

AMADEOS



Режимы ориентации аппаратов в межпланетных миссиях

к.ф.-м.н. Маштаков Я.В.



Что мы обсуждаем?

СУОС – Система Управления Ориентацией и Стабилизации,
она же ADCS – Attitude Determination and Control system

Зачем она нужна?

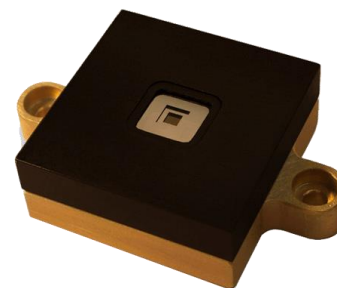
- Измерить, где мы сейчас находимся
- Понять, где мы должны быть
- Привести нас в нужное положение
- При этом мы рассматриваем только угловое движение

Начнем с «где мы?»

Мы в космосе. Что делать?

Можно осмотреться

- Звездные датчики
- Привязка к местности (скорее, для земных аппаратов)
- Солнечные датчики (не совсем оптика)



«Где мы?»

- Точная оптика (звездники) – дорогая, работает только на малых угловых скоростях
- Солнечники дают только один вектор – направление на Солнце
- Если летаем около Земли – хорошо знаем магнитное поле
- Ставим магнитометр
- ...
- ~~Profit~~ Теперь у нас есть и второй вектор, а значит можем полностью определить ориентацию

«Где мы?»

- Проблемы: во время межпланетного перелета мы не знаем магнитное поле, да и так точности датчиков малы
- Какие еще есть инструменты?
- Например, гироскопы
- Они измеряют угловую скорость
- Интегрируем – получаем ориентацию



«Где мы?»

Какие проблемы с гироскопами?

- Проблема с измерением начальной ориентации
- Измерения всех датчиков, в том числе гироскопа – случайные величины, с ненулевым (хоть и малым) сдвигом нуля
- При интегрировании ошибка накапливается
- Ориентация «уходит»
- Нужна постоянная калибровка

«Где мы?»

Какие проблемы в принципе?

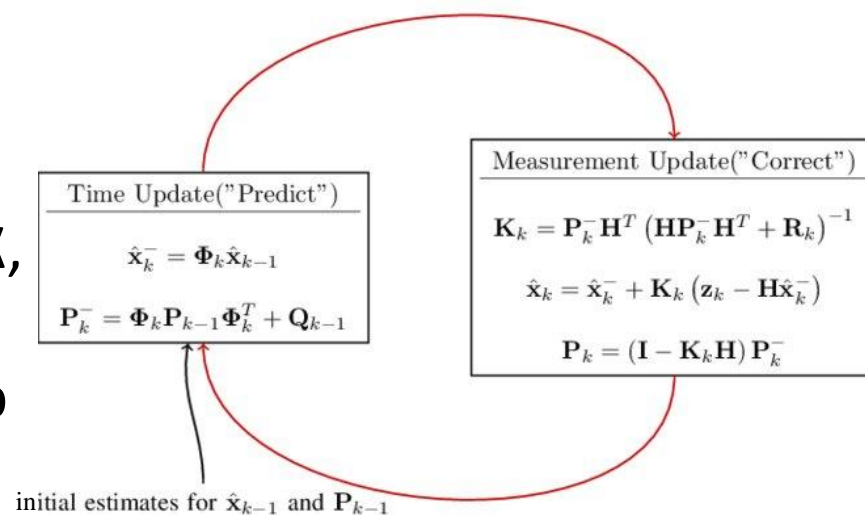
- У датчиков есть сдвиги нулей
- Эти сдвиги еще и ползают
- Всегда присутствует шум
- Очень большая боль – синхронизация приборов, временные метки на измерениях



«Где мы?»

Мы поставили кучу датчиков, получили разнородные измерения, и как это все обрабатывать?

