ниже −3 дБи. Измерения в крайних направлениях дали −4,5 дБи. Несмотря на высокий максимум по оси, антенна не соответствует требованию покрытия. Нужна корректировка геометрии или ориентации либо пересмотр системной архитектуры.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Успешная бортовая антенна является результатом одновременно электромагнитного, механического и системного проектирования. Например, изменение толщины платы меняет электромагнитную геометрию и положение разъёма; сдвиг крепёжного отверстия может повлиять на токи земли; изменение защитного покрытия — на параметры диэлектрика. Поэтому финальный набор данных должен иметь согласованные версии CAD, Gerber, спецификации материалов, ICD и результатов измерений. Неизменность модели не гарантирует неизменность изделия после монтажа на корпус и прохождения вибрационных испытаний. Система конфигурационного управления фиксирует, какой вариант действительно прошёл квалификацию.

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

Проверка только размеров недостаточна: антенный модуль одновременно электрическое, тепловое и механическое изделие. Для его готовности к интеграции требуется связанный комплект CAD, ICD, результатов моделирования и протоколов испытаний.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Создайте паспорт двухдиапазонной бортовой антенны учебного CubeSat: частоты, поляризация, сектор, S11, интерфейсы, масса и шесть испытаний.

Термины для повторения

ТЗ • ICD • CAD • Квалификация • S11 • Диаграмма • Развёртывание • ЭМС

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Какие параметры обязательны в ТЗ?

02 Почему надо моделировать корпус?

03 Когда нужен механизм раскрытия?

04 Что должно быть в ICD антенны?

05 Что такое контроль конфигурации?

06 Как подтвердить требование усиления в секторе?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Техническое задание должно содержать рабочие частоты и полосу, нужные направления, максимальную и среднюю мощность, поляризацию, минимальный коэффициент усиления в заданном секторе, уровень S11, габариты, массу и условия эксплуатации.

2. Для командно-телеметрической связи предпочтение часто отдают широкому угловому покрытию и надёжности: используются монополи, диполи, спирали.

3. Рабочий процесс включает сбор требований, аналитическую оценку, полноволновое моделирование антенны на реальном корпусе, проектирование питания, изготовление образца и измерение.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 C. A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design (учебник)

02 J. D. Kraus, R. J. Marhefka. Antennas (учебник)

03 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан