

**ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И КАЛИБРОВКА
АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО
ПОЛОЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СПУТНИКА ЗЕМЛЕОБОЗОРА**

Введение. Рассматривается астроинерциальная система определения углового положения (СОУП) маневрирующего космического аппарата (КА). Данная система содержит инерциальный измерительный модуль (ИИМ) в виде жёстко закреплённых на корпусе КА гироскопических измерителей приращений квазиординат углового положения КА и астрономическую систему (АС) на основе звёздных датчиков с широким полем зрения, также закреплённых на корпусе спутника. СОУП входит в состав бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которая решает общую задачу навигации – определения как ориентации, так и местоположения спутника. Предложенный в [1, 2] подход к обработке сигналов в астроинерциальной СОУП развивается для маневрирующих КА оптико-электронного наблюдения Земли. Проблемы такой обработки связаны с интегрированием кинематических уравнений по информации только о векторе дискретных приращений угловых квазиординат (псевдоуглов), получаемого ИИМ при наличии шумов измерений, с калибровкой (идентификацией и компенсацией вектора дрейфа ИИМ \mathbf{b}^s и погрешности m масштабного коэффициента измерения вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$) и с юстировкой – идентификацией и компенсацией погрешности взаимной угловой установки систем координат ИИМ и АС на основе доступных сигналов АС с периодом дискретности T_o , существенно превосходящего периоды дискретности выходных сигналов ИИМ T_q и СОУП T_p .

При решении подобных задач многими авторами использовались кинематические параметры в виде кватерниона $\Lambda = (\lambda_0, \boldsymbol{\lambda})$, матрицы ориентации \mathbf{C} , вектора Эйлера $\boldsymbol{\phi} = \mathbf{e} \theta$, вектора конечного поворота $\boldsymbol{\theta} = 2\mathbf{e} \operatorname{tg}(\theta/2)$ и др. При этом для медленных угловых движений КА с малой вариацией угла θ и практически неизменным направлением орта Эйлера \mathbf{e} на периоде дискретности T_o интегрирование кинематических соотношений для вектора Эйлера и получение значений кватерниона $\Lambda_k \equiv \Lambda(t_k)$ выполнялось по схеме

$$\delta\boldsymbol{\phi}_k = \mathbf{i}_k^\omega = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \boldsymbol{\omega}(\tau) d\tau \equiv \mathbf{Int}(t_k, T_o, \boldsymbol{\omega}(t)), \quad \boldsymbol{\phi}_k + \delta\boldsymbol{\phi}_k = \boldsymbol{\phi}_{k+1} \Rightarrow \mathbf{C}_{k+1} \Rightarrow \Lambda_{k+1}, \quad \text{где } \delta\boldsymbol{\phi}_k = \delta\theta_k \mathbf{e}_k,$$

$t_{k+1} = t_k + T_o, \quad k \in \mathbb{N}_0 \equiv [0, 1, 2, \dots]$. Угловое движение маневрирующего КА землеобзора осуществляется на последовательности временных интервалов выполнения маршрутов и

поворотных маневров (ПМ) с переменным направлением вектора $\boldsymbol{\omega}$, модуль которого может достигать 3 град/сек. В статье рассматривается классическая схема СОУП в составе БИНС, где основным измерителем является ИИМ с периодом T_q ; сигналы АС с периодом дискретности T_o , кратном периоду T_q , используются для его калибровки и юстировки.

Применяются методы полиномиальной аппроксимации и интерполяции, а также нелинейный дискретный наблюдатель Луенбергера, где выполняется численное интегрирование кинематического уравнения для вектора модифицированных параметров Родрига (МПР) $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{e} \operatorname{tg}(\theta/4)$, который связан с кватернионом $\boldsymbol{\Lambda}$ соотношениями

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\lambda} / (1 + \lambda_0) \quad (\boldsymbol{\Lambda} \Rightarrow \boldsymbol{\sigma}), \quad \boldsymbol{\lambda} = 2\boldsymbol{\sigma} / (1 + \sigma^2); \quad \lambda_0 = (1 - \sigma^2) / (1 + \sigma^2) \quad (\boldsymbol{\sigma} \Rightarrow \boldsymbol{\Lambda})$$

и имеет кинематические уравнения $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{F}^\sigma(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\omega}) \equiv \frac{1}{4}(1 - \sigma^2)\boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma} \langle \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\omega} \rangle$;

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{F}^\omega(\boldsymbol{\sigma}, \dot{\boldsymbol{\sigma}}) \equiv 4[(1 - \sigma^2)\dot{\boldsymbol{\sigma}} - 2(\boldsymbol{\sigma} \times \dot{\boldsymbol{\sigma}}) + 2\boldsymbol{\sigma} \langle \dot{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\sigma} \rangle] / (1 + \sigma^2)^2$$

при стандартном обозначении $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$ скалярного произведения векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} .

Постановка задач. Исходная измерительная информация с частотой ≈ 3 КГц предварительно обрабатывается в ИИМ и в результате от ИИМ поступают значения вектора приращений квазиординат $\mathbf{i}_{m_s}^{g\omega}, s \in N_0$ с периодом $T_q \ll T_o$, а от АС – измеренные значения кватерниона $\boldsymbol{\Lambda}_{mk}^a, k \in N_0$ с периодом T_o :

$$\mathbf{i}_{m_s}^{g\omega} = \mathbf{Int}(t_s, T_q, \boldsymbol{\omega}_m^g(t)) + \boldsymbol{\delta}_s^n; \quad \boldsymbol{\omega}_m^g(t) \equiv (1 + m)\mathbf{S}^\Delta(\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{b}^g); \quad \boldsymbol{\Lambda}_{mk}^a = \boldsymbol{\Lambda}_k \circ \boldsymbol{\Lambda}_k^n. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\omega}_m^g(t)$ представляет измеряемый вектор угловой скорости КА в базисе \mathbf{G} ИИМ с учётом неизвестных малых и медленных вариаций вектора $\mathbf{b}^g = \mathbf{b}^g(t)$ дрейфа ИИМ по угловой скорости; ортогональная матрица $\mathbf{S}^\Delta(t)$ описывает погрешности угловой установки базиса \mathbf{G} относительно базиса \mathbf{A} АС; скалярная функция $m = m(t)$ представляет неизвестную медленную вариацию масштабного коэффициента ИИМ; учтены центрированные гауссовские шумы $\boldsymbol{\delta}_s^n$ со среднеквадратичным отклонением (СКО) σ^b и $\boldsymbol{\Lambda}_k^n$ с СКО σ^a в выходных сигналах ИИМ и АС соответственно. Предполагается малая вариация масштабного коэффициента ИИМ, когда справедливо $1 - m^2 \cong 1$. Ставятся задачи дискретной фильтрации измерений ИИМ с периодом T_q , калибровки и юстировки СОУП по сигналам АС с периодом T_o , а также цифровой фильтрации выходных сигналов СОУП с периодом T_p с получением дискретных значений

кватерниона Λ_l^f и вектора угловой скорости ω_l^f , $l \in N_0$, которые используются для управления ориентацией.

Подход к решению задач. Формирование оценки $\hat{\mathbf{b}}_k^g$ вектора дрейфа ИИМ, постоянной на периоде T_o , выполняется в каждый момент времени t_k с помощью нелинейного дискретного наблюдателя Луенбергера, а оценки $\hat{\mathbf{S}}_k^\Delta$ и \hat{m}_k регулярно формируются off-line, т.е. на основе обработки доступной измерительной информации, накопленной на длительных временных интервалах [1, 2]. При дискретной фильтрации измерений вектора $\mathbf{i}_{m_s}^{g\omega}$ в (1) с целью подавления дискретного шума ИИМ δ_s^n применяется сочетание аппроксимации полиномом 3-го порядка $\tilde{\mathbf{i}}_k^{g\omega}(\tau)$ в скользящем окне 8 измерений по методу наименьших квадратов и сплайновой интерполяции по центрам смежных скользящих окон полиномом 5-го порядка $\hat{\mathbf{i}}_k^{g\omega}(\tau) = \tilde{\mathbf{i}}_k^{g\omega}(\tau) - \hat{\mathbf{b}}_k^g \tau$ для локального времени $\tau = t - kT_o \in [0, T_o]$ (рисунок 1). В базисе \mathbf{A} оценка вектора приращений квазиординат $\hat{\mathbf{i}}_s^\omega$, $s \in N_0$ формируется по соотношению $\hat{\mathbf{i}}_s^\omega = (1 - \hat{m}_k)(\hat{\mathbf{S}}_k^\Delta)^t \hat{\mathbf{i}}_s^{g\omega}$. Погрешности цифровой фильтрации выходных сигналов СОУП представлены на рисунке 2. Авторские методы калибровки и юстировки СОУП по сигналам АС кратко представлены в [3].

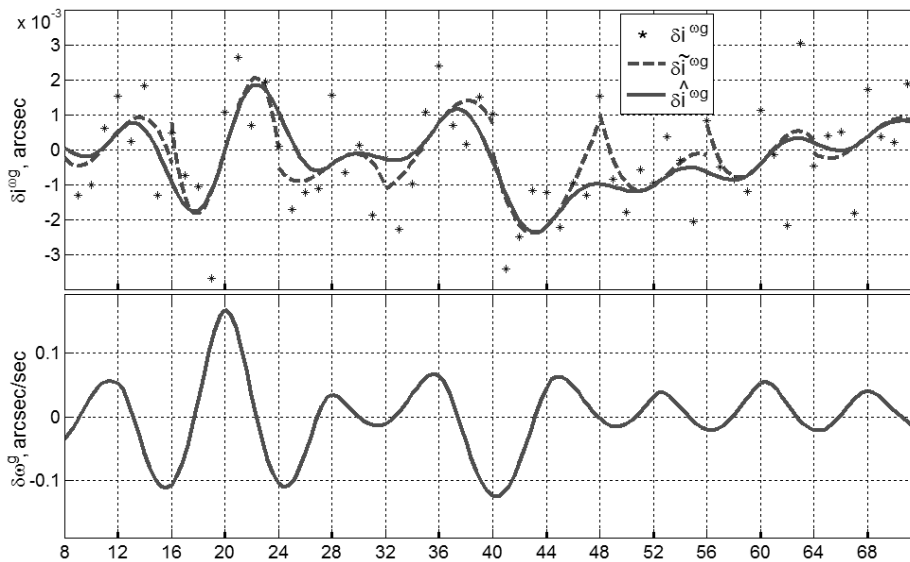


Рисунок 1 – Погрешности двухпроходной техники фильтрации измерений ИИМ

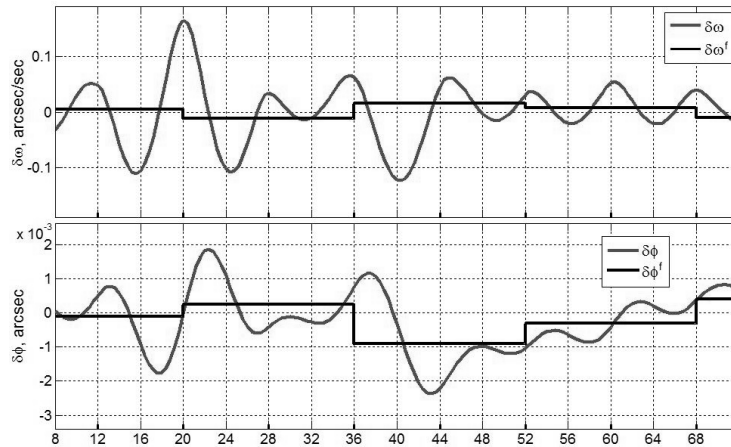


Рисунок 2 – Погрешности цифровой фильтрации выходных сигналов СОУП

Результаты компьютерной имитации. Пусть для КА на солнечно-синхронной орбите высотой $H = 600$ км и наклоном $i = 97,8$ град имеется задание на опико-электронную съёмку окрестностей двух российских столиц (рисунок 3) в такой последовательности временных интервалов:

- (i) ориентация корпуса КА в орбитальном базисе $\forall t \in [0, 840)$ с;
- (ii) поворотный манёвр ПМ1 длительностью 40 с $\forall t \in [840, 880)$ с;
- (iii) маршрут М1 съёмки с выравниванием продольной скорости движения изображения длительностью 40 с $\forall t \in [880, 920)$ с при начальной точке с долготой $L = 54,3$ град, широтой $B = 38,4$ град и геодезическим азимутом $A = -11$ град;
- (iv) поворотный манёвр ПМ2 длительностью 55 с $\forall t \in [820, 975)$ с;
- (v) маршрут М2 трассовой съёмки длительностью 20 с $\forall t \in [975, 995)$ при начальных углах крена $\phi_1 = 14$ град и тангажа $\phi_3 = 0$ ориентации КА в орбитальном базисе.