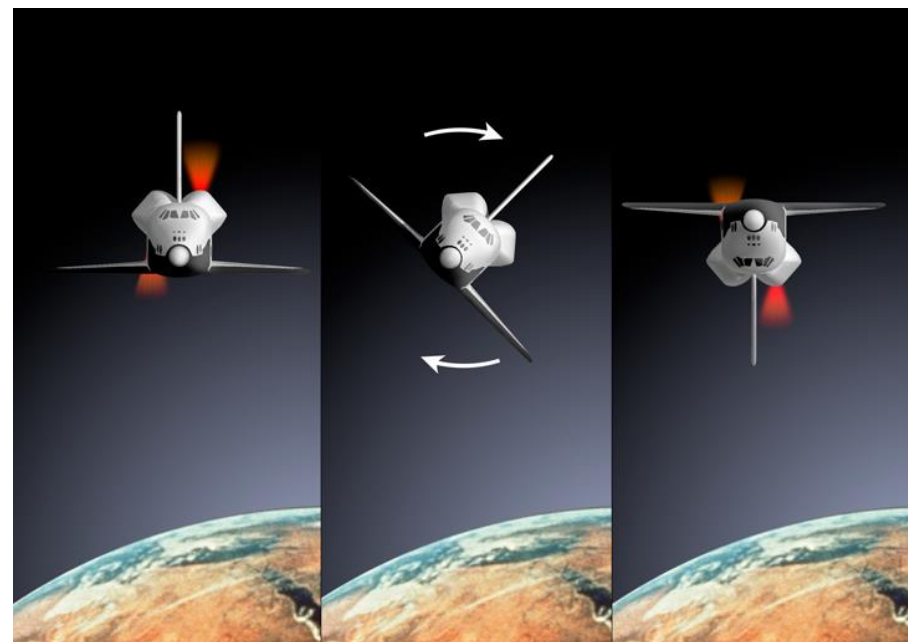
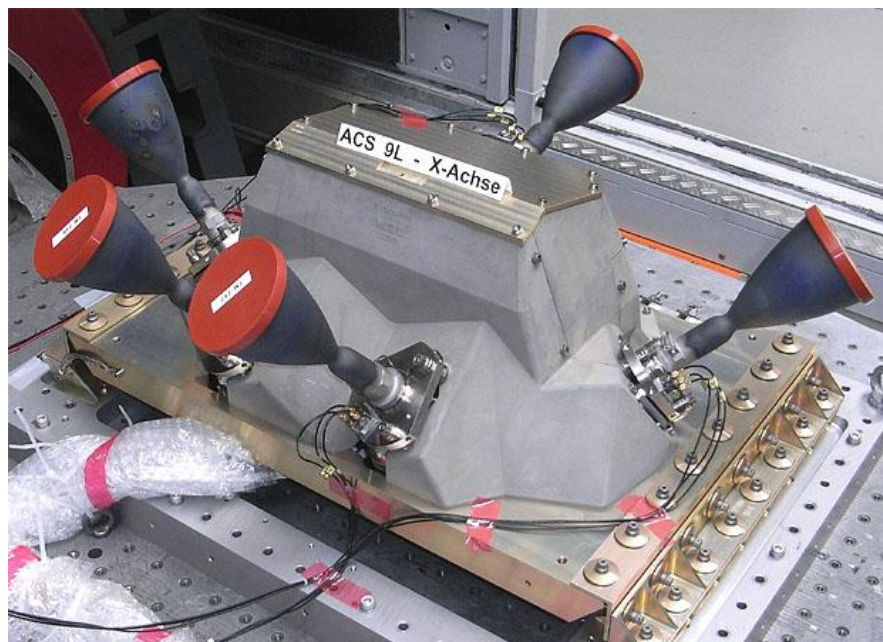
- As is
- Локальные методы типа МНК, TRIAD и др.
- Более сложные вещи (фильтр Калмана и модификации)
- И вот тут нам нужна математика и модели движения



Управление

С определением понятно, а как управляться?

- Самый простой способ – реактивные двигатели



Двигатели

Куда же без проблем?

- Расходуется топливо
- Создаваемый момент не очень точный
- Прецизионная ориентация (например, для съемки) почти невозможна
- Возможны проблемы с энергетикой
- Выхлоп может оседать на панелях/оптике
- Движков нужно много (минимум два на каждую ось + резервирование)

Гироскопические системы

Что еще? «Цепляемся за вакуум» -- закон изменения кинетического момента и гироскопические системы

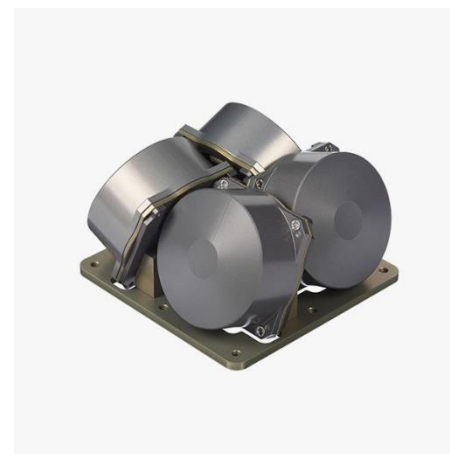
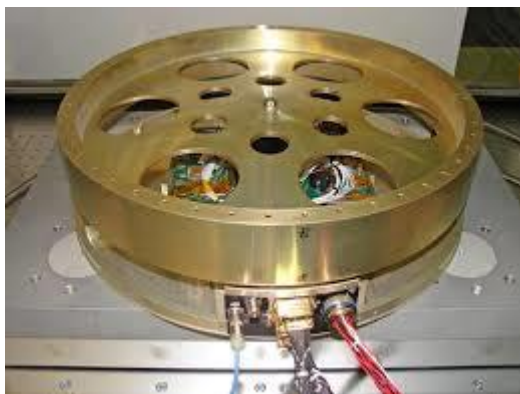
$$\mathbf{K} = \mathbf{H} + \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} = \text{const}$$



Гироскопические системы

Маховики

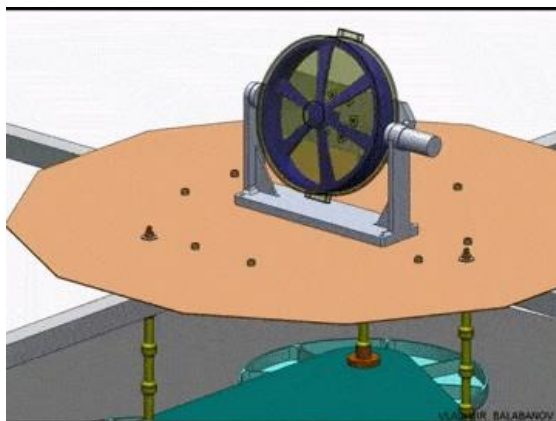
- Одна степень свободы
- Железная болванка в подшипнике
- Ставим три некомпланарных маховика – получаем управляемую систему



Гироскопические системы

Гиродины

- Почти маховики, только в кардановом подвесе
- Дают **большой** управляющий момент





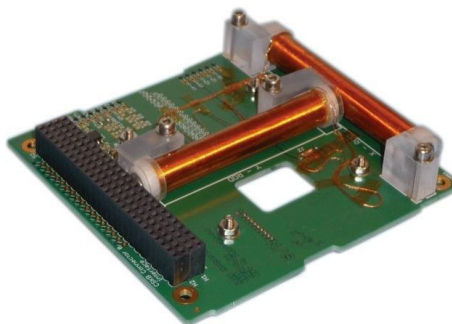
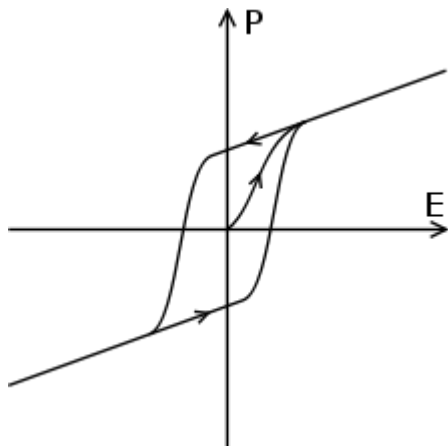
Гироскопические системы

Проблемы?

