



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 64 за 2014 г.



Иванов Д.С., Ивлев Н.А.,
Карпенко С.О., Овчинников М.Ю.

Исследование алгоритмов
определения ориентации
для микроспутников серии
'ТаблетСат'

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Исследование алгоритмов определения ориентации для микроспутников серии 'ТаблетСат' / Д.С.Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 64. 24 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-64>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**Д.С. Иванов, Н.А. Ивлев,
С.О. Карпенко, М.Ю. Овчинников**

**Исследование алгоритмов
определения ориентации
для микроспутников
серии "ТаблетСат"**

Москва — 2014

Иванов Д.С., Ивлев Н.А., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю.

Исследование алгоритмов определения ориентации для микроспутников серии "TabletSat"

Исследуются разработанные алгоритмы определения ориентации на основе фильтра Калмана для различного набора используемых датчиков: магнитометр, солнечные датчики, датчики угловой скорости и звездный датчик. В качестве определяемых параметров рассматриваются кватернион ориентации и вектор угловой скорости, а также для ряда алгоритмов – вектор смещения нуля магнитометра и вектор смещения нуля датчика угловой скорости. Алгоритмы исследуются с параметрами микроспутника "TabletSat-Аврора".

Ключевые слова: определение ориентации микроспутника, фильтр Калмана

Ivanov D.S., Ivlev N.A., Karpenko S.O., Ovchinnikov M.Yu

Attitude determination algorithms investigation for microsattellites of "TabletSat" series

Attitude determination algorithms based on Kalman filter are considered in the paper. The algorithms processes measurements of a star sensor, gyro, magnetometer and sun sensor. Quaternion and angular velocity vector are choosen as a state vector, and for a several algorithms also biases of magnetometer and gyro measurements are also estimated. The algorithms are investigated with parameters of the "TabletSat-Aurora" microsattelite.

Key words: microsattelite attitude determination, Kalman filter

Работа выполнена при поддержке контракта № 11-13 между ООО "Спутникс" и ИПМ им.М.В. Келдыша РАН и гранта Фонда Сколково № 83 «Создание и коммерциализация комплексных решений и отдельных продуктов для малых космических аппаратов прикладного и образовательного назначения» для ООО "Спутниковые Инновационные Космические Системы".

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-01-33045, 13-01-00665, 14-01-31313).

Введение

В основе подхода компании СПУТНИКС при проектировании малых космических аппаратов лежит модульный принцип построения спутника из типовых служебных систем и полезной нагрузки, позволяющий формировать масштабируемую архитектуру и технические характеристики спутника по принципу LEGO-конструктора. Подход основан на использовании открытых SxPA-спецификаций (SPUTNIX Plug-n-Play Architecture), описывающих механические, электрические, информационные интерфейсы между служебными системами и полезной нагрузкой [1].

На основе данного подхода разработана платформа "ТаблетСат". Базовой единицей конструкции платформы "ТаблетСат" является модуль массой около 10 кг, получивший название 1U (U-от английского слова UNIT, т.е. модуль). Другие типовые размеры (2U, 3U, 4U) с большим резервом по массе и электрической мощности под полезную нагрузку может выполняться посредством увеличения количества однотипных модулей формата 1U. Выбранный форм-фактор (6-угольная призма) обусловлен исключительно возможностями, удобством запуска платформы в качестве попутной нагрузки.

Разрабатываемые в СПУТНИКС технологии и служебные системы позволяют создавать микроспутники общей массой от 10 до 50 кг. Возможны также варианты реализации микроспутника массой вплоть до 100 кг. Микроспутник состоит из унифицированных элементов, легко собирается, быстро интегрируется на ракету-носитель. После запуска он радиосовместим с широким спектром наземных станций управления, станций для приема телеметрии и научной информации.

В зависимости от требований на платформу "ТаблетСат" устанавливается набор исполнительных элементов и датчиков, в частности, для системы ориентации. Для обеспечения требуемого углового движения необходимо разработать банк алгоритмов управления и алгоритмов определения движения, из которого можно выбрать подходящий набор, удовлетворяющий требованиям миссии. Однако каждый алгоритм имеет свои особенности, параметры и ограничения, которые необходимо выявить и проанализировать путем аналитического и численного исследования. Для верификации разработанных алгоритмов проводится математическое моделирование их работы с параметрами исполнительных органов и датчиков, используемых на микроспутнике "ТаблетСат-Аврора", успешно запущенном на орбиту 19 июня 2014 г (рис. 1).

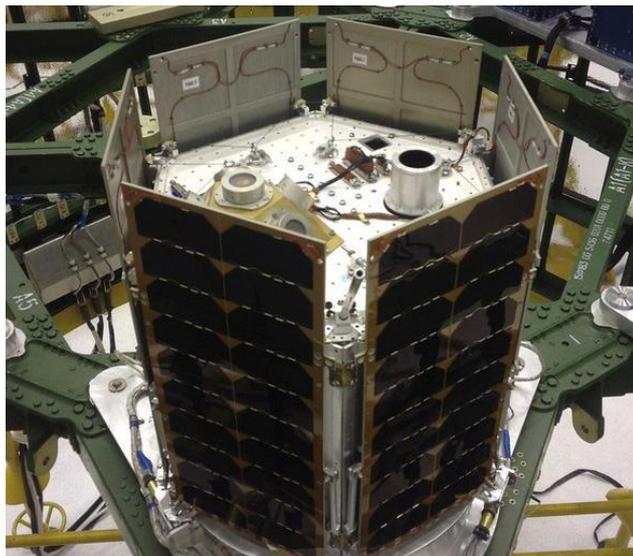


Рис. 1. Микроспутник "ТаблетСат-Аврора" перед запуском.
Фото ООО "Спутникс"

1. Состав системы ориентации микроспутника "ТаблетСат-Аврора"

Рассмотрим состав системы ориентации микроспутника "ТаблетСат-Аврора". Система ориентации и стабилизации состоит из датчиков определения ориентации, исполнительных органов и блока управления системой ориентации. Расположение элементов системы ориентации в корпусе спутника показано на рис.2.

В качестве датчиков определения ориентации используются один трехкомпонентный магнитометр, пять солнечных датчиков, два датчика угловой скорости, а также звездный датчик, разработанный в ИКИ РАН. Основные характеристики датчиков приведены в таблице 1.

Табл. №1. Характеристики датчиков

Характеристика	Магнитометр	Солнечный датчик	Датчик угловой скорости	Звездный датчик
Диапазон измерения	$\pm 200\ 000$ нТ	± 45 град	± 250 град/с	± 2 град/с
Случайное отклонение (σ)	250 нТ	0,1 град	0,005 град/с	0,001 град

В качестве исполнительных элементов системы управления ориентацией используются три токовые катушки, четыре управляющих двигателя-маховика (три – по основным осям и один – запасной – диагональный) и четыре гироскопа.

Токовые катушки индуцируют управляемый дипольный магнитный момент, который при взаимодействии с внешним магнитным полем создаёт управляющий механический момент. Токовые катушки представляют собой соленоиды с обмоткой из медной проволоки и пермаллоевым сердечником.

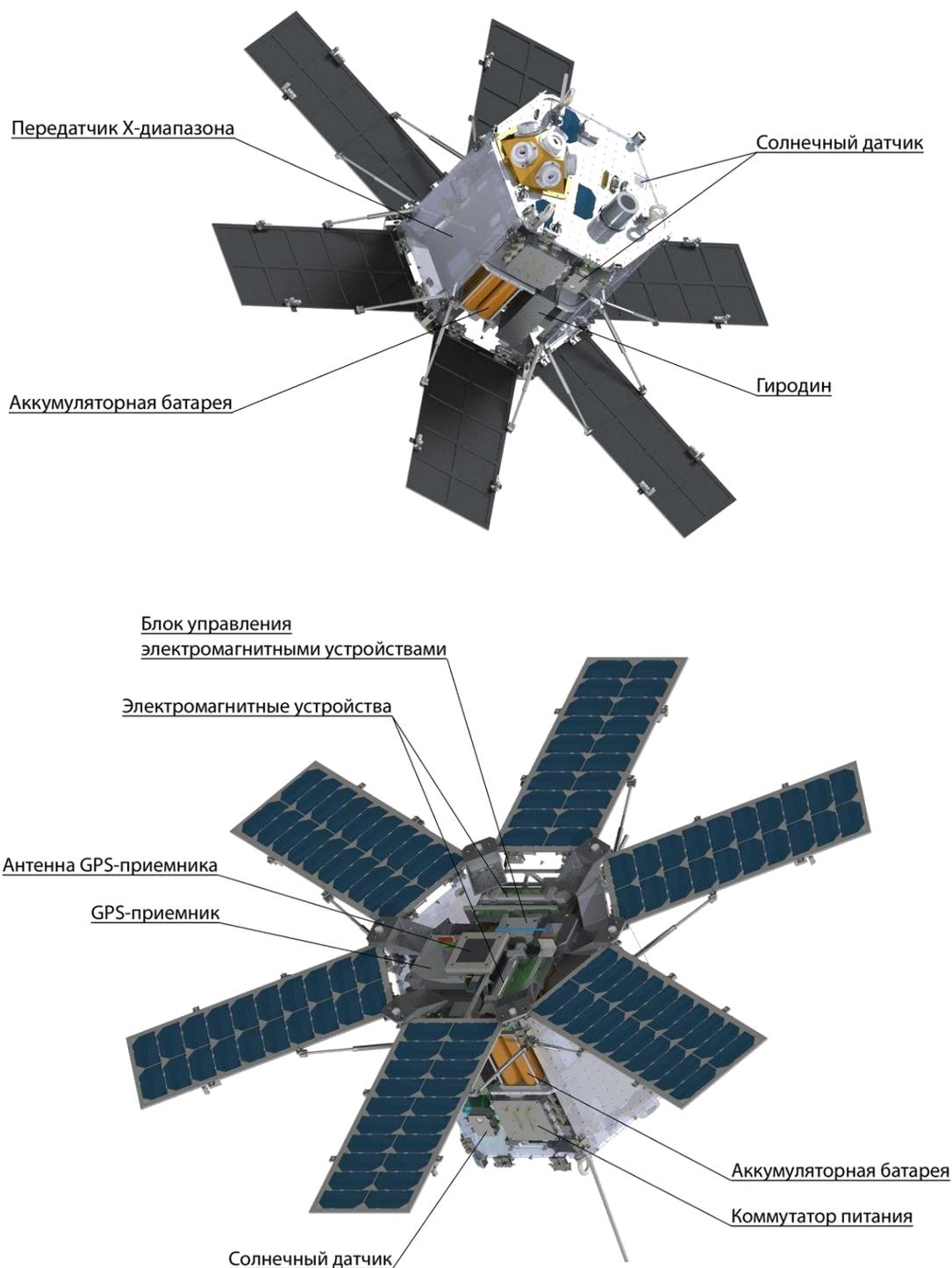


Рис.2. Расположение элементов системы ориентации и стабилизации микропутника «ТаблетСат-Аврора»

Двигатели-маховики выполнены на основе бесконтактного двигателя постоянного тока с управляемым моментом и предназначены для использования в качестве исполнительного органа в системах ориентации и стабилизации мик-

роспутников. Электродвигатель обеспечивает вращение ротора-маховика, его торможение. Величина создаваемого им вращающего (управляющего) момента может плавно меняться в заданном диапазоне в соответствии с сигналом управления, подаваемым на вход двигателя-маховика. Максимальный управляющий кинетический момент составляет 0,17 Нмс.

Гиродины используются в контуре системы стабилизации для обеспечения основных режимов управления и предназначены для создания управляющего момента за счет изменения углового положения оси вращения ротора. Максимальный кинетический момент гиродина – $8 \cdot 10^{-3}$ Нмс, максимальный момент относительно оси гиродина – $3,7 \cdot 10^{-4}$ Нмс, максимальная угловая скорость поворота оси – 1,5 рад/с.

Масса микроспутника составляет 26кг. Тензор инерции микроспутника "ТаблетСат-Аврора" следующий:

$$J = \begin{pmatrix} 0.519 & 0.002 & 0.005 \\ 0.002 & 0.579 & 0.009 \\ 0.005 & 0.009 & 0.71 \end{pmatrix} \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

2. Построение алгоритмов

2.1. Расширенный фильтр Калмана

Активное управление ориентацией микроспутников серии "ТаблетСат" требует определения движения аппарата относительно центра масс в режиме реального времени. Рекурсивные алгоритмы оценивания параметров движения по типу фильтра Калмана [2; 3] позволяют на основе измерений датчиков ориентации и модели движения аппарата получить наилучшую по среднеквадратичному критерию оценку вектора состояния относительно его центра масс.

Фильтр Калмана – последовательный рекурсивный алгоритм, использующий принятую модель динамической системы и измерения датчиков для получения оценки вектора состояния системы. В случае, если измерения поступают дискретно в некоторые моменты времени t_k , то для этих моментов времени необходимо сделать оценку вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}(t_k)$. Дискретный фильтр Калмана работает по системе прогноз-коррекция (рис.3) [4]. Пусть на некотором шаге $k-1$ известна оценка $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+$ и ковариационная матрица ошибки P_{k-1}^+ . Требуется найти оценку вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_k^+$. Для этого на этапе прогноза путем интегрирования модели движения вычисляется априорная оценка $\hat{\mathbf{x}}_k^-$, а на этапе коррекции с помощью обработки вектора измерений \mathbf{z}_k вычисляется апостериорная оценка $\hat{\mathbf{x}}_k^+$. Ковариационная матрица ошибок вектора состояния

P_k^- прогнозируется с помощью дискретного уравнения Риккати, и после получения измерения вычисляется апостериорная матрица P_k^+ .

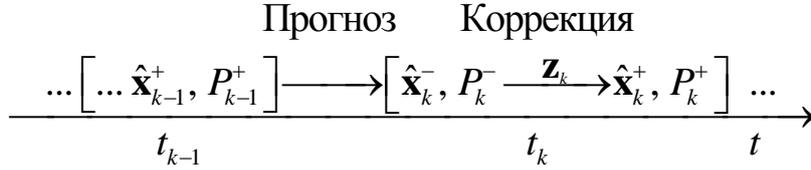


Рис. 3. Принцип работы фильтра Калмана

Фильтр Калмана находит наилучшую по среднеквадратическому критерию оценку для линейных систем, но может быть построен и в случае, если уравнение движения и уравнение измерений являются нелинейными функциями от времени и вектора состояния:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{w}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v}(t). \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{w}(t)$ – нормально распределенная ошибка модели движения с ковариационной матрицей Q , $\mathbf{v}(t)$ – нормально распределенная ошибка измерений с ковариационной матрицей R . Для построения фильтра функции $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ и $\mathbf{h}(\mathbf{x}, t)$ представляются в виде разложения в ряд Тейлора в окрестности оценки текущего вектора состояния [5]. После этого удерживаются только линейные члены разложения. Матрица динамики системы и матрица модели измерений вычисляются следующим образом:

$$H_k = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_k^-, t=t_k}, \quad F_k = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_k^-, t=t_k}. \quad (3)$$

Для расширенного фильтра Калмана при дискретно поступающих измерениях вектор состояния на этапе прогноза вычисляется путём интегрирования нелинейных уравнений движения (1) и на этапе коррекции используется нелинейная модель измерений (2) [6]:

Этап прогноза:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+, t) dt, \quad (4)$$

$$P_k^- = \Phi_k P_{k-1}^+ \Phi_k^T + Q_k.$$

Этап коррекции:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + K_k [\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, t_k)],$$

$$P_k^+ = [E - K_k H_k] P_k^-.$$

Здесь Φ_k – матрица перехода из состояния $k-1$ в состояние k , E – единичная матрица, K – весовая матрица.

Далее в настоящей работе будут рассматриваться расширенный фильтр Калмана с уравнениями (4) и (5), и модификации фильтра Калмана, которые решают вопросы калибровки датчиков в режиме реального времени и нахождения действующих возмущений.

2.2. Модель движения и модель измерений

В настоящем разделе будут рассмотрены алгоритмы определения углового движения микроспутников на основе расширенного фильтра Калмана. Примем, что динамическая модель движения микроспутника, используемая фильтром Калмана, учитывает только гравитационный и управляющий моменты со стороны маховиков и имеет вид

$$J\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\dot{\mathbf{h}} + \frac{3\mu}{r^3}(\boldsymbol{\eta} \times J\boldsymbol{\eta}) - \boldsymbol{\omega} \times (J\boldsymbol{\omega} + \mathbf{k}), \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – вектор угловой скорости связанной со спутником системы координат (ССК) относительно инерциальной системы координат (ИСК), J – тензор инерции аппарата, $\boldsymbol{\eta} = [\eta_x \ \eta_y \ \eta_z]^T$ – единичный вектор направления местной вертикали, записанный в связанной системе координат, $\mu = GM_3$ – гравитационный параметр Земли, r – расстояние от центра Земли до микроспутника, \mathbf{k} – кинетический момент маховиков, $\dot{\mathbf{k}}$ – изменение кинетического момента маховиков, которое задается выражением

$$\dot{\mathbf{k}} = K_\alpha \boldsymbol{\lambda}_{rel} + K_\omega (\tilde{\boldsymbol{\omega}} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}_0) - \boldsymbol{\omega} \times (J\boldsymbol{\omega} + \mathbf{k}),$$

$\boldsymbol{\lambda}_{rel}$ – векторная часть кватерниона $\Lambda_{rel} = [\boldsymbol{\lambda}_{rel}^T \ \lambda_{rel}^0]^T = \Lambda_0^{-1} \Lambda$, где $\Lambda = [\boldsymbol{\lambda} \ \lambda^0]^T$ перехода из орбитальной системы координат (ОСК) в ССК, Λ_0 – кватернион требуемой ориентации, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ – вектор угловой скорости ССК относительно ОСК, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_0$ – вектор требуемой угловой скорости, $K_\alpha = \text{diag}(k_\alpha^1, k_\alpha^2, k_\alpha^3)$, $K_\omega = \text{diag}(k_\omega^1, k_\omega^2, k_\omega^3)$ – диагональные матрицы с параметрами пропорционально-дифференциального-регулятора управления маховиками. Второе слагаемое в (6) описывает гравитационный момент. Запишем кинематические уравнения в виде

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Omega \Lambda. \quad (7)$$

Здесь

$$\Omega = \begin{pmatrix} \tilde{W} & \tilde{\boldsymbol{\omega}} \\ -\tilde{\boldsymbol{\omega}}^T & 0 \end{pmatrix},$$

\tilde{W} – кососимметрическая матрица угловой скорости $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$.

Для фильтра, основанного на измерениях, например, солнечного датчика и магнитометра, в качестве вектора оцениваемых величин возьмем векторную

часть кватерниона перехода из ОСК в ССК и угловую скорость ССК относительно ИСК, $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\omega}^T]^T$. Теперь линеаризуем динамическое и кинематическое уравнения движения в окрестности текущего положения. Запишем уравнения (6) и (7) в виде

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

где $\delta \mathbf{x}(t)$ – малое приращение вектора состояния, а $F(t)$ – линеаризованная матрица уравнения движения в окрестности состояния $\mathbf{x}(t)$. Тогда получим

$$F = \begin{pmatrix} -W_\omega & \frac{1}{2} E \\ J^{-1} (kF_g - K_\alpha W_{\Lambda_{rel}}) & -J^{-1} K_\omega \end{pmatrix},$$

где E – единичная матрица, W_ω – кососимметрическая матрица угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, $k = 6\mu / R^3$,

$$W_{\Lambda_{rel}} = \begin{pmatrix} \lambda_{rel}^0 & -\lambda_{rel}^3 & \lambda_{rel}^2 \\ \lambda_{rel}^3 & \lambda_{rel}^0 & -\lambda_{rel}^1 \\ -\lambda_{rel}^2 & \lambda_{rel}^1 & \lambda_{rel}^0 \end{pmatrix},$$

$F_g = W_\eta J W_\eta - W_{J\eta} W_\eta$ – матрица линеаризованного гравитационного момента, W_η и $W_{J\eta}$ – кососимметрические матрицы векторов $\boldsymbol{\eta}$ и $J\boldsymbol{\eta}$ соответственно.

Для различного набора измерительных датчиков фильтрующие алгоритмы будут отличаться моделью измерений (2), линеаризованной матрицей измерений H (3). Эти значения приведены в табл. 2. Значения матрицы ошибок измерений R имеют для всех наборов датчиков диагональный вид. На диагонали матрицы стоят дисперсии ошибок соответствующих датчиков, характеристики которых приведены в табл. 1.

Например, для фильтра, использующего измерения магнитометра и солнечного вектора, вектор измерений состоит из вектора геомагнитного поля \mathbf{b} и вектора направления на Солнце \mathbf{s} . Тогда вектор \mathbf{h} из (2) можно записать в виде

$$\mathbf{h} = \left[\left(A(\hat{\Lambda}_k^-) \mathbf{b}_o \right)^T \quad \left(A(\hat{\Lambda}_k^-) \mathbf{s}_o \right)^T \right]^T,$$

где A – матрица перехода из ОСК в ССК, записанная через оценку кватерниона $\hat{\Lambda}_k^-$, \mathbf{b}_o и \mathbf{s}_o – векторы магнитного поля и направления на Солнце, записанные в ОСК. Линеаризованная модель измерений записывается следующим образом:

$$\delta \mathbf{z}(t) = H(t) \delta \mathbf{x}(t).$$

Здесь $\delta \mathbf{z}(t)$ – малое изменение измерений при малом изменении вектора состояния $\delta \mathbf{x}(t)$ в момент времени t . Матрица чувствительности H имеет вид

$$H = \begin{pmatrix} W_{\hat{\mathbf{b}}} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\hat{\mathbf{s}}} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix},$$

где $W_{\hat{\mathbf{b}}}$, $W_{\hat{\mathbf{s}}}$ – кососимметрические матрицы прогноза измерений $\hat{\mathbf{b}} = A(\hat{\Lambda}_k^-)\mathbf{b}_o$, $\hat{\mathbf{s}} = A(\hat{\Lambda}_k^-)\hat{\mathbf{s}}_o$ соответственно.

2.3. Фильтрация с калибровкой

Для преодоления особенностей датчиков, связанных с неточным знанием и плавным изменением смещения поля измерений, могут использоваться модификации фильтра Калмана, которые позволяют оценивать смещение поля в режиме реального времени и тем самым улучшать точность определения углового движения. Для этого в вектор состояния добавляются дополнительные компоненты – смещение поля датчика. Обычно для плавно изменяющегося смещения поля предполагается, что производная смещения поля – это случайная величина с нулевым математическим ожиданием.

Рассмотрим следующую модель измерения датчика угловой скорости:

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} + \Delta\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\omega}}, \quad (8)$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\eta}_{\Delta\boldsymbol{\omega}}.$$

Здесь $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ – измерения датчика угловой скорости, $\boldsymbol{\omega}$ – истинное значение угловой скорости, $\Delta\boldsymbol{\omega}$ – смещение поля измерений, $\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\omega}}$ и $\boldsymbol{\eta}_{\Delta\boldsymbol{\omega}}$ – белые шумы угловой скорости и скорости изменения смещения поля соответственно $M\langle\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\omega}}\rangle = 0$ и $M\langle\boldsymbol{\eta}_{\Delta\boldsymbol{\omega}}\rangle = 0$.

Аналогично будем использовать следующую модель измерений магнитометра:

$$\tilde{\mathbf{b}} = A(\lambda_k^-)\mathbf{b}_o + \Delta\mathbf{b} + \boldsymbol{\eta}_{\mathbf{b}},$$

$$\Delta\dot{\mathbf{b}} = \boldsymbol{\eta}_{\Delta\mathbf{b}},$$

Здесь $\tilde{\mathbf{b}}$ – измерения магнитометра, \mathbf{b} – истинное значение магнитного поля, $\Delta\mathbf{b}$ – смещение поля измерений, $\boldsymbol{\eta}_{\mathbf{b}}$ и $\boldsymbol{\eta}_{\Delta\mathbf{b}}$ – белые шумы магнитного поля и скорости изменения смещения поля соответственно $M\langle\boldsymbol{\eta}_{\mathbf{b}}\rangle = 0$ и $M\langle\boldsymbol{\eta}_{\Delta\mathbf{b}}\rangle = 0$.

Возможны также модификации алгоритмов, использующих измерения датчиков угловой скорости, при которых вектор угловой скорости не входит в вектор измерений. Угловая скорость оценивается как измерения минус оцененное смещение поля. Это позволяет уменьшить размерность вектора состояния на 3 единицы, а следовательно, уменьшить сложность алгоритма за счет уменьшения размерности матриц, используемых фильтром Калмана.

Табл. № 2. Матрицы чувствительности для различных наборов датчиков

Датчики	Вектор измерений	Вектор состояния	Матрица измерений H
ЗД+ДУС+Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
ЗД+ДУС+Маг	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
ЗД+Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
ЗД+Маг	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
Маг+СД+ДУС	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
ЗД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
Маг+СД	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \\ W_{\mathbf{s}} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
Маг+ДУС	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} W_{\mathbf{b}} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
ЗД	λ	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$E_{3 \times 3}$

3. Исследование алгоритмов определения углового движения

3.1. Алгоритмы для определения движения и нахождения смещения нолей датчиков

Модель движения микроспутника (6) учитывает только основные воздействия, поэтому необходимо исследовать влияние неучтенных в модели возмущений на точность определения движения аппарата и найти такую матрицу параметров Q , которая бы минимизировала ошибку определения движения.

Рассмотрим матрицу шумов системы вида.

$$Q = \text{diag}(q_\lambda^2, q_\lambda^2, q_\lambda^2, q_\omega^2, q_\omega^2, q_\omega^2),$$

Тем самым, будем предполагать, что шумы уравнения движения не коррелируют между собой и одинаковы для всех компонент векторной части кватерниона, среднеквадратическая ошибка которых равна q_λ , и для компонент вектора угловой скорости со среднеквадратичной ошибкой q_ω . Для вычисления оценки точности определения ориентации по элементам асимптотического значения матрицы ошибок вектора состояния P_∞ будем рассматривать диагональные члены, соответствующие ошибке определения кватернионов (подробнее см в [7]). Среднеквадратическую ошибку определения компонент кватерниона оценим как наихудшую $\sigma_\lambda = \sqrt{\max(p_{11}, p_{22}, p_{33})}$, где p_{ii} – диагональные элементы матрицы P_∞ . Аналогично среднеквадратическую ошибку определения угловой скорости оценим как $\sigma_\omega = \sqrt{\max(p_{44}, p_{55}, p_{66})}$.

Каждому типу датчиков соответствуют свои особенности, которые могут влиять на точность определения движения или приводят к невозможности использования их измерений на некоторых участках орбиты. Рассмотрим основные из них:

- Звездный датчик – неспособен вычислить текущую ориентацию при засветке звездной камеры Солнцем, при ориентации камеры на Землю или при слишком высокой скорости вращения спутника.
- Солнечный датчик – не работает в тени Земли.
- Магнитометр – при использовании его измерений необходимо учитывать ошибку знания магнитного поля Земли (которая составляет до 400 нТ), а также ошибку измерений со стороны переменных магнитных полей аппаратуры КА.

- Датчик угловой скорости – его измерения имеют систематическую плавающую ошибку, которую желательно оценивать в режиме реального времени.

При использовании конкретных наборов датчиков также могут возникать особенности. Перечислим основные:

- **s-b-проблема** – при использовании одновременно измерений солнечных датчиков и магнитометра на участках орбиты, где векторы становятся почти коллинеарными, точность определения движения ухудшается. При коллинеарности векторов матрица измерений вырождается, пропадает наблюдаемость трехосной ориентации и оценки фильтра расходятся.

- **Дрейф** – при использовании измерений датчиков угловой скорости и одного векторного измерения (направления на Солнце или магнитного поля) нет наблюдаемости трехосной ориентации и при наличии систематической ошибки измерений датчиков угловой скорости на этапе интегрирования уравнений движения накапливается ошибка, что приводит к увеличению ошибки определения ориентации.

На рис. 3 приведен пример процесса сходимости оценок компонент кватерниона ориентации с использованием фильтра Калмана, основанного на измерениях звездного датчика и датчика угловой скорости. График отображает разницу оценок вектора состояния и точного значения вектора состояния, которое при моделировании точно известно. На рис. 4 и 5 приведена разность оценок и истинных значений углов ориентации и угловой скорости. В легенде графика отражено среднеквадратическое отклонение, вычисленное по измерениям последней минуты.

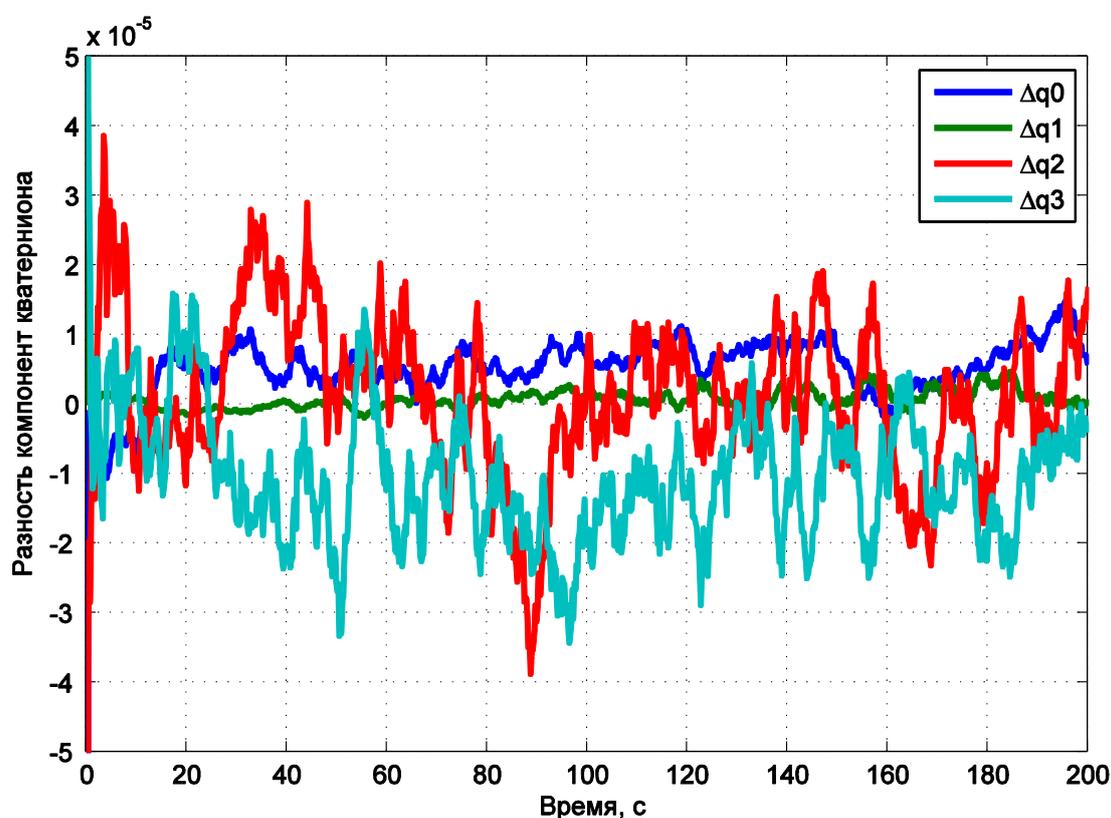


Рис.3. График разности оценок компонент кватерниона и их реального значения

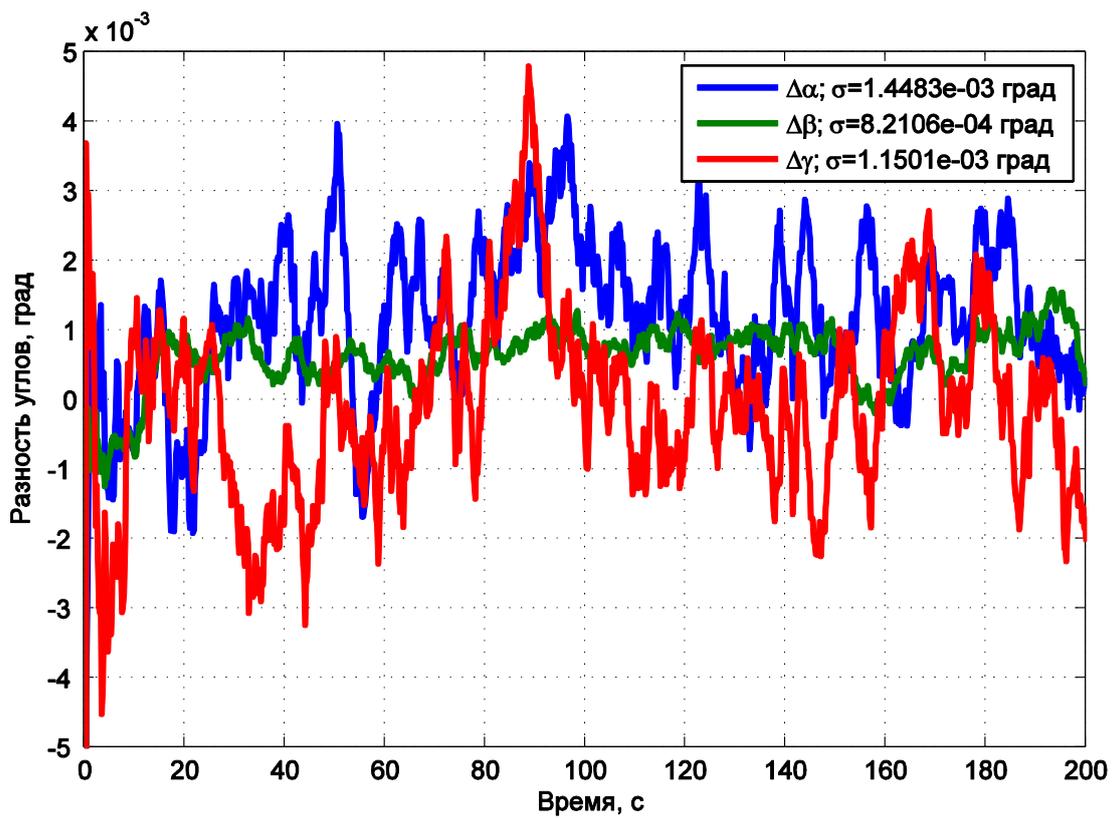


Рис.4. График разности оценок углов ориентации и их реального значения

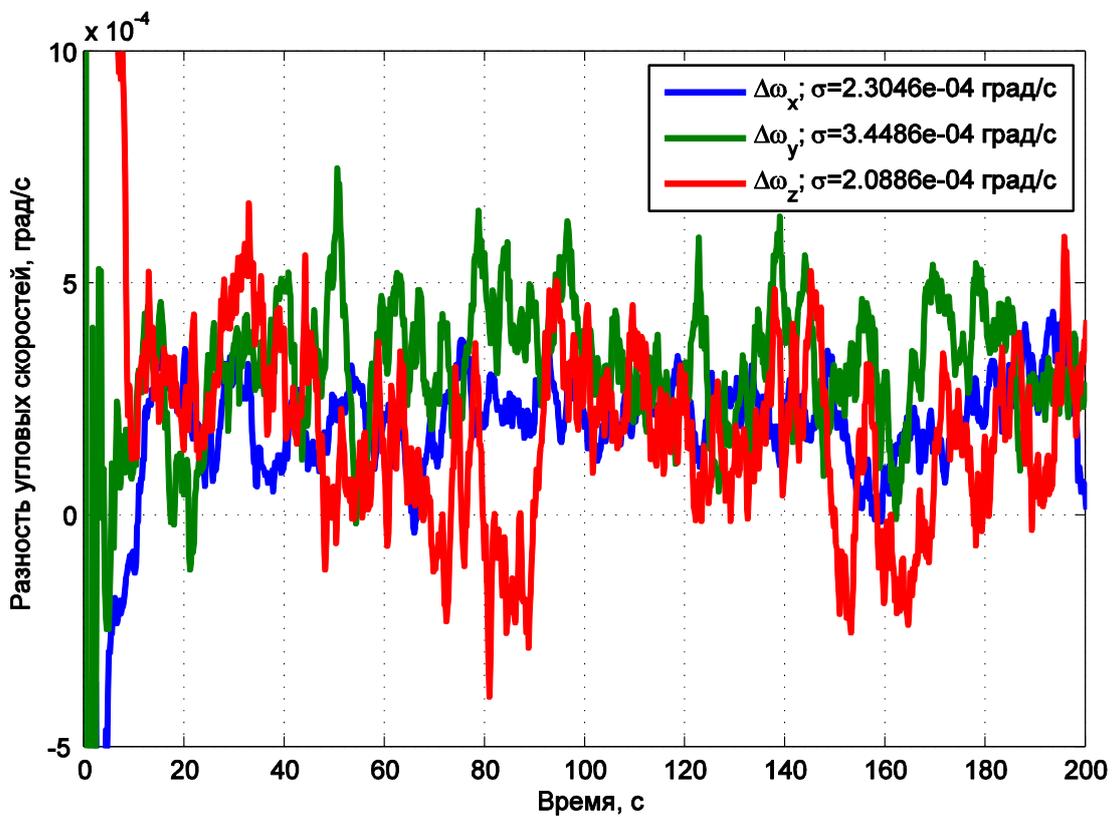


Рис.5. График разности оценок компонент угловой скорости и их реального значения

При моделировании работы алгоритмов для определения движения с калибровкой смещения полей датчиков предполагалось, что смещения поля датчика угловой скорости и магнитометра постоянны во времени, хотя в действительности они могут меняться. На рис. 6 изображен в качестве примера график разницы оцененного смещения поля датчика угловой скорости и реального значения для фильтра, работающего на измерениях звездного датчика и датчика угловой скорости. В легенде графика есть вычисленное среднеквадратическое отклонение оценки смещения. В на рис.7 приведен график разницы оценки смещения поля магнитометра и его реального значения для фильтра, использующего измерения магнитометра, солнечного датчика и датчика угловой скорости. Тут смещение поля задается в повороте единичного вектора направления магнитного поля, поэтому смещение измеряется в градусах. Как видно из графиков меньше чем за минуту работы фильтра Калмана оценки смещения поля сходятся от нулевого к реальным значениям.

