ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 3. С. 22–27.

УДК 681.518.5

Н. В. Ефименко

Науково-виробниче підприємство «Хартрон-ЮКОМ», Запоріжжя

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ЗВЕЗДАМ ПУТЕМ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДВУХ АСТРОДАТЧИКОВ

Рассматривается задача повышения точности определения ориентации КА по звездам путем совместной обработки информации двух астродатчиков. При этом предполагается, что один из астродатчиков является базовым, и его выходная информация уточняется по данным второго астродатчика. Получена математическая модель ошибки базового астродатчика, и предложен алгоритм уменьшения этой ошибки путем совместной обработки выходной информации двух астродатчиков. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет ориентации летательных аппаратов по звездам используется на практике уже несколько десятков лет. Вследствие того что положения звезд известны достаточно хорошо, использование их в качестве ориентиров позволяет с высокой точностью рассчитать ориентацию космического аппарата (КА). Для определения ориентации космического аппарата с помощью звезд в состав его системы управления должен входить астродатчик. Астродатчик визирует звезды, находящиеся в его поле зрения, и выдает направления на них относительно своей внутренней системы координат (ВСК). Измерительная информация об угловых координатах звезды подается на вход алгоритма опознавания, который ставит в соответствие измеренной звезде каталожную звезду. Далее алгоритм расчета ориентации, используя соответствие между визируемыми и каталожными координатами звезд, рассчитывает ориентацию КА относительно инерциальной системы координат.

Имеется множество работ, посвященных вопросам определения ориентации КА по информации об угловых координатах звезды [5—9]. Основные недостатки всех этих алгоритмов определения ориентации следующие. Погрешность определения ориентации обратно пропорциональна синусу угла между единичными векторами направления на звезды, который не превышает угловой размер поля зрения астродатчика. Современные астродатчики имеет сравнительно небольшое поле зрения — порядка 10—25°, и поэтому погрешность расчета ориентации по звездам, попавшим в поле зрения одного астродатчика, достаточно велика.

Для устранения этого недостатка на борту КА устанавливают два и более астродатчика, и ориентация рассчитывается по всем звездам, попавшим в поле зрения этих астродатчиков. При этом угол между направлениями на звезды из разных астродатчиков может достигать нескольких десятков градусов, что значительно повышает точность определения ориентации. При таком подходе возникает задача уточнения параметров ориентации по информации нескольких астродатчиков.

Ниже предложен алгоритм уточнения параметров ориентации по информации двух астродатчиков. Для нахождения оценки применен рекуррентный метод наименьших квадратов с регуляризацией по Тихонову решения некорректно поставленной задачи [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть на борту КА имеется два астродатчика АД1 и АД2. Астродатчики установлены таким образом, что угол между их оптическими осями равен α и удовлетворяет условию $\alpha \geq 2 \cdot \chi$, где χ — угловой размер поля зрения астродатчика. Свяжем с ПЗС-матрицами астродатчиков правые ортогональные внутренние системы координат P_1 и P_2. Взаимное положение базисов P_1 и P_2 определим кватернионом Q_{P2P1}, задающем переход от базиса P_2 к базису P_1. Будем полагать, что в составе программно-алгоритмического обеспечения системы управления космического аппарата имеется алгоритм взаимной привязки внутренних систем координат астродатчиков [2], и значение кватерниона Q_{P2P1} нам известно. Примем, что в первом астродатчике опознано m_1, во втором — m_2 звезд, и каждый астродатчик в момент времени t_k выдает следующую информацию:

— оценку $\widehat{Q}_{IPi}$ (i = 1, 2) кватерниона перехода Q_{IPi} от инерциальной системы координат I к своей внутренней системе координат P_i;

— измеренные координаты $\tilde{\mathbf{r}}_{P1j1}$, ($j1$ = 1, 2, ..., $m1$) и $\tilde{\mathbf{s}}_{P2j2}$, ($j2$ = 1, 2, ..., $m2$) единичных направлений на опознанные звезды относительно своих внутренних систем координат P_1 и P_2 соответственно;

— каталожные направления $\mathbf{r}_{Ij1}$ и $\mathbf{s}_{Ij2}$ на опознанные звезды относительно инерциальной системы координат I.

Измерения производятся с погрешностями $\delta\mathbf{r}_{P1j1}$ и $\delta\mathbf{s}_{P2j2}$. О погрешностях измерений известно лишь то, что они удовлетворяют условиям

$$\left\|\delta\mathbf{r}\right\|^2_{P1j1} \leq \delta_r^2, \ \left\|\delta\mathbf{s}\right\|^2_{P2j2} \leq \delta_s^2,$$

где скаляры δ_r и δ_s полагаются заданными. Требуется по измеренным и каталожным единичным векторам направления на звезды уточнить кватернион $\widehat{Q}_{IP1}$.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для единичных векторов $\mathbf{r}_{P1k}$ (k = 1, 2, ..., $m1$) и $\mathbf{s}_{P2j}$ (j = 1, 2, ..., $m2$) можно записать соотношения

$$\mathbf{r}_{P1k} = \bar{Q}_{IP1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ Q_{IP1}, \tag{1}$$

$$\mathbf{s}_{P2j} = Q_{P2P1} \circ \bar{Q}_{IP1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ Q_{IP1} \circ \bar{Q}_{P2P1}. \tag{2}$$

В выражениях (1), (2) черта над обозначением кватерниона обозначает сопряженный кватернион.

