

УДК 681.51

ОЦЕНКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ*

**Н.Е. Зубов^{1,2}, Е.А. Микрин^{1,2}, А.С. Олейник^{1,3},
В.Н. Рябченко^{1,2}, Д.Е. Ефанов¹**

¹ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва”,
Королёв, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: Nikolay.Zubov@rsce.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: nezubov@bmstu.ru

³Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация

Реализация режима орбитальной ориентации основана на использовании датчиковой аппаратуры, измеряющей углы положения космического аппарата относительно опорной системы координат и угловые скорости вращения аппарата относительно инерциального пространства. В случае отказа последнего выполнение орбитальной стабилизации невозможно и соответственно в режиме реального времени требуется построение бортовых алгоритмов оценки вектора угловой скорости по результатам измерений с использованием датчика углового положения. С помощью метода точного размещения полюсов получено аналитическое решение задачи синтеза алгоритма оценки угловой скорости вращения космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали, дающего показания двух углов положения. Приведены результаты математического моделирования и оценена возможность реализации разработанного алгоритма в реальном масштабе времени. Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность работы алгоритма.

Ключевые слова: космический аппарат, метод точного размещения полюсов, датчик местной вертикали, угловая скорость, алгоритм оценки.

THE SPACECRAFT ANGULAR VELOCITY ESTIMATION IN THE ORBITAL STABILIZATION MODE BY THE RESULTS OF THE LOCAL VERTICAL SENSOR MEASUREMENTS

**N.E. Zubov^{1,2}, E.A. Mikrin^{1,2}, A.S. Oleynik^{1,3},
V.N. Ryabchenko^{1,2}, D.E. Efanov¹**

¹OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”,
Korolev, Moscow region, Russian Federation
e-mail: Nikolay.Zubov@rsce.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: nezubov@bmstu.ru

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny,
Moscow region, Russian Federation

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-11-00046).

Implementation mode orbital orientation is based on the use of sensor equipment, measuring the spacecraft position angles relative to the directional reference and the angular velocity of spacecraft rotation relatively inertial space. In case of failure occurrence of angular velocity sensor the orbital stabilization implementation is impossible and consequently in real-time we need to make on-board estimation algorithms for angular velocity vector by the results of measurements using an angular position sensor. Using the exact placement of the poles method the analytic solution of the synthesis problem of estimation algorithm for angular velocity of the spacecraft rotation in the orbital stabilization mode by the results of local vertical sensor measuring was obtained. The mathematical simulation results are given and the possibility implementation of the developed algorithm is assessed in real-time. Also the simulation results are confirming high efficiency of the algorithm operation.

Keywords: spacecraft, exact placement of the poles method, local vertical sensor, angular velocity, estimation algorithm.

Введение. Задача построения и стабилизации режима орбитальной ориентации [1–3] — одна из наиболее распространенных в практике полетов космических аппаратов (КА) независимо от их целевого назначения. Как правило, реализация указанного режима основана на использовании датчиковой аппаратуры, измеряющей углы положения КА относительно опорной системы координат и угловые скорости вращения КА относительно инерциального пространства. При отказе последнего выполнение орбитальной стабилизации невозможно, следовательно, актуальным является построение бортовых алгоритмов оценки вектора угловой скорости по результатам измерений с помощью датчика углового положения в режиме реального времени. Особенность многих КА — применение в качестве измерителя углового положения построителя местной вертикали (ИКВ) [4], который измеряет только два угла (угол крена и угол тангажа). Настоящая статья посвящена решению задачи аналитического синтеза алгоритма оценки угловой скорости КА в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали. В основу синтеза алгоритма положен метод точного размещения полюсов [2].

Метод точного размещения полюсов при решении задач наблюдения. Рассмотрим линейную многомерную динамическую систему, заданную в пространстве состояний уравнениями вида [4]

$$\mathcal{D}\mathbf{x} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u}; \quad \mathbf{y} = C\mathbf{x}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ — вектор входа; $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ — вектор выхода; \mathbb{R} — множество действительных чисел; \mathcal{D} — символ, обозначающий либо оператор дифференцирования $\mathcal{D}\mathbf{x}(t) = \dot{\mathbf{x}}(t)$, либо оператор сдвига $\mathcal{D}\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t + 1)$.

Пусть пара матриц (A, C) полностью наблюдаемая, т.е. выполняется условие Калмана

$$\text{rank} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-m} \end{pmatrix} = n,$$

тогда можно построить наблюдатель, позволяющий по векторам входа \mathbf{u} и выхода \mathbf{y} оценивать вектор состояния \mathbf{x} объекта. Если наблюдатель формирует оценку всего вектора \mathbf{x} , то утверждают о наблюдателе полного ранга, если оценивается только некоторая часть этого вектора, то наблюдатель называют редуцированным.

Наблюдатель полного ранга определяется по уравнению

$$\mathcal{D}\hat{\mathbf{x}} = (A - LC)\hat{\mathbf{x}} + L\mathbf{y} + B\mathbf{u}.$$

Здесь $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ — состояние наблюдателя, представляющее собой искомую оценку; L — матрица обратной связи наблюдателя.

Для решения задачи синтеза наблюдателя (определения матрицы L) можно применять любой метод модального управления. Так же, как и в работе [5], воспользуемся методом, приведенным в работах [2, 6]. Введем многоуровневую декомпозицию системы (1), представляемую парой матриц (A, C) :

нулевой (исходный) уровень

$$A_0 = A^T, \quad B_0 = C^T; \quad (2)$$

k-й уровень $\left(k = \overline{1, J}, J = \text{ceil}\left(\frac{n}{m} - 1\right)\right)$

$$A_k = B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}^{\perp-}, \quad B_k = B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}.$$

Здесь B_i^\perp — аннулятор (делитель нуля) матрицы B_i , $B_i^\perp B_i = 0$; $B_i^{\perp-}$ — 2-полуобратная матрица для B_i , т.е. матрица, удовлетворяющая условиям регулярности

$$B_i^\perp B_i^{\perp-} B_i^\perp = B_i^\perp, \quad B_i^{\perp-} B_i^\perp B_i^{\perp-} = B_i^{\perp-}.$$

В соответствии с работой [5] искомая матрица $L = L_0 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ вычисляется по рекурсивным формулам

$$L_J = B_J^+ A_J - \Phi_J B_J^+;$$

$$L_k = B_k^- A_k - \Phi_k B_k^-; \quad B_k^- = L_{k+1} B_k^+ + B_k^+, \quad k = \overline{0, J-1},$$

и обеспечивает точное заданное размещение полюсов. Это действительно так, поскольку все элементы множества собственных значений $\text{eig}(A - LC)$ совпадают с собственным значением заданных устойчивых матриц Φ_i размером $m \times m$, $i = \overline{0, J}$. Здесь B_0^+, \dots, B_J^+ — псевдообратные матрицы Мура–Пенроуза. Таким образом, для синтеза рассматриваемого здесь наблюдателя полного порядка необходимо:

1) провести линеаризацию системы для дальнейшей возможности применения алгоритма синтеза наблюдателя для линейных систем [7];

2) воспользоваться следующим алгоритмом синтеза наблюдателя состояния полного ранга:

— задать матрицы

$$A_0 = A^T; \quad B_0 = C^T;$$

— вычислить

$$J = \text{ceil} \left(\frac{n}{m} \right) - 1;$$

— задать матрицы $\Phi = \Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_J$ такие, что желаемый спектр наблюдателя состояния составляет

$$\bigcup_{i=1}^{J+1} \text{eig}(\Phi_{i-1});$$

— определить ортогональный аннулятор B_{k-1}^\perp , а затем матрицы

$$A_k = B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}^{\perp T};$$

$$B_k = B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}, \quad k = \overline{1, J};$$

— последовательно вычислить матрицы

$$L_J^T = \Phi_J B_J^+ - B_J^+ A_J;$$

$$B_k^- = B_k^+ - L_{k+1}^T B_k^\perp; \quad (3)$$

$$L_k^T = \Phi_k B_k^- - B_k^- A_k, \quad k = \overline{J-1, 0}.$$

Оценка угловой скорости КА по результатам измерения датчика местной вертикали. Движение КА как твердого тела вокруг центра масс описывается системой динамических уравнений Эйлера:

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y\omega_z = M_x;$$

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_x\omega_z = M_y; \quad (4)$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x\omega_y = M_z,$$

где J_x, J_y, J_z — главные моменты инерции КА; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции угловой скорости КА на оси системы координат, жестко связанной с аппаратом; M_x, M_y, M_z — моменты внешних сил.

Для описания движения КА в базовой системе координат необходимо знать кинематические соотношения, выражающие зависимость проекций угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ от положения связанной системы координат относительно базовой. Эта зависимость устанавливает-

ся с помощью трех углов Эйлера: угол крена γ ; угол курса ψ ; угол тангажа ϑ .

При ориентации аппарата в орбитальной системе координат:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\gamma} + (\Omega - \dot{\vartheta}) \sin \psi; \\ \omega_y &= \dot{\psi} \cos \gamma - (\Omega - \dot{\vartheta}) \sin \gamma \cos \psi; \\ \omega_z &= -(\Omega - \dot{\vartheta}) \cos \gamma \cos \psi - \dot{\psi} \sin \gamma.\end{aligned}\tag{5}$$

Дифференцируем кинематические уравнения (5):

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_x &= \ddot{\gamma} + (\dot{\Omega} - \ddot{\vartheta}) \sin \psi + (\Omega - \dot{\vartheta}) \dot{\psi} \cos \psi; \\ \dot{\omega}_y &= \ddot{\psi} \cos \gamma - \dot{\psi} \dot{\gamma} \sin \gamma - (\dot{\Omega} - \ddot{\vartheta}) \sin \gamma \cos \psi - \\ &\quad - (\Omega - \dot{\vartheta}) (\dot{\gamma} \cos \gamma \cos \psi - \dot{\psi} \sin \gamma \sin \psi); \\ \dot{\omega}_z &= -(\dot{\Omega} - \ddot{\vartheta}) \cos \gamma \cos \psi + (\Omega - \dot{\vartheta}) (\dot{\gamma} \sin \gamma \cos \psi + \\ &\quad + \dot{\psi} \cos \gamma \sin \psi) - \ddot{\psi} \sin \gamma - \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \gamma.\end{aligned}\tag{6}$$

После линеаризации системы (5) и (6) примут следующий вид:

$$\omega_x = \dot{\gamma} + \Omega \psi; \quad \omega_y = \dot{\psi} - \Omega \gamma; \quad \omega_z = \dot{\vartheta} - \Omega;\tag{7}$$

$$\dot{\omega}_x = \ddot{\gamma} + \Omega \dot{\psi}; \quad \dot{\omega}_y = \ddot{\psi} - \Omega \dot{\gamma}; \quad \dot{\omega}_z = \ddot{\vartheta}.\tag{8}$$

Подставляя (7) и (8) в (4), получаем

$$\begin{aligned}J_x \ddot{\gamma} + \Omega^2 (J_z - J_y) \gamma + \Omega (J_x + J_y - J_z) \dot{\psi} &= M_x; \\ J_y \ddot{\psi} + \Omega^2 (J_z - J_x) \psi - \Omega (J_x + J_y - J_z) \dot{\gamma} &= M_y; \\ J_z \ddot{\vartheta} &= M_z.\end{aligned}\tag{9}$$

Канал тангажа является автономным, его можно рассматривать независимо от движения по двум другим каналам. Каналы крена и курса взаимно связаны. Это объясняется наличием угловой скорости орбитальной системы координат в плоскости орбиты, что приводит к возникновению гироскопических перекрестных связей:

$$\begin{aligned}J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y) \Omega \omega_y &= M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_z - J_x) \Omega \omega_x &= M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} &= M_z.\end{aligned}\tag{10}$$

Используя системы (8)–(10) для связанных каналов, получаем

$$\begin{pmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{J_z - J_y}{J_x} \Omega \\ \Omega & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{J_z - J_x}{J_y} \Omega & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \gamma \\ \omega_x \\ \psi \\ \omega_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix};$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{J_z - J_y}{J_x} \Omega \\ \Omega & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{J_z - J_x}{J_y} \Omega & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (12)$$

В соответствии с (2) и на основании (11), (12) для нулевого уровня дискретной системы с трактом h запишем

$$A_0 = A^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & a_{31}h & 0 \\ h & 1 & 0 & a_{42}h \\ a_{31}h & 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_{24}h & h & 1 \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$B_0 = C^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

В данном случае размерность вектора состояния составляет $n_x = 4$, вектора наблюдаемых переменных — $m_y = 1$, а число уровней декомпозиции, дополнительных к нулевому:

$$J = \text{ceil} \left(\frac{n_x}{m_y} \right) - 1 = 4 - 1 = 3.$$

Согласно введенной выше многоуровневой декомпозиции, матрицы A_k , B_k , $k = \overline{1, J}$, имеют вид

уровень 1

$$B_0^\perp = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$B_0^+ = (1 \ 0 \ 0 \ 0); \quad (16)$$

$$A_1 = B_0^\perp A_0 B_0^{\perp\tau} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & a_{42}h \\ 0 & 1 & 0 \\ a_{24}h & h & 1 \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$B_1 = B_0^\perp A_0 B_0 = \begin{pmatrix} h \\ a_{13}h \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (18)$$

уровень 2

$$B_1^\perp = \begin{pmatrix} -a_{13} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$B_1^+ = \begin{pmatrix} h & a_{13}h & 0 \\ a_{13}^2h^2 + h^2 & a_{13}^2h^2 + h^2 & 0 \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$A_2 = B_1^\perp A_1 B_1^{\perp\tau} = \begin{pmatrix} a_{13}^2 + 1 & -a_{13}a_{42}h \\ h - a_{13}a_{24}h & 1 \end{pmatrix}; \quad (21)$$

$$B_2 = B_1^\perp A_1 B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ a_{13}h^2 + a_{24}h^2 \end{pmatrix}; \quad (22)$$

уровень 3

$$B_2^\perp = (1 \ 0); \quad (23)$$

$$B_2^+ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ a_{13}h^2 + a_{24}h^2 \end{pmatrix}; \quad (24)$$

$$A_3 = B_2^\perp A_2 B_2^{\perp\tau} = (a_{13}^2 + 1); \quad (25)$$

$$B_3 = B_2^\perp A_2 B_2 = (-a_{13}a_{42}h (a_{13}h^2 + a_{24}h^2)). \quad (26)$$

На основании формул (3) и (13)–(26) можно найти матрицу наблюдателя L_0 . В общем виде формулы для компонент матрицы L_0 имеют очень громоздкий вид. Поэтому было решено не приводить эти выражения. Для того чтобы обеспечить максимально быструю сходимость с использованием решения, полученного в настоящей статье, необходимо в (3) принять равными нулю собственные значения: $\Phi_0 = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0$. Тогда матрица наблюдателя L_0

в соответствии с (3) будет иметь следующий вид:

$$L_0^T = (l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4), \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} l_1 &= -a_{13}^2 - 4; \\ l_2 &= -\frac{a_{24}(6a_{13}^2 + 4a_{13}^4 + a_{13}^6 + a_{24}a_{42}h^2 - a_{42}a_{13}^3h^2 + a_{24}a_{42}a_{13}^2h^2 + a_{24}a_{42}a_{13}^4h^2 + 3)}{h(a_{13}^2 + 1)(a_{13} + a_{24})} - \\ &\quad - \frac{3a_{13}^2 + 3a_{13}^4 + a_{13}^6 + 3a_{24}a_{42}h^2 - a_{42}a_{13}^3h^2 + 4a_{24}a_{42}a_{13}^2h^2 + 2a_{24}a_{42}a_{13}^4h^2 + 1}{a_{42}h^3(a_{13}^2 + 1)(a_{13} + a_{24})}; \\ l_3 &= \frac{a_{13}^6 - a_{42}a_{13}^5h^2 + a_{24}a_{42}a_{13}^4h^2 + 3a_{13}^4 - 5a_{42}a_{13}^3h^2 + 3a_{13}^2 - 3a_{42}a_{13}h^2 + 1}{a_{13}a_{42}h^3(a_{13}^2 + 1)(a_{13} + a_{24})} - \\ &\quad - \frac{a_{13}^6 + a_{24}a_{42}a_{13}^4h^2 + 4a_{13}^4 - a_{42}a_{13}^3h^2 + a_{24}a_{42}a_{13}^2h^2 + 6a_{13}^2 + a_{24}a_{42}h^2 + 3}{h(a_{13}^2 + 1)(a_{13} + a_{24})} - a_{31}h; \\ l_4 &= -\frac{2a_{13}^6 + 3a_{24}a_{42}a_{13}^4h^2 + 7a_{13}^4 - 2a_{42}a_{13}^3h^2 + 5a_{24}a_{42}a_{13}^2h^2 + 9a_{13}^2 + 4a_{24}a_{42}h^2 + 4}{h^2(a_{13}^2 + 1)(a_{13} + a_{24})}. \end{aligned} \quad (28)$$

Соответственно для канала тангажа матрицу наблюдателя получить с помощью примененного выше метода достаточно просто, и она запишется так:

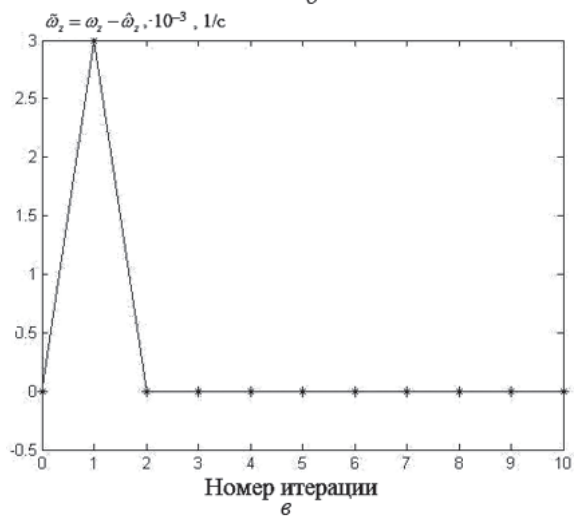
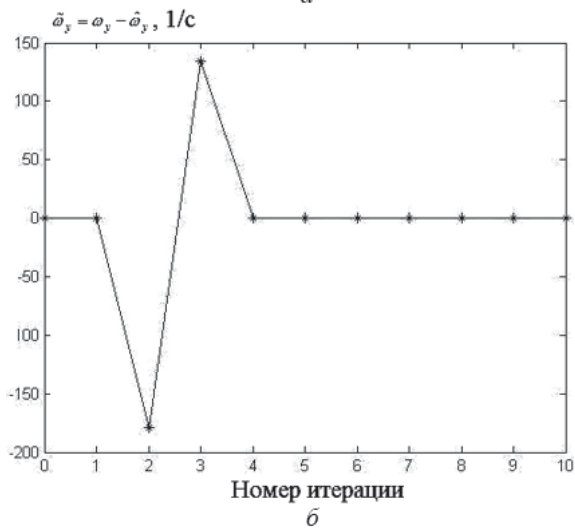
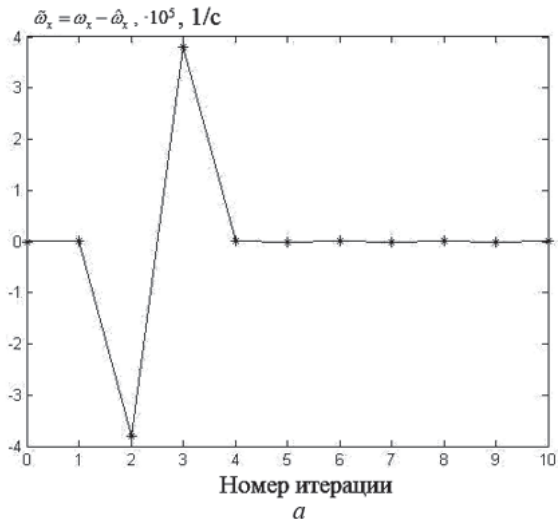
$$L_{\vartheta}^T = (l_1^{\vartheta} \quad l_1^{\vartheta}). \quad (29)$$

Здесь $l_1^{\vartheta} = -2$, $l_2^{\vartheta} = -1/h$.

Анализ выражений (28), которые в соответствии с (27) и (29) представляют собой аналитический алгоритм синтеза наблюдателя, показывает, что его реализация основана на выполнении таких элементарных операций, как сложение, умножение и деление. Это обстоятельство позволяет констатировать возможность выполнения алгоритма в реальном масштабе времени с помощью бортовой ЭВМ.

Результаты моделирования. Выполним математическое моделирование. Пусть главные моменты инерции КА, кг·м², имеют следующие значения: $J_x = 77521$; $J_y = 274021$; $J_z = 238845$, а с использованием системы единиц СИ начальные значения вектора состояния КА равны $(\gamma \quad \omega_x \quad \psi \quad \omega_y)^T = (0,1 \quad 0,005 \quad -0,1 \quad 0,002)^T$; $(\vartheta \quad \omega_z)^T = (0,1 \quad 0,003)^T$. В качестве начального приближения значений оценки вектора угловой скорости выберем начало координат: $(\hat{\omega}_{x0} \quad \hat{\omega}_{y0})^T = (0,0 \quad 0,0)^T$; $\hat{\omega}_{z0} = 0,0$.

Результаты моделирования приведены на рисунке, на котором представлено изменение невязок компонент вектора угловой скорости ($\tilde{\omega}_x = \omega_x - \hat{\omega}_x$, $\tilde{\omega}_y = \omega_y - \hat{\omega}_y$, $\tilde{\omega}_z = \omega_z - \hat{\omega}_z$) в зависимости от номера итерации.



Изменение невязки компонент вектора угловой скорости в каналах крена (*a*), рысканья (*b*) и тангажа (*c*)

Диапазон изменения невязок (части *a* и *б* рисунка) достаточно большой и соответственно точность сходимости алгоритма оценки вектора угловой скорости вращения КА с использованием приведенных зависимостей определить трудно, поэтому начиная с четвертого такта итерационного процесса, результаты моделирования представлены в таблице.

Результаты моделирования

Невязка компонент вектора угловой скорости, 1/с	Номер итерации						
	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{\omega}_x$	-0,0110	0,0343	-0,0179	0,0089	0,0050	0,0050	0,0050
$\tilde{\omega}_x = \omega_x - \hat{\omega}_x$	0,0160	-0,0293	0,0229	-0,0039	0,0000	0,0000	0,0000
$\hat{\omega}_y$	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020
$\tilde{\omega}_y = \omega_y - \hat{\omega}_y$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$\hat{\omega}_z$	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
$\tilde{\omega}_z = \omega_z - \hat{\omega}_z$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Анализ данных, приведенных на рисунке и в таблице, показывает, что за восемь итераций вектор оценки угловой скорости с высокой точностью совпадает с реальным значением вектора угловой скорости КА.

Заключение. В настоящей статье с помощью метода точного размещения полюсов получено аналитическое решение задачи синтеза алгоритма оценки угловой скорости КА в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали. Приведены результаты математического моделирования, подтвердившие высокую эффективность работы алгоритма. В соответствии с анализом вычислительных затрат алгоритма, основанных на выражении (16), и числом итераций, обеспечивающем сходимость процесса по результатам моделирования, можно сделать вывод о возможности его реализации в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубов Н.Е.* Алгоритмическое обеспечение автоматического режима орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1990. № 2. С. 193–202.
2. *Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.* Синтез развязывающих законов стабилизации орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 1. С. 92–108.
3. *Зубов Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А.* Стабилизация орбитальной ориентации космического аппарата // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 74–81.

4. Ивандиков Я.М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
5. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Тимаков С.Н. Применение алгоритма точного размещения полюсов при решении задач наблюдения и идентификации в процессе управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 1. С. 135–151.
6. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. № 2. 2013. С. 118–132.
7. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Олейник А.С. Оценка угловой скорости линии визирования в процессе сближения космических аппаратов по результатам измерения дальности и скорости продольного движения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. [Электронный ресурс] URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1079.html> (дата обращения: 22.12.2013).

REFERENCES

- [1] Zubov N.E. Algorithmic implementation of an automatic regime for orbital orientation of a spacecraft. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Tech. Cyber.* [Sov. J. Comp. and Sys. Sci., vol. 28, iss. 6, pp. 143–151], 1990, no. 2, pp. 193–202 (in Russ.).
- [2] Zubov N.E., Mikrin E.A., Misrikanov M.Sh., Ryabchenko V.N. Synthesis of decoupling laws for attitude stabilization of a spacecraft. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [J. Comput. Syst. Sci. Int., vol. 51, pp. 80–96], 2012, no. 1, pp. 92–108 (in Russ.).
- [3] Zubov N.E., Lapin A.V., Mikrin E.A. Orbital attitude stabilization of a spacecraft. *Kosm. Tekh. i tekhnol.* [Space engineering & technology], 2013, no. 3, pp. 74–81 (in Russ.).
- [4] Ivandikov Ya.M. Opticheskie pribory navedeniya i orientatsii kosmicheskikh apparatov [Optical devices for guidance and orientation of a spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 208 p.
- [5] Zubov N.E., Mikrin E.A., Misrikanov M.Sh., Ryabchenko V.N., Timakov S.N. The use of the exact pole placement algorithm for observation and identification tasks of the spacecraft motion control. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [J. Comput. Syst. Sci. Int.], 2013, no. 1, pp. 135–151 (in Russ.).
- [6] Zubov N.E., Mikrin E.A., Misrikanov M.Sh., Ryabchenko V.N. Modification of the exact pole placement method and its application for the spacecraft motion control. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [J. Comput. Syst. Sci. Int., vol. 52, iss. 2, pp. 279–292], 2013, no. 2, pp. 118–132 (in Russ.).
- [7] Zubov N.E., Mikrin E.A., Oleynik A.S. Estimation for the angular velocity of pointing direction by the process of measurements the distance and the velocity of longitudinal motion in spacecrafts rendezvous process. *Jelekt. Nauchno-Teh. Izd. "Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sci.-Tech. Publ. "Eng. J.: "Science and Innovation" of Bauman MSTU], 2013, iss. 10. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1079/1079.pdf> (accessed 22.12.2013).

Статья поступила в редакцию 26.03.2014

Николай Евгеньевич Зубов — д-р техн. наук, заместитель руководителя по науке НТЦ ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 научных работ в области проблем управления космических аппаратов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва», Российская Федерация, 141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

N.E. Zubov — Dr. Sci. (Eng.), deputy director on science of the Research and Development Center of OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 publications in the field of problems of spacecraft control.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.

Евгений Анатольевич Микрин — д-р техн. наук, академик РАН, первый заместитель генерального конструктора ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области систем управления космических аппаратов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва”, Российская Федерация, 141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

E.A. Mikrin — Dr. Sci. (Eng.), member of the Russian Academy of Sciences, head of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, first deputy general designer of OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”. Author of more than 150 publications in the field of problems of spacecraft control.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.

Алексей Сергеевич Олейник — аспирант Московского физико-технического института, инженер ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”. Автор четырех работ в области проблем управления космическими аппаратами.

Московский физико-технический институт, Российская Федерация, 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва”, Российская Федерация, 141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

A.S. Oleynik — post-graduate of the Moscow Institute of Physics and Technology (State University), engineer of the OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”. Author of four publications in the field of problems of spacecraft control.

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskiy per. 9, Dolgoprudnyy, Moscow region, 141700 Russian Federation.

OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.

Владимир Николаевич Рябченко — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НТЦ ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”, профессор кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области проблем управления.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва”, Российская Федерация, 141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

V.N. Ryabchenko – Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of the Research and Development Center of OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of problems of control.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.

Дмитрий Евгеньевич Ефанов — аспирант НТЦ ОАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва”. Автор более 10 научных трудов в области проблем управления.

ОАО “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва”, Российская Федерация, 141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, д. 4а.

D.E. Efanov – post-graduate of the Research and Development Centre of OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”. Author of more than 10 publications in the field of problems of control.

OAO “Korolev Rocket and Space Corporation “Energiya”, ul. Lenina 4a, Korolev, Moscow region, 141070 Russian Federation.