

XXXIV Академические Чтения по Космонавтике им.С.П.Королёва

Разработка системы определения ориентации МКА на основе фильтра Калмана

Д.С. Иванов

(Московский физико-технический институт)

С.О. Карпенко

(ИТЦ «СканЭкс»)

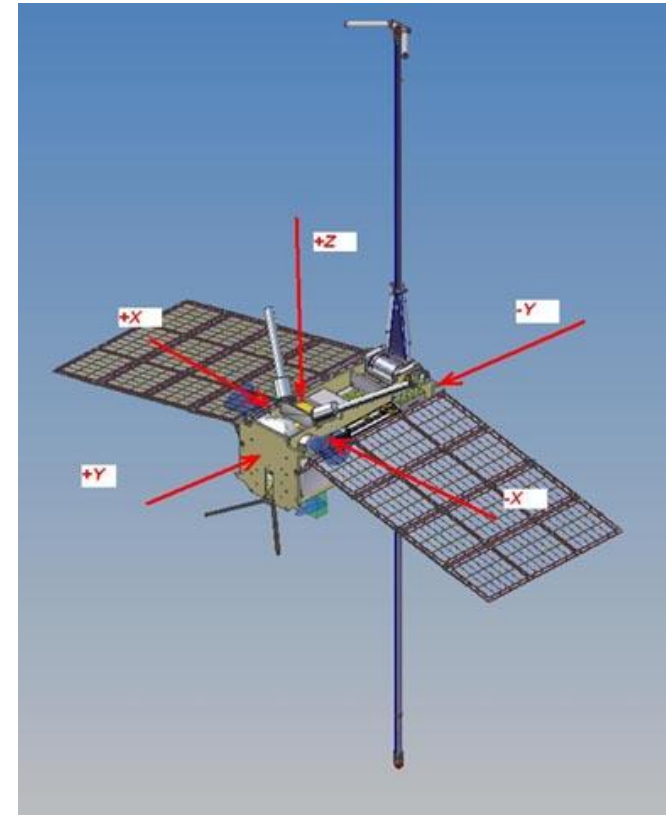
М.Ю. Овчинников

(ИПМ им.М.В.Келдыша)



Малый спутник Чибис-М

- **Миссия:** Исследование физических процессов при атмосферных грозовых разрядах
- **Орбита:** Наклонение орбиты $i = 57^\circ$, высота орбиты $h = 500 \text{ км}$, вес $\sim 50 \text{ кг}$
- **Моменты инерции:**
 $J_x = 3.60 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ $J_y = 3.10 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ $J_z = 1.50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
- **Органы управления ориентацией:**
Маховики
Магнитные катушки
- **Датчики определения ориентации:**
Набор солнечных датчиков
Трёхосный магнитометр
Трёхосный датчик угловой скорости





Режимы управления и

режимы определения ориентации

- Демпфирование начальной закрутки

- Разгрузка маховиков

- Ориентация солнечных батарей на Солнце

- **Стабилизация относительно орбитальной системы координат**

Требуемая точность знания текущей ориентации: $\sim 10^\circ$

Локальный алгоритм TRIAD

Точность знания текущей ориентации: $\sim (10^{-1})^\circ$

Рекурсивный алгоритм на основе фильтра Калмана



Требования к работе фильтра Калмана

При известной ошибке задания начального приближения фильтр Калмана должен:

- **сходиться** менее, чем за **600 секунд**,
- **иметь максимально возможную точность** при заданных шумовых характеристиках датчиков ориентации.

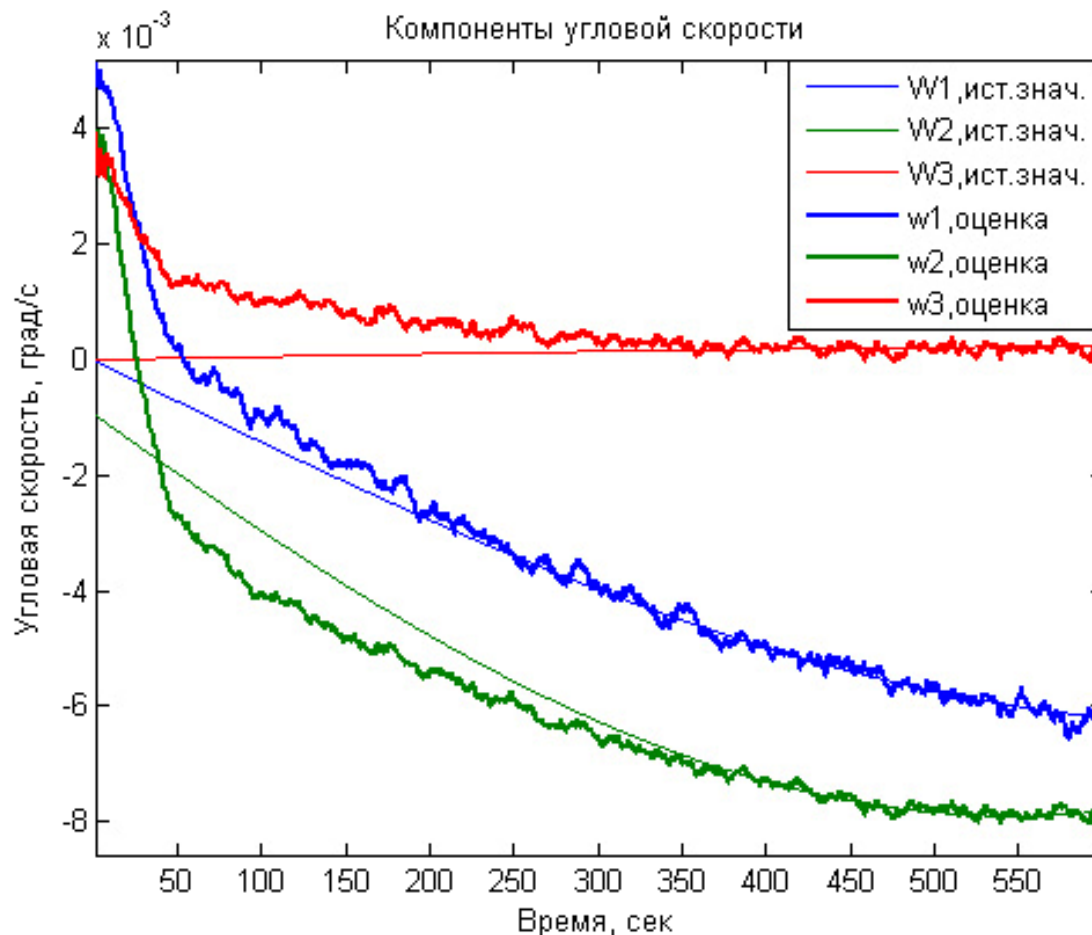
Вектор измеряемых величин: $z = \begin{bmatrix} b_{meas} & s_{meas} & \omega_{meas} \end{bmatrix}^T$

Вектор параметров ориентации: $\hat{x}(t) = [\hat{q}(t) \ \hat{\omega}(t)]^T$

Сходимость и точность фильтра

График зависимости компонент угловой скорости МКА и оценок компонент угловой скорости от времени.

Тонкие линии – истинные значения компонент;
Жирные линии – оценка компонент, получаемая с помощью фильтра Калмана.



Фильтр Калмана

■ Основные формулы

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) + \boldsymbol{\omega}(t) \quad E\langle \boldsymbol{\omega}_k \rangle = 0 \quad E\langle \boldsymbol{\omega}_k \boldsymbol{\omega}_i^T \rangle = \delta(k - i) \mathbf{Q}_k$$

$$\frac{d}{dt} \delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \delta \mathbf{x}(t)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad E\langle \mathbf{v}_k \rangle = 0 \quad E\langle \mathbf{v}_k \mathbf{v}_i^T \rangle = \delta(k - i) \mathbf{R}_k$$

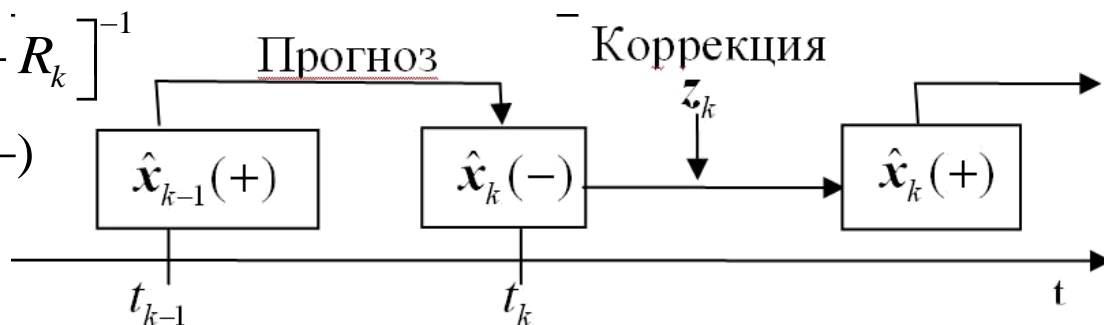
$$\mathbf{P}(t) = E\langle \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)^T \rangle$$

$$\mathbf{P}_k(-) = \Phi(t_k, t_{k-1}) \mathbf{P}_{k-1}(+) \Phi(t_k, t_{k-1})^T + \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k(-) \mathbf{H}_k^T \left[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k(-) \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \right]^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k(+) = \hat{\mathbf{x}}_k(-) + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k(-)$$

$$\mathbf{P}_k(+) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k(-)$$



Задача

Найти начальное значение матрицы ошибок модели движения, исходя из критерия улучшения

- скорости сходимости ФК,

- точности определения вектора состояния,

при заданном начальном приближении углового движения МКА.

Модель движения МКА

Принимаем, что на МКА действуют в основном следующие моменты:

- гравитационный момент;
- управляющий момент со стороны маховиков;
- малый случайный возмущающий момент.

$$I\omega^{si} = N_{ctrl} + N_{gg} + N_{dist} - [\omega^{si} \times] I\omega^{si} + h$$

$$\dot{q}^{so} = \frac{1}{2} \Omega q^{so} \quad \Omega = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z^{so} & -\omega_y^{so} & \omega_x^{so} \\ -\omega_z^{so} & 0 & \omega_x^{so} & \omega_y^{so} \\ \omega_y^{so} & -\omega_x^{so} & 0 & \omega_z^{so} \\ -\omega_x^{so} & -\omega_y^{so} & -\omega_z^{so} & 0 \end{bmatrix}$$



Поиск оптимальных начальных условий матрицы ошибок Q

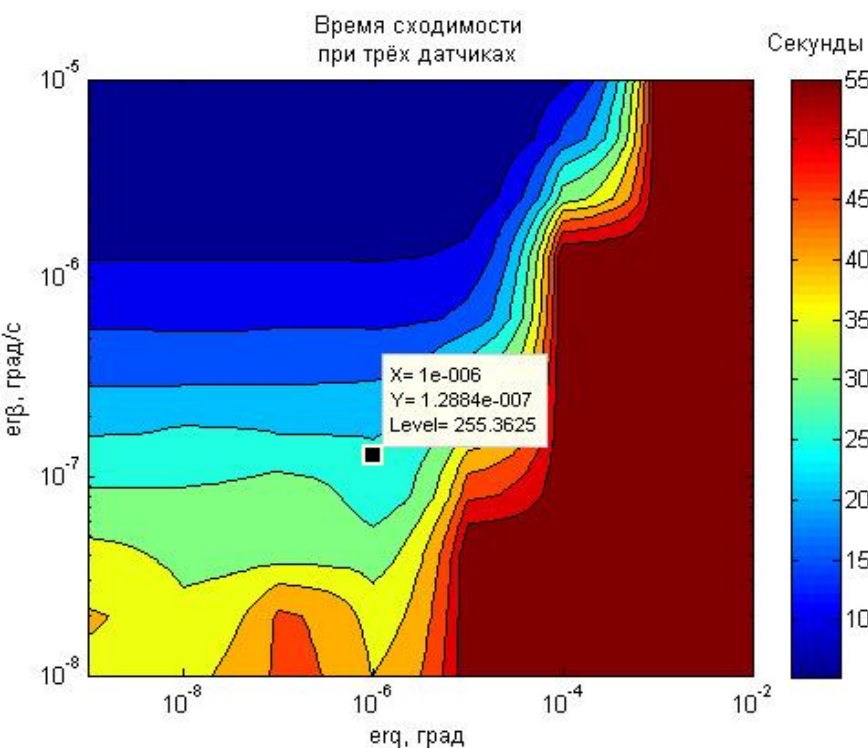
- Два критерия – скорость сходимости фильтра и точность фильтра.
- Задача настройки фильтра Калмана сводится к поиску по двум параметрам оптимального соотношения:
скорость сходимости – ошибка определения вектора состояния.
- Два способа оценки качества работы фильтра:
 - Численный,
 - Аналитический.

Численное исследование фильтра на основе трёх датчиков

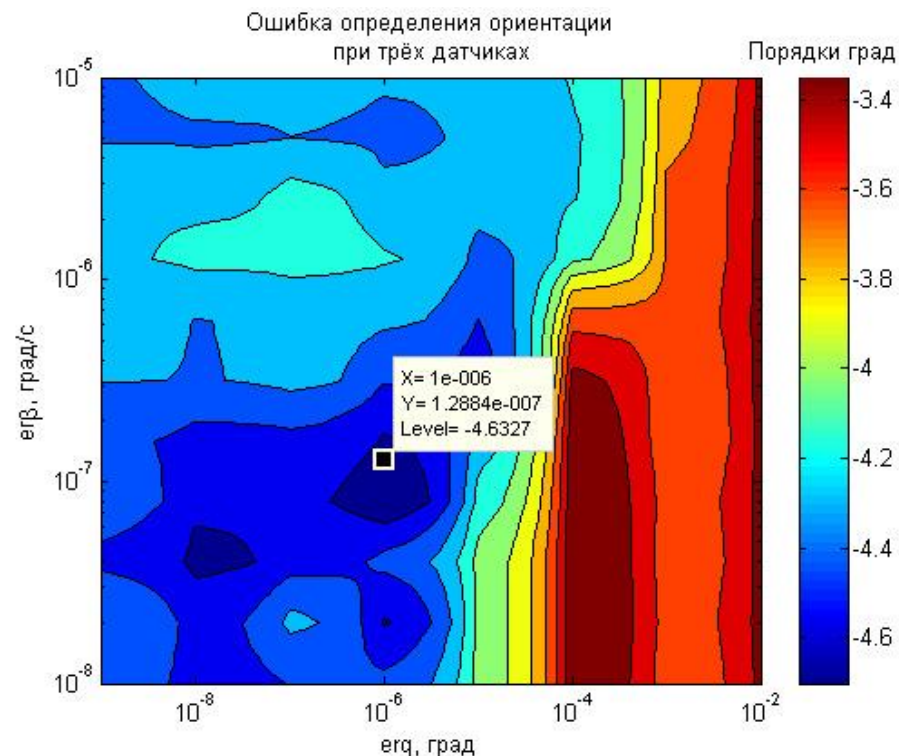
Магнитометр: погрешность измерений (3 сигма) : 250 нТл

Солнечный датчик: погрешность определения направления на Солнце (3 сигма): ± 0.1

Датчик угловой скорости: чувствительность : $0.0001^\circ/\text{сек}$



Время сходимости при трёх датчиках



Ошибка определения по трём датчикам

Результаты поиска

Состав приборов	Значение erq , град	Значение $er\omega$, град/с	Время сходимости, с	Точность определения угла град	Точность определения угловой скорости, град/с
М+СД+ДУС	10^{-6}	$1.28 \cdot 10^{-7}$	255	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-5}$
М+СД	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-5}$	315	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Пример значений параметров настройки фильтра Калмана для достижения наивысшей точности оценки вектора состояния МКА

