



# Использование естественных сил для управление относительным движением космических аппаратов

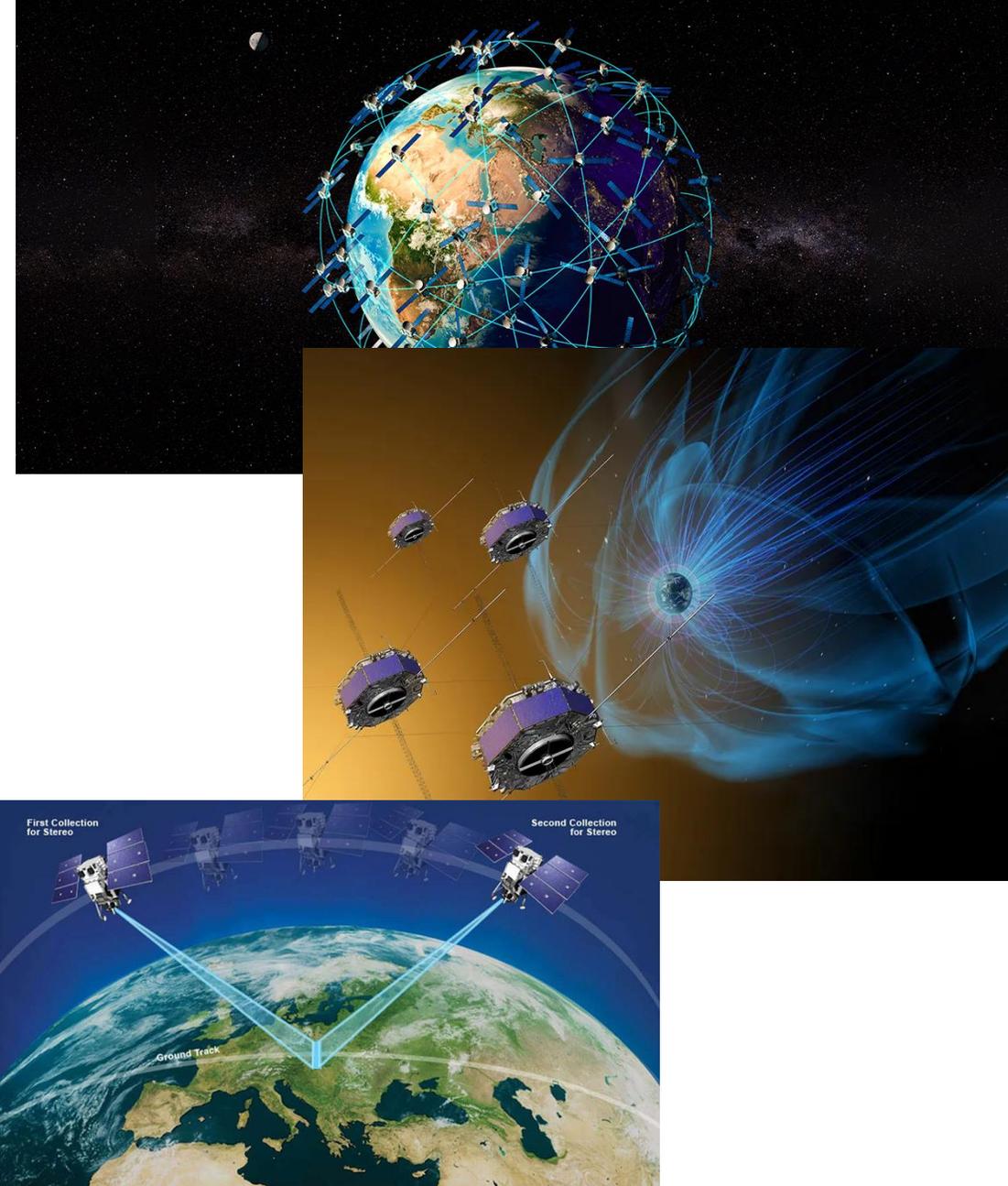
Маштаков Я.В., Монахова У.В., Иванов Д.С.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

# Введение

Многоспутниковые системы дают существенно больше возможностей:

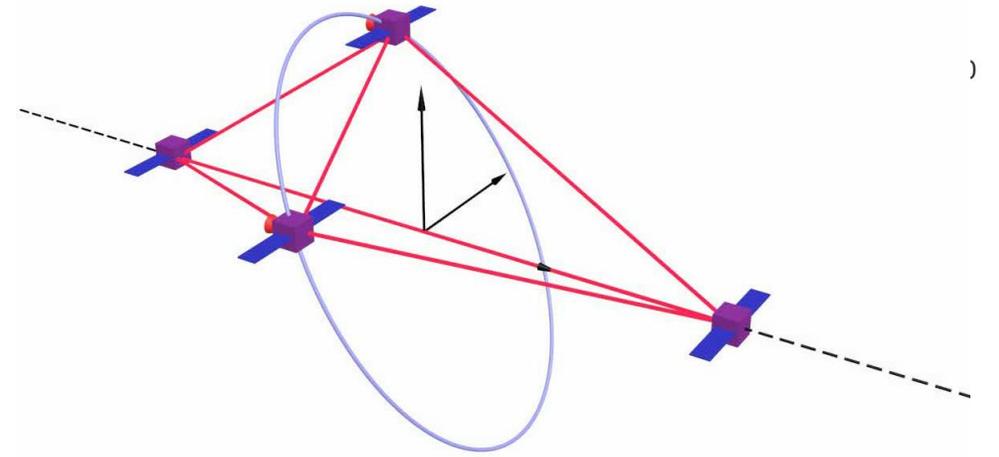
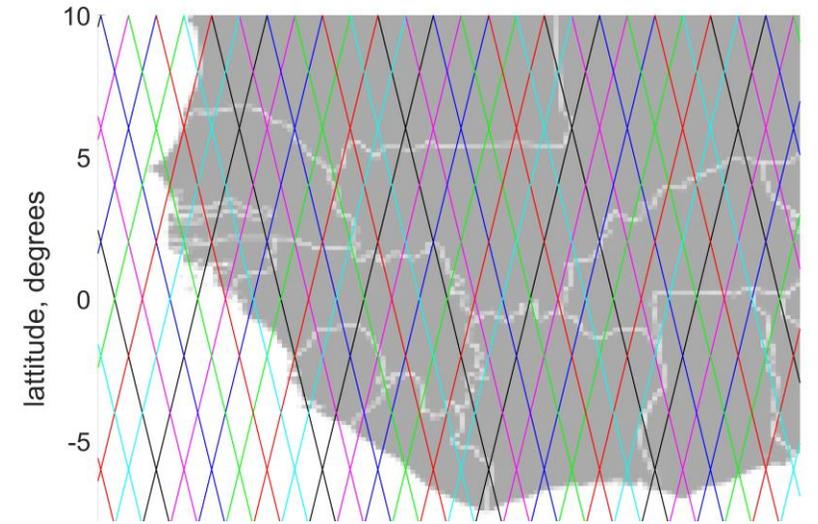
- Распределенные измерения (нужно для физики)
- Стереοизображения земной поверхности
- Навигационные системы
- Мониторинг земной поверхности с высокой периодичностью



# Относительная навигация

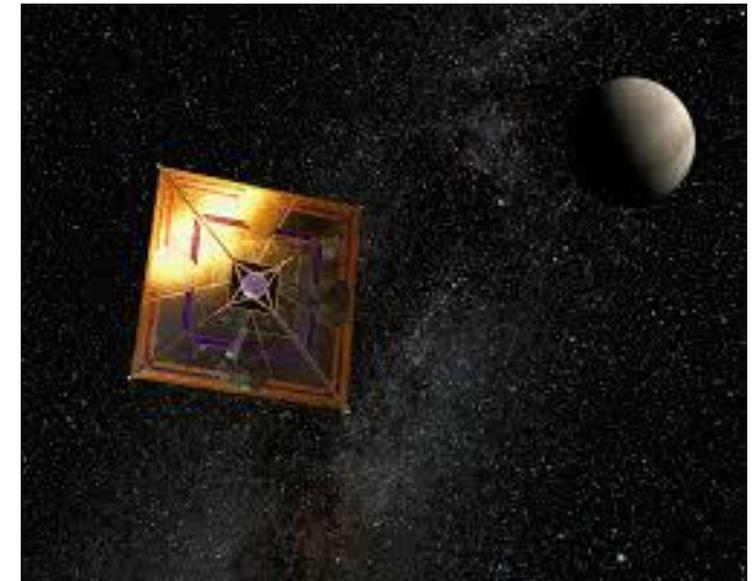
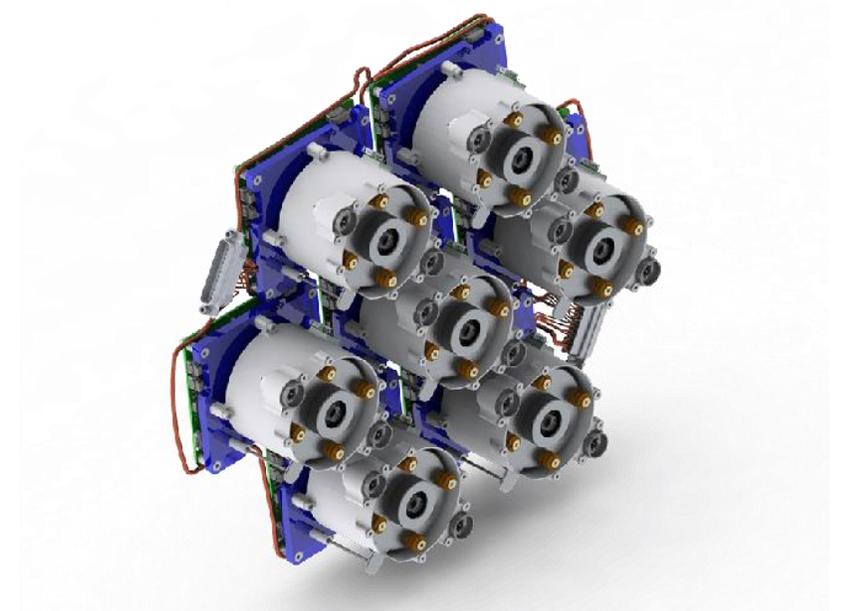
В зависимости от миссии – разные требования к навигации:

- Спутниковая альтиметрия – отклонение от номинальной траектории каждого аппарата в сотни метров-единицы километров
- Проведение физических экспериментов – требования к относительным траекториям
- Глобальный мониторинг земной поверхности – наименее требовательный



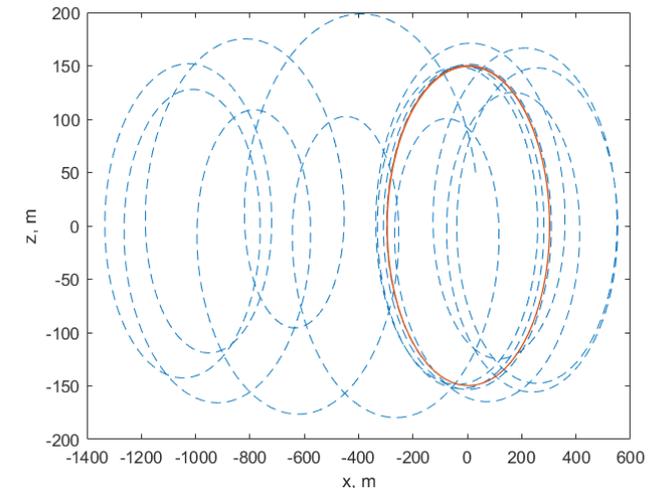
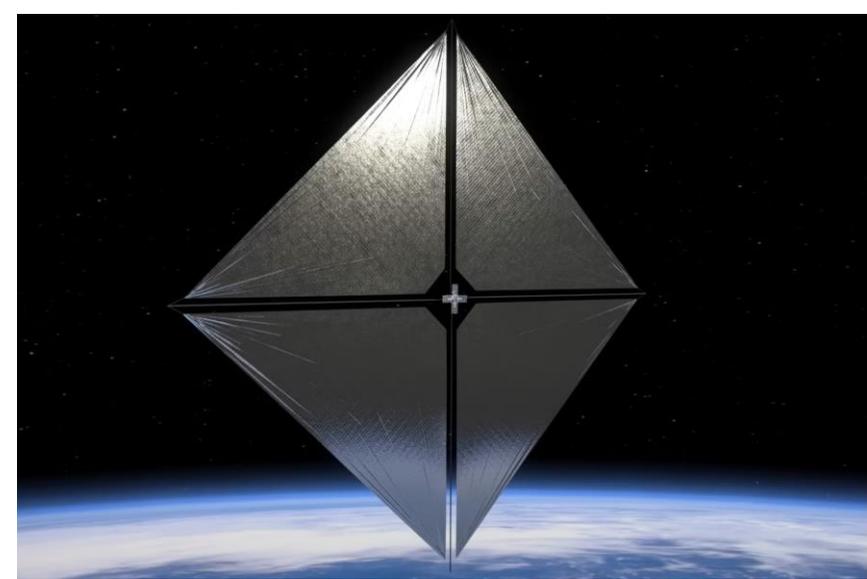
# Как мы можем управляться?

- Реактивные двигатели
  - Быстрое влияние на траекторию
  - Просты в применении
  - Не требуют длительных особых режимов движения
  - Ограничения по запасу топлива
- Бестопливные методы
  - Медленное влияние на движение
  - Ограниченный ресурс управления
  - Ограниченная область применения
  - Могут требовать особый режим движения/конструкцию
  - В целом сложнее в имплементации
  - Не требуют расхода топлива

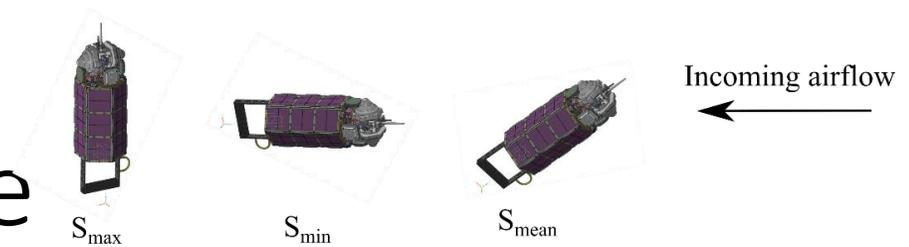


# Солнечное давление

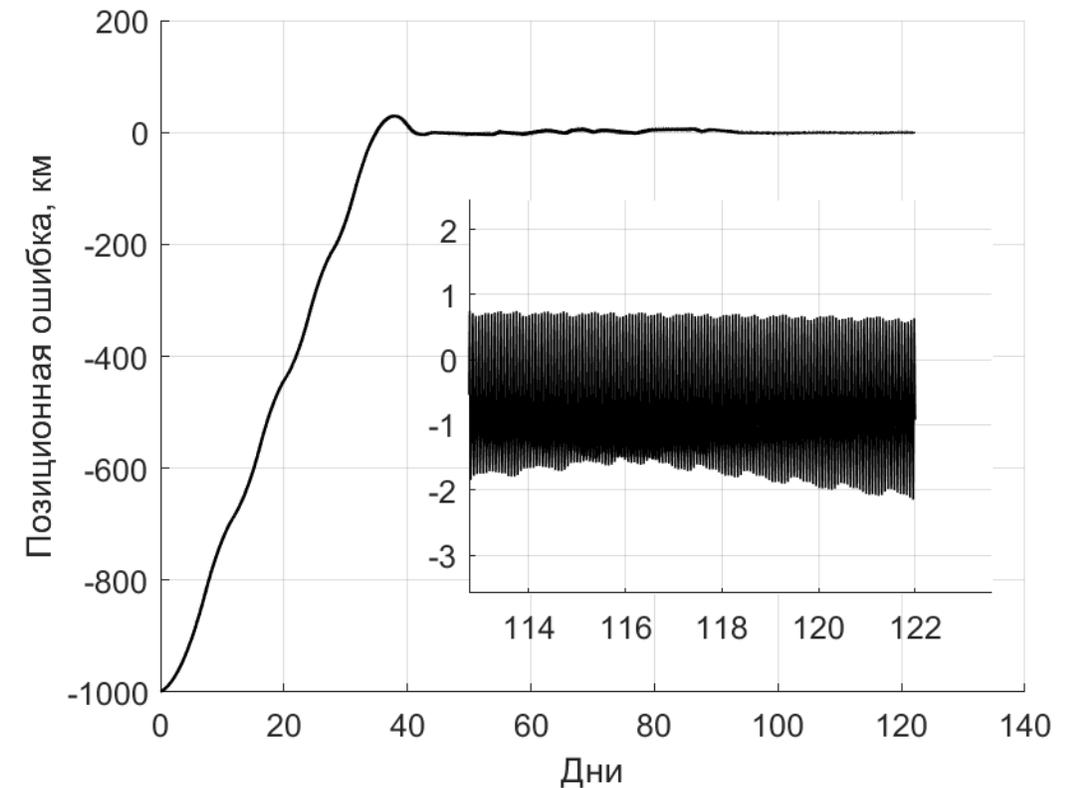
- Требует наличия больших отражательных поверхностей
- Достаточно слабое взаимодействие ( $10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>)
- Актуально на достаточно высоких (>500-600 км) орбитах
- В целом позволяет менять все параметры орбиты
- При наличии «умных» материалов с переменной отражающей способностью – можем управлять еще и угловым движением