В табл. 4 приведены максимальные точности определения движения с использованием заданного набора датчиков и при постоянном неучтенном возмущении на аппарат порядка $8 \cdot 10^{-7}$ Н·м. В таблице приведены основные характеристики алгоритмов определения ориентации – максимальная точность, параметры матрицы Q, при которых эта точность достигается. Из таблицы видно, что добавление измерений магнитометра и солнечного датчика к измерениям звездного датчика для совместной обработки не приводит к увеличению точности определения углового движения, так как звездный датчик имеет значительно более высокие точностные характеристики. Использовать измерения магнитометра совместно со звездным датчиком наиболее разумно только для нахождения смещения поля магнитометра. Фильтр Калмана, построенный на измерениях звездного датчика и датчика угловой скорости, не намного точнее фильтра, использующего только измерения звездного датчика, однако с помощью использования звездного датчика удается эффективно находить смещение поля датчика угловой скорости. При отсутствии измерений звездного датчика, наиболее точным является фильтр, использующий измерения магнитометра, солнечного датчика и датчика угловой скорости. На основе измерений этих трёх датчиков фильтры, позволяющие находить смещение поля магнитометра и датчика угловой скорости, позволяют определять угловое движение незначительно хуже по точности.

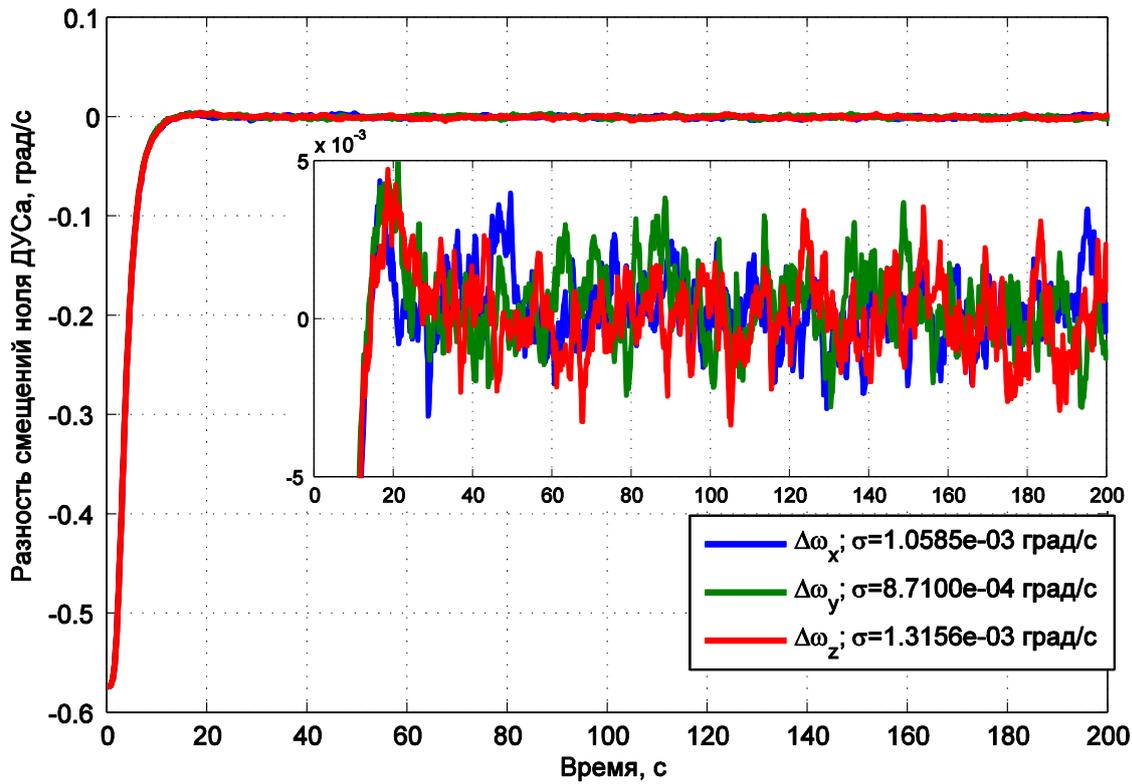


Рис.6. График разности оценок компонент смещения поля датчика угловой скорости и их реального значения

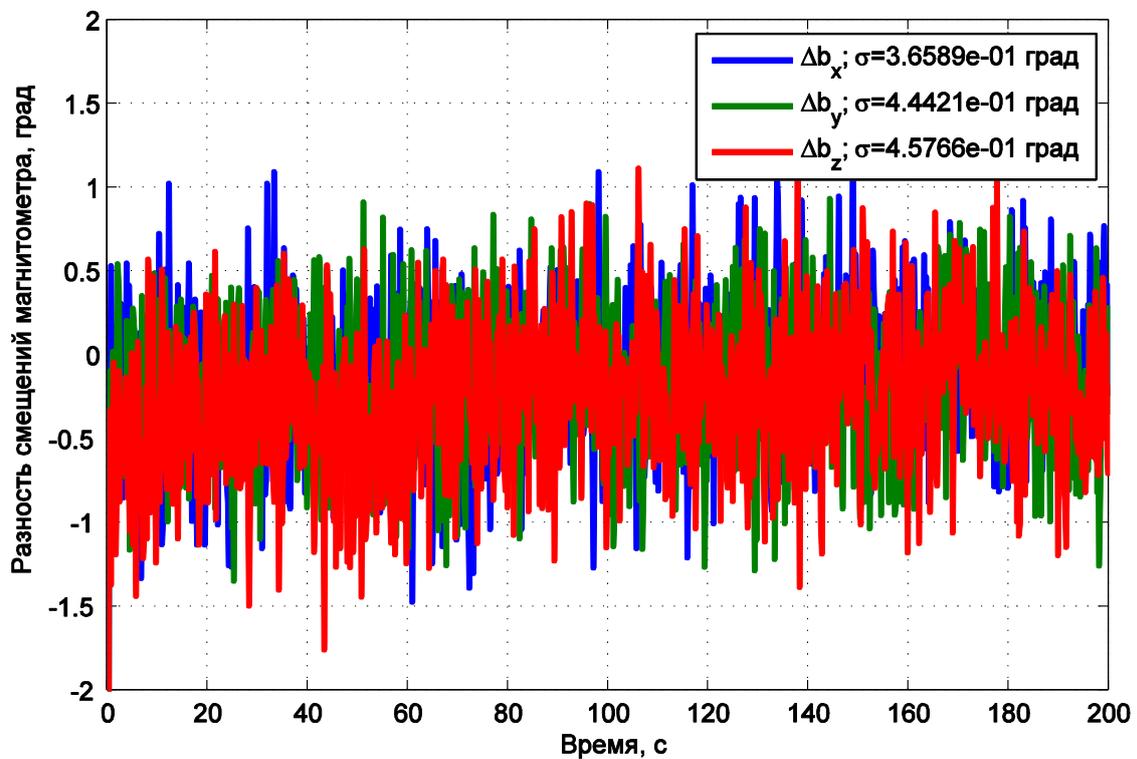


Рис.7. График разности оценок компонент смещения поля магнитометра и их реального значения