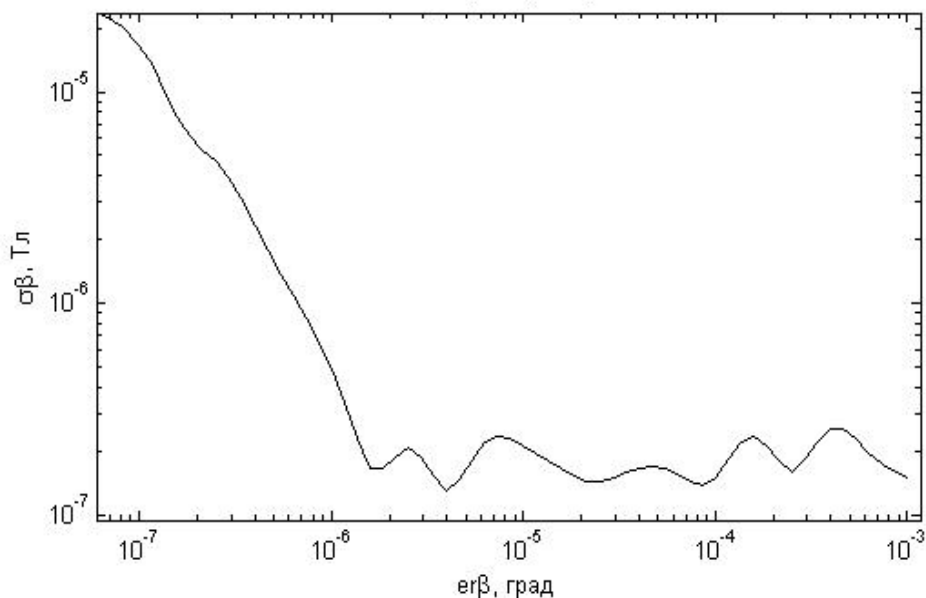


Сопутствующие задачи определения ориентации

- Разработка алгоритмов на основе фильтра Калмана в **случае выхода** из строя одного из датчиков.
- Оценка **наведённых магнитных полей**, создаваемых приборами на борту МКА.
- **Калибровка** датчиков определения ориентации на борту МКА.
- **Отслеживание аномальных измерений**, которые могут быть связаны с выходом датчика из строя или сбоем при передаче информации.

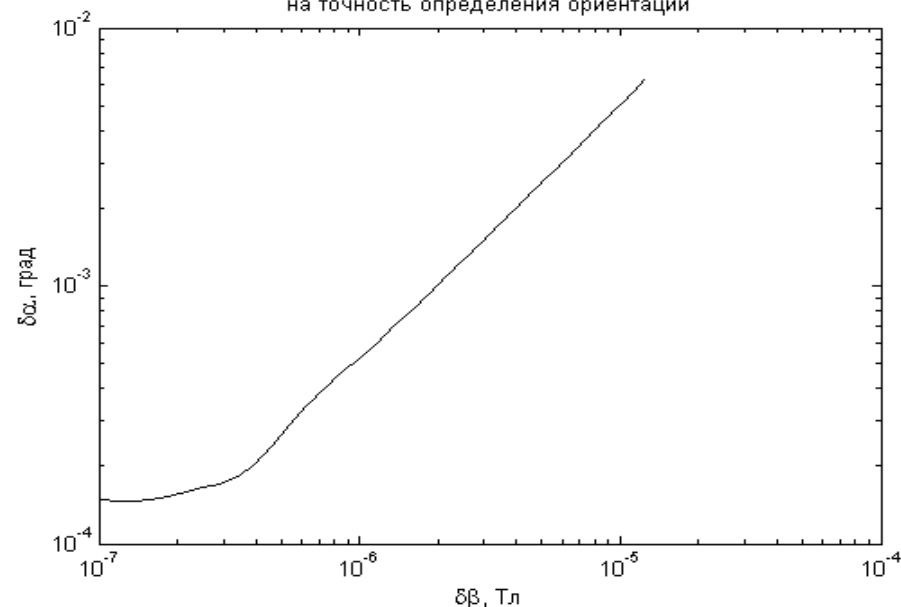
Точность определения наводимых полей

Зависимость ошибки определения смещения поля $\sigma\beta$ от параметра $er\beta$



Ошибка определения в зависимости от параметра фильтра

Влияние неточности значения смещения поля $\delta\beta$ на точность определения ориентации



Влияние неточности знания наводимых полей на точность определения ориентации

Правило 3-х сигм

- Для нормально-распределённой величины справедливо с вероятностью 0.997

$$|z - E_z| \leq 3\sqrt{D_z}$$

- Прогноз невязки измерений равен:

$$\square z_i = z_i - H_i \hat{x}_k^- \quad \hat{x}_k^- = \Phi_k \hat{x}_{k-1}^+$$

