Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 10

Проектирование миссии CubeSat и системная интеграция

Постановка миссии, системные бюджеты и проверка готовности



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Объединить орбитальную, энергетическую, радиотехническую и конструктивную модели в целостный проект малого спутника.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Составлять измеримые системные требования. Понимать роль ICD и матрицы проверок. Формировать базовый план наземных и лётных испытаний.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **От цели миссии к требованиям**
2. **Интерфейсы и общая компоновка**
3. **Верификация и жизненный цикл**
4. **Бюджеты подсистем**
5. **План испытаний**
6. **Организация операций**

От цели миссии к требованиям

РАЗДЕЛ 1 / 6

Проект начинается не с покупки модулей, а с вопроса о полезном результате. Например, требуется передавать измерения с заданным пространственным охватом и задержкой. Из этого следуют требования к орбите, полезной нагрузке, хранению данных, суточному радиотрафику, точности ориентации и энергетике. Требования должны быть проверяемы численно: не «надёжная связь», а заданный объём данных при конкретной доступности.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

От цели миссии к требованиям

CubeSat

ICD

01

Интерфейсы и общая компоновка

РАЗДЕЛ 2 / 6

На уровне аппарата согласуют механические габариты, массу, разъёмы, питание, радиочастотные тракты, тепловые пути, шины данных и командные протоколы. Информация фиксируется в интерфейсном контрольном документе (ICD). Даже небольшое изменение расположения разъёма может повлечь переразводку платы, коррекцию кабельного жгута и повторную проверку электромагнитной совместимости.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Интерфейсы

общая компоновка

ICD

02

Верификация и жизненный цикл

РАЗДЕЛ 3 / 6

Разработка проходит концепцию, предварительный и детальный дизайн, изготовление, интеграцию, испытания и эксплуатацию. Для каждого требования выбирают способ подтверждения: анализ, инспекция, демонстрация или испытание. Инженерные и лётные модели могут различаться составом проверок. Наземная отработка ПО, связи и аварийных сценариев начинается задолго до запуска.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Верификация

жизненный цикл

PDR/CDR

03

Бюджеты подсистем

РАЗДЕЛ 4 / 6

Системные бюджеты отслеживают массу, мощность, энергетику, тепловыделение, вычислительные ресурсы, объём памяти и радиолинию. Для каждого бюджета нужен резерв на изменения и неопределённость. Перенос мощности от одного прибора к другому может изменить и радиорежим, и расписание контактов.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Бюджеты подсистем

Интеграция

Верификация

04

План испытаний

РАЗДЕЛ 5 / 6

Проводят электрические функциональные проверки, end-to-end тесты связи, проверку механизмов, вибрационные и термовакуумные испытания по применимому уровню требований. Контрольные точки фиксируют конфигурацию, результаты измерений и перечень открытых несоответствий.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

План испытаний

Верификация

TVAC

05

Организация операций

РАЗДЕЛ 6 / 6

До запуска формируют частотные и регуляторные документы, прогнозы покрытия, процедуры ввода в эксплуатацию, перечни команд, телеметрические лимиты и план реагирования на аномалии. Реальное управление аппаратом без авторизованных частот и согласований недопустимо.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Организация операций

TVAC

End-to-end

06

Техническая иллюстрация

Проектирование миссии CubeSat и системная интеграция



Обратите внимание

Постановка миссии, системные бюджеты и проверка готовности

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

Системный запас = предельный ресурс − прогнозная потребность; каждое требование ↔ метод проверки.

Обратите внимание

Системные бюджеты отслеживают массу, мощность, энергетику, тепловыделение, вычислительные ресурсы, объём памяти и радиолинию.

Условный объём данных CubeSat

Инженерный пример

Прибор создаёт 600 Мбайт в сутки. Канал даёт 1 Мбит/с полезного потока, в день ожидаются 4 контакта по 12 мин с эффективностью окна 0,8. Возможная доставка: 1 × 4 × 12 × 60 × 0,8 / 8 ≈ 288 Мбайт/сутки. Дефицит более 300 Мбайт требует изменения архитектуры: дополнительной станции, скорости, сжатия или графика измерений.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Системная инженерия требует прослеживаемости: у каждой цели есть связанный набор требований, у каждого требования — способ проверки, а у каждого измерения — версия конфигурации. Самые дорогие ошибки возникают при несогласованности интерфейсов между группами: электрический разъём имеет правильную форму, но неверную распиновку; 3D-модель существует, но не соответствует последнему чертежу; допустимая мощность заявлена без режима включения. Контроль версий и формализованное согласование изменений не являются бюрократической формальностью — они предотвращают переделку изготовленного изделия. Для малых миссий особенно важны end-to-end испытания, которые проверяют полный маршрут данных от датчика до наземного приложения.

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

Последняя стадия проекта часто выявляет ошибки интерфейсов, а не «ошибки космической физики»: несовпадение размеров, полярности питания, адресов шин или форматов пакетов. Управление конфигурацией и своевременные изменения ICD — обязательная часть работы.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Создайте одностраничный паспорт учебной миссии 3U/6U с пятью измеримыми требованиями и методами проверки каждого требования.

Термины для повторения

CubeSat • ICD • PDR/CDR • Интеграция • Верификация • TVAC • End-to-end • Конфигурация

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Чем цель миссии отличается от требования?

02 Для чего нужна матрица верификации?

03 Что должно находиться в ICD?

04 Зачем нужен бюджет резерва?

05 Какие испытания связаны с запуском?

06 Как оценить достаточность суточного канала?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Проект начинается не с покупки модулей, а с вопроса о полезном результате.
2. На уровне аппарата согласуют механические габариты, массу, разъёмы, питание, радиочастотные тракты, тепловые пути, шины данных и командные протоколы.
3. Разработка проходит концепцию, предварительный и детальный дизайн, изготовление, интеграцию, испытания и эксплуатацию.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 ESA. Types of orbits

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан