

«Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Факультет управления и прикладной математики
Кафедра математического моделирования и прикладной математики

Магистерская диссертация

Определение движения космического аппарата во время межпланетного перелета с помощью обработки изображений космических тел

Подготовила:

Наумкина Юлиана Константиновна, 272 группа

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доц. Иванов Д.С.

Актуальность автономной навигации

Развитие идей межпланетных перелетов малых и наноспутников требует развития средств и методов автономной навигации

В окрестности планеты или астероида определение движения возможно по изображению видимой части объектов

В качестве камеры предполагается использовать звездный датчик

Похожие работы:

Жуков Б.С., Жуков С.Б. Возможности[01] космической навигации по планетному горизонту в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне // Сборник трудов четвертой всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», Таруса, 8-11 сентября 2014. С. 293-310

D. Mortari, D. Conway. Single-point position estimation in interplanetary trajectories using star trackers // Celest Mech. Dyn. Astr., 2017, V. 128, № 1, pp 115–130



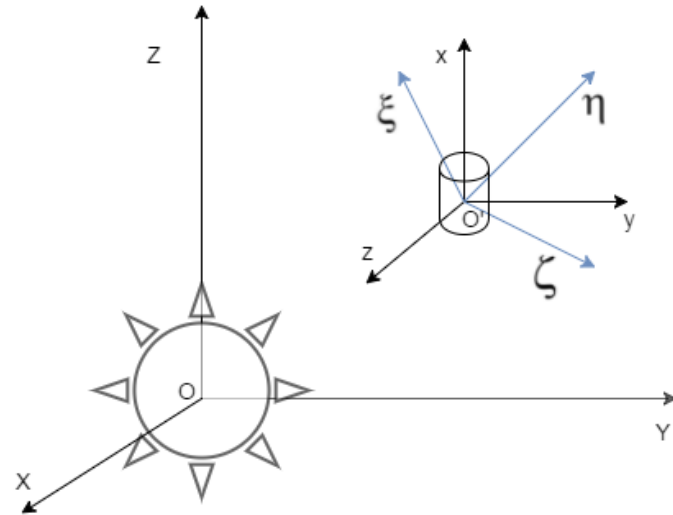
Постановка задачи

Дано:

Космический аппарат с установленной на борту камерой, аппарат находится в окрестности массивного тела (планеты, астероида)

Получить:

Алгоритм для автономной навигации, работающий в режиме реального времени



Используются гелиоцентрическая, орбитальная и связанная с КА системы координат

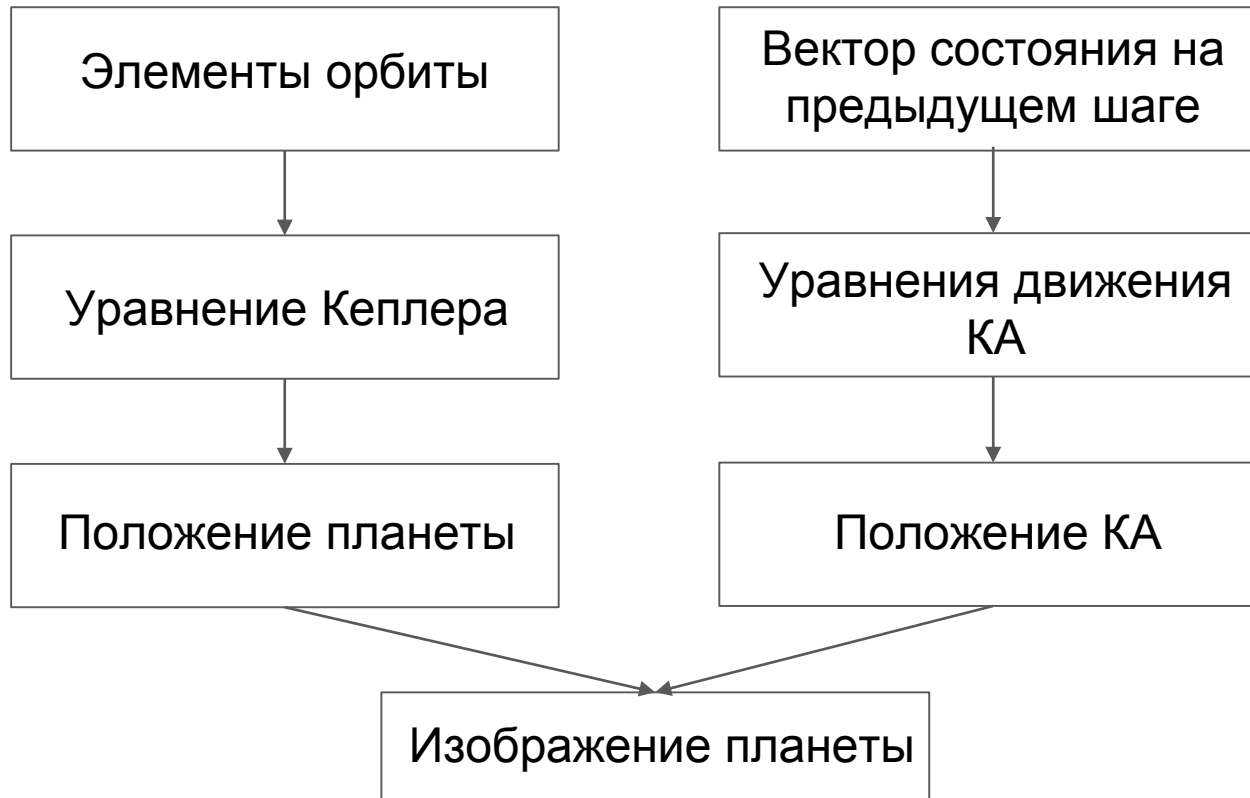
Движение планет - кеплерово

Планеты хорошо видны, их форма близка к сферической

Космический аппарат - твёрдое тело

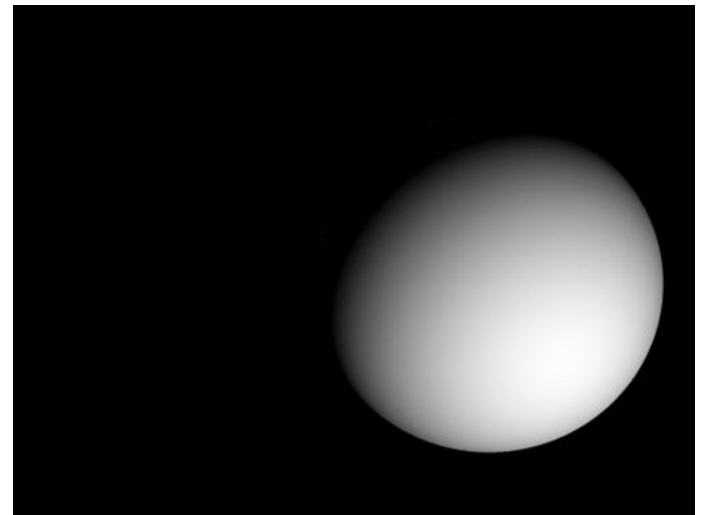
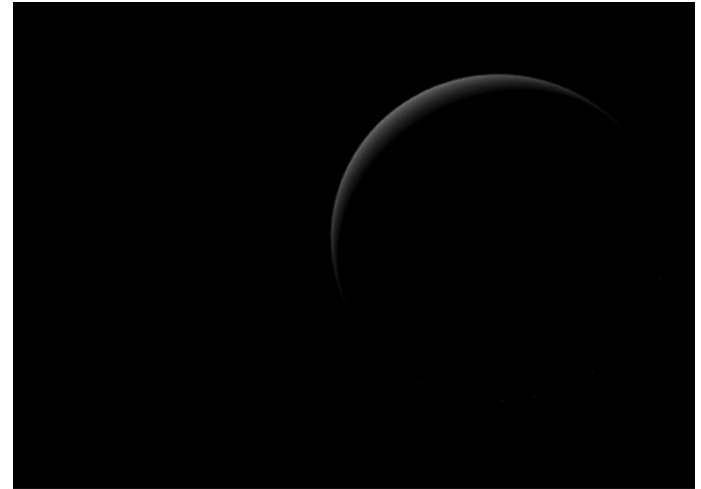
Получение изображений

Схема программы для моделирования изображения с камеры



Этапы обработки изображений

- ↓ Цветное изображение
- ↓ Полутоновое изображение
- ↓ Оценка яркости
- ↓ Бинарное изображение
- ↓ Нахождение объектов-границ
- ↓ Выбор объекта
- ↓ Разбиение границы на две части
- ↓ Выбор полуокружности
- ↓ Восстановление параметров
окружности с помощью МНК



Модель измерений

Вектор измерений:

углы направления на центр планеты и
угловой размер

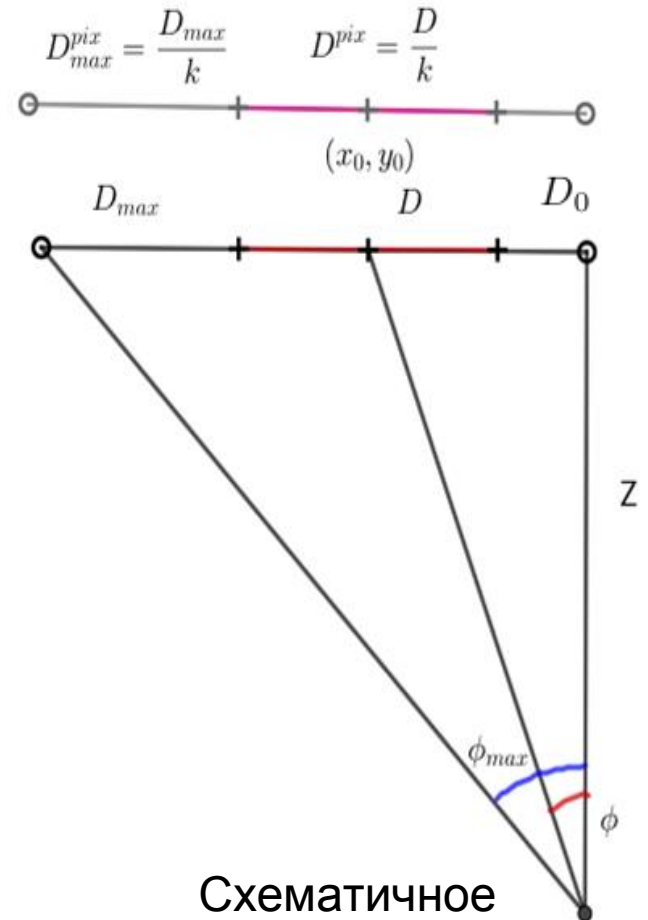
$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \\ \alpha \end{pmatrix} + \delta \mathbf{h} = \begin{pmatrix} \arcsin\left(\frac{z-R_z}{L}\right) \\ \arctg\left(\frac{y-R_y}{x-R_x}\right) \\ 2\arctg\frac{D}{2L} \end{pmatrix} + \delta \mathbf{h}$$

Вычисление углов в результате обработки
изображения

$$\theta = \arctg\left(x_0^{pix} \frac{tg\phi_{max}}{x_{max}^{pix}}\right)$$

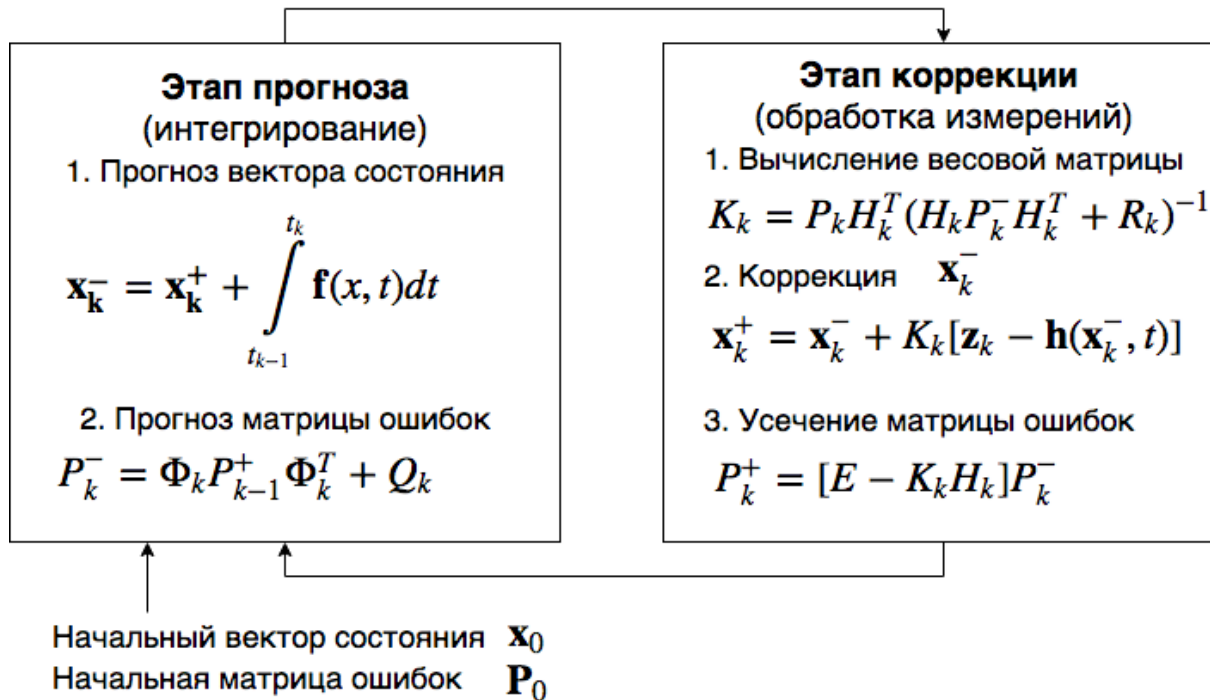
$$\phi = \arctg\left(y_0^{pix} \frac{tg\theta_{max}}{y_{max}^{pix}}\right)$$

$$\alpha = 2\arctg\frac{D}{2L}$$



Схематичное
представление
изображения планеты

Расширенный фильтр Калмана



Вектор состояния:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{r}; \mathbf{v}]$$

Модель движения:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{d}$$

Матрица динамики:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \\ \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{r}} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Матрица чувствительности:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{r}} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Исследование точности алгоритма

Зависимость точности оценок вектора состояния от параметров вычисляется численно при моделировании работы алгоритма

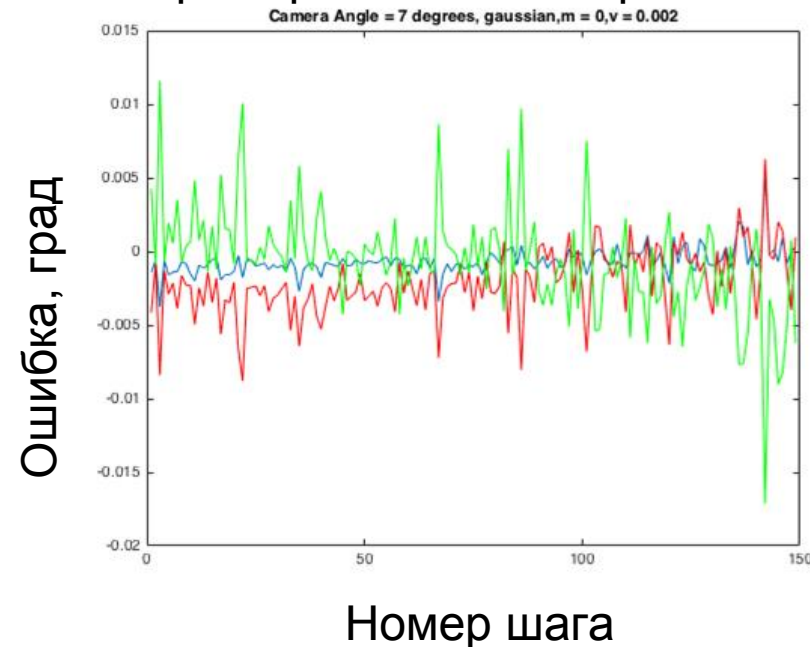
Параметры, от которых зависит точность оценок:

- Размер планеты на изображении
- Качество изображения
- Неточность модели движения

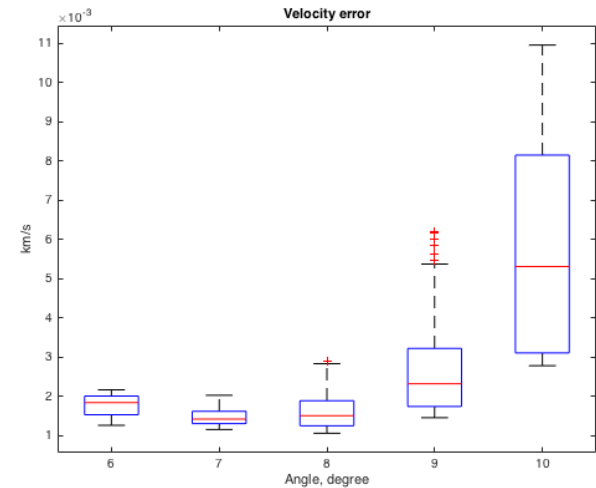
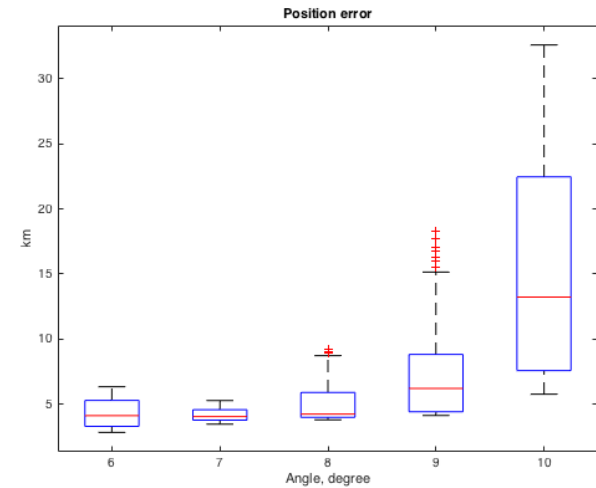
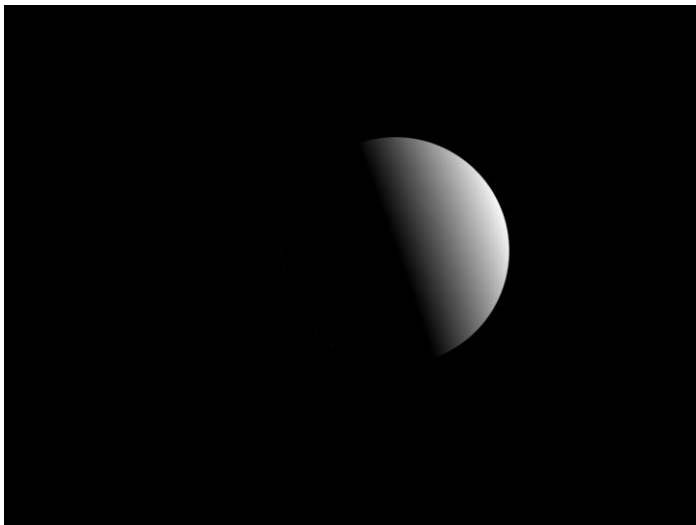
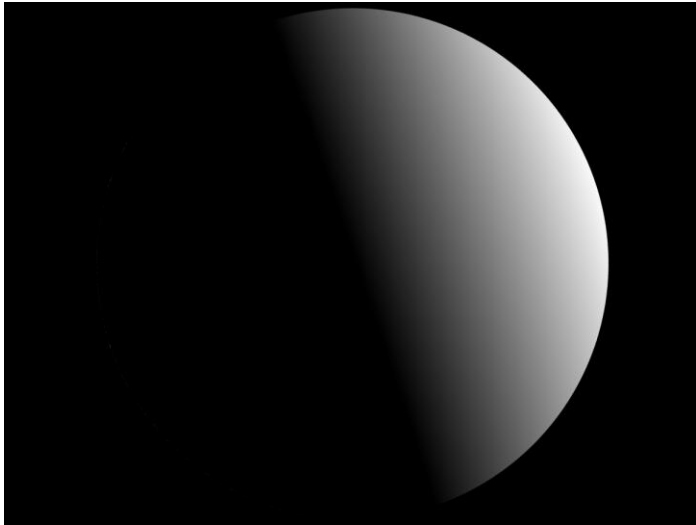
Параметры моделирования:

- угол зрения камеры - 7 градусов
- время интегрирования 25 минут
- начальная ошибка определения положения 10 000 км
- начальная ошибка определения скорости 1000 км/с
- размер шага по времени 10 секунд
- Размер получаемого изображения: 1200x900 пикселей

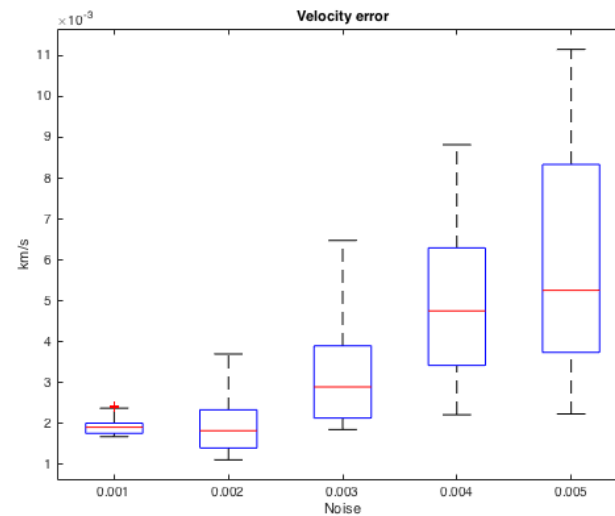
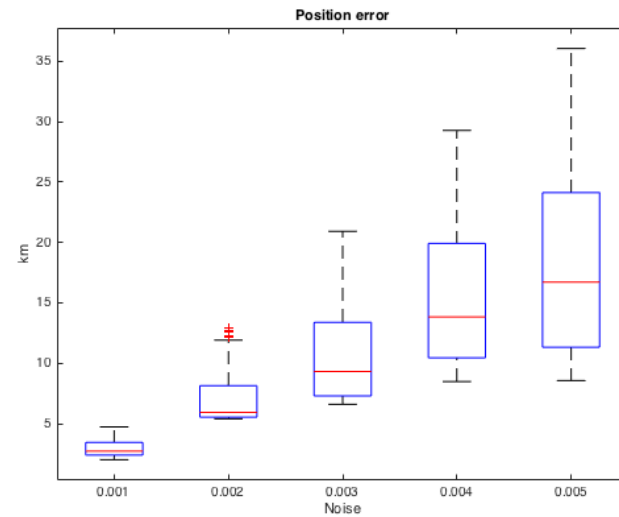
Пример ошибок измерений



Ошибки определения движения при разном размере изображения планеты

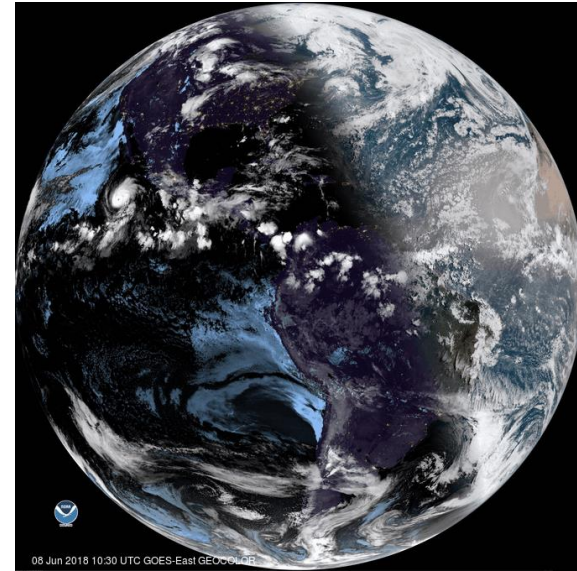


Ошибки определения движения при разном качестве кадров

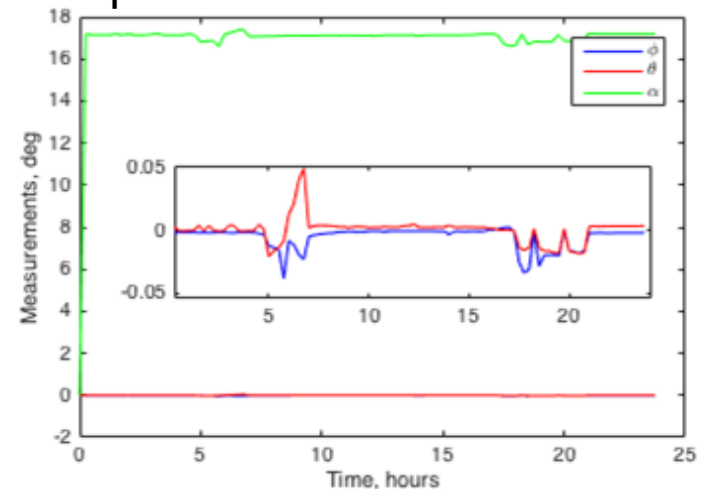


Апробация алгоритма на фотографиях со спутника

- На вход алгоритму подавались снимки, полученные с геостационарного спутника GOES-16 за сутки с интервалом 30 минут
- Предполагалось, что аппарат стабилизирован в орбитальной системе координат
- Вследствие того, что на затененной отражательная способность Земли сильно неравномерна из-за облачности, возникают ошибки при обработке изображения

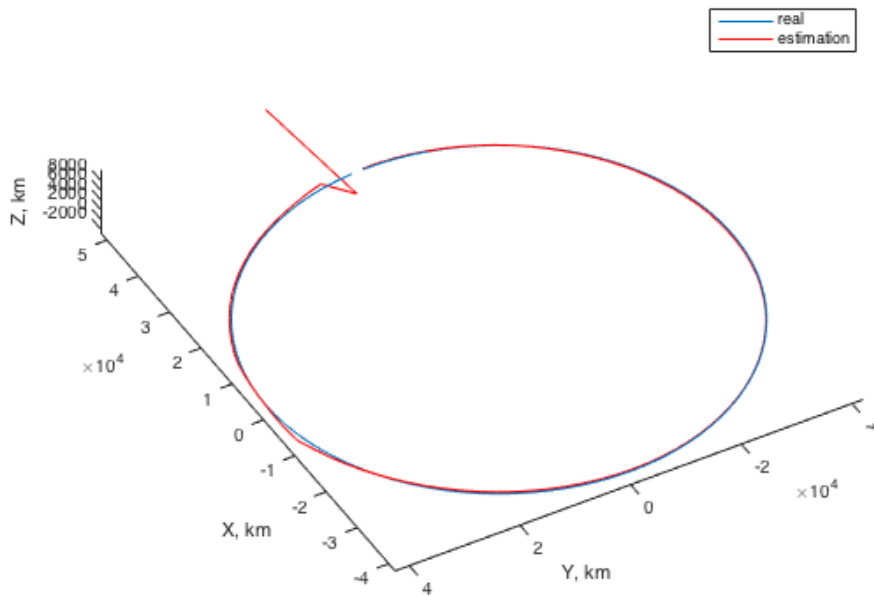


Измерения, полученные с видео-изображения

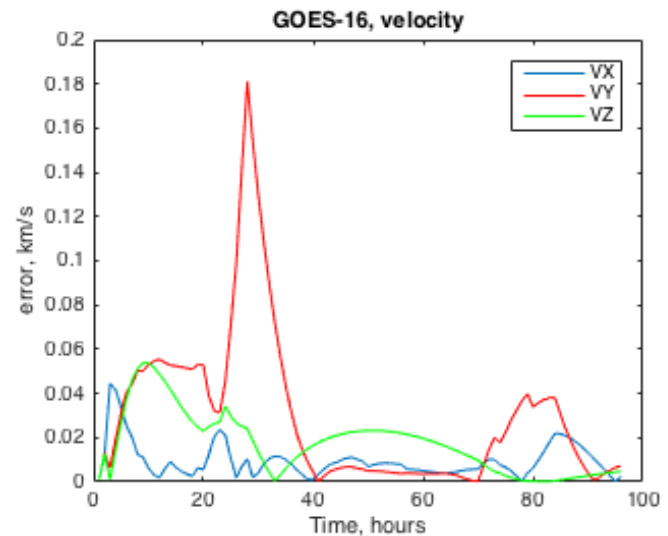
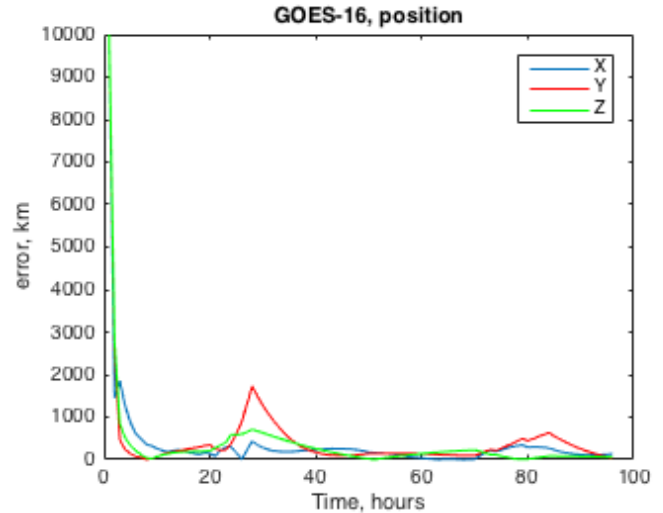


Результаты обработки изображений

Ошибки определения вектора СОСТОЯНИЯ

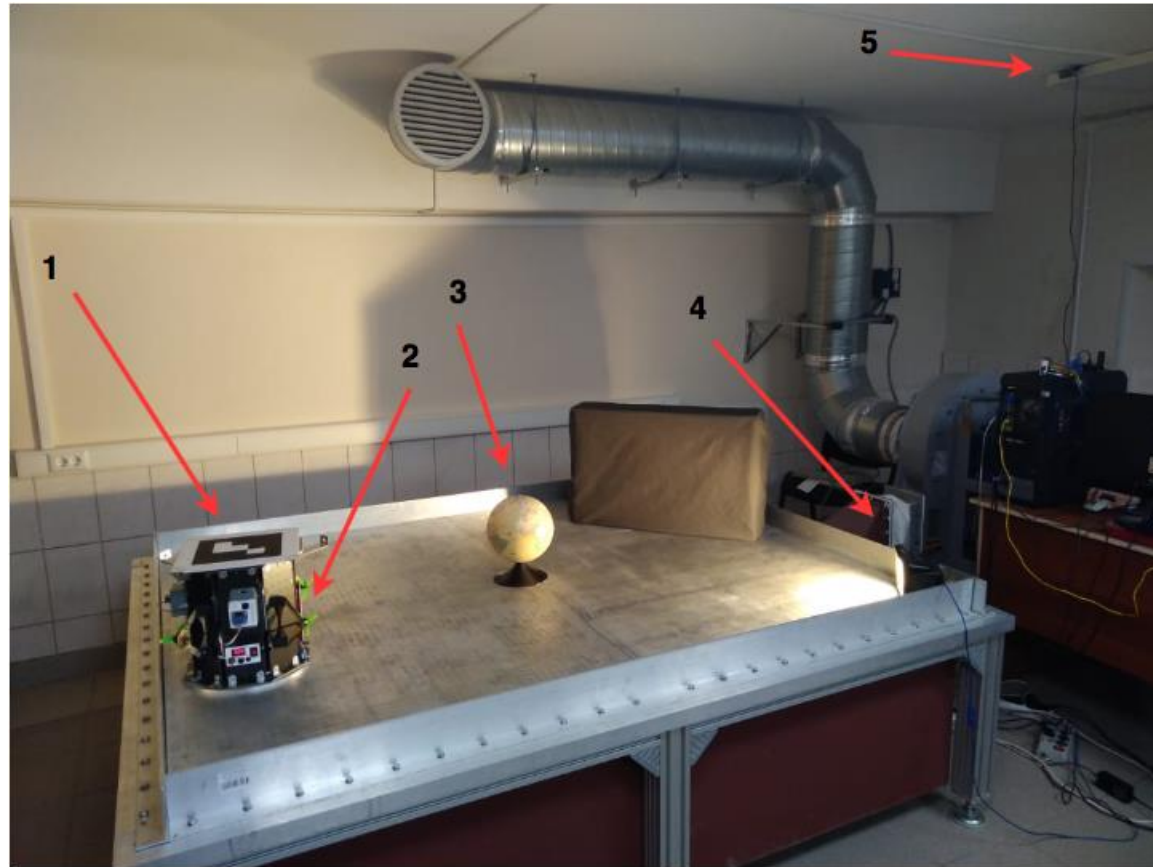


Взаимное расположение реальной и приближенной орбит



Эксперимент на стенде с аэродинамическим столом

- Макет микроспутника движется по кругу вокруг глобуса
- На макете установлена камера
- Цель эксперимента - сравнить результаты работы алгоритма с реальным движением макета



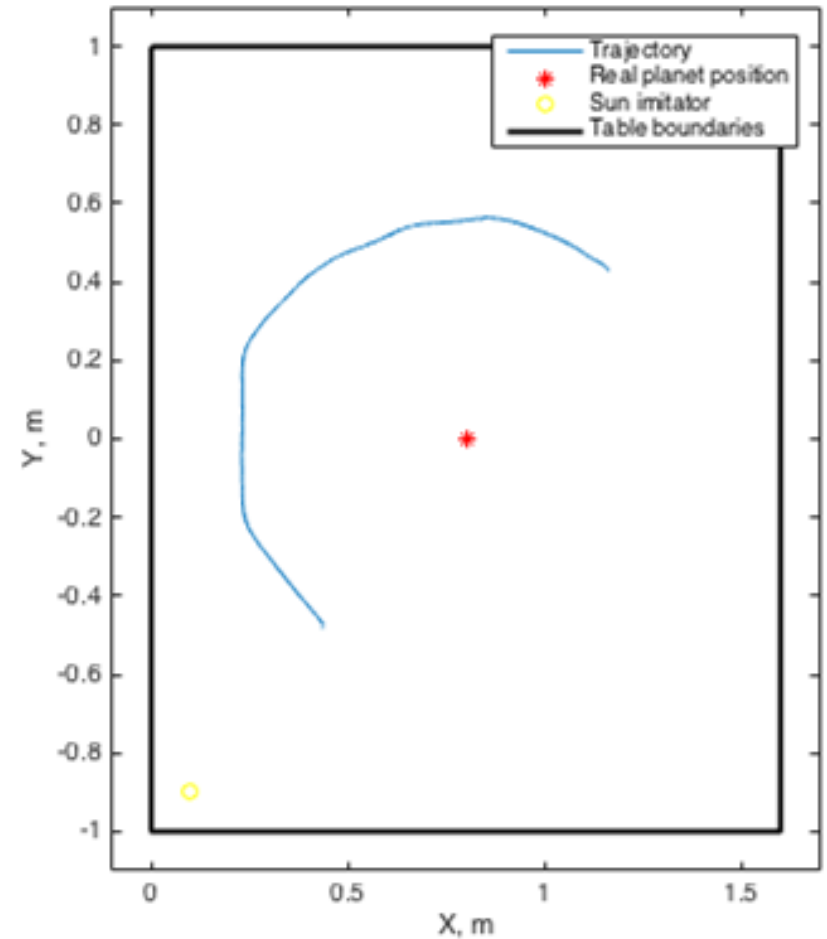
- 1 – макет спутника с меткой
- 2 – камера
- 3 – глобус, имитирующий планету
- 4 – источник света
- 5 – камера для алгоритма определения положения спутника по метке

