



XII Всероссийский съезд по фундаментальным
проблемам теоретической и прикладной механики
Уфа, 19-24 августа 2019

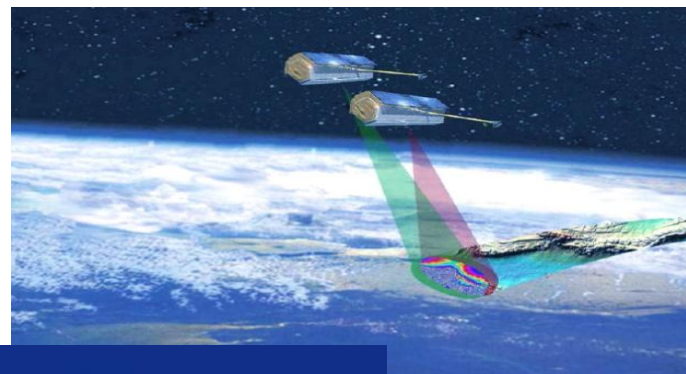
Задачи управления
роем наноспутников
на низкой околоземной орбите

Иванов Д.С., Монахова У.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Применение групповых полетов спутников

- Дистанционное зондирование Земли
- Интерферометрия
- Исследование гравитационных волн
- Обслуживание космических систем
- Мониторинг солнечной активности
- Увод космического мусора
- ...



TanDEM-X



LISA



Что такое рой?

- Рой – это групповой полет большого количества аппаратов со следующими особенностями:
 - Случайные, но замкнутые относительно траектории
 - Децентрализованное и некоординированное управление каждым отдельным элементом роя
 - Использование локальной информации о движении ближайших соседей
 - Устойчивость при отказе отдельных элементов роя
 - Пространственно-распределённая измерительная система



Работы по рою наноспутников

- **Пассивный рой спутников в атмосфере Земли**
Colombo C., McInnes C. Orbit design for future SpaceChip swarm missions in a planetary atmosphere // Acta Astronautica, 2012. Vol. 75. P. 25–41.
- **Управление движением с использованием аэродинамики**
Ben-Yaacov O., Gurfil P. Long-Term Cluster Flight of Multiple Satellites Using Differential Drag // J. Guid. Control. Dyn. 2013. Vol. 36, № 6. P. 1731–1740.
- **Формирование роя наноспутников с учётом коммуникационных ограничений**
Ivanov D., Monakhova U., Ovchinnikov M. Nanosatellites swarm deployment using decentralized differential drag-based control with communicational constraints // Acta Astronautica, 2019. Vol. 159. P. 646–657.



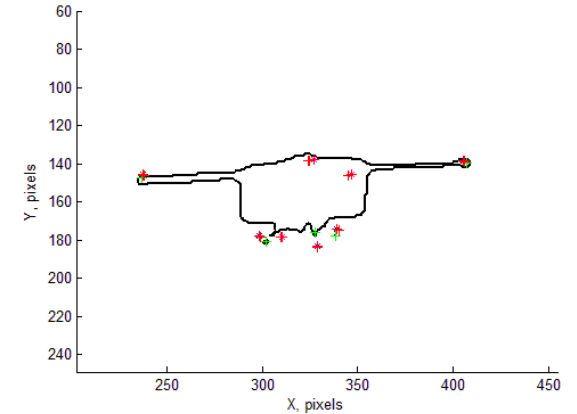
Оснащение чипсата



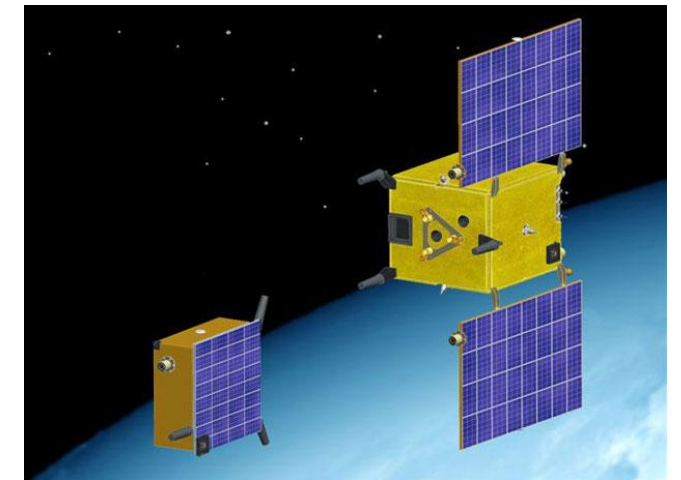
Запуск 105-ти чипсатов Sprite с борта наноспутника KickSat-2 16 марта 2019

Коммуникационные ограничения

- Для управления каждым спутником в рое необходимо, чтобы было известно относительное движение каждого из аппаратов
- Однако в случае значительного количества спутников это трудновыполнимая задача из-за аппаратных ограничений системы определения относительного движения и/или ограничений межспутниковой связи
- Принципы систем определения относительного движения:
 - Обработка видеоизображения
 - Радиочастотные дальномеры
 - Использование сигналов навигационных спутников и передача данных об орбитальном движении по межспутниковому каналу



Определение относительного движения аппарата Чибис-М



Дальномеры миссии Prisma

Постановка задачи

Рассматриваются:

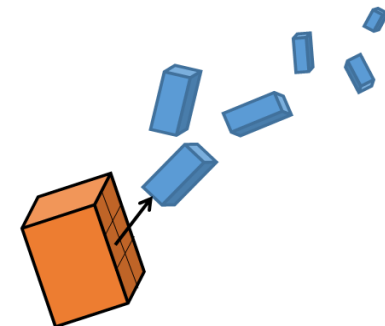
- Кластерный запуск 3U кубсатов
- Низкая околоземная орбита
- Ошибки в скорости отделения при запуске
- Аппараты оснащены активной магнитной системой ориентации
- У спутников есть коммуникационные ограничения

Требуется:

- Достичь ограниченного относительного движения спутников в рое
- Управлять плотностью пространственного распределения аппаратами



Видео запуска 88-ти 3U кубсатов компании PlanetLabs в 2017 году



Рассматриваемая схема запуска

Уравнения относительного движения: линейная модель, околокруговая орбита

Уравнения Хилла-Клохесси-Уилдшира:

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} x_{ij} & y_{ij} & z_{ij} \end{bmatrix}^T$$

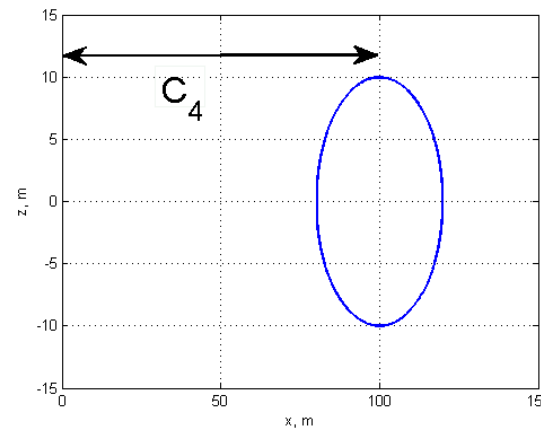
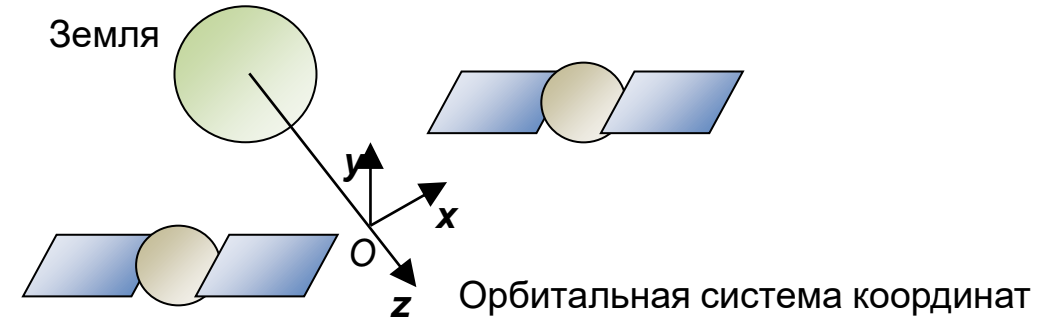
$$\begin{cases} \ddot{x}_{ij} + 2\omega\dot{z}_{ij} = 0 \\ \ddot{y}_{ij} + \omega^2 y_{ij} = 0 \\ \ddot{z}_{ij} - 2\omega\dot{x}_{ij} - 3\omega^2 z_{ij} = 0 \end{cases}$$

Решение:

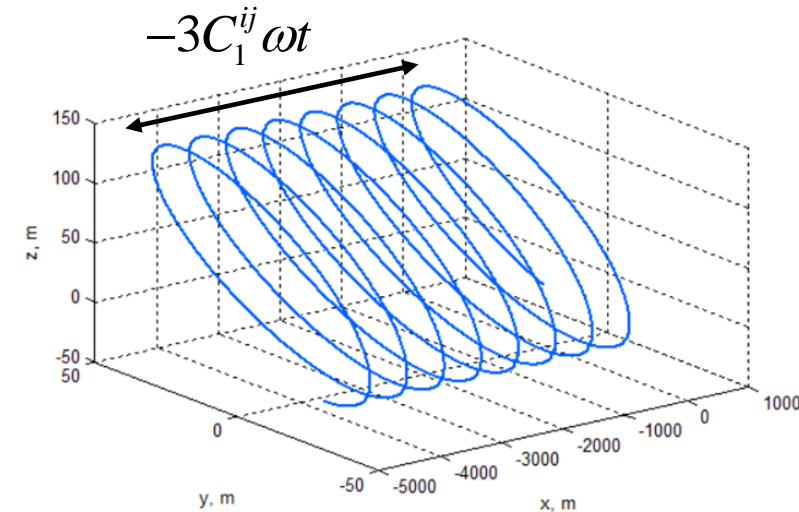
$$\begin{cases} x_{ij}(t) = -3C_1^{ij}\omega t + 2C_2^{ij}\cos(\omega t) - 2C_3^{ij}\sin(\omega t) + C_4^{ij}, \\ y_{ij}(t) = C_5^{ij}\sin(\omega t) + C_6^{ij}\cos(\omega t), \\ z_{ij}(t) = 2C_1^{ij} + C_2^{ij}\sin(\omega t) + C_3^{ij}\cos(\omega t), \end{cases}$$

Относительный дрейф: $-3C_1^{ij}\omega t$

Мгновенный центр эллипса: C_4^{ij}



Относительный сдвиг



Относительный дрейф



Модель аэродинамического сопротивления

Уравнения управляемого движения:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{ij} + 2\omega\dot{z}_{ij} = u_{ij} = f_{ij} / m \\ \ddot{y}_{ij} + \omega^2 y_{ij} = 0 \\ \ddot{z}_{ij} - 2\omega\dot{x}_{ij} - 3\omega^2 z_{ij} = 0 \end{cases}$$

Модель аэродинамического сопротивления:

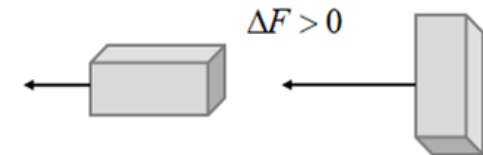
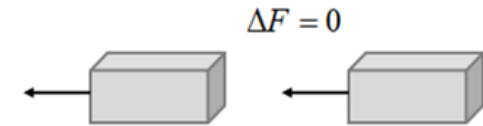
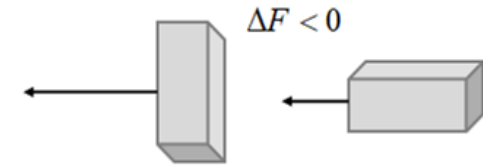
$$f_i = -\frac{1}{2} C_a \rho V^2 \Delta S \sin \alpha_i - \frac{1}{2} C_a \rho V^2 S_0$$

Разница между силами, действующими на i -й и j -й аппараты:

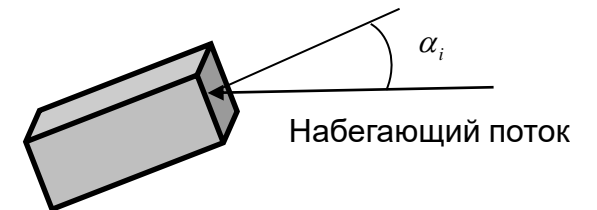
$$f_{ij} = f_j - f_i = -\frac{1}{2} C_a \rho V^2 \Delta S (\sin \alpha_j - \sin \alpha_i)$$

Максимальная разница сил:

$$\max |f_{ij}| = \frac{1}{2} C_a \rho V^2 \Delta S$$



Принцип управления





Управление на основе прямого метода Ляпунова

- Рассмотрим первые интегралы невозмущенного движения как оскулирующие элементы при применении управления
- Для двух спутников кандидат-функция Ляпунова

$$V = \frac{1}{2} (C_1^{ij})^2 + \frac{1}{2} k_1 (\Delta C_4^{ij})^2 > 0$$

- Производная функции Ляпунова

$$\dot{V} = C_1^{ij} \dot{C}_1^{ij} + k_1 \Delta C_4^{ij} \Delta \dot{C}_4^{ij} = \frac{1}{\omega} C_1^{ij} u_{ij} + k_1 \Delta C_4^{ij} (-3\omega^2 C_1^{ij}) < 0$$

- Полученное управление

$$u_{ij} = 3\omega^2 k_1 \Delta C_4^{ij} - k_2 C_1^{ij}, \quad k_1, k_2 > 0$$

- Необходимо разработать правила для управления в случае множества аппаратов

$$V = \sum_i \sum_j \frac{1}{2} (C_1^{ij})^2 + \frac{1}{2} k_1 (\Delta C_4^{ij})^2$$

Децентрализованный подход

Децентрализованная некоординированная реализация управления:

$$u_{ij} = u_j - u_i$$

$$u_i \in [-u_{\max}; -u_{\min}]$$

$$u_i = \begin{cases} -u_{\max}, & \text{если } u_{ij} > (u_{\max} - u_{\min}), \\ -u_{ij} - u_{\min}, & \text{если } 0 < u_{ij} < (u_{\max} - u_{\min}), \\ -u_{\min}, & \text{если } u_{ij} < 0. \end{cases}$$

Правила управления:

- Компактный рой

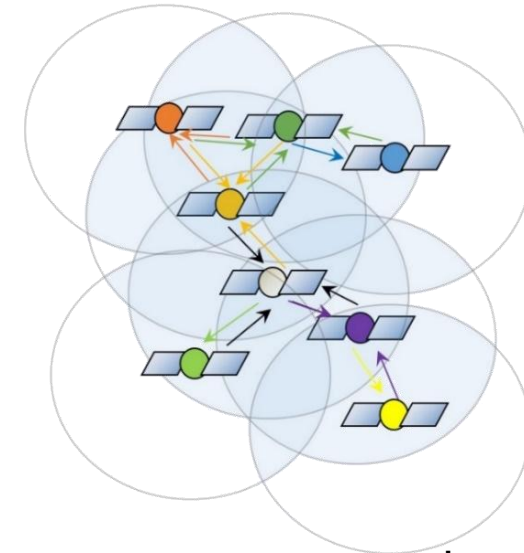
$$u_i = -k_1 \bar{C}_1^i + k_2 \bar{C}_4^i$$

- Движение в ограниченной области:

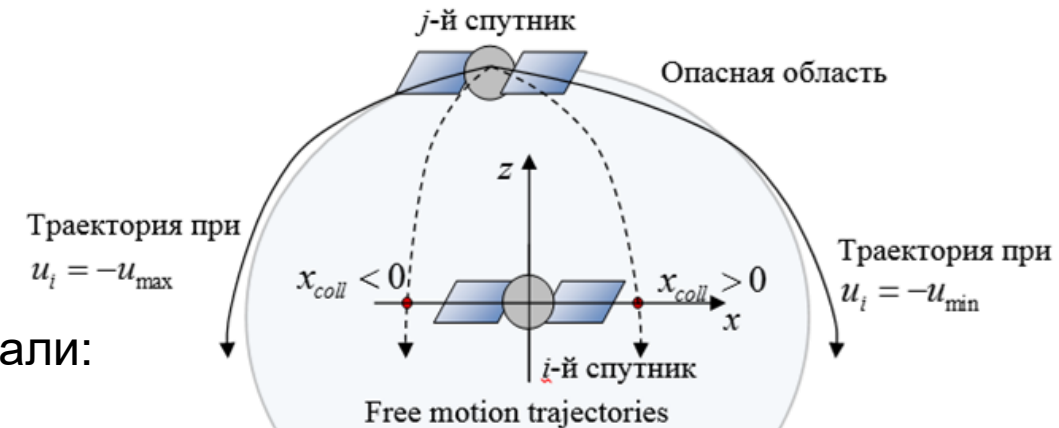
$$u_i = \begin{cases} -k_1 \bar{C}_1^i + k_2 \bar{C}_4^i, & \text{if } \bar{C}_4^i > C_4^b \\ -k_1 \bar{C}_1^i, & \text{if } \bar{C}_4^i \leq C_4^b \end{cases}$$

- Равномерное распределение плотности вдоль трансверсали:

$$u_i = -k_1 \bar{C}_1^i + k_2 (C_4^{\text{левый сосед}} - C_4^{\text{требуемое}})$$



Коммуникационные сферы и связи



Принцип уклонения от столкновения

Алгоритм управления угловым движением

- Механический момент

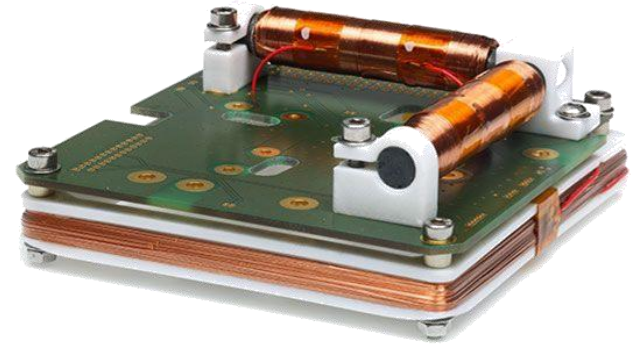
$$\mathbf{M}_{ctrl} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

- Дипольный магнитный момент для трёхосного управления

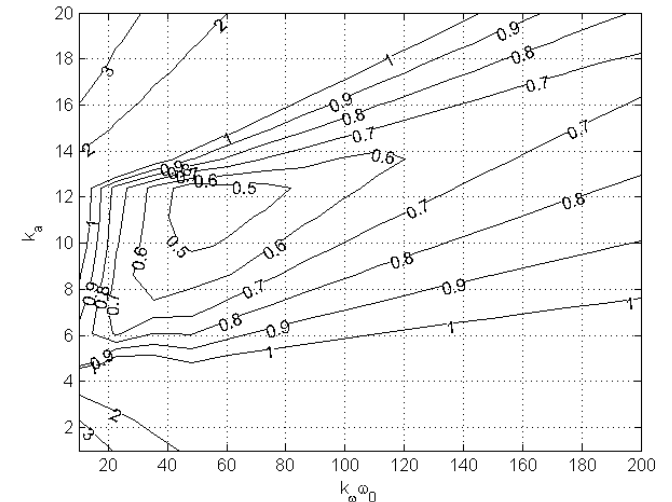
$$\mathbf{m} = -k_{\omega} \mathbf{B} \times \boldsymbol{\Omega} - k_a \mathbf{B} \times \mathbf{S}$$

$$\mathbf{S} = (a_{23} - a_{32}, a_{31} - a_{13}, a_{12} - a_{21})$$

- Для нахождения области устойчивости в пространстве параметров управления используется теория Флоке



Магнитные катушки “SatBus MTQ”



Область устойчивости

Ivanov D.S. et al. Advanced numerical study of the three-axis magnetic attitude control and determination with uncertainties // Acta Astronautica, 2017. Vol. 132. P. 103–110.

Численное исследование

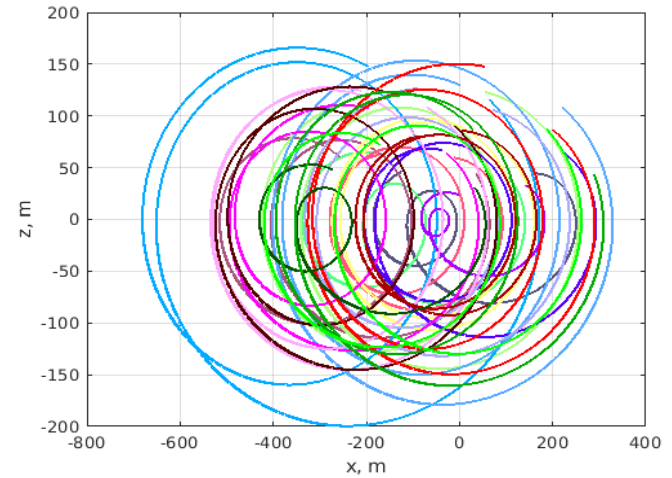
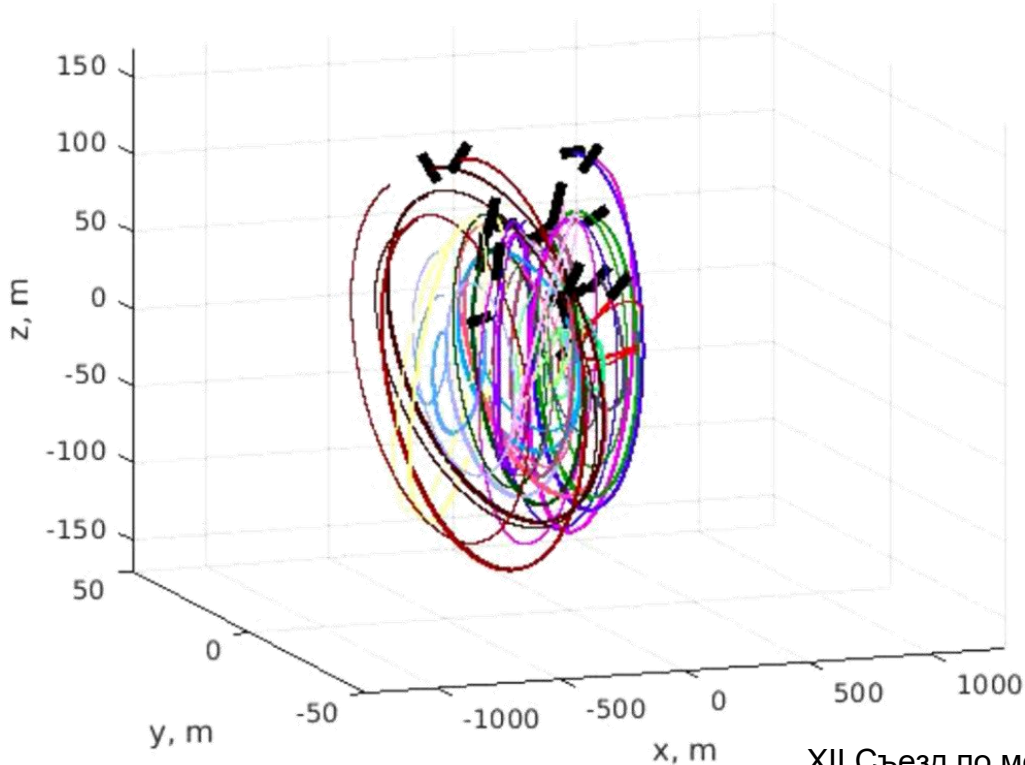
- Численное моделирование включает
 - Полное орбитальное движение с учетом J_2
 - Неточность знания плотности атмосферы
 - Модель магнитного поля IGRF
 - Управление катушками
- Высота орбиты 340 км
- Ошибка в скорости запуска 5%
- Число 3U кубсатов в рое - 20
- Радиус коммуникационной сферы 500 м



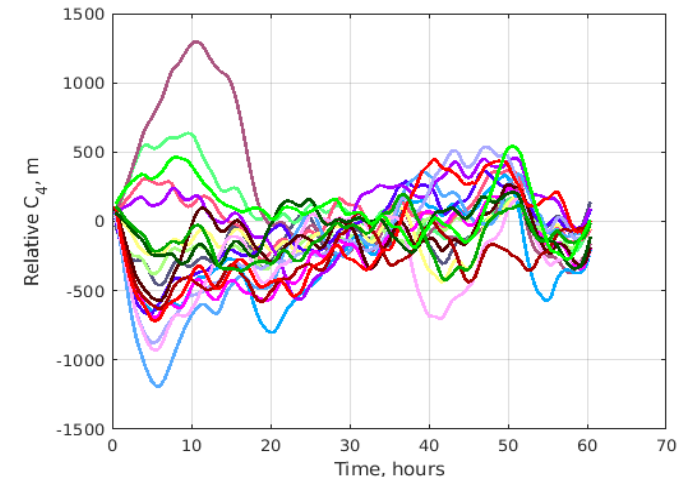
Схема моделирования

Компактный рой

- Управление стремится достичь среднее значение $C_4 = 0$
- Рой движется в компактной области
- Возмущения, ошибки управления, уклонения от столкновений приводят к хаотическому относительному движению



Относительные траектории на двух последних витках

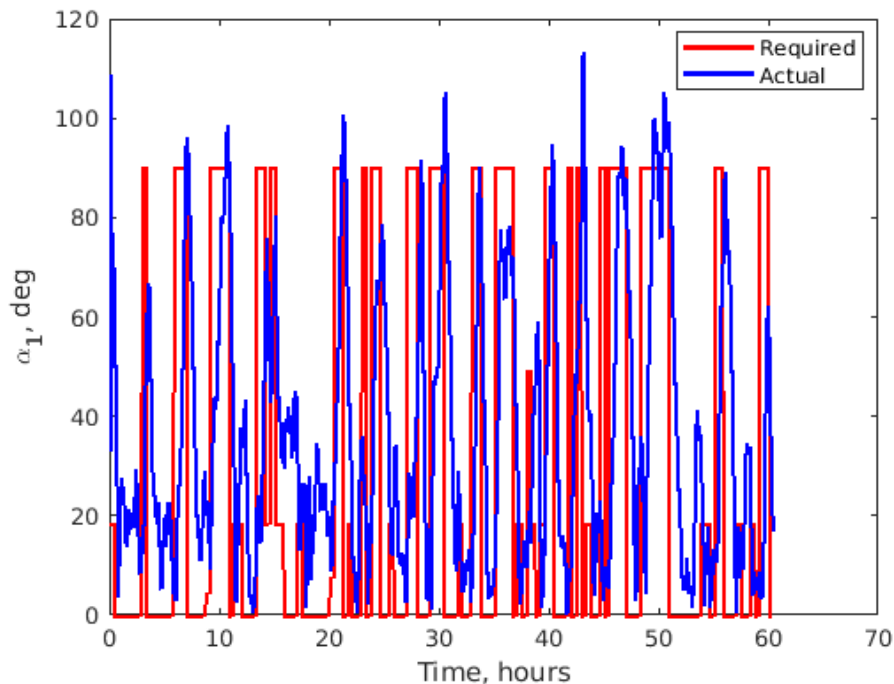


Значения C_4 относительно первого запущенного аппарата

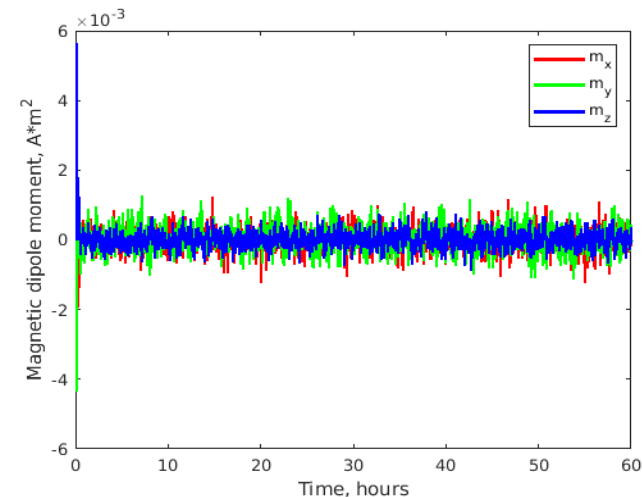


Реализация требуемого углового движения

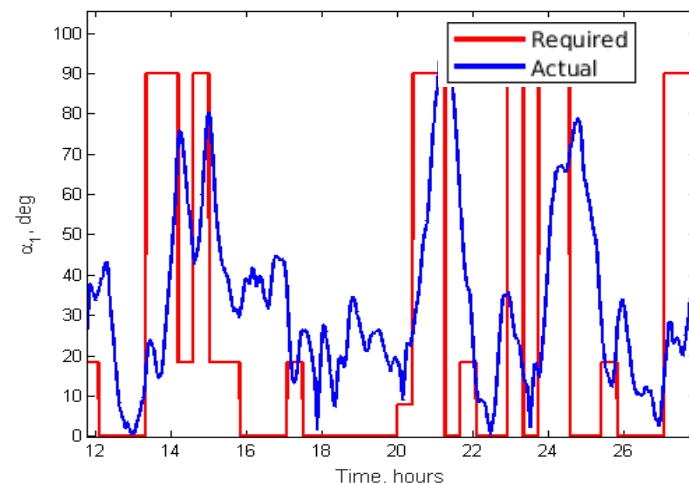
- Точность реализации требуемой ориентации около 20 градусов
- Задержки реализации управления увеличивают ошибки
- Тем не менее, невысокая точность магнитного управления позволяют управлять роем наноспутников



Требуемый и фактический угол относительно набегающего потока



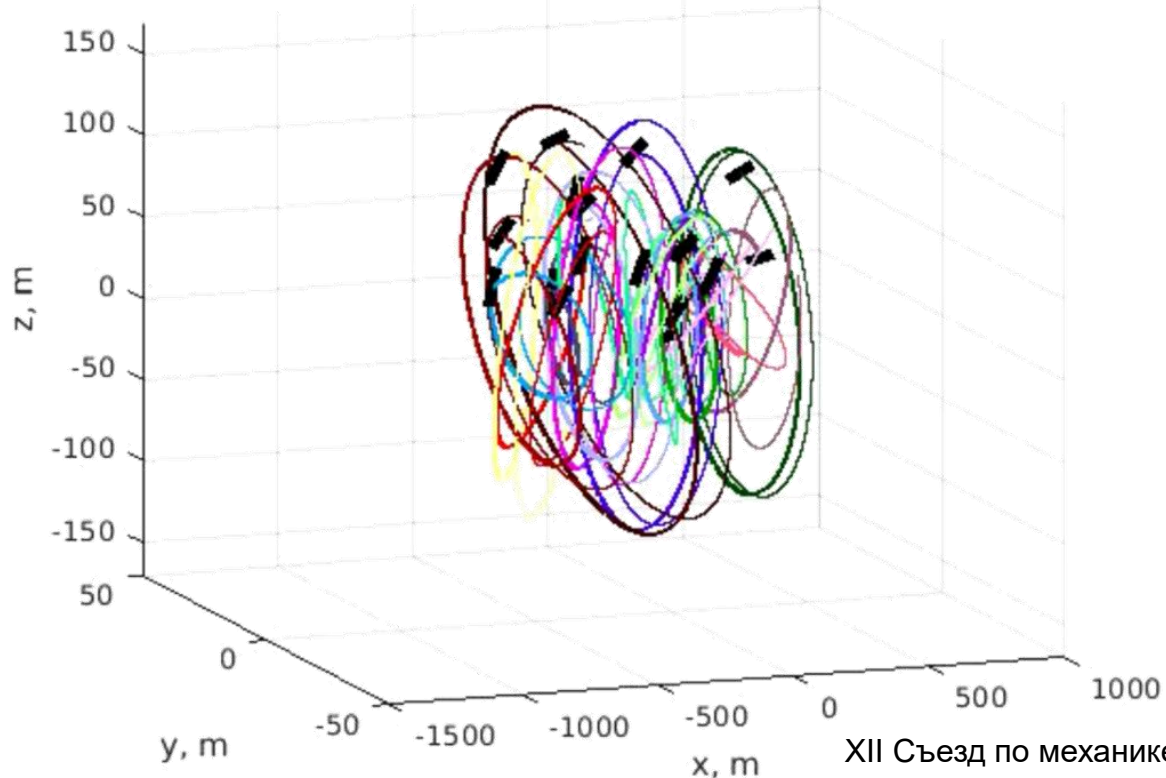
Магнитный момент магнитных катушек



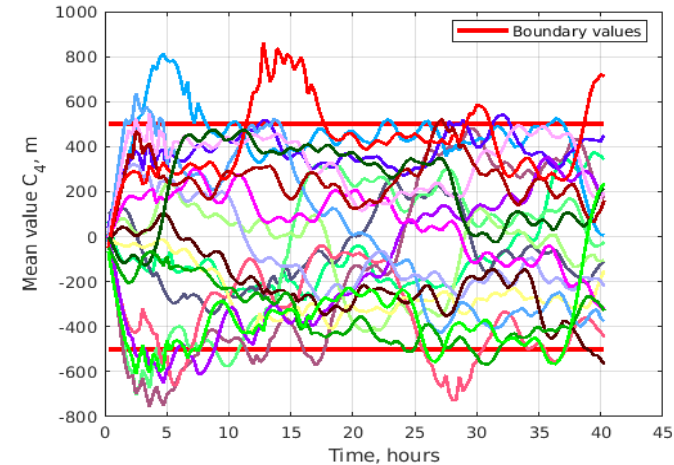
Ошибки реализации ориентации

Движение в ограниченной области

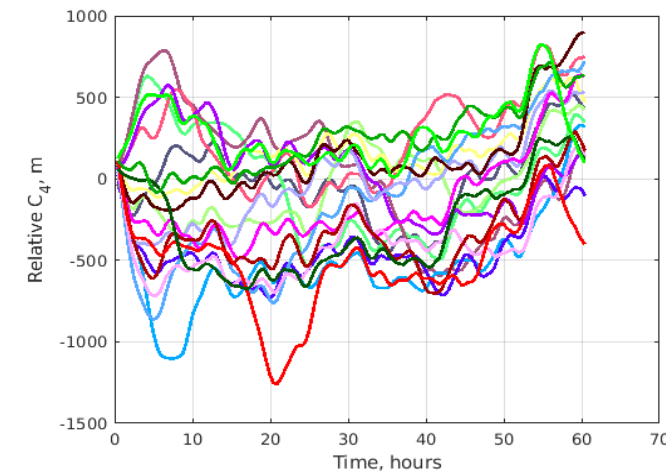
- Управление стремится удержать рой внутри заданной области (1000 м в этом примере)
- Внутри области значение C_4 произвольное, требуемое среднее значение $C_1 = 0$
- Достигается более разреженный рой



XII Съезд по механике, 19-24 Августа 2019



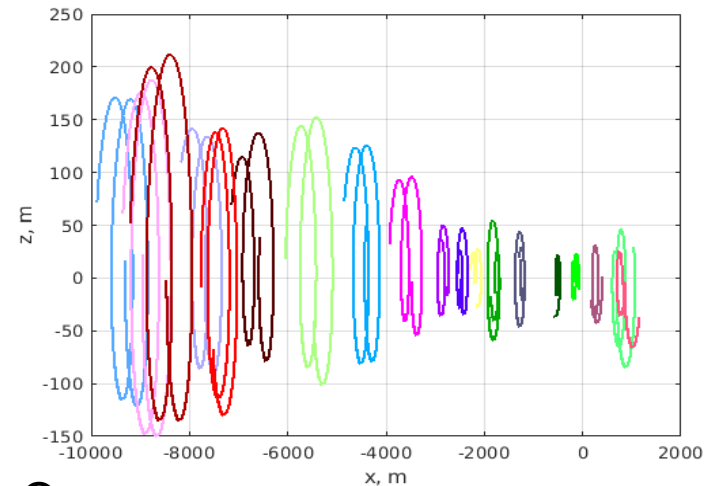
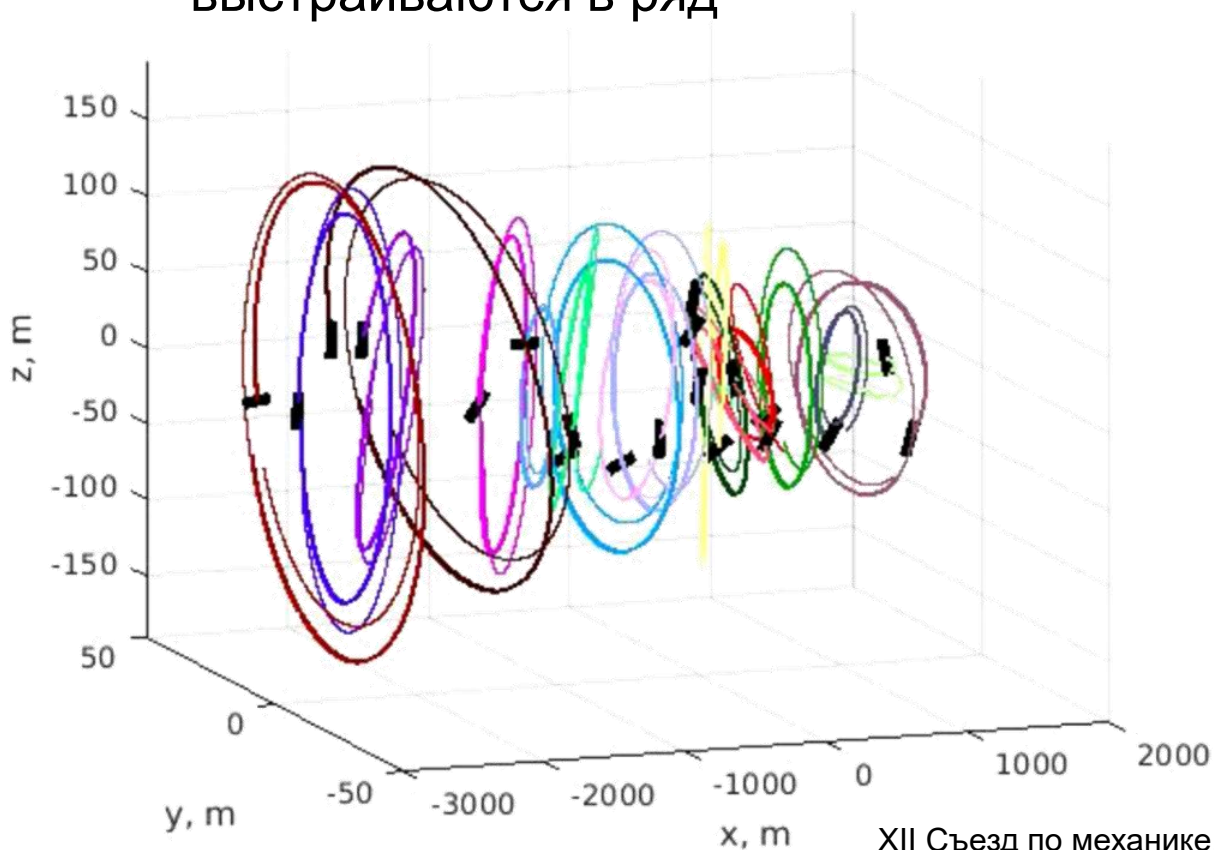
Значения \bar{C}_4^i для всех спутников в рое



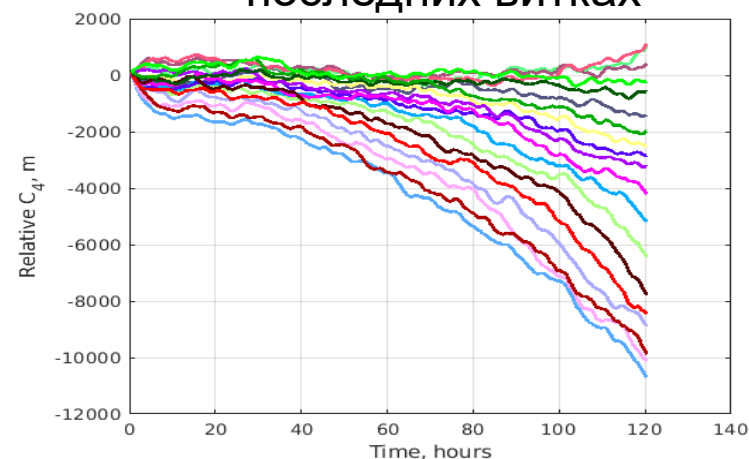
Значения C_4 относительно первого запущенного аппарата

Равномерная плотность по трансверсали

- Управление стремится достичь $C_4 = 300$ м относительно ближайшего левого соседа
- Мгновенные центры эллипсоидов выстраиваются в ряд



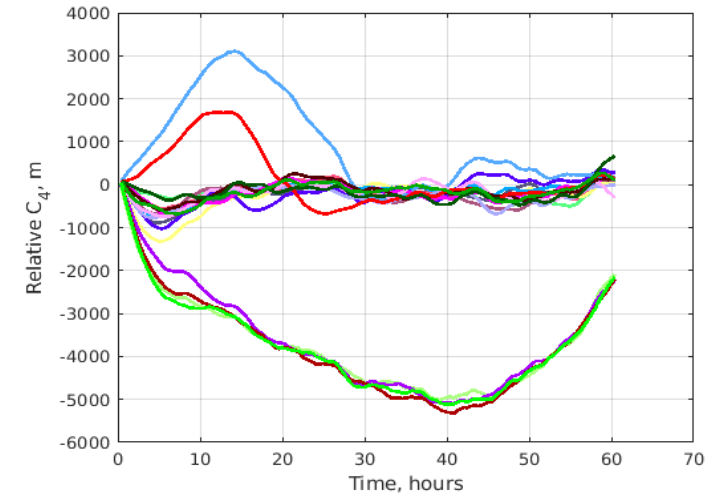
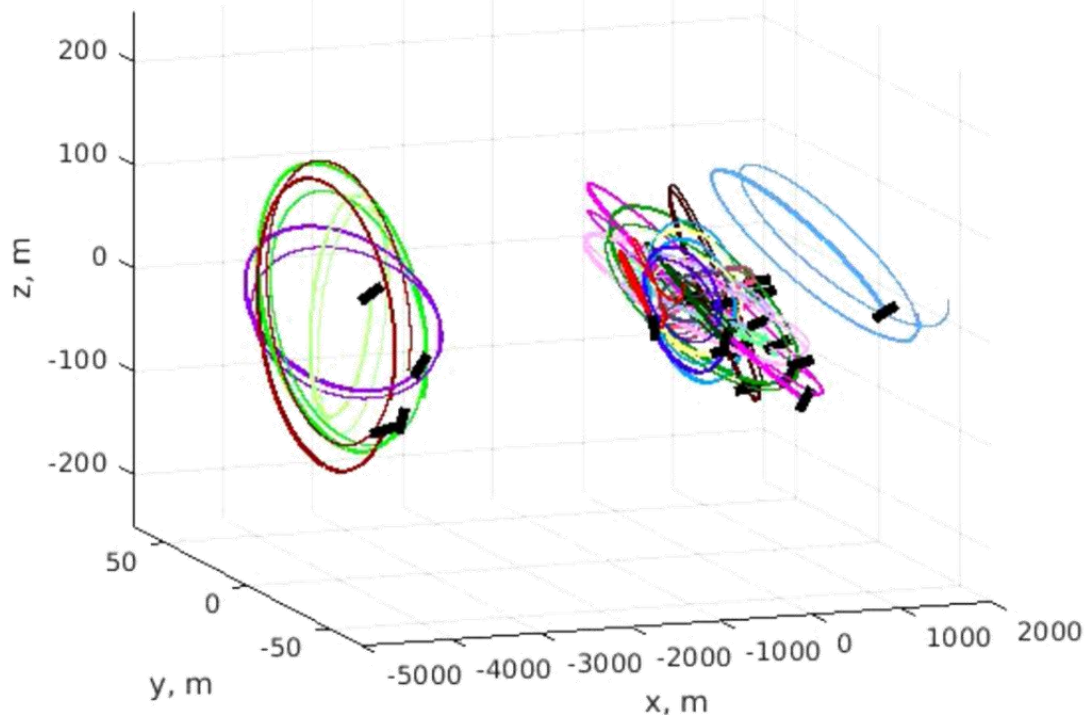
Относительные траектории на двух последних витках



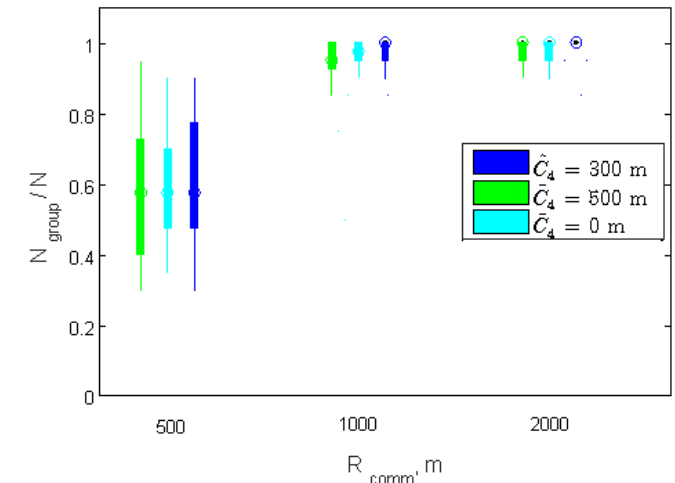
Значения C_4 относительно первого запущенного аппарата

Разделение роя

- Из-за ошибок в скорости запуска, вследствие действующих возмущений и ошибок реализации углового положения рой может разделиться на подгруппы
- Эффект разделения изучается с помощью массового численного моделирования
- Проблему разделения можно решить с помощью спутника-наблюдателя



Значения C_4 относительно первого запущенного аппарата



N_{group} / N от R_{comm} для различных правил управления



Заключение

- Децентрализованное некоординированное управление с помощью аэродинамической силы сопротивления позволяет получить ограниченное движение наноспутников внутри заданной области
- Коммуникационные ограничения, вызванные особенностями системы определения относительным движением и межспутниковой связью, должны быть приняты во внимание при управлении роем
- Продемонстрировано успешное применение магнитного управления угловым движением для задач управления роем наноспутников

Работа поддержана РФФИ, грант № 17-01-00449_a



Спасибо за внимание!