Табл. 3. Характеристики алгоритмов определения ориентации

Датчики	Вектор измерений	Вектор состояния	Параметры настройки $q_\lambda[s^{-1}]$ и $q_\omega[s^{-2}]$	Точность определения ориентации и угловой скорости
ЗД+ДУС+Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$ град, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с
ЗД+ДУС+Маг	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$ град, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с
ЗД+Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$ град, $6 \cdot 10^{-4}$ град/с
ЗД+Маг	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4} (q_{\Delta b})$	$7 \cdot 10^{-4}$ град, $6 \cdot 10^{-4}$ град/с, 80 нТл ($\sigma_{\Delta b}$)
Маг+СД+ДУС	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$5 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $4 \cdot 10^{-3}$ град/с
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-6} (q_{\Delta \omega})$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $4 \cdot 10^{-3}$ град/с, $5 \cdot 10^{-4}$ град/с ($\sigma_{\Delta \omega}$)
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \mathbf{b} \end{pmatrix}$	$5 \cdot 10^{-8}$, $3 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-1} (q_{\Delta b})$	$5 \cdot 10^{-2}$ град, $4 \cdot 10^{-3}$ град/с, 400 Т ($\sigma_{\Delta b}$)
ЗД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$ град, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с
		$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4} (q_{\Delta \omega})$	$5 \cdot 10^{-4}$ град, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с, $3 \cdot 10^{-3}$ град/с ($\sigma_{\Delta \omega}$)
Маг+СД	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{s} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$5 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$ град, $2 \cdot 10^{-2}$ град/с,
Маг+ДУС	$\begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \omega \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$ град, $5 \cdot 10^{-3}$ град/с,
ЗД	λ	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$1 \cdot 10^{-6}$, $1,2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$ град, $6 \cdot 10^{-4}$ град/с

3.2. Оценка действующих возмущений

Алгоритмы определения, как правило, используют модель движения спутника, учитывающую только основные воздействия. Однако, на аппарат могут воздействовать возмущения, модель которых либо слишком сложна для реализации на бортовом компьютере, либо природа возмущения может быть не до конца ясна или изучена. По этой причине можно построить такой алгоритм, который кроме определения движения оценивает ещё и возмущения, действующие на аппарат. Отслеживание этих возмущений позволяет улучшить точность определения движения.

Рассмотрим следующую динамическую модель движения аппарата:

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}, \Lambda) + \mathbf{d} + \boldsymbol{\eta}_d,$$

Здесь $\boldsymbol{\omega}$ – вектор угловой скорости аппарата, \mathbf{f} – некоторая нелинейная вектор-функция от состояния аппарата, \mathbf{d} – постоянная часть возмущающего момента, природа которого неизвестна, $\boldsymbol{\eta}_d$ – случайная часть возмущающего момента. Предполагается, что скорость изменения возмущающего момента является нормально распределенной случайной величиной $\dot{\mathbf{d}} = \boldsymbol{\eta}_d$, причем $M\langle \boldsymbol{\eta}_d \rangle = 0$, $M\langle \boldsymbol{\eta}_d \rangle = 0$, $M\langle \boldsymbol{\eta}_d \boldsymbol{\eta}_d^T \rangle = Q_d$, $M\langle \boldsymbol{\eta}_d \boldsymbol{\eta}_d^T \rangle = Q_d$.

Существует несколько подходов для отслеживания медленно изменяющихся возмущений. Можно добавить в вектор состояния вектор \mathbf{d} . Однако в этом случае случайная часть возмущений $\boldsymbol{\eta}_d$ и случайная скорость изменения возмущения $\boldsymbol{\eta}_d$ будут являться неизвестными, их ковариационные матрицы будут параметрами настройки.

Для того чтобы отслеживались ещё и случайные части возмущений и оценки фильтр были оптимальными с точки зрения минимизации среднеквадратичной ошибки, необходимо добавить в вектор состояния дополнительно параметры настройки, то есть элементы матрицы Q . Если предполагать, что шумы некоррелированы и одинаковы для кватерниона для угловой скорости и для скорости изменения возмущений, то требуется добавить в вектор состояния три дополнительных компоненты.

Преимуществом этой модификации фильтра является его высокая устойчивость к неучтенным в модели движения возмущениям и самонастройка для достижения наилучшей точности. Однако увеличение размерности вектора состояния приводит к увеличению объемов вычисления ковариационных матриц ошибок. Поэтому можно построить фильтр, который будет состоять из двух частей. Рассмотрим, например, вектор состояния фильтра Калмана в виде

$$\mathbf{x} = (\boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\omega}^T)^T.$$

Для параллельной оценки действующего возмущения \mathbf{d} построим следующий фильтр. Будем считать, что возмущение постоянно во времени и поэтому спрогнозированная оценка вектора равна

$$\hat{\mathbf{d}}_k^- = \hat{\mathbf{d}}_{k-1}^+$$

Прогноз ковариационной матрицы ошибки имеет вид:

$$P_{\mathbf{d}_k}^- = \lambda^{-1} P_{\mathbf{d}_{k-1}}^+,$$

где $\lambda \in (0,1]$ – некоторый множитель, характеризующий скорость сходимости фильтра. Для коррекции оценки текущего возмущения используется следующая процедура:

$$K_k^{\mathbf{d}} = P_k^{\mathbf{d}} (H_k^{\mathbf{d}})^T (H_k^{\mathbf{d}} P_k^{\mathbf{d}} (H_k^{\mathbf{d}})^T + R^{\mathbf{d}})^{-1},$$

$$\hat{\mathbf{d}}_k^+ = \hat{\mathbf{d}}_k^- + K_k^{\mathbf{d}} [\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, t_k)].$$

Здесь

$$H_k^{\mathbf{d}} = H \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_k^-}{\partial \mathbf{d}} \right|_{\mathbf{d}=\hat{\mathbf{d}}_k^-},$$

матрица чувствительности измерений к возмущениям $R^{\mathbf{d}}$ – некоторая матрица параметров. Матрица $\left. \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_k^-}{\partial \mathbf{d}} \right|_{\mathbf{d}=\hat{\mathbf{d}}_k^-}$ может вычисляться численно в процессе итерационной процедуры фильтра Калмана.

Рассмотрим, насколько улучшатся оценки фильтра Калмана в случае добавления дополнительной оценки действующего возмущения. При моделировании задается возмущение порядка $d = 10^{-6} \text{c}^{-2}$, все остальные параметры такие же как и в предыдущих примерах. На рис. 8 показан процесс сходимости параллельно работающего фильтра для оценки возмущения. За счет оценки действующего возмущения в режиме реального времени удастся улучшить точность определения ориентации и угловой скорости. В табл. 4 приведены характеристики фильтров Калмана с одновременной оценкой действующего возмущения. Имеет смысл его оценивать для фильтров, в которых оценивается также угловая скорость.