# Атмосферное сопротивление



- Требует наличия «маленькой» и «большой» стороны у аппаратов
- Область применения – низкие (до 500 км) орбиты
- При активном управлении спутник может быстрее сойти с орбиты
- Влияние в основном в плоскости орбиты
- Хорошо подходит для фазирования аппаратов



# Гравитация

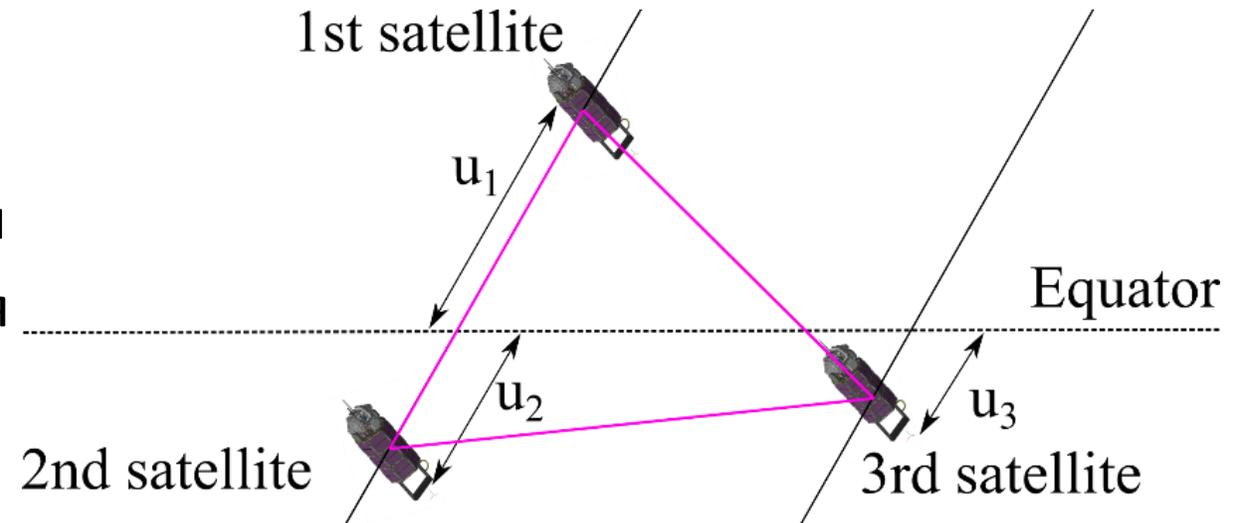
- Основной эффект – прецессия орбиты из-за полярного сжатия (гармоника  $J_2$  геопотенциала)
- Помогает разводить плоскости орбит аппаратов по долготе восходящего узла
- Требуется различных наклонений/больших полуосей у орбит – а значит начальных импульсов
- Скорость расхождения орбит – постоянна, а значит потребуются дополнительный импульс для остановки расхождения

