

О перспективных задачах динамики космического полета

к.ф.-м.н. С.С.Ткачев^{1,2}

¹ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

²Московский физико-технический институт



Немного истории

Основные вехи в освоении космоса (СССР и США)

Сергей Королев, Мстислав Келдыш

- *Первый ИСЗ – 4 октября 1957 (Спутник-1)*
- Луна-1 (январь, 1959), Луна-3 (4 октября 1959)
- *Первый человек на орбите (Ю.Гагарин) – 12 апреля 1961*
- Первый выход человека в космос (А.Леонов) – март, 1965
- Посадка на Венеру (Венера-7) -1970
- Посадка на Марс (Марс-3) – 1970
- Первая пилотируемая ОС (Салют-1) – 1971
- ОС МИР (1986-2001)

Вернер фон Браун

- Первый ИСЗ – 31 января 1958 (Explorer-1)
- Первый спутник связи – 1958
- Первый метеоспутник – 1959
- Первый человек на суборбите – 5 мая 1961
- *Первый человек на Луне (Нил Армстронг) – 21 июля 1969*
- Выход за пределы Солнечной системы (Пионер-10) -1972
- *Voyager-1, -2 - 1977*
- Многоразовая транспортная система Space Shuttle – 1981

• МКС (1998-....)

Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН



Был образован в 1953 году для решения сложных математических проблем, связанных с государственными программами исследования космического пространства, развития атомной и термоядерной энергетики

Организатором и первым директором был Мстислав Всеволодович Келдыш



Направления исследований

- Математическая физика
 - Физика плазмы, ядерная физика, сильные взаимодействия, нанотехнология, синергетика, численные методы
- Механика и управление
 - Баллистика КА, космический мусор, навигация
 - *Динамика и управление угловым и орбитальным движением малых КА, тросовые системы*
 - *Робототехника, мобильные аппараты*
- Компьютеры и программирование
 - Системное и прикладное ПО, многопроцессорные машины и комплексы, компьютерная графика

Космические миссии

Пилотируема космонавтика	Большие КА	Малые КА
• МКС • Союз, Прогресс • Space shuttle • Перспективные КА для межпланетных экспедиций	• Спутники связи • Навигационный спутники (GPS, ГЛОНАСС, Галилео, Бейдоу) • Метеорологические спутники • Спутники для задач ДЗЗ • КА для межпланетных исследований	• Мини (до 500кг) • Микро (до 100кг) • Нано (до 10кг) • Пико (до 1кг) • Фемто (до 100г)

Малые космические аппараты

Преимущества

Снижение стоимости

Открывает возможности по созданию и запуску спутников для отдельных организаций и даже небольших групп (*Сонг Хойюн спутник за \$500*)

Снижение сроков разработки

Использование *COTS*-электроники (*Commercial Off-The-Shelf*)

Новые возможности

Спутники-инспекторы

Групповые полеты

Недостатки

Ограничение по массе, габаритам, энерговооруженности

Пополнение орбитальной группировки объектов космического мусора

Иногда недостаточная квалификация разработчиков

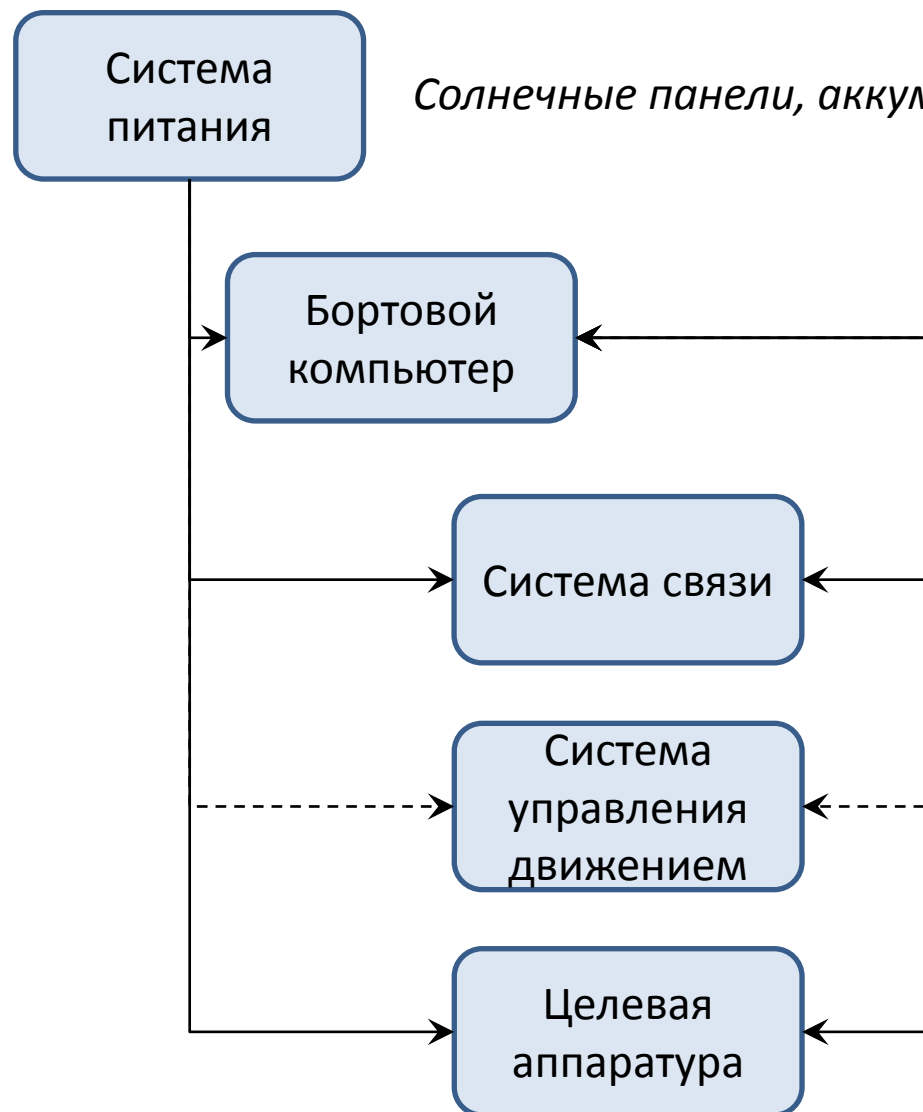


Чибис-М (ИКИ РАН, 34.4 кг)



ТНС-0 (РКС, 5.5 кг)

Системы спутника



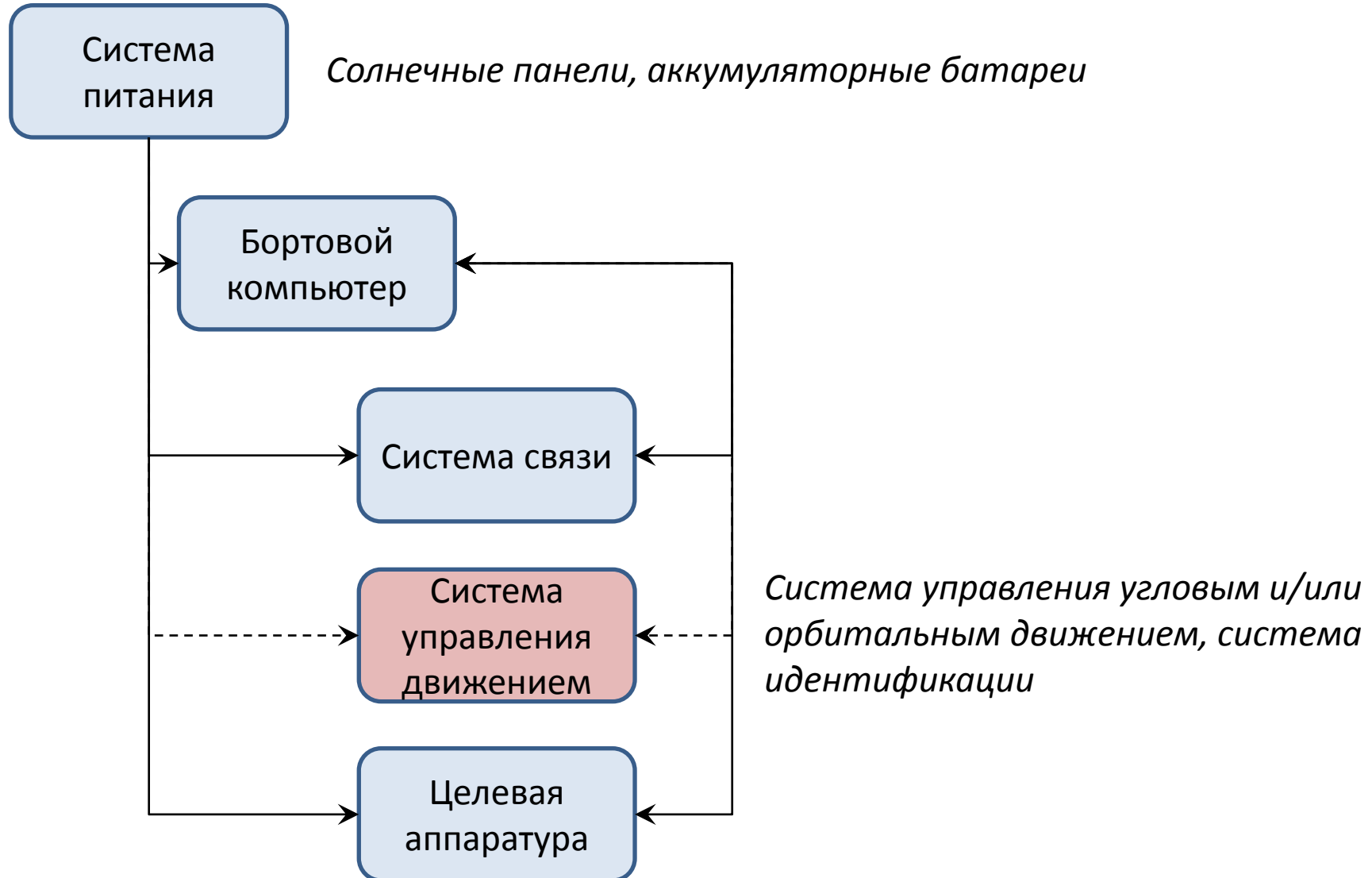
Солнечные панели, аккумуляторные батареи



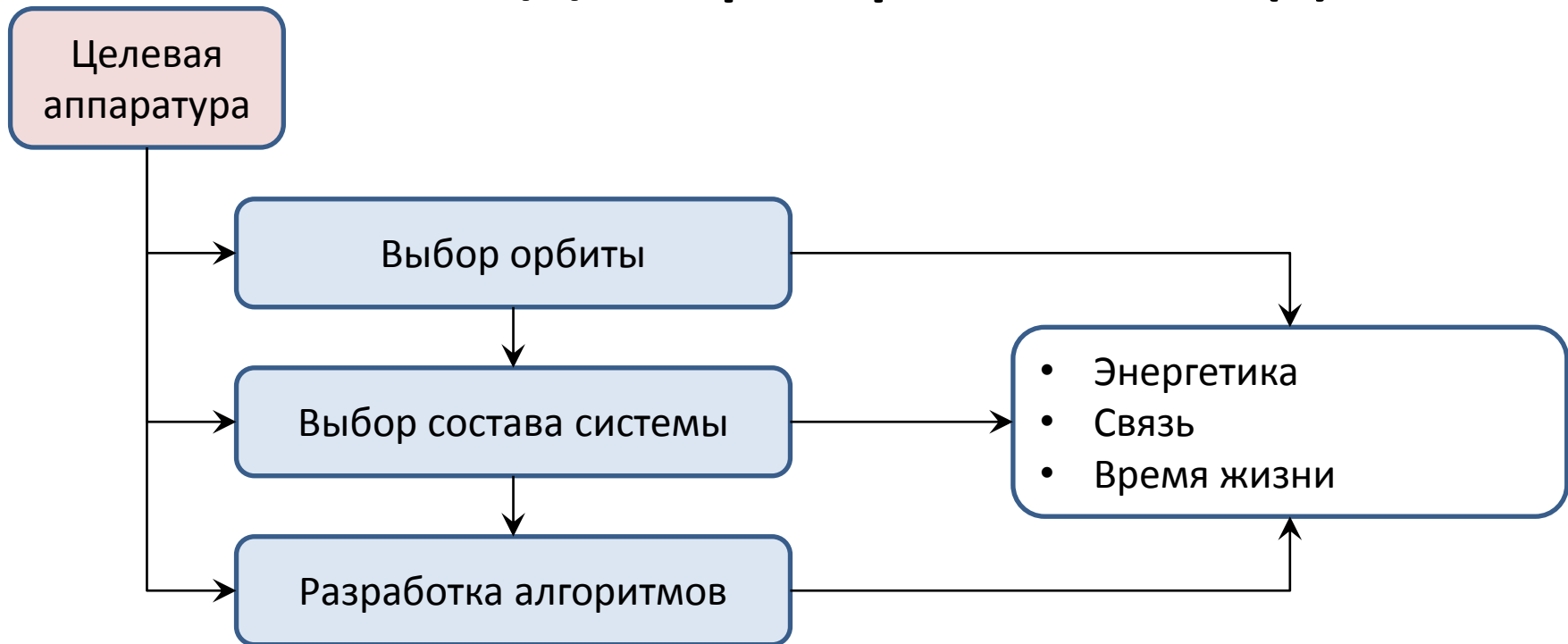
Бортовой компьютер Чибис-М с маховиками

Система управления угловым и/или орбитальным движением, система идентификации

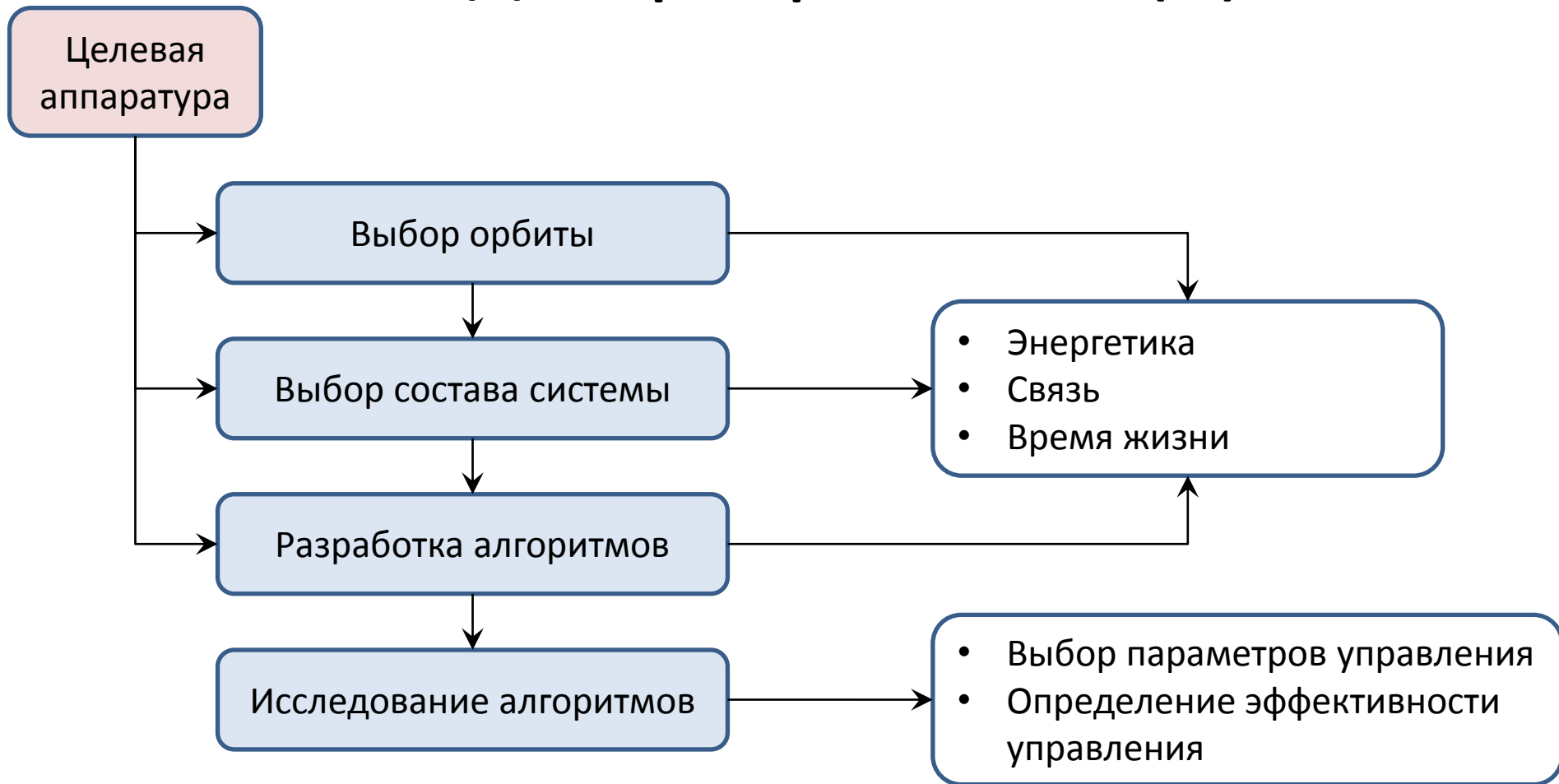
Системы спутника



Стадии разработки (I)



Стадии разработки (II)



Стадии разработки (III)



Стадии разработки



Угловое движение - управление

- Магнитные системы

токовые катушки

гистерезисные стержни

постоянные магниты

- Гироскопические системы

маховики

гиродины

силовые гироскопы

- Реактивные двигатели

- Гравитационные системы

специальная конструкция спутника

гравитационная штанга



Магнитные системы

Управляющий момент

$$\mathbf{M} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

$\mathbf{m}$ – магнитный момент

$\mathbf{B}$ – индукция геомагнитного поля

Преимущества

Относительная простота реализации

Не создает вибрации

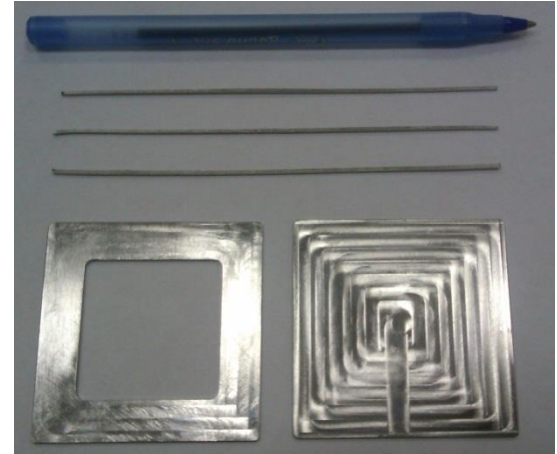
Не требует рабочего тела

Недостатки

Необходимо внешнее магнитное поле

Вырожденность управление

Низкая точность



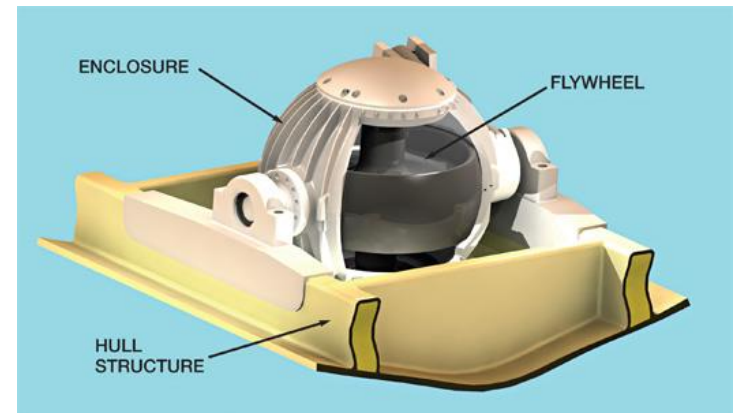
Гироскопические системы

Управляющий момент

$$\mathbf{M} = -\dot{\mathbf{H}} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}$$

$\mathbf{H}$ – кинетический момент

$\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость спутника



Преимущества

- Не требует наличия внешних полей

- Высокая точность

- Не требует рабочего тела

Недостатки

- Сложность конструкции

- Вибрации

- Особенности в управлении

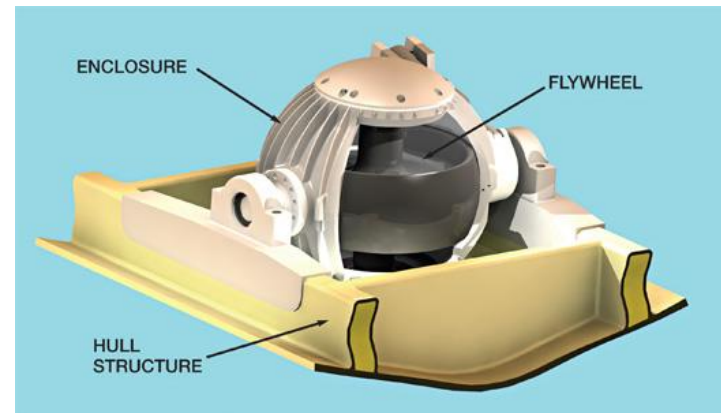
Гироскопические системы

Управляющий момент

$$\mathbf{M} = -\dot{\mathbf{H}} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}$$

$\mathbf{H}$ – кинетический момент

$\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость спутника



Преимущества

Не требует наличия внешних полей

Высокая точность

Не требует рабочего тела

Недостатки

Сложность конструкции

Вибрации

Особенности в управлении

Маховики

достижение максимального $\mathbf{H}$
разгрузка

Гиродины

вырождение
построение специальных
законов (steering law)

Угловое движение - идентификация

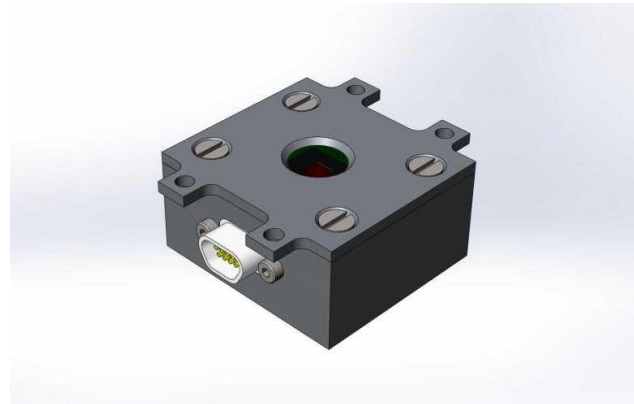
Позиционные датчики

датчик Солнца

магнитометр

датчик горизонта

звездная камера



Датчики скорости

датчик угловой скорости

датчик ускорения



Угловое движение - алгоритмы

Алгоритмы идентификации

Локальные – TRIAD

Одно измерение, кинематическая модель

Статистические – МНК, фильтр Калмана

Набор измерений, модель ошибок, динамическая модель

Алгоритмы стабилизации

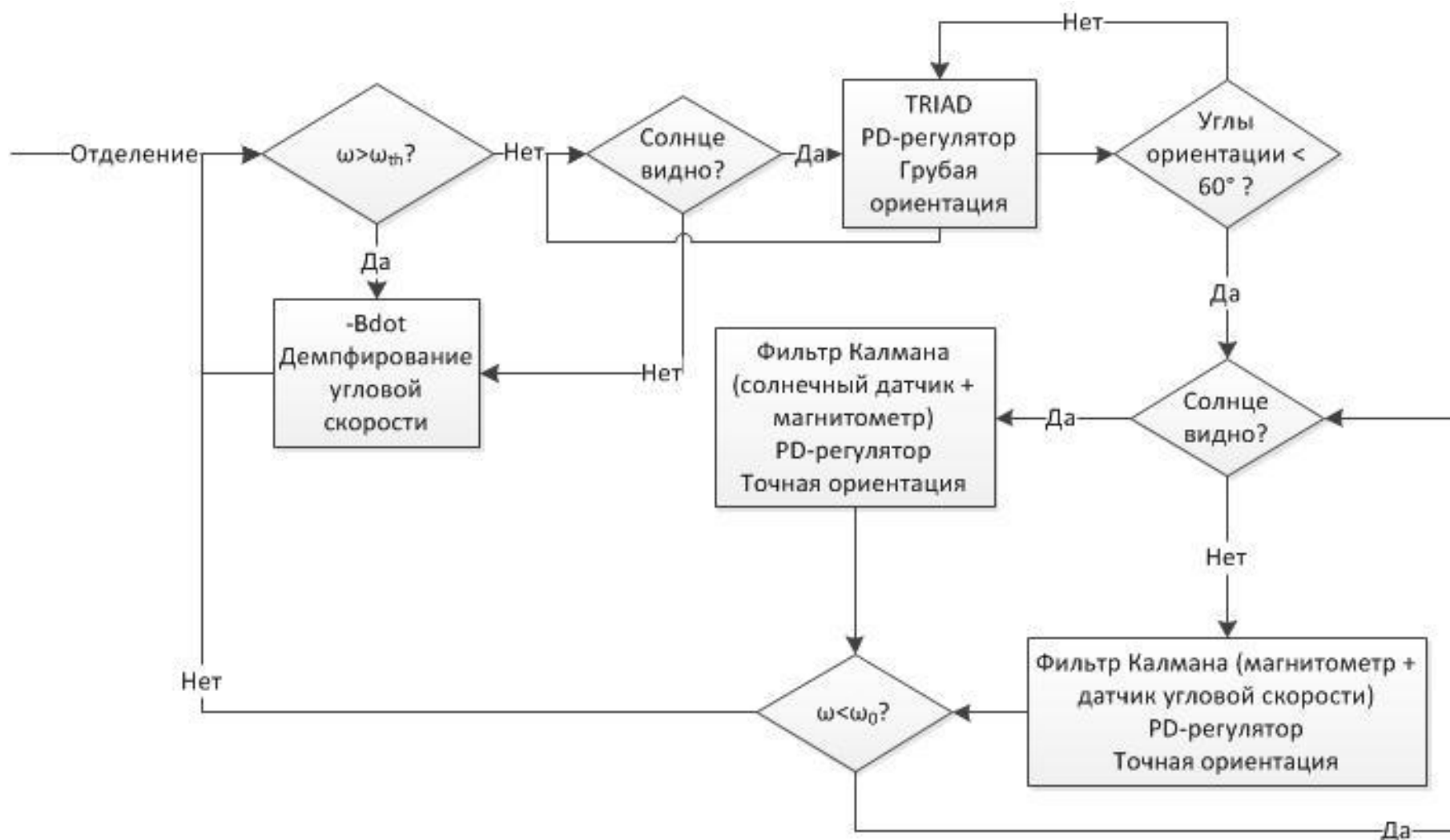
Алгоритм демпфирования угловой скорости

$$\mathbf{m} = -\mathbf{k} \frac{d\mathbf{B}}{dt}$$

Алгоритм стабилизации ПД-регулятор

$$\dot{\mathbf{H}} + \boldsymbol{\omega}_{абс} \times \mathbf{H} = \mathbf{k}_a \mathbf{q} + \mathbf{k}_\omega \boldsymbol{\omega}_{отн} - \boldsymbol{\omega}_{абс} \times \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}_{абс} - \mathbf{J} \mathbf{A} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{орб} + \mathbf{J} \mathbf{W} \mathbf{A} \boldsymbol{\omega}_{орб}$$

Автономная работа



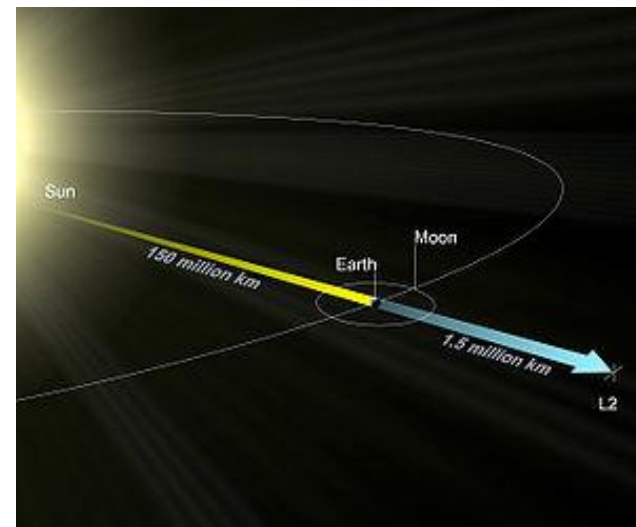
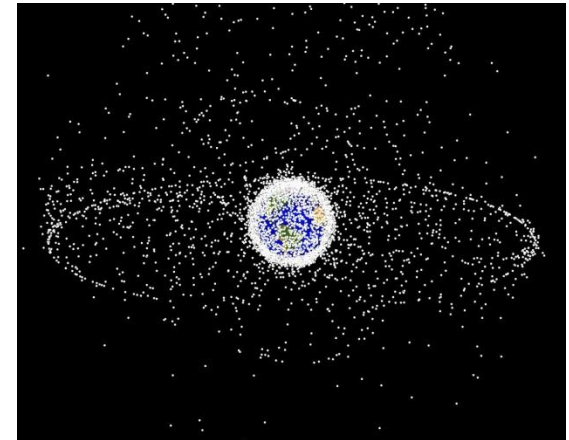
Орбитальное движение

Околоземные миссии

задачи выведения, оптимальных маневров, поддержания орбиты
задачи связанные с космическим мусором

Миссии дальнего космоса

миссии к другим телам Солнечной системы
миссии к точкам Лагранжа системы Солнце-Земля, Земля-Луна



Проблема космического мусора

Активные способы увода

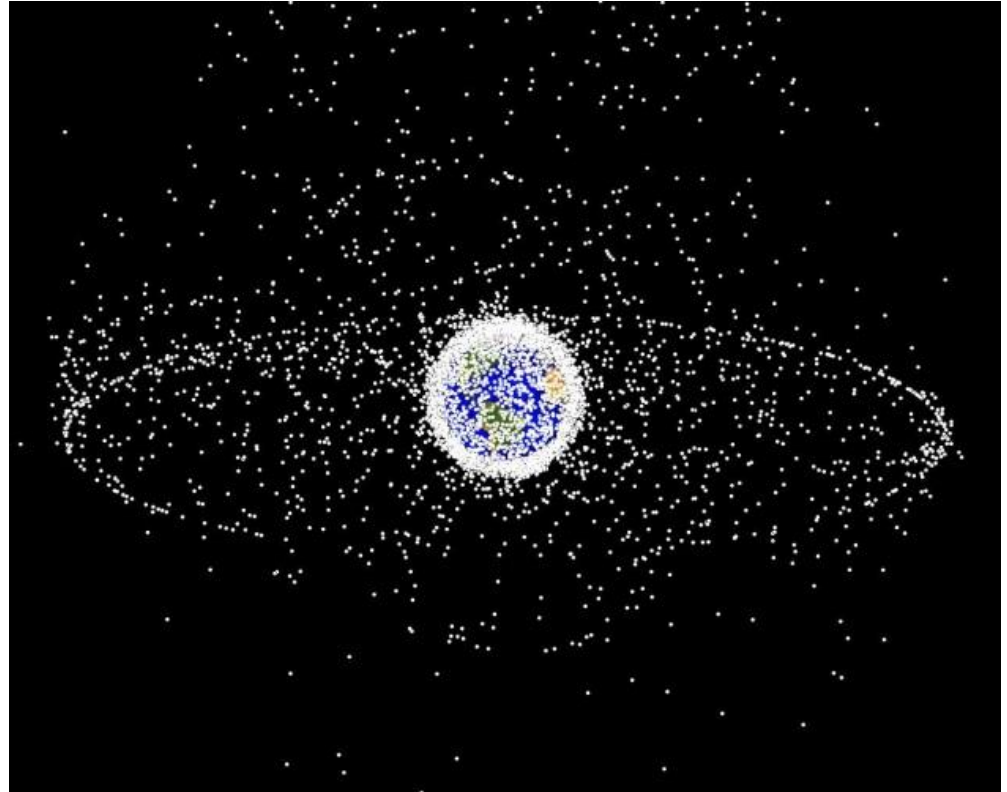
Реактивные двигатели

Пассивные способы увода

Использование
аэродинамического
сопротивления

Использование солнечного
давления

Использование притяжения Луны



В случае малых спутников проблема усугубляется

Способы увода

Активные способы увода

Преимущества

Не требует внешних воздействий

Недостатки

Требуется затраты топлива

Пассивные способы увода

Преимущества

Не требует топлива

Недостатки

Требуется внешние воздействия

Возможно дополнительное
оборудование

Для оценки времени увода нужны
прецизионные моделирования

Межпланетные миссии

Расширение возможностей космических миссий:

- Обсерватории и телескопы (NASA's Terrestrial Planet Finder, ESA's Darwin project),

- Узловые станции для полетов в дальний космос (Lunar Gateway Station),

- Поддержка связи с землей аппаратуры на поверхности Луны

Снижение затрат топлива и увеличение массы полезной нагрузки

- Облет спутников планет-гигантов с целью их длительного изучения

Классическая аппроксимация траектории сопряженными коническими сечениями становится неадекватной на границах сфер действия при малых относительных скоростях КА

Проектирование межпланетных миссий

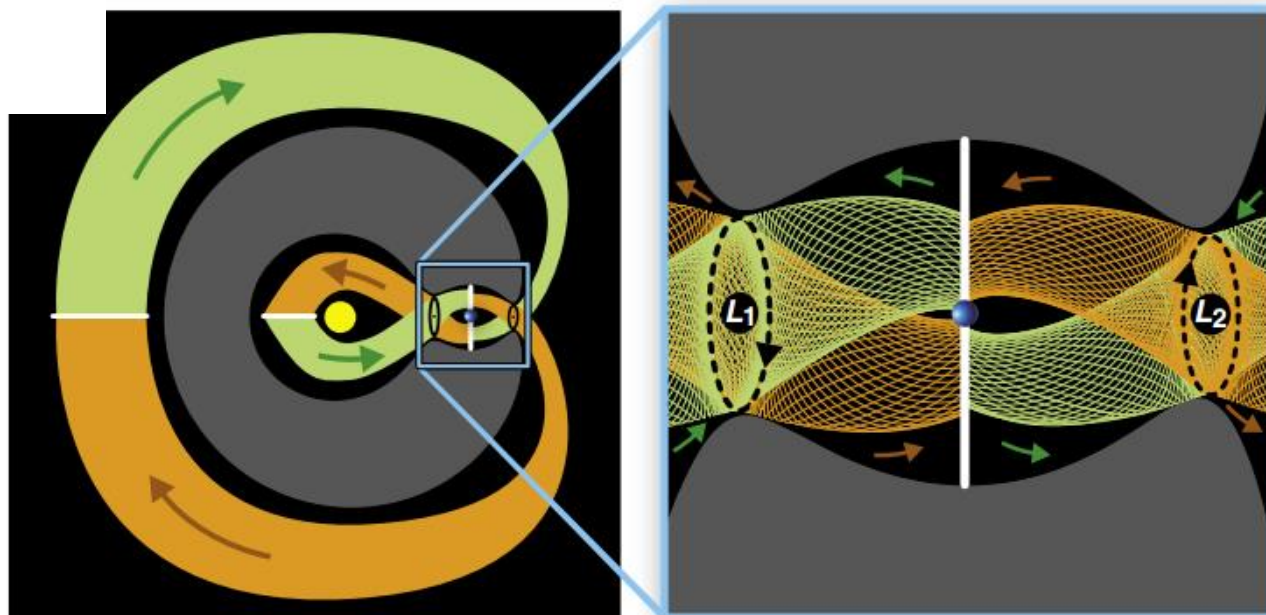
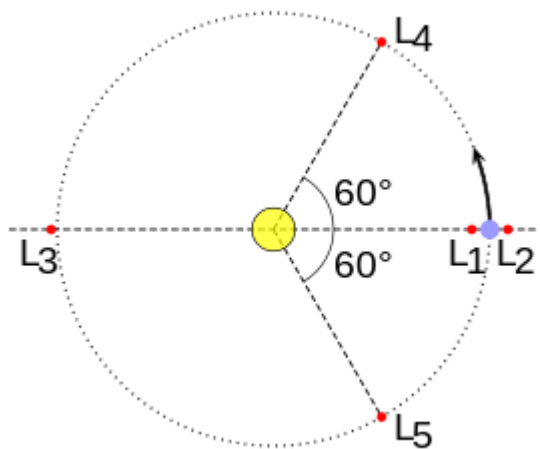


Пять точек равновесия и периодические орбиты вокруг них во вращающейся системе координат

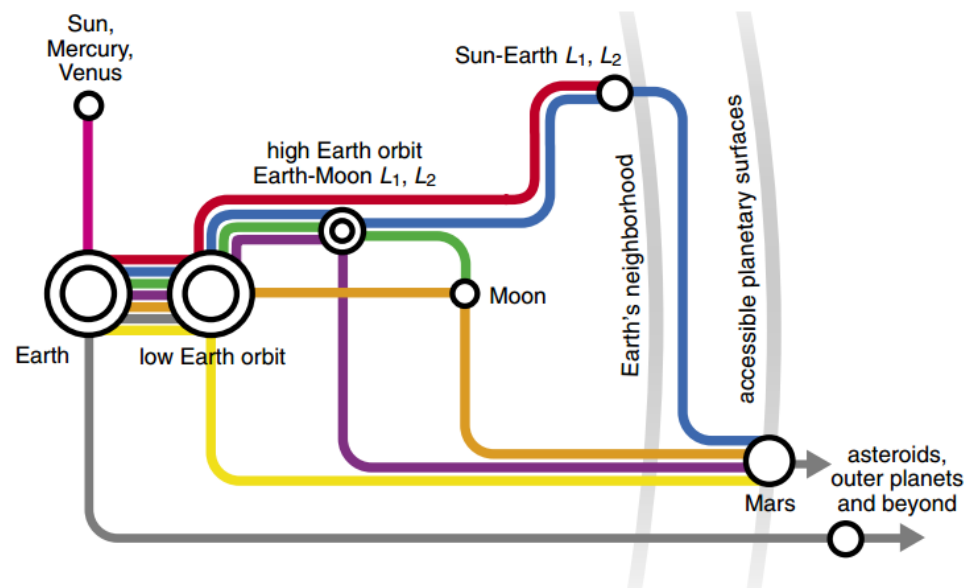
Инвариантные структуры (трубки в пространстве) позволяют подходить к задаче проектирования траекторий с наглядной, геометрической точки зрения

Существенное сокращение затрат топлива по сравнению со стандартными подходами

Инвариантные многообразия



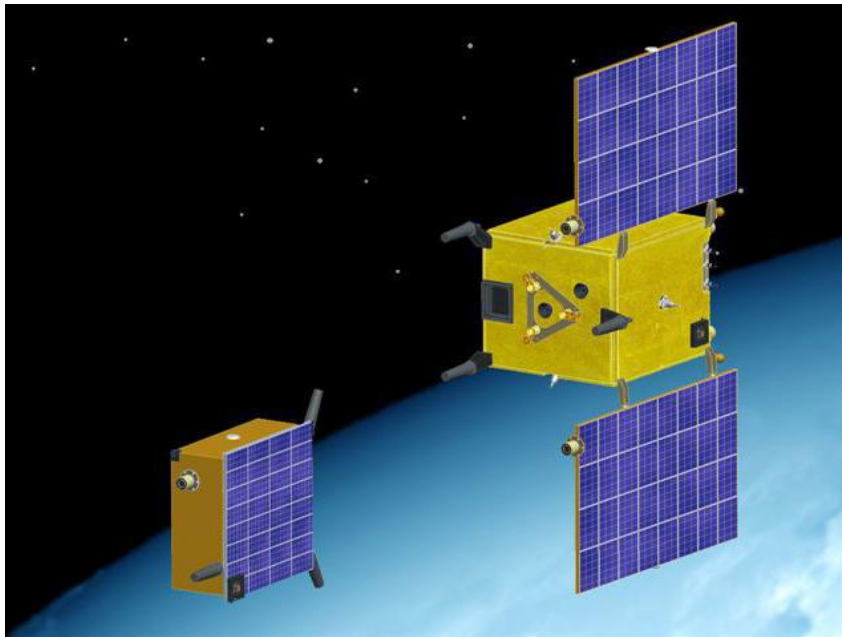
Космический «суперхайвей»



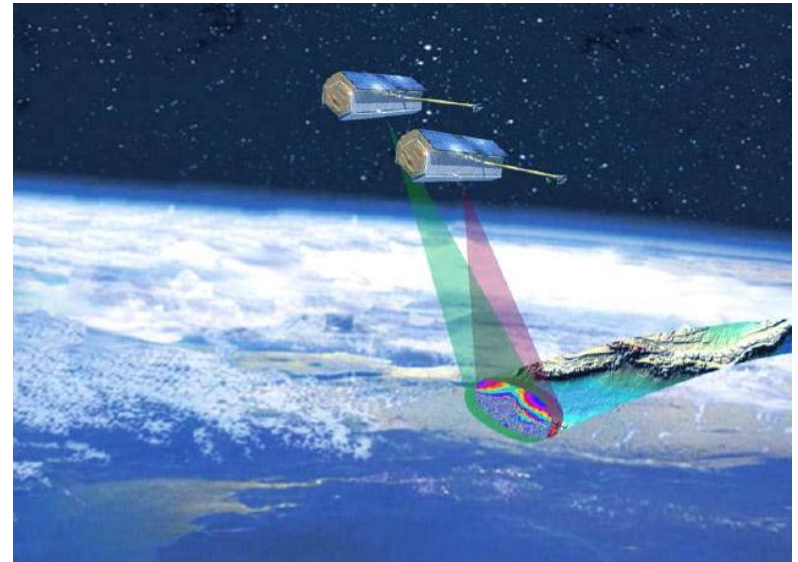
Групповые полеты

Особенности

- Несколько спутников
- Одна задача
- Расстояние до нескольких километров



Prisma



TanDEX-X

Относительное движение - управление

Способы управления

Реактивные двигатели

Электромагнитное взаимодействие

Электростатическое взаимодействие

Переброс масс

Использование аэродинамики

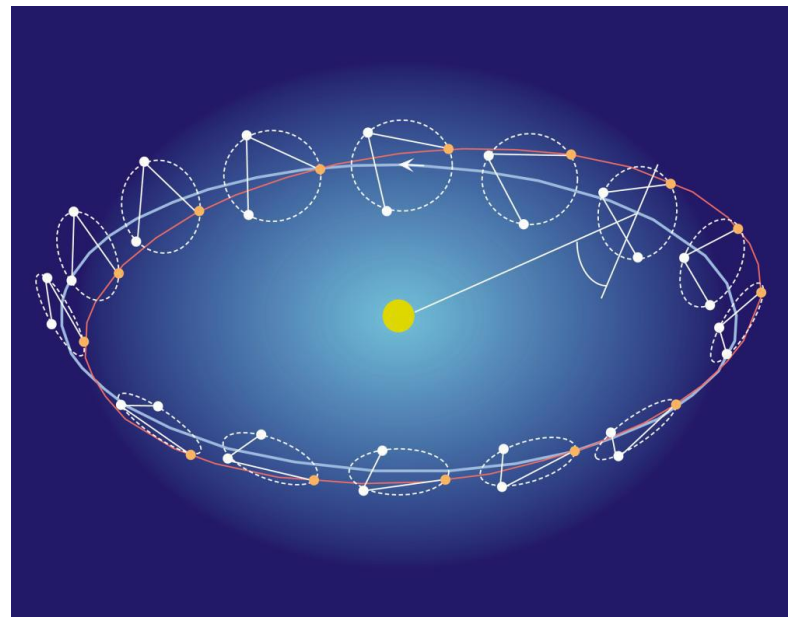
Использование солнечного давления

Способы определения движения

Системы глобального позиционирования

Оптические способы

Радиолокационные способы



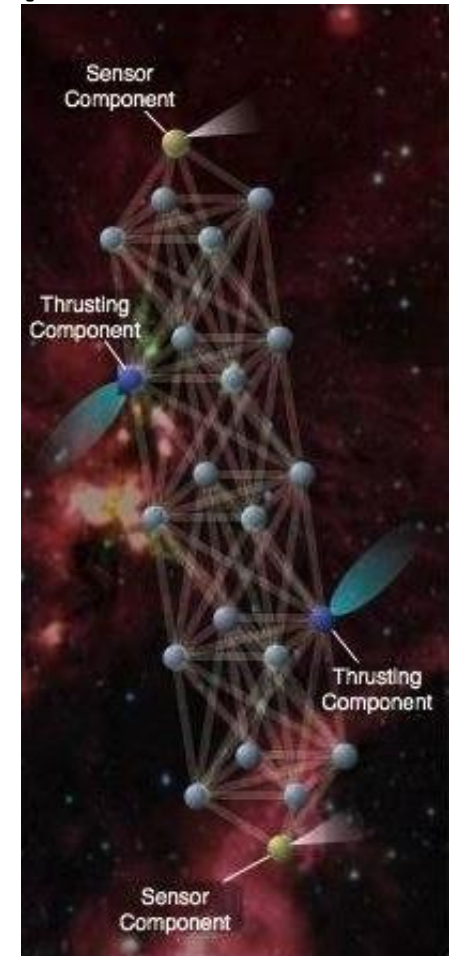
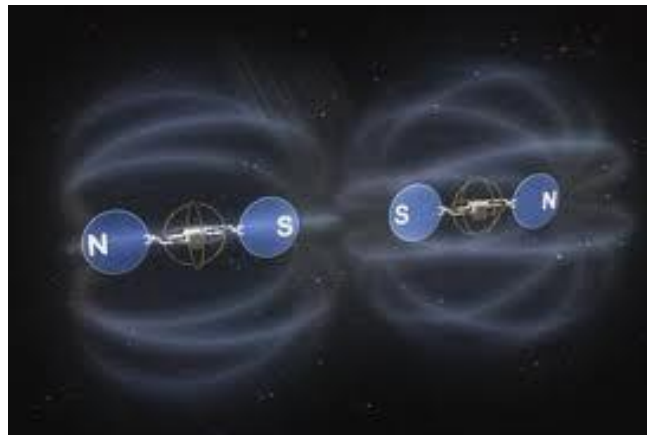
Электромагнитное или электростатическое взаимодействие

Преимущества

Управление только относительным движением
Не требует расхода рабочего тела

Недостатки

Эффективно только на небольших расстояниях
Сложность в реализации
Электростатика – на высоких орбитах
Вырожденное управление



Солнечное давление или сопротивление атмосферы

Преимущества

Не требует расхода рабочего тела

Недостатки

Зависит от внешних факторов

Аэродинамика – на низких орбитах

Солнечное давление – на высоких

Вырожденное управление

Сложность реализации

сложное оборудование

управление ориентацией



Переброс массы

Преимущества

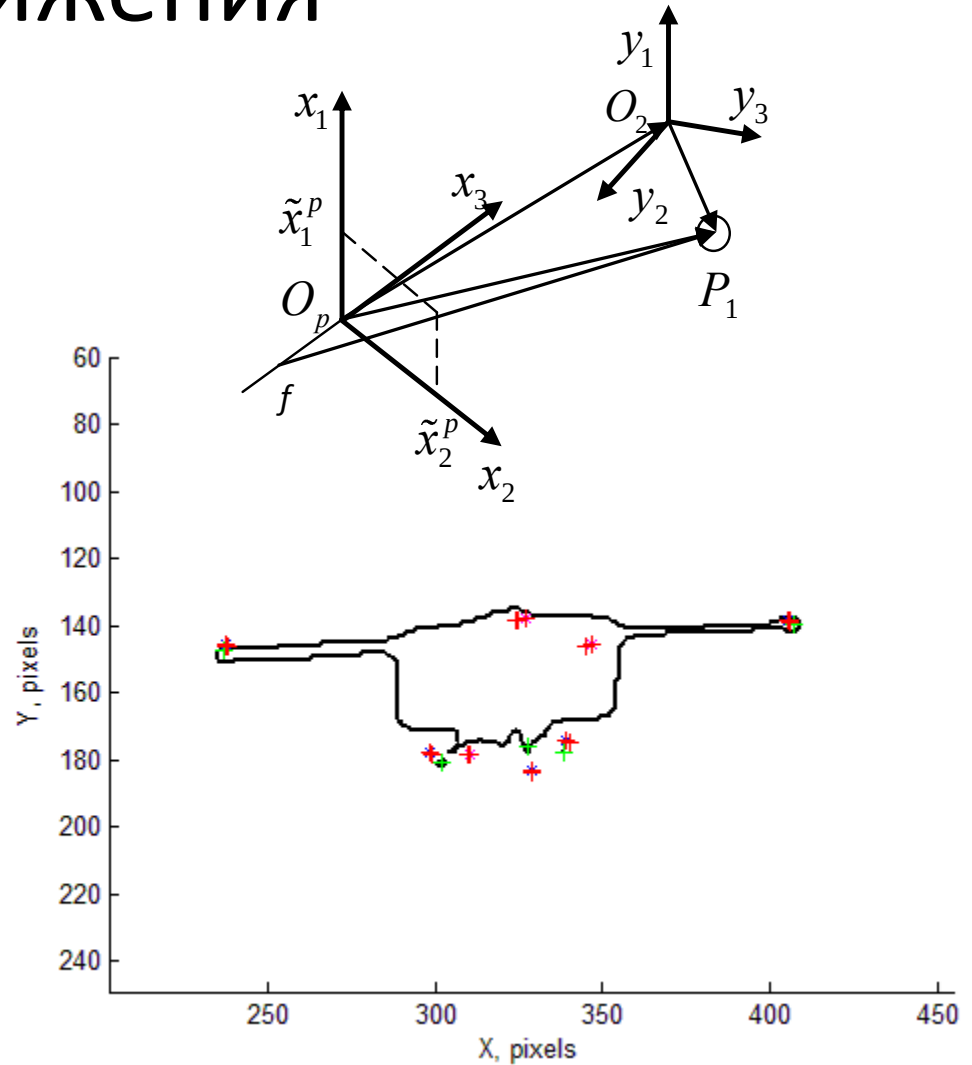
Не требует расхода рабочего тела
Эффективно на любых орбитах, в том числе и
около точек либрации

Недостатки

Сложность реализации



Определение по изображению



Исследование

Создание математической модели

- Выбор параметров

- Выбор возмущений

- Выбор алгоритмов

Исследование математической модели

- Аналитические исследования

- Численные исследования

Лабораторные испытания

- Разработка оборудования

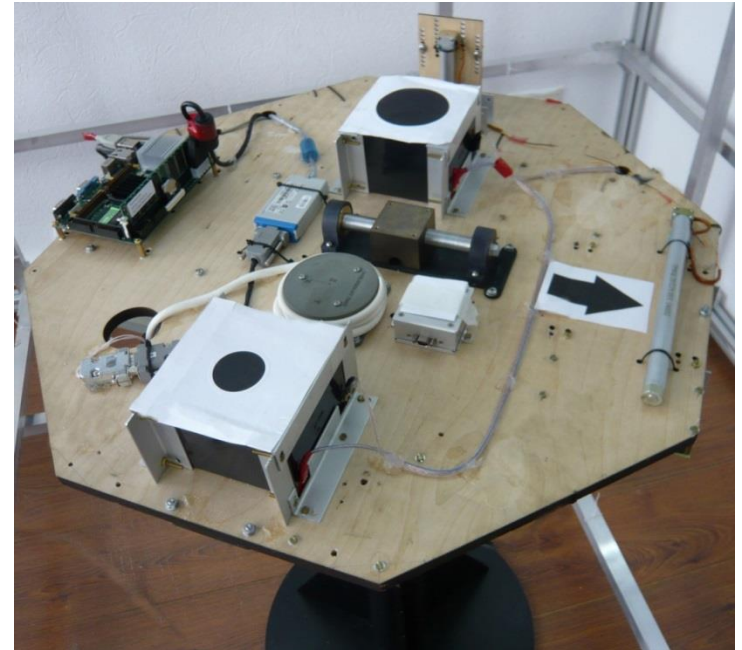
- Создание математических моделей макетов