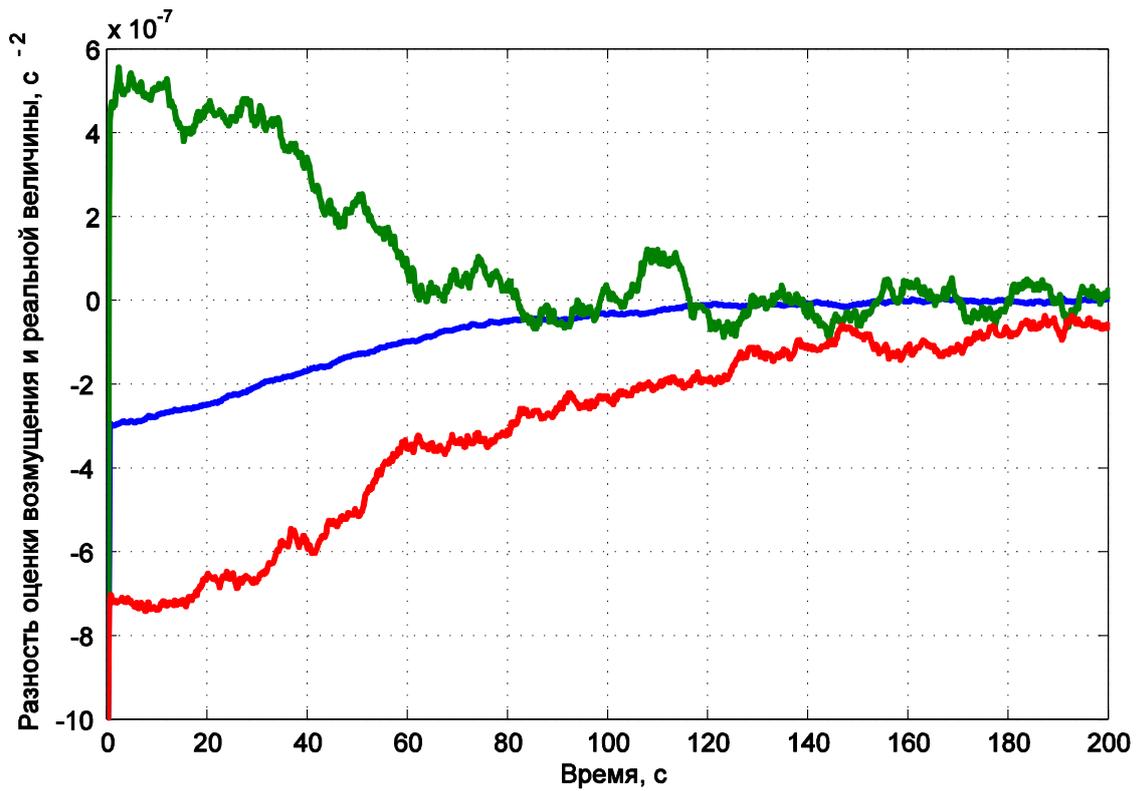


Рис. 8. График разности оценок компонент возмущения и реального значения

Табл. 4. Характеристики алгоритмов определения ориентации при оценке возмущения

Состав используемых датчиков	Вектор состояния	Точность определения ориентации, угловой скорости, смещения ноля (если есть) и возмущения	Параметры настройки:
ЗД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$8 \cdot 10^{-4}$ град, $1 \cdot 10^{-4}$ град/с, $5 \cdot 10^{-8}$ с $^{-2}$	$3 \cdot 10^{-7}$, $3 \cdot 10^{-7}$, $5 \cdot 10^{-6}$
ЗД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\omega \end{pmatrix}$	$8 \cdot 10^{-4}$ град, $7 \cdot 10^{-5}$ град/с, $1 \cdot 10^{-3}$ град/с, $5 \cdot 10^{-8}$ с $^{-2}$	$3 \cdot 10^{-7}$, $3 \cdot 10^{-7}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-6}$
Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$3 \cdot 10^{-2}$ град, $2 \cdot 10^{-3}$ град/с, $5 \cdot 10^{-8}$ с $^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-7}$
Маг+СД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\omega \end{pmatrix}$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $2 \cdot 10^{-3}$ град/с, $5 \cdot 10^{-4}$ град/с, $8 \cdot 10^{-7}$ с $^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-6}$, $5 \cdot 10^{-6}$

3.3. Фильтры с постоянной весовой матрицей

Для упрощения алгоритмов определения для маломощных бортовых компьютеров можно применить модификацию фильтра Калмана, которая использует постоянную весовую матрицу и не требует вычисления ковариационной матрицы ошибки в режиме реального времени. Это значит, что на этапе коррекции вектора состояния, который осуществляется по формуле

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + K[\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, t_k)],$$

весовая матрица K принимается постоянной. Однако, вычислительная простота алгоритма сопряжена с высокой чувствительности точности определения вектора состояния от выбора самой матрицы K . При выборе постоянной матрицы необходимо руководствоваться предположениями о характере шумов в системе, величине неучтенных возмущений и так далее. Разумно использовать такое значение матрицы K , которое она имеет для стандартного фильтра Калмана при квазистационарном движении после сходимости. Вычислительная сложность такого алгоритма минимальна. Однако существует опасность применения такого алгоритма, так как при изменении динамики системы ковариационная матрица не будет отслеживать изменение ошибки. В табл. 5 приведены точностные характеристики алгоритмов определения движения.

Табл. 5. Характеристики алгоритмов определения ориентации при постоянной весовой матрице

Состав используемых датчиков	Вектор состояния	Точность определения ориентации, угловой скорости, смещения поля (если есть) и возмущения
ЗД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{d} \end{pmatrix}$	$8 \cdot 10^{-4}$ град, $1 \cdot 10^{-4}$ град/с, $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-2}$
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$2 \cdot 10^{-3}$ град, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с
ЗД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \Delta\omega \end{pmatrix}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ град, $3 \cdot 10^{-4}$ град/с
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\omega \end{pmatrix}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ град, $3 \cdot 10^{-4}$ град/с, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с,
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \Delta\omega \end{pmatrix}^*$	$1.5 \cdot 10^{-3}$ град, $5 \cdot 10^{-3}$ град/с, $4 \cdot 10^{-4}$ град/с,
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\omega \\ \mathbf{d} \end{pmatrix}$	$8 \cdot 10^{-4}$ град, $7 \cdot 10^{-5}$ град/с, $1 \cdot 10^{-3}$ град/с, $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-2}$
Маг+СД+ДУС	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\mathbf{b} \end{pmatrix}$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $5 \cdot 10^{-3}$ град/с, $6 \cdot 10^{-2}$ град
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \Delta\omega \end{pmatrix}^*$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $5 \cdot 10^{-3}$ град/с, $1 \cdot 10^{-3}$ град
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \Delta\omega \\ \mathbf{d} \end{pmatrix}$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $2 \cdot 10^{-3}$ град/с $5 \cdot 10^{-4}$ град/с $8 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-2}$
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	$2 \cdot 10^{-2}$ град, $2.2 \cdot 10^{-2}$ град/с
Маг+СД	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \\ \mathbf{d} \end{pmatrix}$	$3 \cdot 10^{-2}$ град, $2 \cdot 10^{-3}$ град/с $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-2}$
	$\begin{pmatrix} \lambda \\ \omega \end{pmatrix}$	0.1 град, $5 \cdot 10^{-3}$ град/с

Заключение

В настоящей работе построены и исследованы алгоритмы для определения углового движения микроспутников с использованием измерений звездного датчика, датчика угловой скорости, магнитометра и солнечного датчика. Рассмотрены все комбинации типов датчиков, на основе которых возможно определить движение, найдены такие параметры алгоритмов, которые при заданном уровне возмущений обеспечивают наилучшую точность определения вектора состояния. На примере параметров датчиков, установленных на микроспутнике "ТаблетСат-Аврора" было проведено количественное сравнение точностных характеристик алгоритмов, которое показало, в частности, что использование низкоточных измерений магнитометра и солнечного датчика совместно с измерениями звездного датчика не приводит к увеличению точности определения движения, и, поэтому, бессмысленно. Также показано, что алгоритмы, на основе измерений магнитометра, солнечного датчика и датчика угловой скорости, позволяющие определять смещение ноля датчиков, незначительно уступают по точности алгоритму без калибровки.

Список литературы

1. <http://sputnix.ru/> (Сайт ООО "Спутник").
2. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Eng. 1960. V. 82. P. 35–45.
3. Kalman R.E., Bucy R.S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Eng. 1961. V. 83. P. 95–108.
4. Зотов Л.В. Теория фильтрации и обработка временных рядов. Курс лекций. М.: Физический факультет МГУ, 2010.
5. Дегтярёв А.А., Тайль Ш. Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2003. № 26. 35 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-26>
6. Wertz J.R. Spacecraft Attitude Determination and Control. Dordrecht/Boston, London: Acad. press, 1990.
7. Иванов Д.С. Метод исследования алгоритмов определения ориентации микроспутников и его верификация // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 80. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-80>

Содержание

Введение	3
1. Состав системы ориентации микроспутника "ТаблетСат-Аврора"	4
2. Построение алгоритмов	6
2.1. Расширенный фильтр Калмана.....	6
2.2. Модель движения и модель измерений	8
2.3. Фильтрация с калибровкой	10
3. Исследование алгоритмов определения углового движения	12
3.1. Алгоритмы для определения движения и нахождения смещения полей датчиков	12
3.2. Оценка действующих возмущений	18
3.3. Фильтры с постоянной весовой матрицей.....	21
Заключение	23
Список литературы.....	23