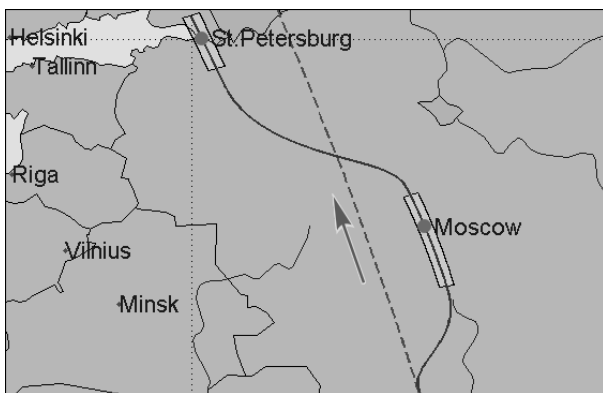


Рисунок 3 – Маршруты съёмки двух российских столиц на карте

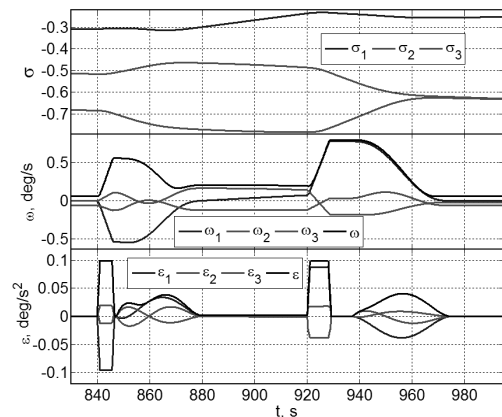


Рисунок 4 – Закон углового наведения КА при съёмке двух столиц

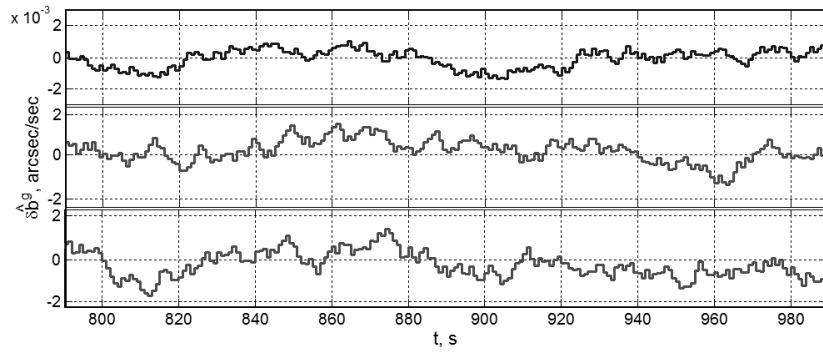


Рисунок 5 – Погрешности оценки вектора дрейфа ИИМ в базисе G

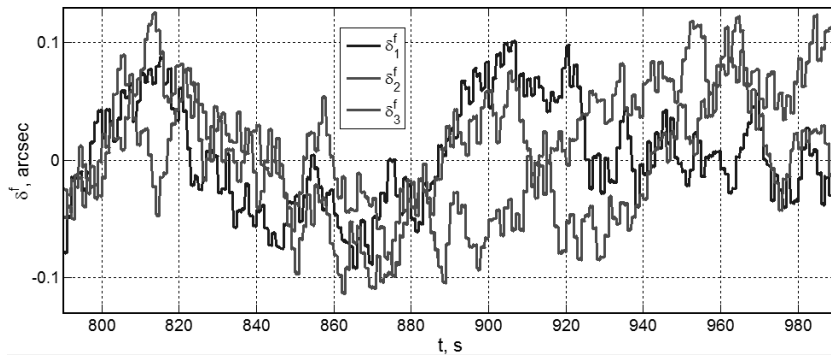


Рисунок 6 – Погрешности СОУП при определении ориентации КА

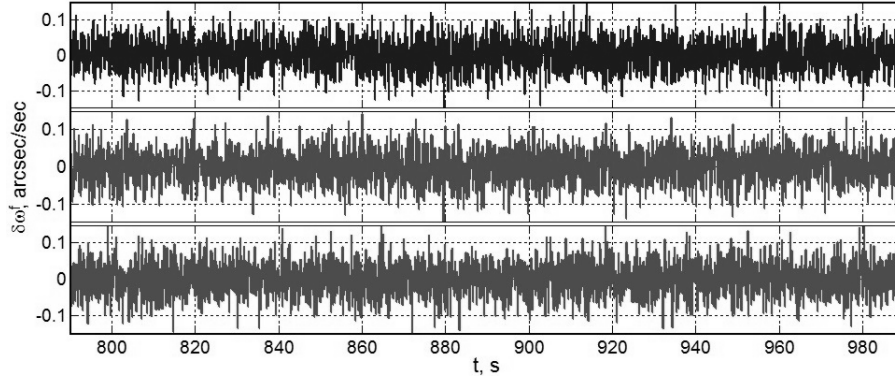


Рисунок 7 – Погрешности СОУП при определении вектора угловой скорости

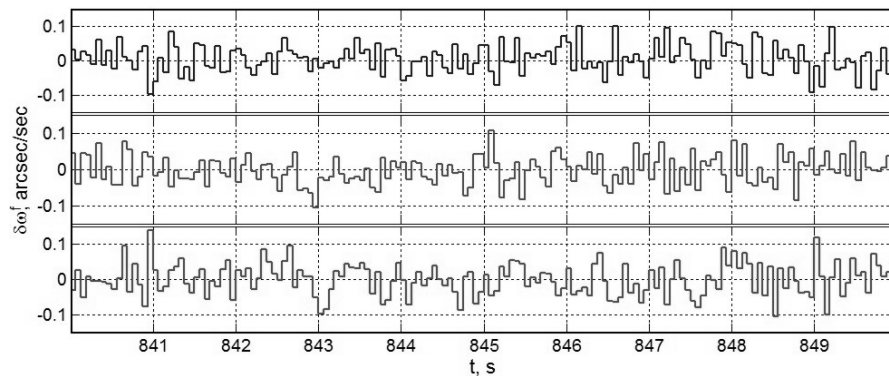


Рисунок 8 – Погрешности СОУП при определении угловых скоростей (фрагмент рисунка 7)

Закон наведения (программное угловое движение) КА землеобзора задаётся вектором МПР $\sigma^p(t)$ (рисунок 2). При имитации были приняты СКО $\sigma^a = 0,33$ угл. сек на частоте 1 Гц для погрешности АС и $\sigma^b = 0,001$ угл. сек на частоте 128 Гц для шумов измерений вектора псевдоуглов $\mathbf{i}_{ms}^{g\omega}$. Параметры наблюдателя Луенбергера выбраны из условия близости его качества к качеству оценки дрейфа ИИМ фильтром Калмана, когда тестовый вектор дрейфа ИИМ $\mathbf{b}^g = \{1; -0,8; 0,3\}$ угл. сек/сек восстанавливается за время ≈ 60 . На рисунке 5 представлены погрешности $\delta \hat{\mathbf{b}}_k^g = \mathbf{b}_k^g - \hat{\mathbf{b}}_k^g$ оценки вектора дрейфа ИИМ в базисе \mathbf{G} . В моменты времени t_l с периодом $T_p = 0,125$ с (частота 8 Гц) погрешность оценки ориентации представляется вектором $\delta_l = 4\sigma_l^\delta$, где вектор МПР σ_l^δ соответствует угловому рассогласованию. Цифровая фильтрация вектора δ_l с частотой 8 Гц даёт вектор $\delta^f(t)$, его компоненты изображены на рисунке 6. На рисунках 7, 8 приведены погрешности СОУП при определении вектора угловой скорости и цифровой фильтрации значений его компонентов с той же частотой 8 Гц, (рисунок 2).

Работа поддержана РФФИ (грант 14-08-01091) и Отделением ЭММПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 13).

Библиографический список

1. Somov, Ye.I. Multiple algorithms for filtration, integration and calibration of a strap-down inertial system for a spacecraft attitude determination // Proceedings of 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2009. – P. 110-112.
2. Somov, Ye.I., Butyrin, S.A. Digital signal processing, calibration and alignment of a strap-down inertial system for attitude determination of an agile spacecraft // Proceedings of 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigational Systems. – 2010. – P. 81-83.
3. Сомов, Е.И. Полетная юстировка и калибровка астроинерциальной системы для определения ориентации маневрирующего информационного спутника [Текст] / Е.И. Сомов, С.А. Бутырин С.А. // Материалы 27 конференции памяти Н.Н. Острякова. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор». – 2012. – С. 18-20.