- Сопоставление результатов моделирования

Лабораторные испытания

Имитатор внешней среды

- Геомагнитное поле
- Солнце
- Звезды



Имитатор системы управления

- Система питания
- Бортовой компьютер
- Набор датчиков и актюаторов

Летные испытания

Подготовительные работы

- Калибровки

- Проверки всех узлов

Штатная эксплуатация

- Обработка данных

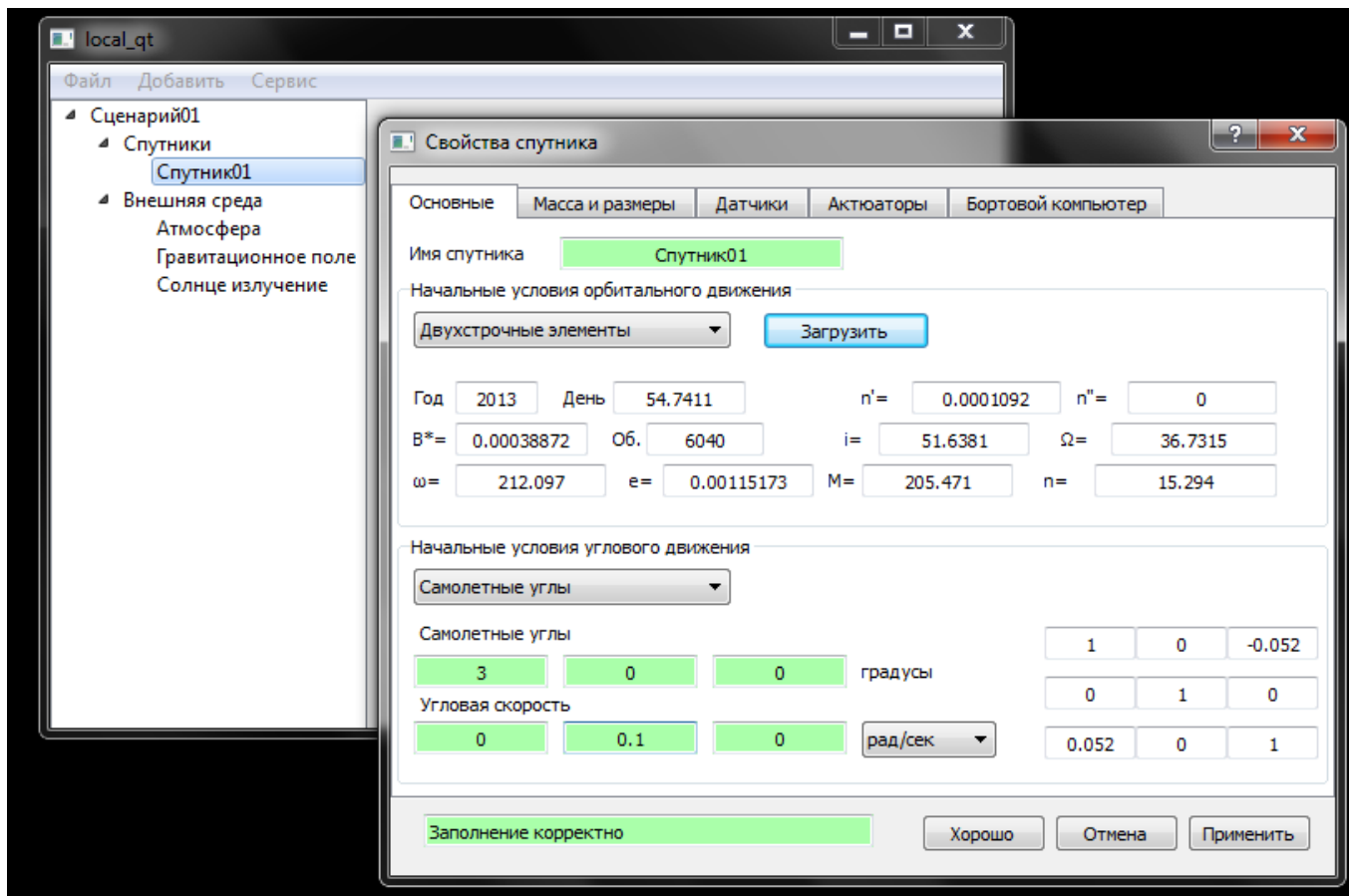
- Проверка соответствия расчетных характеристик реальным

Нештатные ситуации

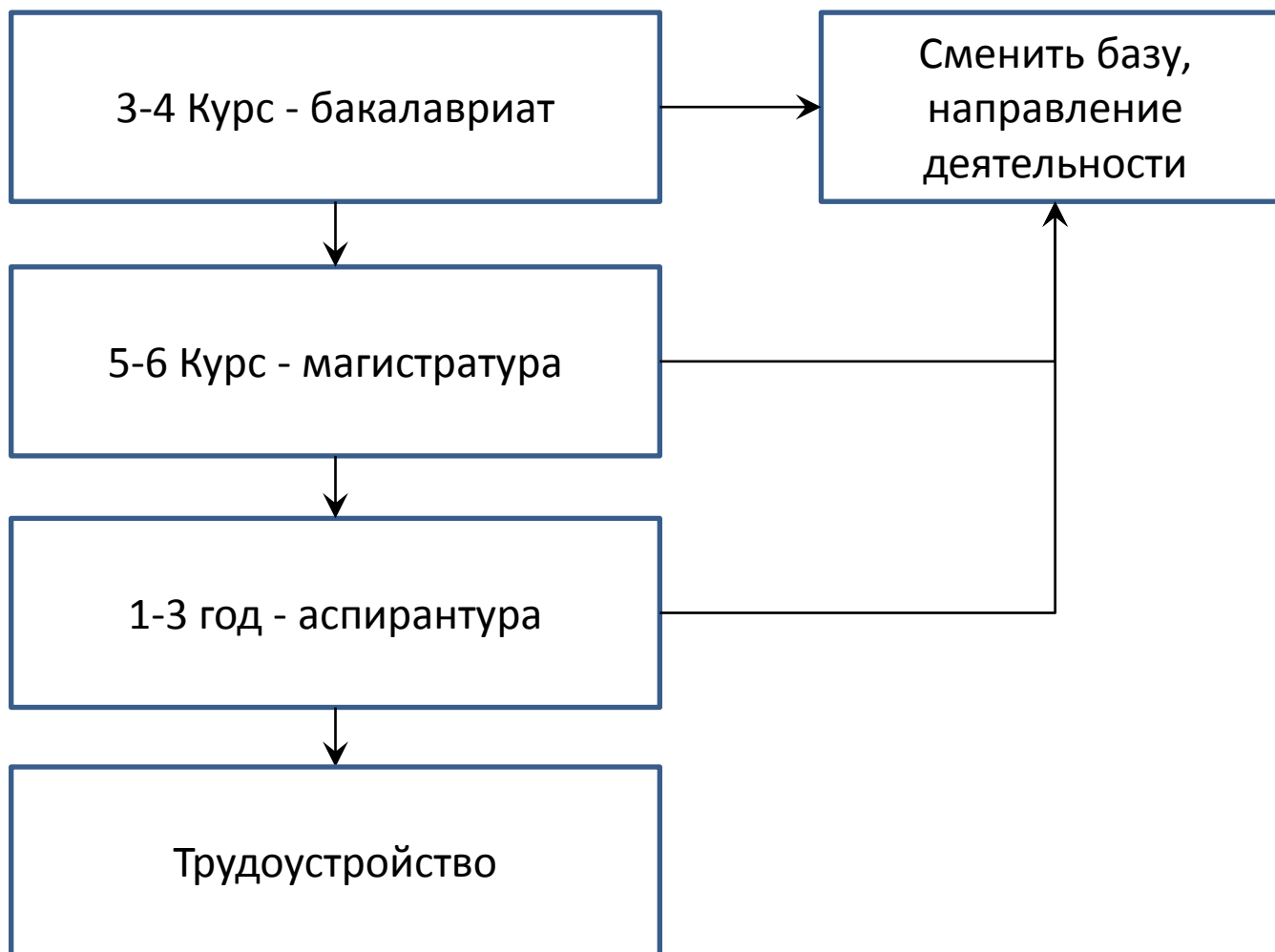
- Разработка методов и алгоритмов для нештатных ситуаций



Недостаточная квалификация разработчиков



Участие студентов и аспирантов



Чем придется (посчастливившись) заниматься?

Математическое моделирование

Управляемого движения космических аппаратов

Управляемого движения макетов в лаборатории

Проведение лабораторных и летных испытаний

Проектирование и создание макетов

Создание программного обеспечения



Наши партнеры

В России

ООО Спутниковые инновационные космические системы (СПУТНИКС), Москва

ОАО Российские космические системы (РКС), Москва

ОАО Информационные спутниковые системы им. М.Ф.Решетнева, Красноярск

ФГУП Научно-производственное объединение им. С.А.Лавочкина

ОАО Газпром космические системы, Щелково

Московский физико-технический институт, Долгопрудный

За рубежом

Universita degli studi di Roma La Sapienza, Рим

Politecnico di Milano, Милан

Universidade do Minho, Мёнью, Португалия

Swedish Institute for space physics, Кируна

Technische Universitat Berlin, Берлин

University of Kentucky, Лексингтон

National Space Organization, Тайвань

Наша команда

