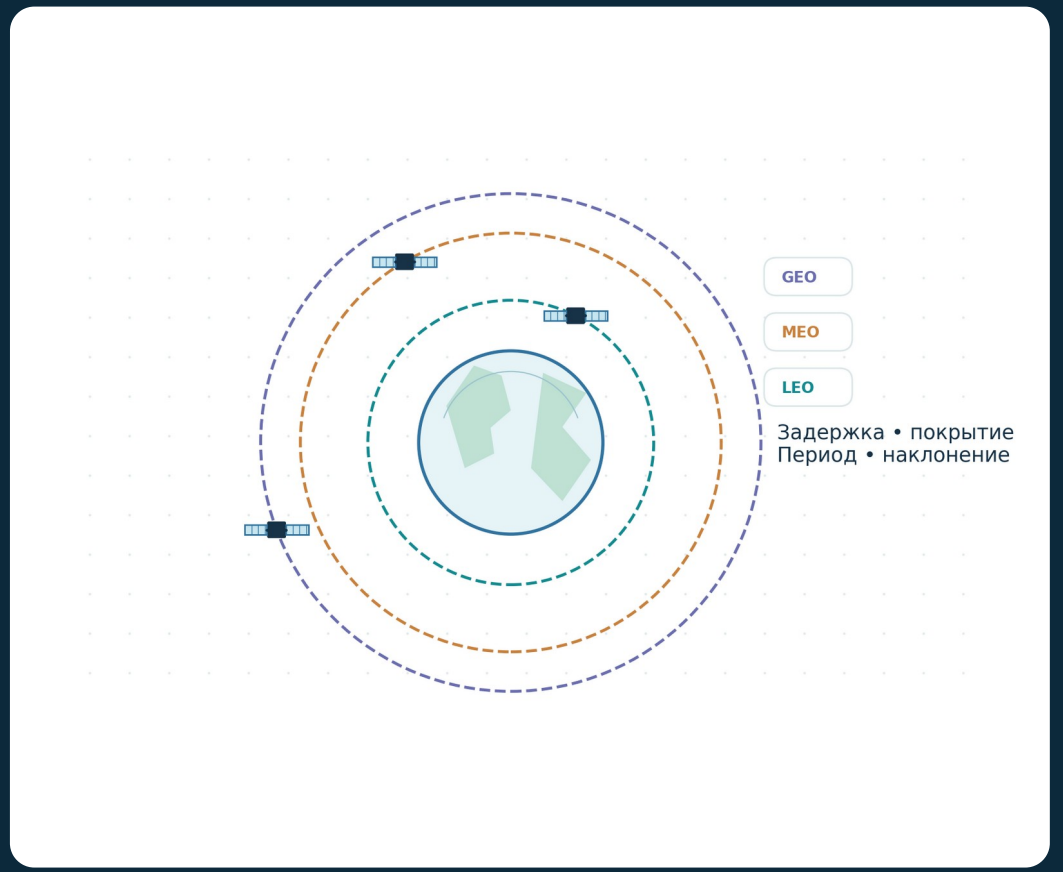
Казахский национальный университет имени аль-Фараби

ОТКРЫТЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 02

Орбиты спутников и основы орбитального движения

LEO, MEO, GEO; период обращения, зона видимости и геометрия контакта



Мейрамбекұлы Нұрсұлтан

старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, PhD

Цель и результаты обучения

Что необходимо освоить

ЦЕЛЬ ЛЕКЦИИ

Научиться связывать тип орбиты с продолжительностью радиовидимости, задержкой сигнала и задачей космической миссии.

ПОСЛЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ

Сопоставлять LEO, MEO и GEO. Рассчитывать орбитальный период круговой орбиты. Пояснять влияние высоты и угла места на связь.

План лекции

Шесть ключевых вопросов

1. **Круговая орбита как первая модель**
2. **Основные классы высот**
3. **Геометрия радиовидимости**
4. **Период и скорость**
5. **Задержка распространения**
6. **Планирование сопровождения**

Круговая орбита как первая модель

РАЗДЕЛ 1 / 6

Движение спутника определяется гравитацией и начальными условиями запуска. Для круговой орбиты сила тяжести обеспечивает центростремительное ускорение; скорость равна корню из отношения гравитационного параметра Земли к радиусу орбиты. Реальные орбиты возмущаются нецентральностью гравитационного поля, атмосферным сопротивлением, влиянием Луны и Солнца. Поэтому в оперативной работе применяют обновляемые эфемериды, а учебный расчёт по круговой модели рассматривают как приближение.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Круговая орбита как первая модель

LEO

MEO

01

Основные классы высот

РАЗДЕЛ 2 / 6

Низкая околоземная орбита LEO обеспечивает относительно короткую радиолинию и удобна для дистанционного зондирования и малых спутников. Средняя орбита MEO применяется, в частности, для навигационных систем. Геостационарный аппарат располагается над экватором на высоте около 35 786 км и имеет период вращения, равный звёздным суткам. Он остаётся почти в фиксированном направлении для земного наблюдателя, но потребует значительно большей длины радиолинии, чем типичный LEO.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Основные классы высот

MEO

GEO

02

Геометрия радиовидимости

РАЗДЕЛ 3 / 6

Наземная станция видит аппарат, когда тот находится над местным горизонтом и удовлетворяет минимальному углу места. На малых углах места путь в атмосфере длиннее и помех от горизонта больше, поэтому радиосвязь часто начинают при достижении заданного порога. Высота, наклонение, широта станции и время определяют количество сеансов в сутки. Сам факт пролёта над областью не гарантирует достаточной продолжительности контакта.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Геометрия радиовидимости

GEO

Наклонение

03

Период и скорость

РАЗДЕЛ 4 / 6

Для круговой модели $T = 2\pi\sqrt{(r^3/\mu)}$, где r — расстояние до центра Земли, $\mu \approx 3{,}986 \times 10^{14}$ м³/с². Радиус Земли принимают около 6371 км. Увеличение радиуса орбиты повышает период обращения и снижает орбитальную скорость.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Период

скорость

Наклонение

04

Задержка распространения

РАЗДЕЛ 5 / 6

Минимальная односторонняя задержка определяется временем прохождения электромагнитной волны: τ = R/c. При дальности 500 км она составляет приблизительно 1,7 мс, но фактическая наклонная дальность обычно больше высоты. Для GEO геометрическая задержка одного пролёта сигнала измеряется десятками или сотнями миллисекунд в зависимости от пути.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Задержка распространения

Период

Эфемериды

05

Планирование сопровождения

РАЗДЕЛ 6 / 6

Для сопровождения вычисляют временные ряды азимута, угла места и наклонной дальности. Радиочастотное оборудование корректирует доплеровский сдвиг, особенно заметный на LEO. На этапе предварительного анализа определяют полезные окна связи и скорость изменения углов, которую должна обеспечить поворотная система антенны.