$$\dot{\Omega} = -\frac{3nR_E^2 J_2}{2p^2} \cos(i)$$

$$\cos(i_2) = \cos(i_1) - \Delta\dot{\Omega}_{req} \frac{2R^2}{3nR_E^2 J_2}$$

# Примеры применения

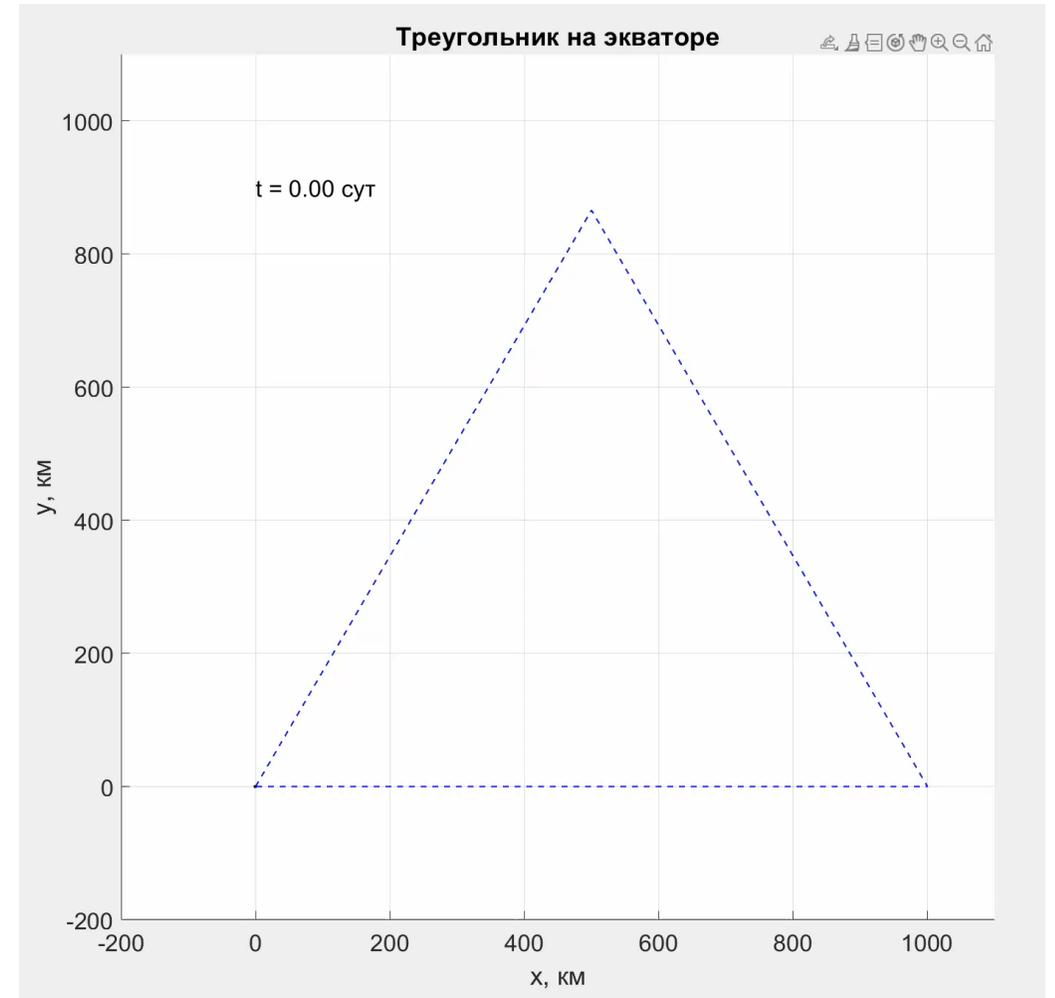
- Мы хотим отследить гамма-вспышки земного происхождения
- Для этого нужен правильный треугольник в экваториальной области
- Размер треугольника должен меняться в течение года с исходных 100 до 1000 км
- Можем выбирать начальные данные, дальше движение управляется только бестопливными методами
- Начальная орбита – близкая к МКС по наклонению, высота – 450 км



# Треугольная формация

- Используем J2 для увеличения размера треугольника (разница наклонов  $\sim 0.2^\circ$ )
- Используем атмосферу для фазирования

$$S_k^* = K_1 \Delta n_{1k} + K_2 (\Delta u_{1k} - \Delta u_k^{req}) + \frac{1}{2} (S_{max} + S_{min})$$



# Заключение

- Бестопливные методы могут стать хорошим подспорьем в некоторых миссиях
- В зависимости от требуемых точностей применение исключительно бестопливных подходов может быть невозможным, однако они могут позволить существенно сократить затраты топлива
- Мы всегда сталкиваемся с компромиссом между быстродействием и экономией