

# Спецкурс: Введение в баллистику и навигацию космических аппаратов

---

Предназначен для студентов 4-го курса кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии.

## Исходные знания

1. Небесная механика
2. Сферическая астрономия
3. Программирование
4. Математический анализ
5. Аналитическая геометрия
6. Механика (общий курс)

## План лекций

1. (Альберт) Введение - дать представление, зачем нужны и из чего состоят космические миссии, а также обозначить, какое место баллистики и навигации КА в космической миссии (границы курса).
  - Какие задачи решают космические полеты в жизни человека
  - Краткий исторический очерк освоения космоса
  - Жизненный цикл космической миссии
  - Наземный контур (станции слежения / приема данных / управления, ЦУП, баллистические центры, космодром, производство КА и компонентов, транспортировка)
  - Космический сегмент (ретрансляторы, ГНСС в космосе, космические аппараты)
  - Космический аппарат (основные системы, особенности космического пребывания, полезная нагрузка, платформенные решения)
  - Стоимость запуска и миссий
  - Обозначить, где в этом всем баллистика и навигация КА.
2. (Альберт) Обзор задач баллистики и навигации КА - обозначить все задачи, которые решаются в рамках баллистики и навигации КА. Сказать явно, что эти задачи и будем рассматривать в течение курса, то есть это и есть план курса.
  - В разрезе этапов космической миссии: Проектная баллистика (определение номинальной орбиты, планирование навигационных измерений, анализ нештатных ситуаций) и Оперативное управление (получение и обработка измерений, расчет корректировок)
  - В разрезе решаемых задач: Баллистика (определение номинальной орбиты, расчет оптимальных маневров и коррекций) и Навигация (обработка данных, модель измерений, определение параметров движения, оценка точности навигации) - сделать связь разделов с лекциями
  - Сделать схему поясняющую связь этапов и решаемых задач, а также сущностей, о которых будем рассказывать далее.
  - Мы рассказываем в разрезе решаемых задач.

### 3. (Павел) Уравнение движения КА. Модель сил. Численное интегрирование.

- Кплеровская орбита
  - элементы Кеплера
  - типы невозмущенного движения
  - уравнения Кеплера
  - переходные орбиты
- Уравнение движения и модель сил
  - представление уравнений движения
  - силы гравитационной природы
  - негравитационные силы
  - степень влияния компонентов модели сил на различных типах орбит
- Методы численного интегрирования
  - одношаговые методы
  - многошаговые методы
- Примеры и задачи

### 4. (Павел) Координатно-временное обеспечение. Вращательное движение КА.

- Константно-эфемеридное обеспечение
  - инерциальные системы координат
  - земная система координат
  - бортовая система координат
  - способы хранения ориентации
  - переход между системами координат
  - эфемериды небесных тел
  - базы данных эфемерид
- Координатно-временные преобразования
  - собственное и координатное время
  - основные используемые шкалы времени
- Уравнения вращательного движения КА
  - модель внешних сил
  - способы измерения ориентации КА
  - способы управления ориентацией КА
- Примеры и задачи

### 5. (Альберт) Определение номинальной траектории

- Факторы, влияющие на выбор траектории
- Зависимость конструкции КА от траектории
- Соответствие целям миссии
- Методы оптимизации
- Примеры реальных миссий (старлинк, МКС, миллиметрон, гайа)

### 6. (Альберт) Расчет маневров и коррекций

- Схема и описание типовых маневров и моделей
- Орбитальные маневры
  - Изменение орбитальной энергии

- Изменение радиуса перицентра / апоцентра
- Изменение наклона орбиты
- Импульсные изменения движения КА
  - Одноимпульсные межорбитальные переходы
  - Двухимпульсные межорбитальные переходы (хомановский)
  - Трехимпульсные межорбитальные переходы (биэллиптический, изменение наклона)
- Изменение движения КА непрерывной тягой

#### 7. (Альберт) Расчет маневров и коррекций

- Задача Ламберта - постановка, где используется
- Получение и анализ уравнения
- Методы решения
  - Метод Бэйта
  - Метод Иццо
  - Метод Гудинга
  - Сравнительный анализ методов
- Практическое применение

#### 8. (Альберт) Расчет маневров и коррекций

- Межпланетные перелеты
  - Постановка задачи
  - Метод сфер действия
  - Оценка времени перелета (формула Ламберта)
  - Гравитационные маневры
  - Перелет между несколькими планетами
  - Этапы полета, маневры захвата
- Полеты около точек Лагранжа
  - Динамика движения ОЗТТ
  - Семейства траекторий
  - Перелет в точку Лагранжа
  - Удержание в области точек Лагранжа

#### 9. (Альберт) Расчет маневров и коррекций

- Оптимизация орбитальных маневров
- Принципа максимум Понтрягина
- Численное решение задачи в общем виде
  - Алгоритм в общем виде
  - Условное интегрирование
  - Дифференциальная коррекция
  - Метод Ньютона-Рафсона

#### 10. (Павел) Навигация КА. Определение орбиты

- Типы наблюдений КА и их назначение
  - радиотехнические измерения
  - оптические измерения

- лазерные измерения
- радиоинтерферометрические измерения
- измерения ГНСС
- автономные наблюдения
- Методы начального определения орбиты
  - методы определения орбиты по двум положениям
  - методы определения орбиты по измерениям угловых координат
  - методы определения орбиты по смешанным данным
- Способы автономной навигации КА
- Примеры и задачи

## 11. (Павел) Методы дифференциального уточнения орбиты

- Основные принципы уточнения орбит
  - основные уравнения
  - модель измерений
  - линеаризация уравнений
  - условные и нормальные уравнения
  - переходная матрица
  - нормальная матрица
  - ковариационные матрицы
- Методы пакетной обработки измерений
  - метод наименьших квадратов
  - метод максимального правдоподобия
  - изохронные производные
- Методы последовательной обработки наблюдений
  - фильтр Калмана
  - матрица усиления
  - априорная и апостериорная оценка
  - обобщенный фильтр Калмана
  - алгоритм вычислений
  - другие методы
- Примеры и задачи

## 12. (Павел) Глобальные навигационные спутниковые системы

- История и развитие ГНСС
  - история развития
  - основные характеристики существующих навигационных систем
  - используемые частоты
- Типы наблюдений ГНСС
  - кодовые измерения
  - фазовые измерений
- Комбинации измерений ГНСС
  - безионосферная комбинация
  - безгеометрическая комбинация
  - комбинация Мельбурна-Вуббена
- Дифференциальный режим

- одинарные разности
- двойные разности
- Проблема неоднозначностей
  - целочисленные неоднозначности
  - скачки фазы
  - способы борьбы
- Модель наблюдений мульти-ГНСС
- Ошибки
  - метод сглаживания измерений
  - коэффициент потери точности
  - источники ошибок
- Примеры и задачи

### 13. Искусственный интеллект в баллистике и навигации КА

- Подходящие задачи
- Деревья решений
- Машинное обучение
- Компьютерное зрение
- Обзор существующих работ

### 14. Программно-математическое обеспечение

- Обзор программного обеспечения для разных задач БНО
- Раздача заданий на зачет

### 15. Заключительная лекция

- обзор изученного материала
- разбор всего на примере одного проекта (Миллиметрон например, который знаем лучше всего, еще могу про Киноспутники и Зоркие)
- рассказ о работе в отрасли в России - приглашение на практику

### 16. Зачет