ПОНЯТИЯ РАЗДЕЛА

Планирование сопровождения

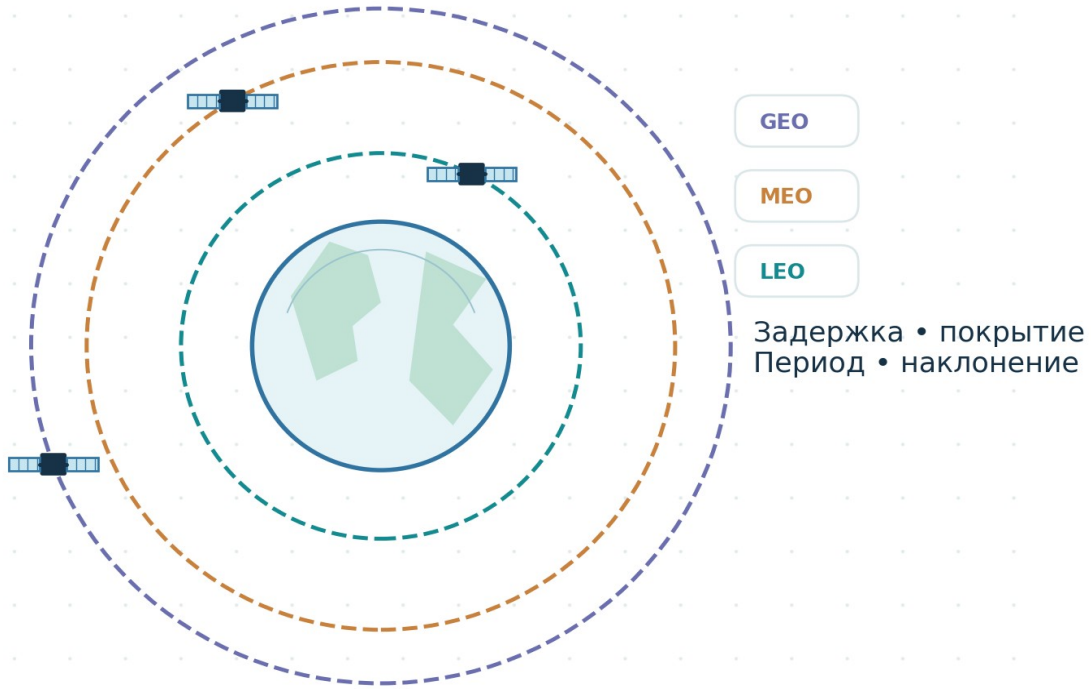
Эфемериды

Угол места

06

Техническая иллюстрация

Орбиты спутников и основы орбитального движения



Обратите внимание

LEO, MEO, GEO; период обращения, зона видимости и геометрия контакта

Схема отражает основные взаимосвязи, рассмотренные в лекции.

Основные расчётные соотношения

Связь теории с инженерным расчётом

$$T = 2\pi \sqrt{((R_Земли + h)^3 / \mu)};\ \tau = R_линии / c.$$

Обратите внимание

Для круговой модели $T = 2\pi\sqrt{(r^3/\mu)}$, где r — расстояние до центра Земли, $\mu \approx 3{,}986 \times 10^{14}$ м³/с².

Период аппарата на высоте 500 км

Инженерный пример

При h = 500 км радиус орбиты r ≈ 6871 км. Подстановка в формулу даёт T ≈ 5668 с, или около 94,5 мин. За сутки аппарат совершает примерно 15,2 оборота, но это не означает 15 сеансов над одной станцией: доступность зависит от наклонения и геометрии трассы.

Ключевой вывод: результат необходимо сопоставить с требованиями системы.

Инженерные аспекты

1 из 1 · Углублённый разбор

Прогноз контактов строят не только на основе периода обращения. Нужны координаты станции, орбитальные элементы с известным временем актуальности, модель Земли и минимальный угол места. Один и тот же спутник может совершить несколько оборотов между двумя пролётами над заданным пунктом. При росте высоты увеличивается потенциальная продолжительность видимости, но растёт и дальность радиолинии, что увеличивает потери. Для SSO существенны местное солнечное время пролёта и тепловой режим; для связи важны наклонная дальность и скорость изменения луча. Проверяйте, что используемая модель орбиты соответствует точности требуемой операции.

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

Геостационарная платформа подходит для непрерывной связи с фиксированной антенной терминала, а LEO — для малой задержки и компактного космического передатчика. При этом для круглосуточного обслуживания на низких орбитах обычно нужна группировка и система передачи обслуживания между спутниками. Численный пример является учебным; для реальной системы необходимы измерения, подтверждённые исходные данные и проверка диапазона применимости модели.

Практическое задание

Самостоятельная работа

Оцените периоды для высот 400, 800 и 1200 км; составьте таблицу и объясните, как изменятся требования к сопровождению.

Термины для повторения

LEO • MEO • GEO • Наклонение • Период • Эфемериды • Угол места • Наклонная дальность

Контрольные вопросы

Для самопроверки

01 Что означает наклонение орбиты?

02 Как период зависит от высоты?

03 Почему GEO требует экваториальной орбиты?

04 От чего зависит число сеансов станции?

05 Чем высота отличается от наклонной дальности?

06 Почему требуется доплеровская коррекция?

Итоги лекции

Три основных положения

1. Движение спутника определяется гравитацией и начальными условиями запуска.

2. Низкая околоземная орбита LEO обеспечивает относительно короткую радиолинию и удобна для дистанционного зондирования и малых спутников.

3. Наземная станция видит аппарат, когда тот находится над местным горизонтом и удовлетворяет минимальному углу места.

Литература и открытые источники

Для дальнейшего изучения

01 ESA. Types of orbits

02 NASA. CubeSat Launch Initiative Resources

Мейрамбекұлы Нұрсұлтан