- Ковариационная матрица ошибок измерений

$$K_{\square z_i} = H_i P_i^- H_i^T$$

- Вектор измерений аномальный, если

$$\sqrt{\square z_i^T K_{\square z_i}^{-1} \square z_i} \geq 3$$

Пример отбраковки

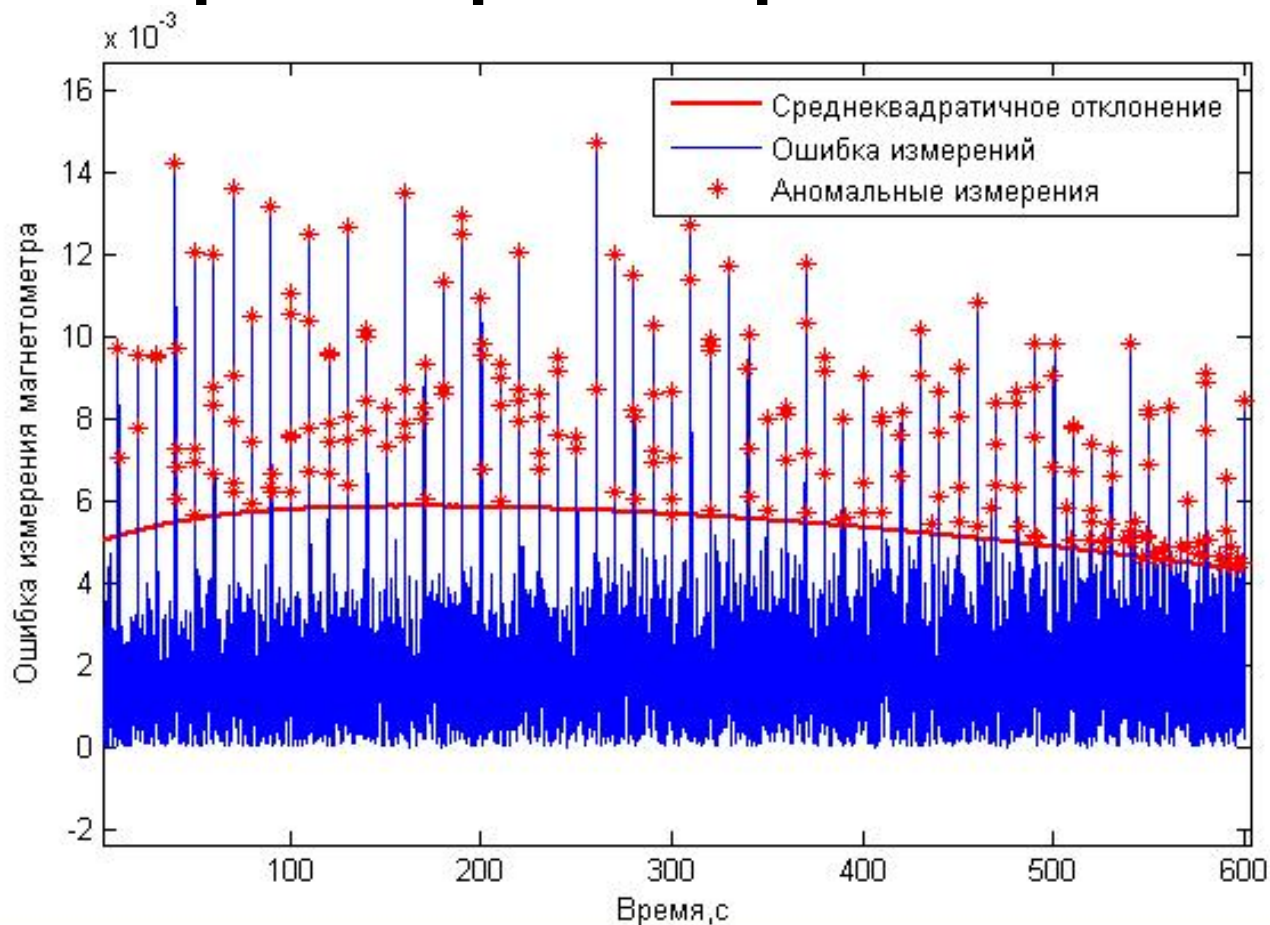
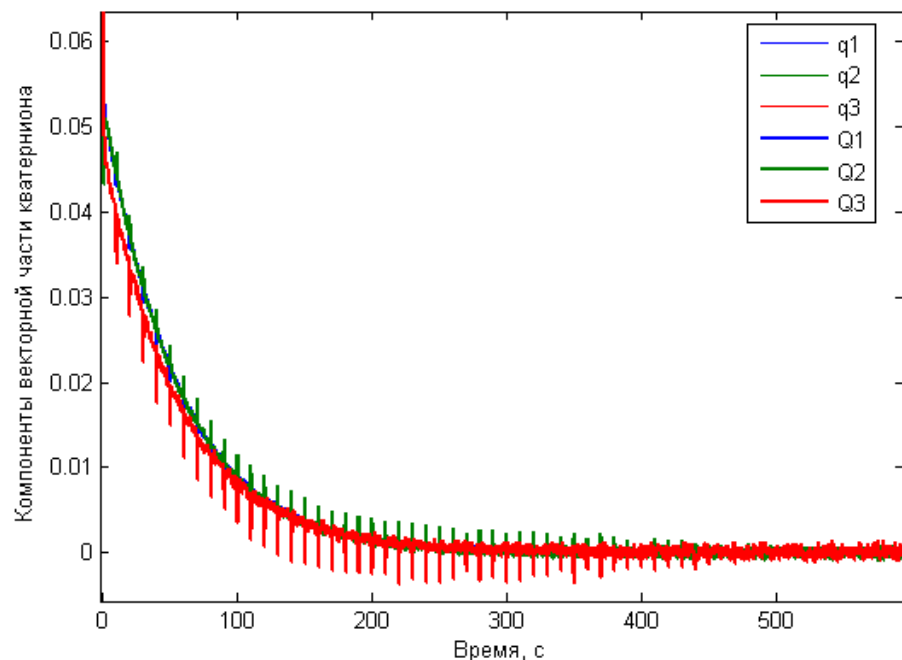


