

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»
ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
Кафедра математического моделирования и прикладной математики

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОЕМ СПУТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ КОММУНИКАЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Выпускная квалификационная работа
(бакалаврская работа)

Направление подготовки: 010900 «Прикладные математика и физика»

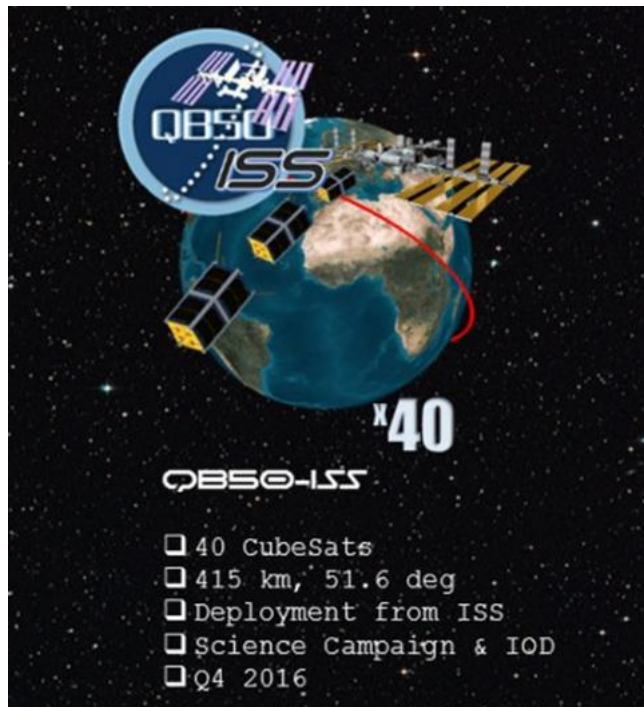
Выполнила: студентка 372 группы Монахова Ульяна Владимировна
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Иванов Данил Сергеевич

Содержание работы

- Актуальность
- Постановка задачи
- Стратегии по выравниванию дрейфов
- Заключение

Актуальность

В настоящее время довольно большое внимание уделяется миссиям с участием множества микро- и наноспутников.



Проект QB-50



Запуск кубсатов с МКС

Исследования в области децентрализованного управления

- Сравнение характеристических скоростей централизованной и децентрализованной стратегий

Sabatini M., Reali F., Palmerini G.B. Autonomous behavioral strategy and optimal centralized guidance for on-orbit self assembly // IEEE Aerosp. Conf. Proc. 2009. 12 p.

- Делается основной упор на изучение децентрализованного подхода с использованием искусственной потенциальной функции

Sabatini M., Palmerini G.B., Gasbarri P. Control laws for defective swarming systems // Adv. Astronaut. Sci. 2015. Vol. 153. P. 749–768.

Постановка задачи

Необходимо разработать такой децентрализованный алгоритм управления, чтобы сформировать рой спутников после их отделения от ракеты-носителя, то есть обеспечить замкнутые относительные траектории аппаратов

Особенности управления спутниками

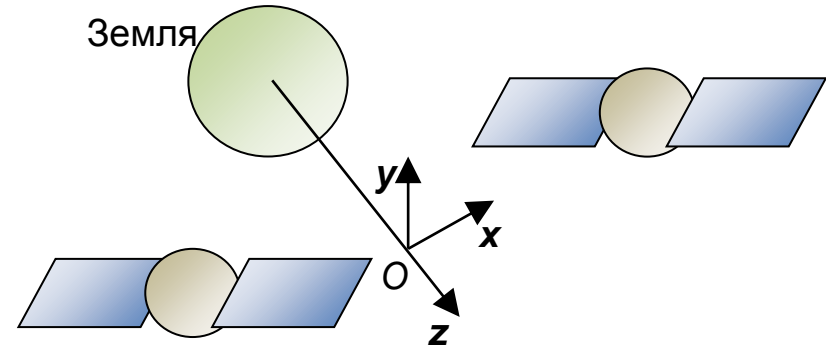
- Отсутствие возможности задания точных начальных условий
- Возникновение относительного дрейфа спутников
- Коммуникационные ограничения – невозможность определить относительное движение между всеми спутниками в группе

Модель управления

Решение уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира для относительного движения имеет вид:

$$\begin{cases} x = -3C_1\omega t + 2C_2 \cos(\omega t) - 2C_3 \sin(\omega t) + C_4 \\ y = C_5 \sin(\omega t) + C_6 \cos(\omega t) \\ z = 2C_1 + C_2 \sin(\omega t) + C_3 \cos(\omega t) \end{cases}$$

Слагаемое, отвечающее за дрейф: $-3C_1\omega t$,
где $C_1 = \frac{\dot{x}(0)}{\omega} + 2z(0)$



При реализации импульсного управления по оси Ox решение будет иметь вид:

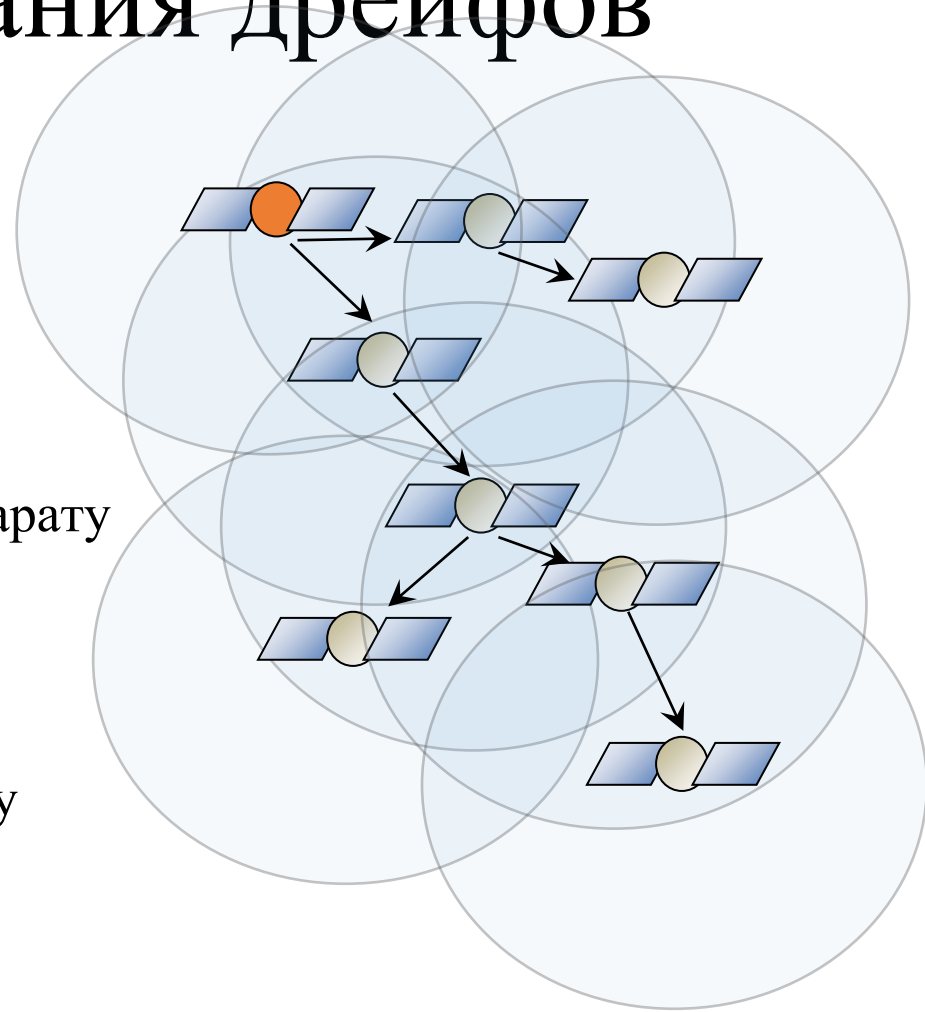
$$\begin{cases} x(t) = -3C_1\omega t + 2C_2 \cos(\omega t) - 2C_3 \sin(\omega t) + C_4 + \frac{4u_x}{\omega^2} - \frac{3t^2 u_x}{2}, \\ y(t) = C_5 \sin(\omega t) + C_6 \cos(\omega t), \\ z(t) = 2C_1 + C_2 \sin(\omega t) + C_3 \cos(\omega t) + \frac{2tu_x}{\omega}, \end{cases}$$

Чтобы относительный дрейф был равен нулю $u_x = \frac{-\omega C_1}{\Delta t}$,

где Δt продолжительность управления.

Централизованное управление для выравнивания дрейфов

- 1) Выбор “главного” спутника, относительно которого будет происходить выравнивание
- 2) Применение управления к аппарату при его попадании в зону видимости “главного”
- 3) Применение управления к спутникам, попадающим в зону видимости “главного” или уже выравненных аппаратов



Траектории относительного движения спутников

Параметры моделирования :

Высота орбиты ~ 400 км

$R_{\text{связи}} = 500$ м

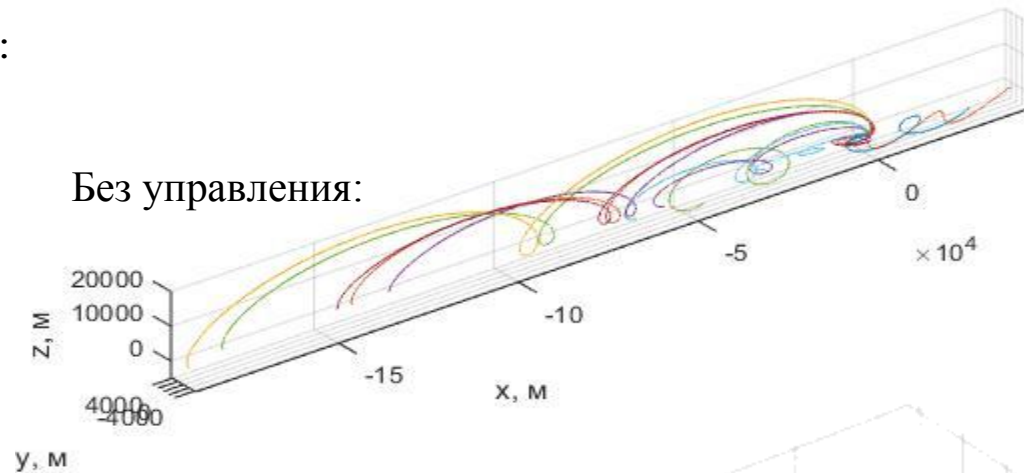
$V_X \sim U(-0.5, 0.5) \cdot 10^{-1} \frac{M}{c}$

$V_{Y,Z} \sim U(-0.5, 0.5) \cdot 10^{-3} \frac{M}{c}$

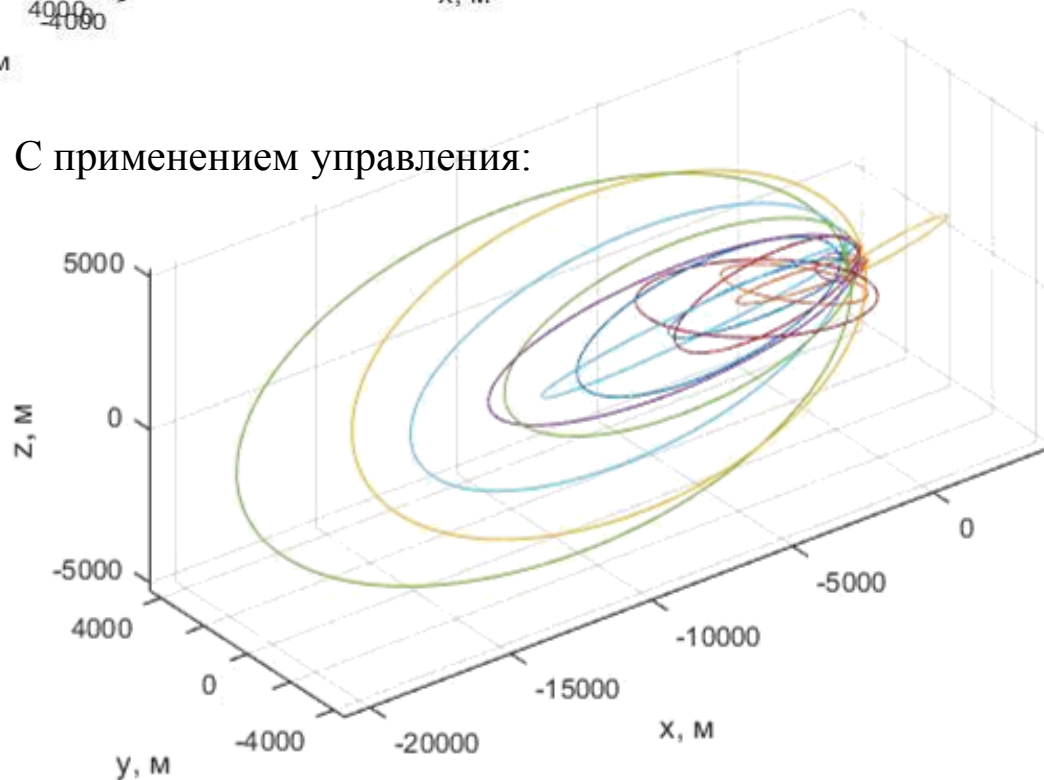
$R_{X,Y} \sim U(-400, 400)$ м

$R_Z \sim U(-200, 200)$ м

Без управления:

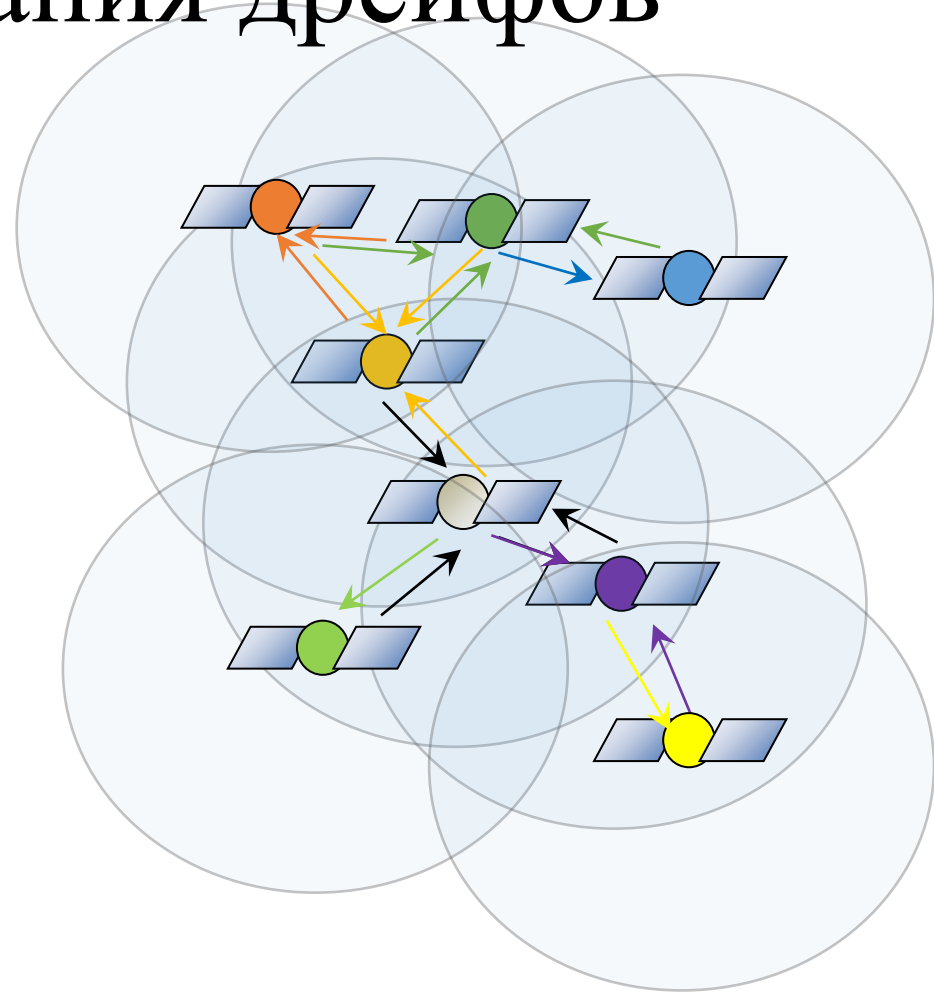


С применением управления:

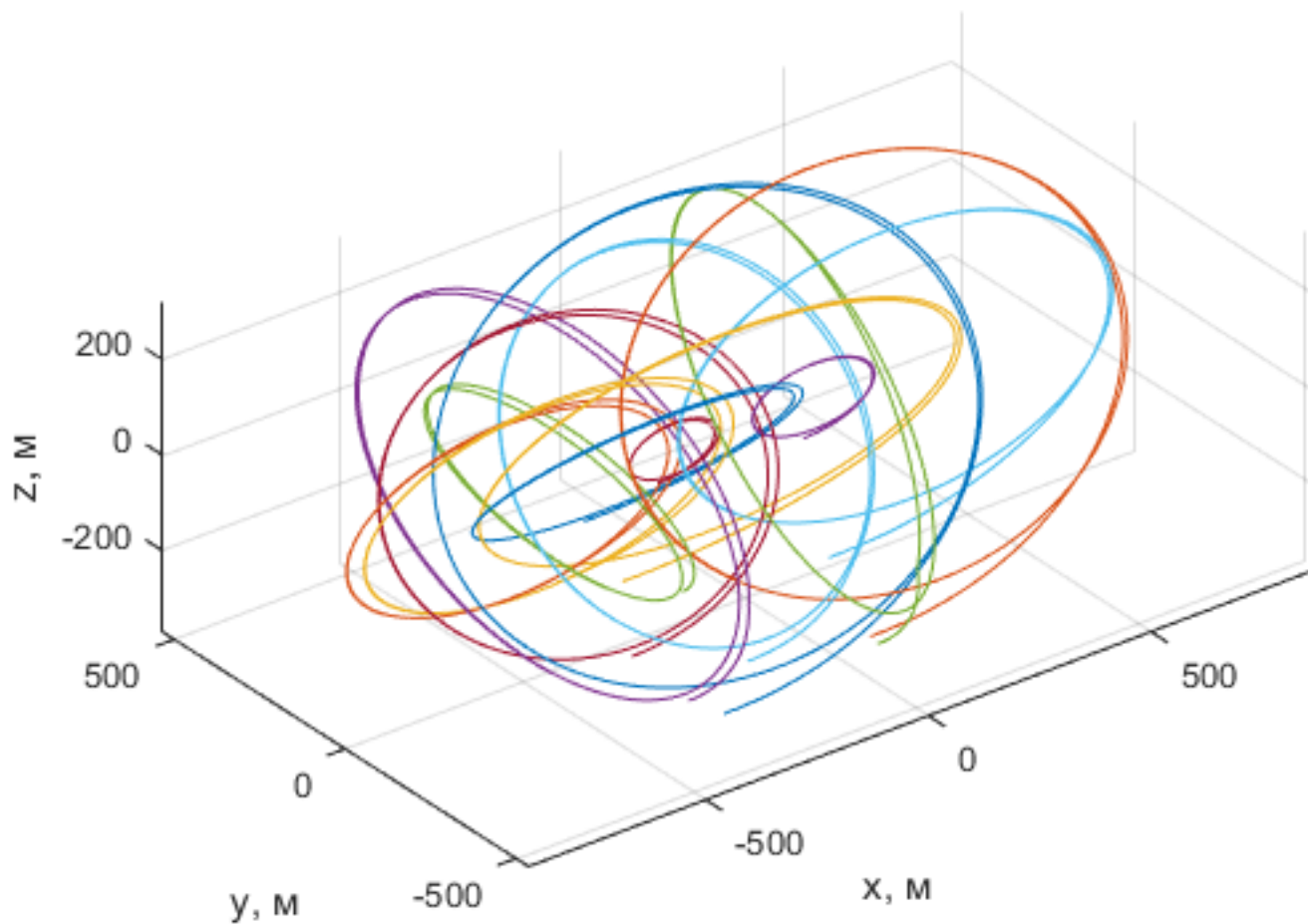


Децентрализованное управление для выравнивания дрейфов

- 1) В зоне видимости каждого спутника вычисляется средний относительный дрейф аппаратов, попавших в эту область
- 2) Применение управления к аппарату, относительно которого был вычислен средний дрейф
- 3) Применить такое управление ко всем спутникам
- 4) Повторить управление через некоторый промежуток времени

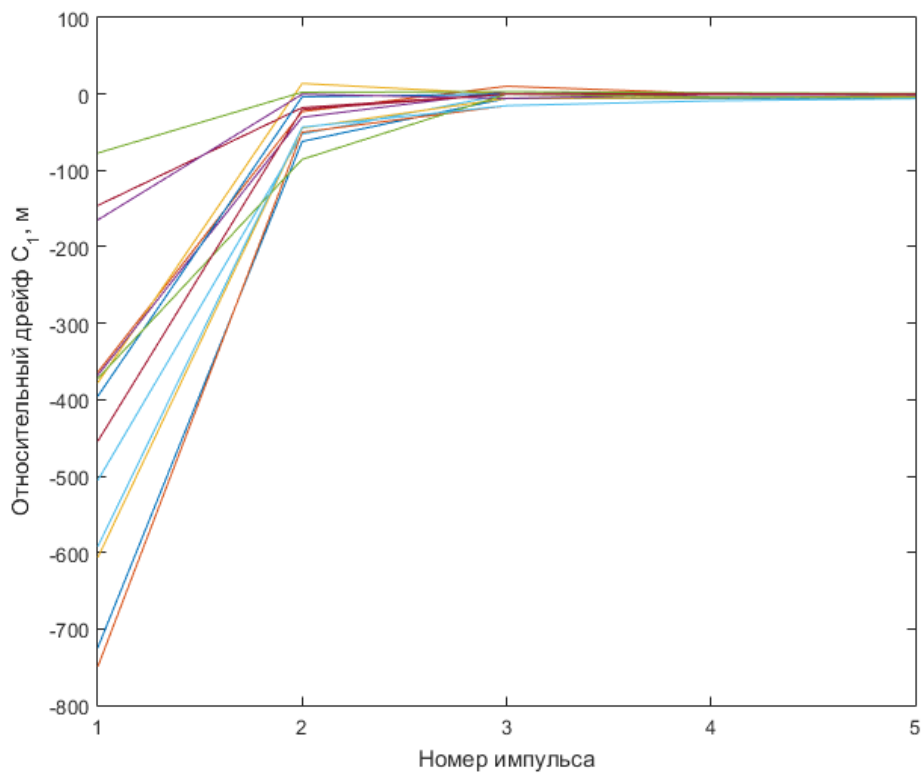


Траектории относительного движения спутников после реализации децентрализованного управления

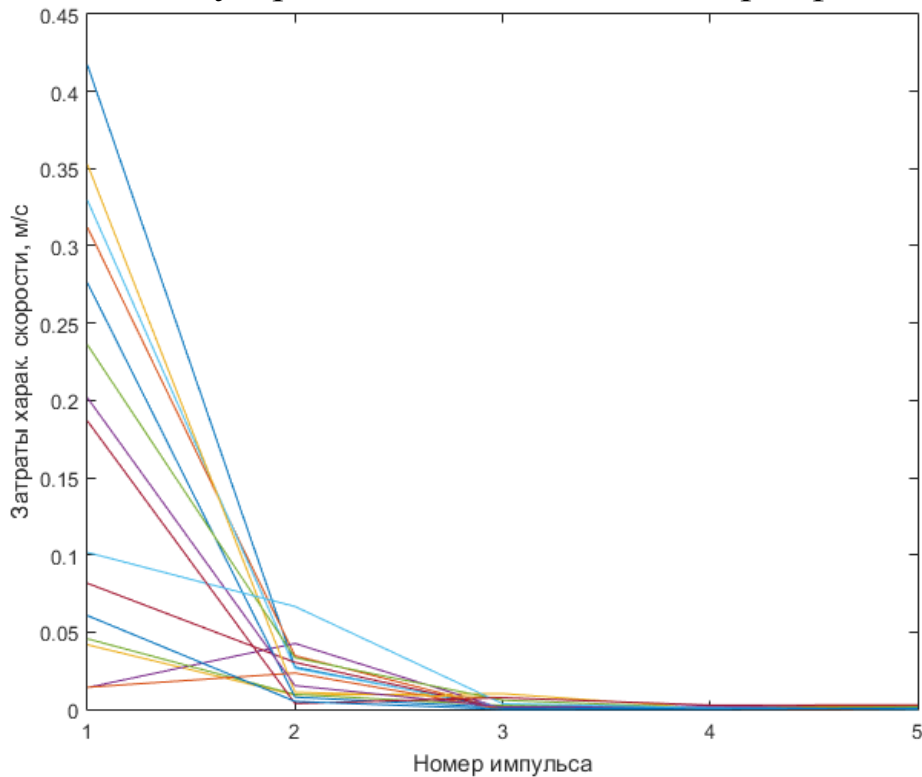


Качественные характеристики движения в процессе децентрализованного управления

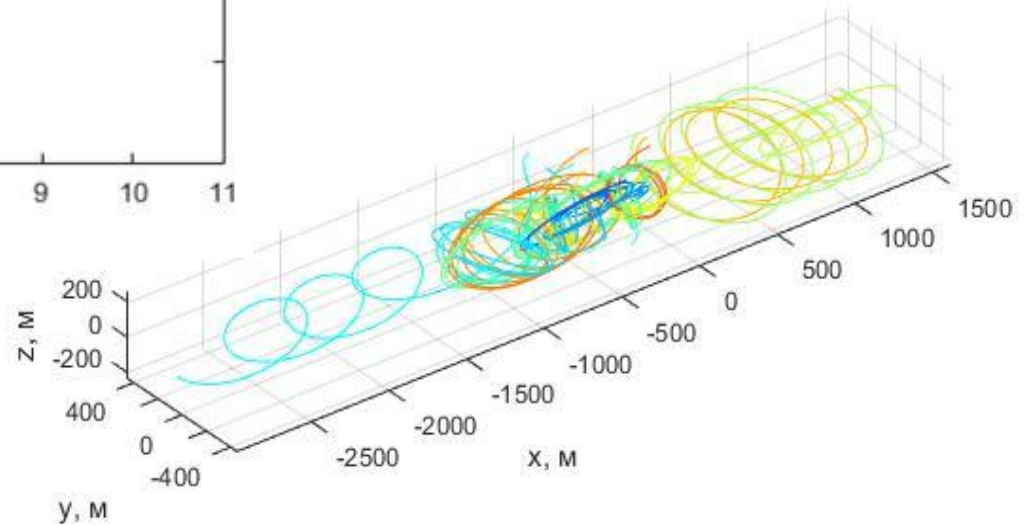
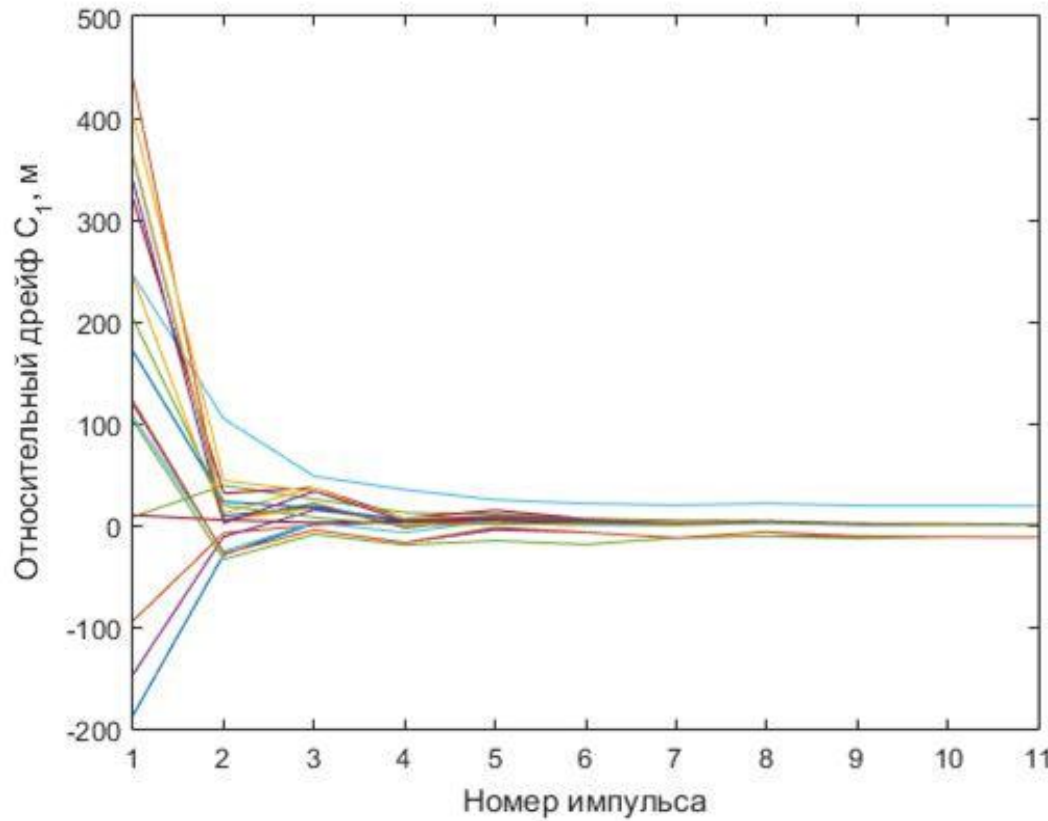
Изменение величины относительного дрейфа в процессе управления