Движение макета

Видео для обработки с помощью алгоритма



Траектория движения макета



Модификация алгоритма

Вектор состояния

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z] \longrightarrow \mathbf{x} = [x \ y \ v_x \ v_y]$$

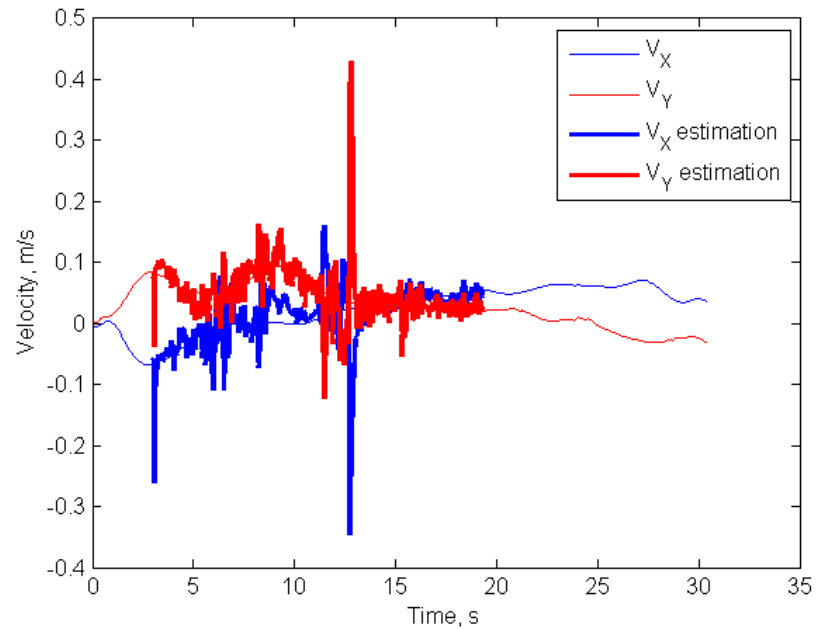
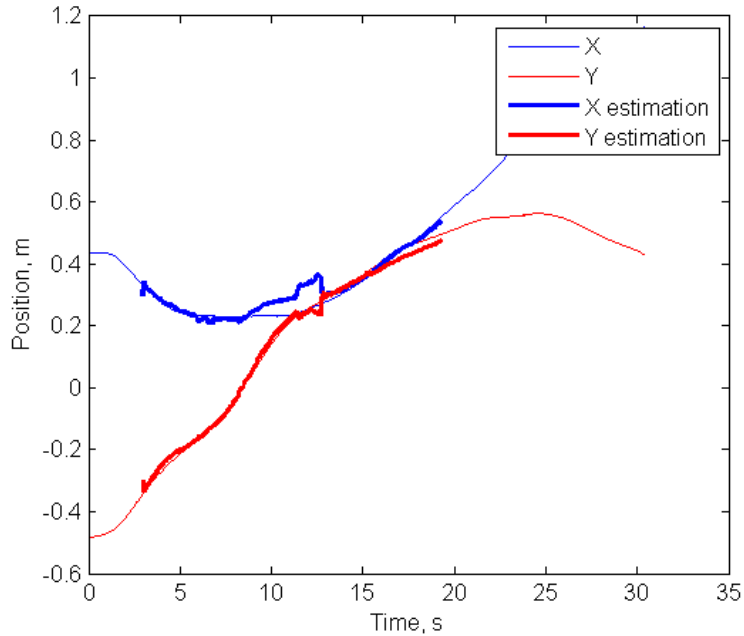
Модель движения

$$\ddot{\vec{r}} + \mu \frac{\vec{r}}{r^3} = 0 \longrightarrow \begin{aligned} \ddot{y} &= -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi_0) \\ \ddot{x} &= -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi_0) \end{aligned}$$

Вектор измерений

$$\mathbf{z} = [\theta \ \phi \ \alpha] \longrightarrow \mathbf{z} = [\phi \ \alpha]$$

Результаты обработки видео эксперимента



Покомпонентное сравнение оценки положения и скорости макета, полученное с помощью системы независимых измерений и с помощью разработанного алгоритма

Заключение

- Разработан алгоритм автономной навигации с использованием обработки изображения наблюдаемой части небесного тела
- Создано программное обеспечение для имитации изображений, получаемых с бортовой камеры
- Проведено исследование точности определения движения с помощью предложенного алгоритма в зависимости от ряда параметров
- Проверена работа алгоритма в лабораторных условиях и на реальных фотографиях со спутника
- На фотографиях со спутника GOES-16 и в лабораторных условиях точность определения движения несколько хуже по сравнению с полученным в ходе моделирования, что связано с особенностями обработки реальных изображений