График зависимости ошибки измерений от времени по одной компоненте магнетометра

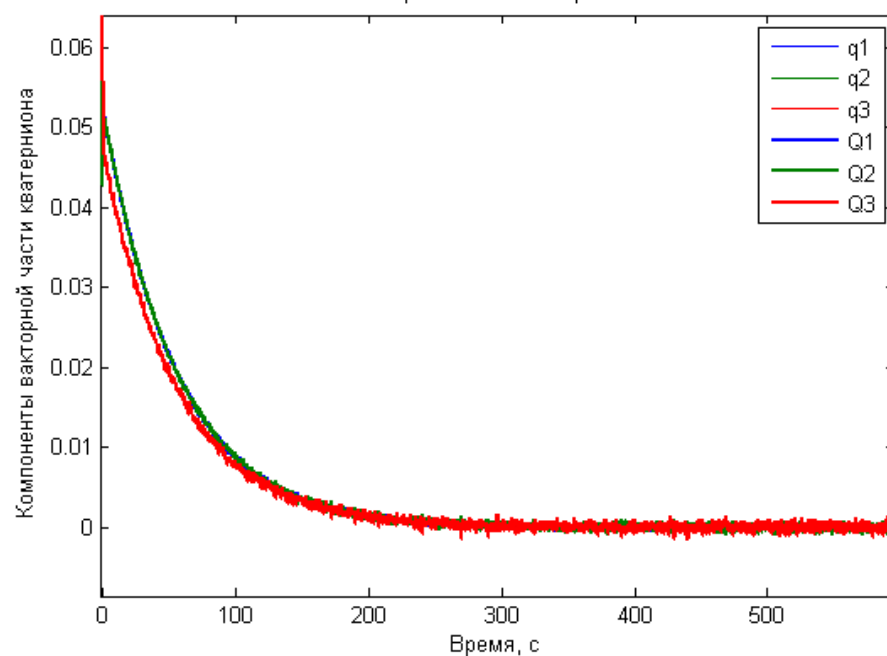
Оценка параметров с удалением аномальных измерений

Векторная часть кватерниона



Оценка векторной части кватерниона без отброса аномальных измерений

Векторная часть кватерниона



Оценка векторной части кватерниона с отбросом аномальных измерений

Заключение

- Проведено исследование алгоритмов
 - определения ориентации с использованием измерений
 - ❖ магнитометра и солнечного датчика,
 - ❖ магнитометра, солнечного датчика и датчика угловой скорости.
- Проведено исследование алгоритма оценки наводимых на борту магнитных полей.
- Реализован алгоритм идентификации аномальных измерений.



Спасибо за внимание