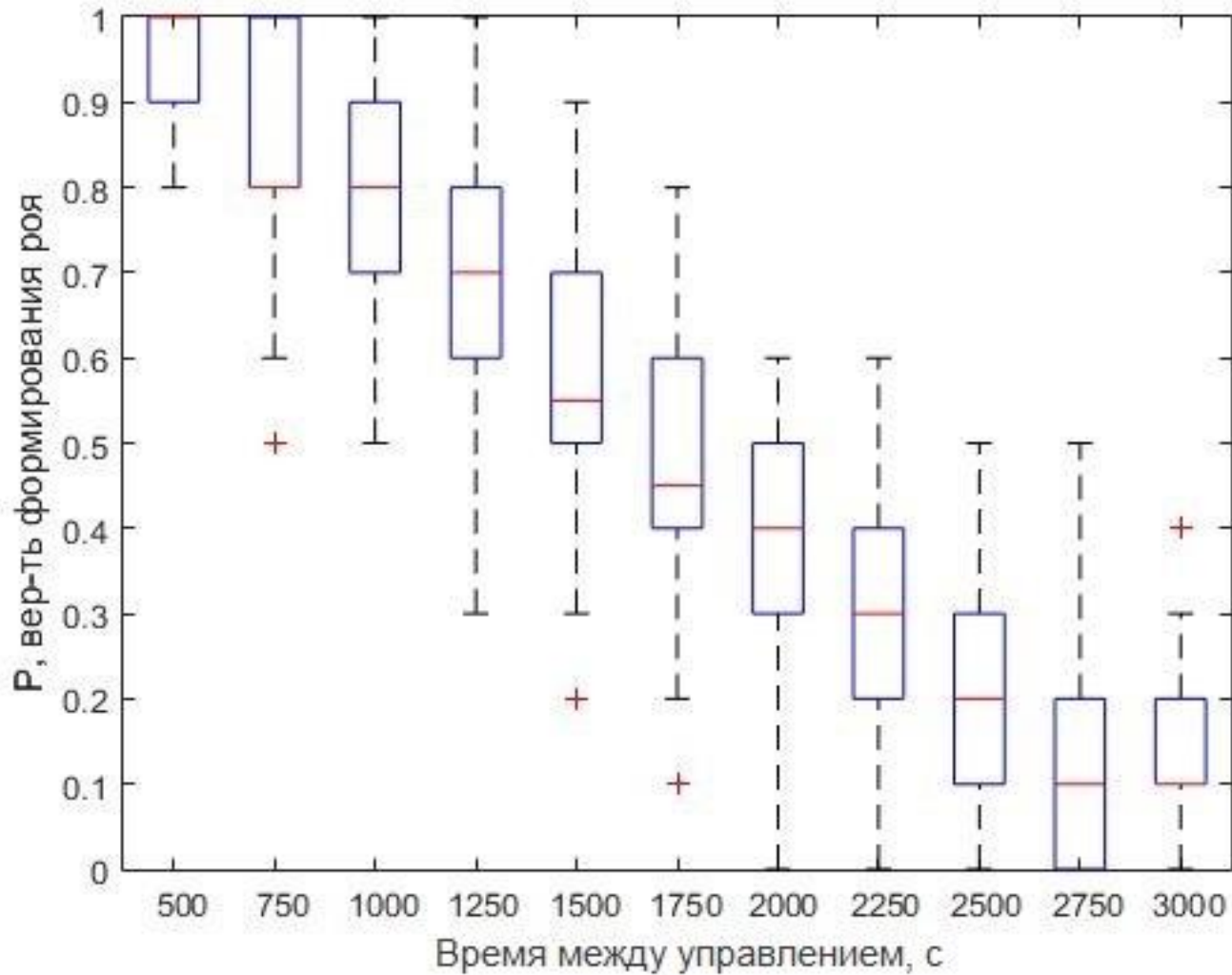
Затраты характеристической скорости на устранение относительных дрейфов



Относительные траектории и дрейфы при кластеризации



Вероятность формирования роя в зависимости от частоты управления



Запуск роя спутников с ракета-носителя PSLV-XL



Применение постоянного управления с помощью аэродинамической силы сопротивления

Ограничение на управление: $u_{\max} = \frac{1}{2} \frac{C \rho V^2 S}{m}$,

где C - аэродинамический коэффициент сопротивления, ρ - плотность атмосферы, V - скорость набегающего потока, S - характерная площадь, m - масса аппарата.

Параметры моделирования :

$3U$ кубсаты с Н орбиты ~ 400км

$R_{\text{связи}} = 250 \text{ м}$

$\Delta t = 3 \text{ с}$ (время между запусками)

$V_x \sim U(0.45, 0.55) \frac{\text{М}}{\text{с}}$

$V_{y,z} \sim U(-0.05, 0.05) \frac{\text{М}}{\text{с}}$

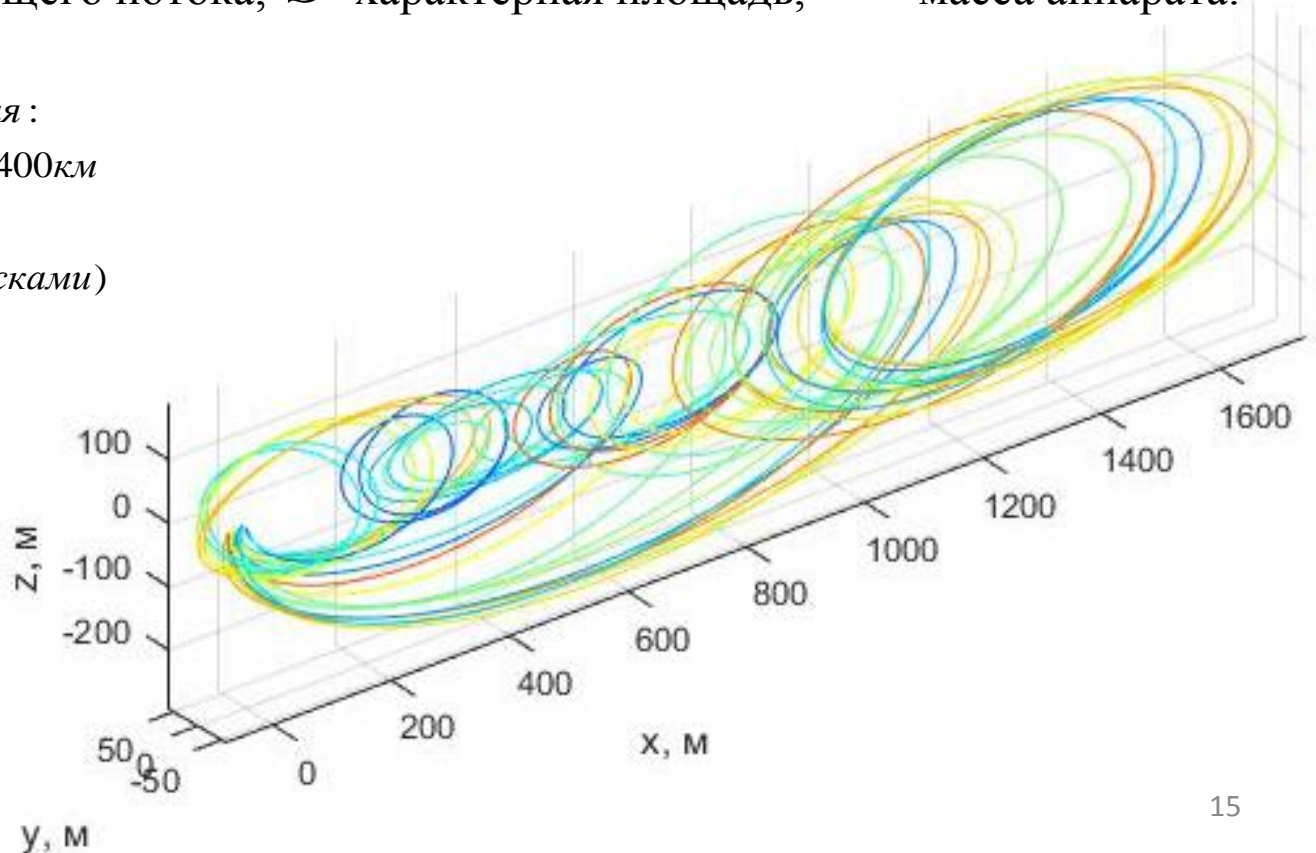
$C = 2$

$\rho = 2.79 \cdot 10^{-12} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$V = 7.9 \cdot 10^3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$

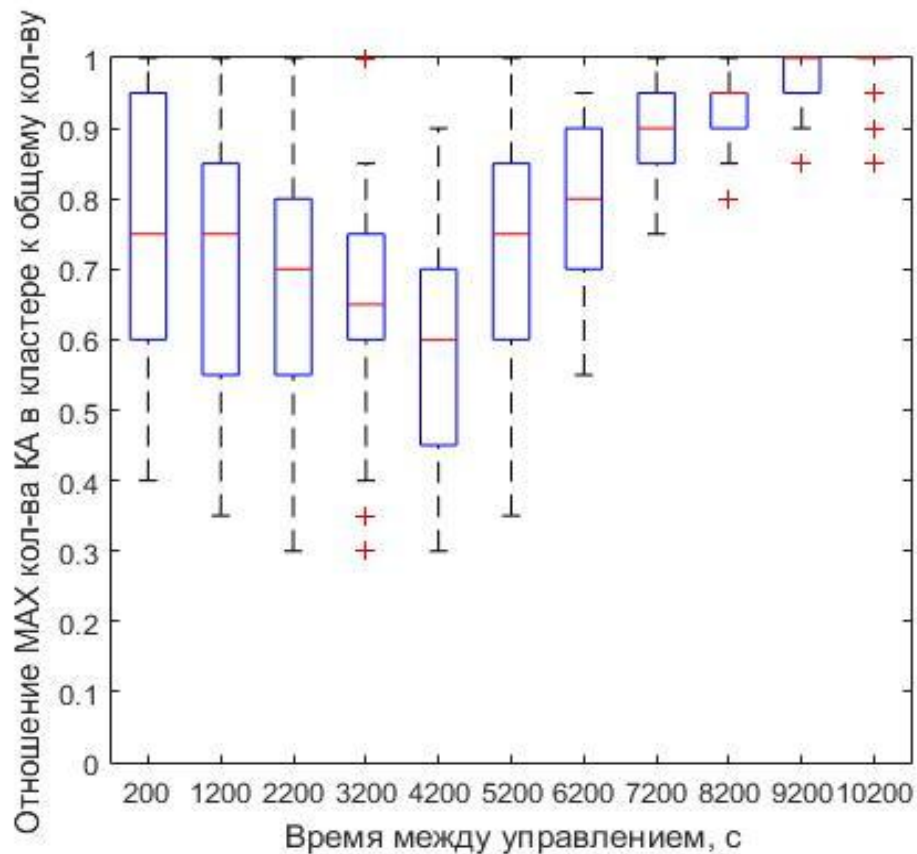
$S = 0.03 \text{ м}^2$

$m = 3 \text{ кг}$

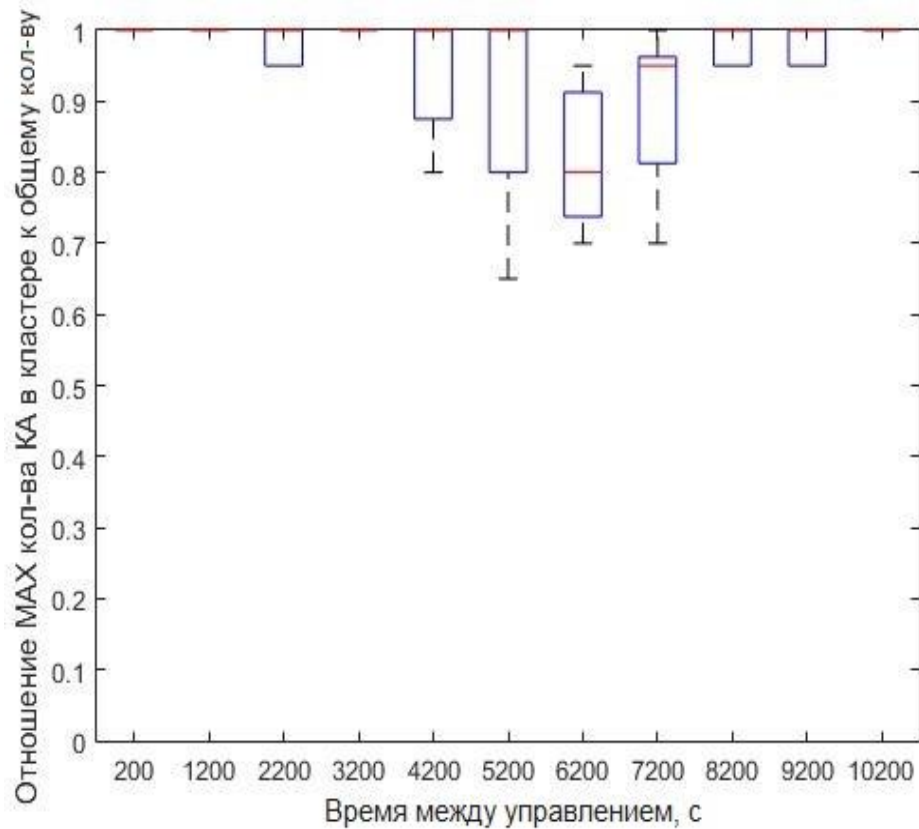


Максимальное относительное количество КА при разных ограничениях на коммуникации в зависимости от частоты изменения управления

$R_{связи} = 250 м$



$R_{связи} = 1000 м$



Применение кусочно-постоянного управления при помощи малой тяги, создаваемой электроспрейным двигателем

Ограничение на управление:
$$u_{\max} = \frac{\max F_{\text{тяги}}}{m}$$

Параметры моделирования:

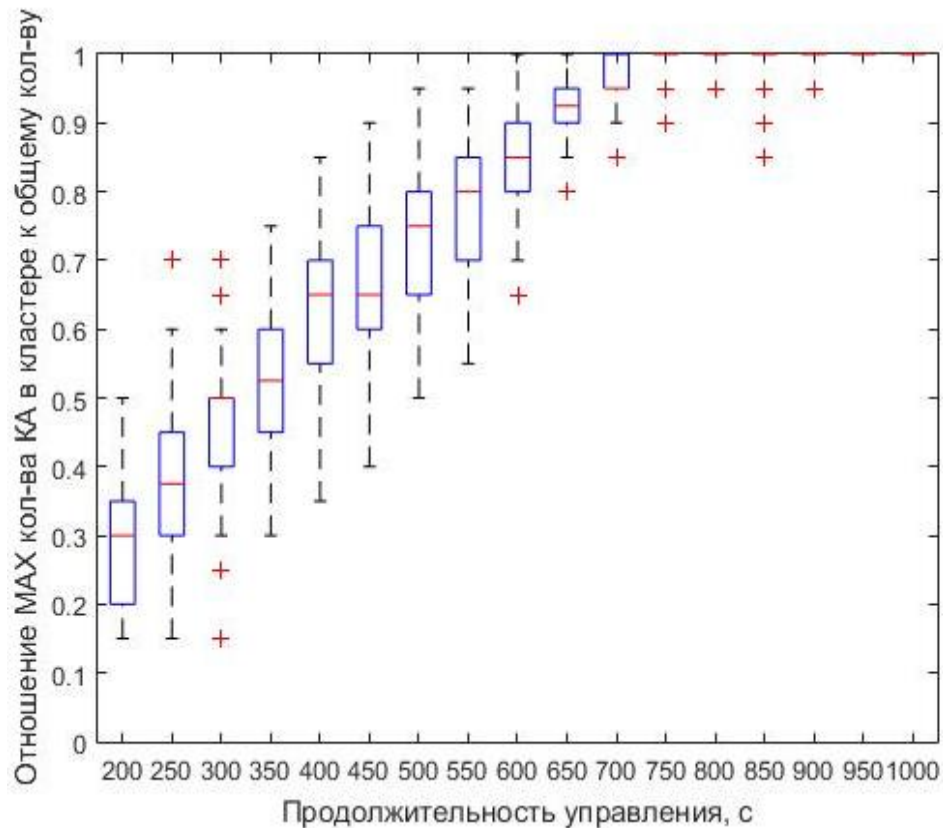
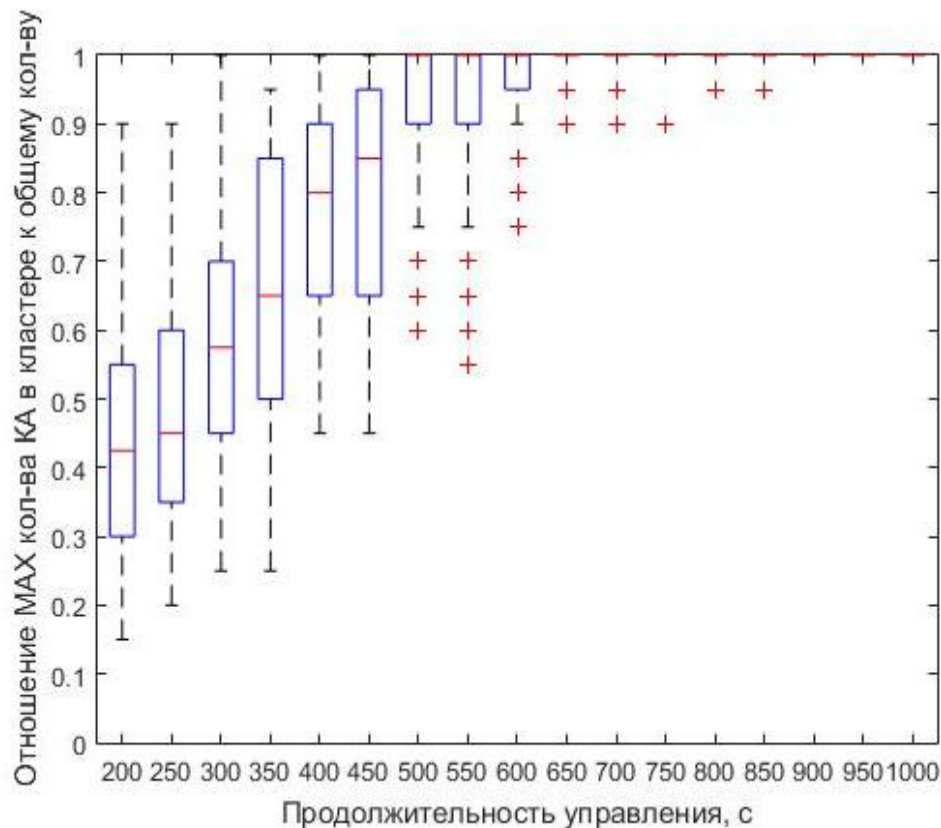
$$R_{\text{связи}} = 100 \text{ м}$$

$$F_{\text{тяги}} = 200 \text{ мкН}$$

$$m = 3 \text{ кг}$$

Δt между управлением = 2500 с

Δt между управлением = 7500 с



Заключение

- Применение децентрализованного управления при ограничении на размер связи позволяет сформировать рой спутников после отделения при некоторых параметрах
- Увеличение времени между управлением приводит к увеличению вероятности кластеризации роя при кусочно-постоянном управлении
- Увеличение радиуса связи приводит к уменьшению вероятности кластеризации при постоянном управлении

Направления дальнейшей работы

- Исследование влияния возмущений и эллиптичности орбиты на эффект кластеризации
- Наложение ограничений на количество связей со спутниками внутри сферы видимости
- Исследование эффекта кластеризации роя при добавлении «правил» в децентрализованное управление

Спасибо за внимание!