- Надежность (крутится – значит может сломаться)
- Ограничения на управление
- Ограниченный запас кинмомента
- Нужна доп.система для разгрузки
- Проблема сингулярности гиродинов
- Энергетика

Магнитные системы

- Одна из самых простых систем
- Активные (катушки)
- Пассивные (гистерезисные стержни/постоянные магниты)



Магнитные системы

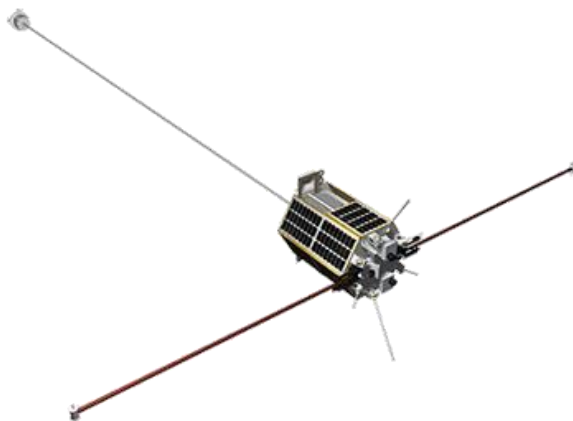
Проблемы?

- Требуют магнитного поля
- Из-за особенностей создаваемого момента не дают полную управляемость
- Сам механический момент очень мал
- Основное предназначение – малые аппараты, не требующие прецизионной ориентации
- Используются как вспомогательная система для разгрузки гироскопических систем

Экзотика

Можно использовать и другие системы/принципы

- Аэродинамическая стабилизация
- Гравитационная стабилизация





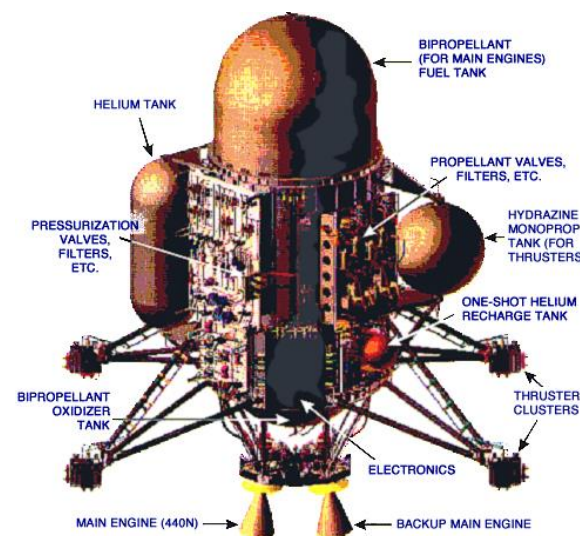
Режимы движения

Какие режимы углового движения используются?

- На Солнце для подзарядки аккумуляторов
- Режим поддержания ориентации при выдаче импульсов
- На приемную станцию связи
- Постоянная закрутка при перелете
- Целевой режим

Выдача импульсов

- При выдаче импульсов работает двигатель
- При плохой проектировке это вызывает большой момент
- Даже хорошая балансировка аппарата не гарантирует отсутствие момента
- Компенсируем его маховиками/двигателями
- Если используем маховики – скорее всего потребуются закрутка



Выдача импульсов

А зачем крутиться?

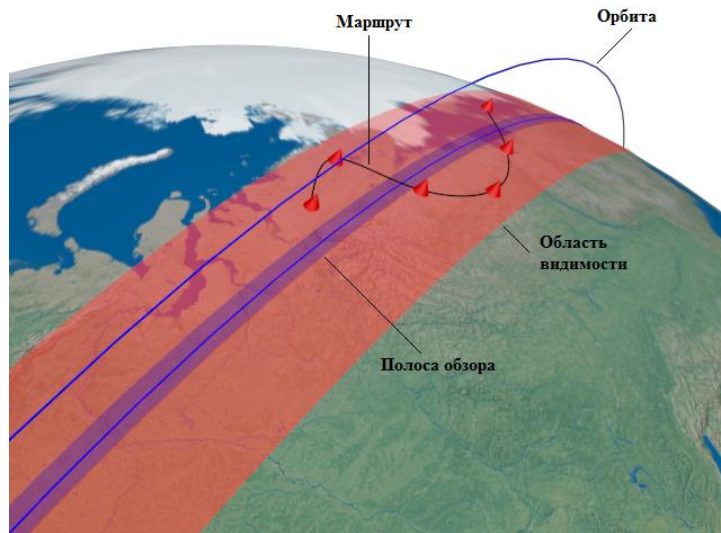
- Закрутка вокруг требуемого направления вектора тяги
- Не влияет на орбитальное движение
- Момент от двигателя усредняется – нужно меньше топлива на разгрузку маховиков
- Проблемы: быстрая закрутка == неработающие ЗД, ориентация только по ДУС (некритично на малых интервалах времени)
- На закрутку также нужно потратить топливо

Связь с Землей

- Для поддержания быстрого канала связи нужно точно ориентировать на Землю
- Относительно ИСК аппарат неподвижен
- Действуют внешние моменты – Солнце и гравитация
- Солнечный момент очень мал
- Гравитационный нужно компенсировать маховиками/двигателями

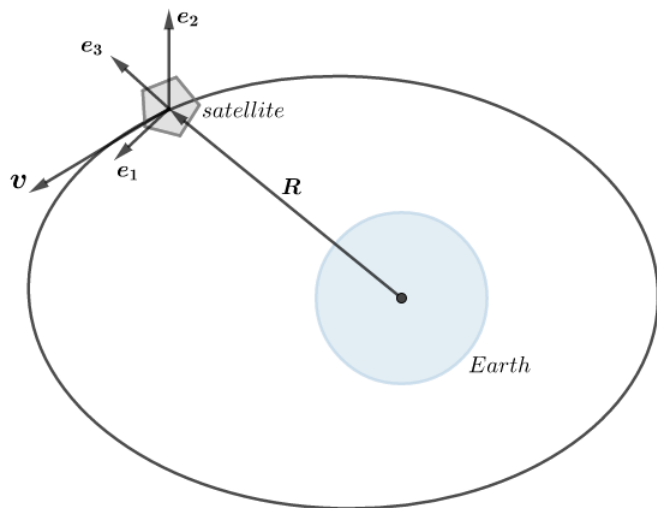
Целевой режим

- Целиком определяется научной аппаратурой
- Может быть произвольным – от свободного движения то съемки сложных объектов на поверхности планет



Съемка

- Будем осуществлять надирную съемку
- Аппарат стабилизирован в орбитальной СК, камера смотрит по радиус-вектору
- На спутник в этот момент действует грав.момент



$$M_{grav} = 3 \frac{\mu}{r^5} \mathbf{r} \times \mathbf{J} \mathbf{r}$$

\mathbf{e}_3 вдоль радиус-вектора

\mathbf{e}_2 вдоль нормали к орбите

Гравмомент

- Пусть мы живем на круговой орбите
- Тогда под действием гравмента есть положения равновесия
- Главные оси инерции совпадают с осями ОрбСК
- Это означает, что не нужно создавать момент, чтобы удерживать аппарат в этом положении – экономим топливо/энергетику маховиков

Съемка

- Это накладывает ограничения на компоновку
- Если камера направлена вдоль одной из главных осей – экономим кучу всего
- Это не всегда удастся сделать
- В любом случае есть возмущения
- Их нужно парировать, но выигрыш может быть очень существенный

Закрутка

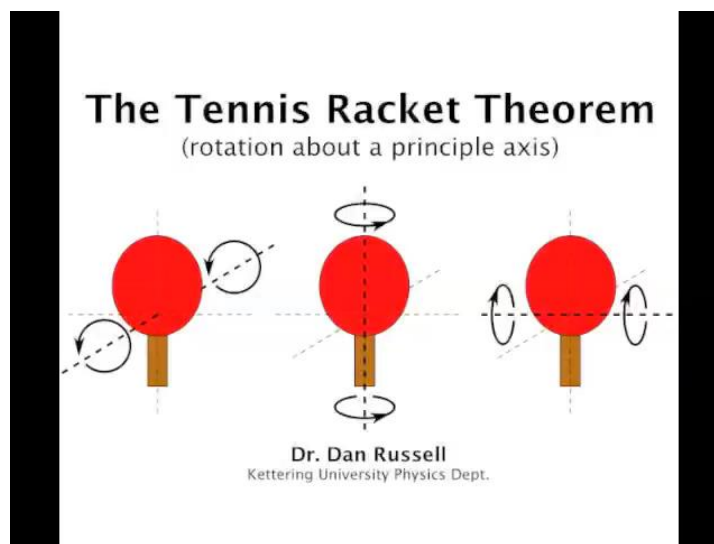
Во время полета может потребоваться закрутка аппарата

- Тепловой баланс – если мы не крутимся, то сильно греется одна сторона
- Стабилизация собственным вращением – учитывая малые внешние возмущения, ось закрутки будет сохранять свое положение в ИСК
- Может быть использовано для связи с Землей во время перелета (с широко-направленной антенной)



Закрутка

- Но, нужно аккуратно
- Закручивать можно только вокруг главных осей
- Иначе будем наблюдать прецессию



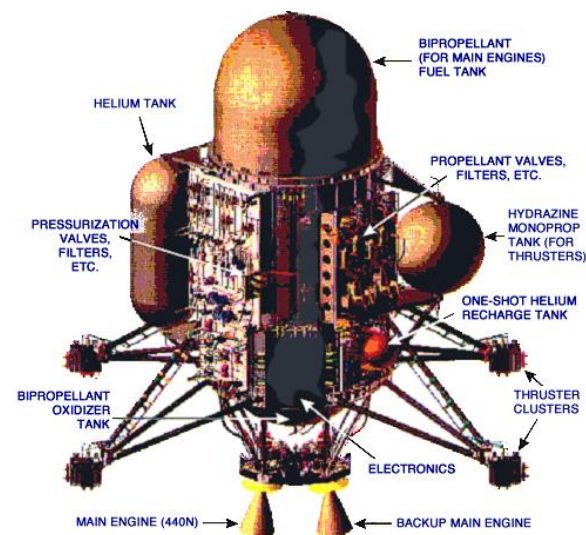
А как считать топливо?

- В первом приближении – нам нужно управлять кинетическим моментом аппарата
- Внешние возмущения (солнце/гравитация/момент двигательной установки) его меняют
- Мы должны парировать его двигателями ориентации
- Это нужно делать даже в том случае, если используем маховики – суммарный кинмомент аппарата не меняется

Расположение движков

Кстати, а зачем вынесли движки так далеко?

- Увеличиваем плечо – увеличиваем момент
- Тратим меньше топлива на разгрузку/управление ориентацией
- Есть проблемы с кабельной/топливной сетью – выносить так далеко это накладно по надежности/массе



Как выбирать маховики?

- Зависит от режимов движения
- В нулевом приближении – есть требуемая угловая скорость и тензор инерции
- Запаса кинмомента маховиков должно хватить на ее поддержание, то есть

$$H \geq |\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_{\text{ref}}|$$

- Также есть требуемые угловые ускорения – по сути, требования к управляющим воздействиям маховиков

$$\dot{H} \geq |\mathbf{J}\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ref}}|$$

Как выбирать маховики?

- В нашем случае эти оценки не совсем верны
- Для быстрых раскруток мы опираемся на движки
- Маховики нужны только для поддержания точной ориентации во время связи/съемки

Вопросы?