Представим кватернион Q_{IP1} следующим образом:

$$Q_{IP1} = \widehat{Q}_{IP1} \circ E. \tag{3}$$

Здесь E — кватернионное представление ошибки определения ориентации по звездам, опознанным в астродатчике АД1. Кватернион $\widehat{Q}_{IP1}$ можно интерпретировать как кватернион, задающий ориентацию некоторого расчетного базиса P_1', в общем случае не совпадающего с базисом P_1. Кватернион E как кватернион малого поворота представим в виде

$$E = 1 + \frac{1}{2}\mathbf{e}, \tag{4}$$

где

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} —$$

вектор малого поворота. Подставив (4) в выражения (1), (2) и перейдя в базис P_1, получим

$$\mathbf{r}_{P1k} = \bar{E} \circ \bar{\widehat{Q}}_{IP1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ \widehat{Q}_{IP1} \circ E, \tag{5}$$

$$Q_{P1P2} \circ \mathbf{s}_{P2j} \circ \bar{Q}_{P1P2} = \bar{E} \circ \bar{\widehat{Q}}_{IP1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ \widehat{Q}_{IP1} \circ E. \tag{6}$$

Введем следующие обозначения:

$$\hat{\mathbf{r}}_{P1k} = \bar{\widehat{Q}}_{IP1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ \widehat{Q}_{IP1},$$

$$\hat{\mathbf{s}}_{P1j} = \bar{\widehat{Q}}_{IP1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ \widehat{Q}_{IP1}.$$

С учетом принятых обозначений уравнения (5), (6) можно записать в виде

$$\mathbf{r}_{P1k} = \bar{E} \circ \hat{\mathbf{r}}_{P1k} \circ E, \tag{7}$$

$$Q_{P1P2} \circ \tilde{\mathbf{s}}_{P2j} \circ \bar{Q}_{P1P2} = \bar{E} \circ \hat{\mathbf{s}}_{P1j} \circ E. \tag{8}$$

Подставив соотношение (4) в выражения (7) и (8), с точностью до величин второго порядка малости получим

$$\mathbf{r}_{P1k} - \hat{\mathbf{r}}_{P1k} = \hat{\mathbf{r}}_{P1k} \times \mathbf{e}, \tag{9}$$

$$Q_{P1P2} \circ \tilde{\mathbf{s}}_{P2j} \circ \bar{Q}_{P1P2} - \hat{\mathbf{s}}_{P1j} = \hat{\mathbf{s}}_{P1j} \times \mathbf{e}. \tag{10}$$

Система уравнений (9), (10) представляет собой линейную переопределенную систему из $3(m_1 + m_2)$ уравнений относительно неизвестного вектора малого поворота $\mathbf{e} \in R^3$. Запишем эту систему в матричном виде:

$$\mathbf{Ae} = \mathbf{Y}, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{m_1+m_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{m_1+m_2} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$\mathbf{C}_k = \begin{cases} F(\hat{\mathbf{r}}_{P1k}) & (k = 1, 2, \ldots m1), \\ F(\mathbf{s}_{P1j}) & (k = m1+1, \ldots m1+m2, \\ & j = 1, 2, \ldots m2), \end{cases} \tag{13}$$

$$\mathbf{Y}_k =$$

$$= \begin{cases} \mathbf{r}_{P1k} - \hat{\mathbf{r}}_{P1k} & (k = 1, 2, \ldots m1), \\ Q_{P1P2} \circ \mathbf{s}_{P2j} \circ \bar{Q}_{P1P2} - \hat{\mathbf{s}}_{P1j} & (k = m1+1, \ldots m1+m2, \\ & j = 1, 2, \ldots m2). \end{cases} \tag{14}$$

Эта система будет иметь единственное решение в том случае, когда ранг матрицы

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{m1} F^2(\hat{\mathbf{r}}_{P1i}) + \sum_{j=1}^{m2} F^2(\hat{\mathbf{s}}_{P1j}) \tag{15}$$

равен трем. В выражении (15) матрица

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}$$

представляет собой линейный кососимметрический оператор векторного произведения, определяемый равенством

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}.$$

Для того чтобы ранг матрицы **P** был равен трем, необходимо и достаточно, чтобы среди векторов $\mathbf{r}_{P1k}$ (k = 1, 2, ..., m1) и $\mathbf{s}_{P2j}$ (j = 1, 2, ..., m2) нашлась пара непараллельных векторов. Так как по предположению угол $\alpha \geq 2 \cdot \chi$, то это условие всегда выполняется, и система уравнений (9)—(10) имеет единственное решение. Для нахождения этого решения поступим следующим образом. Представим систему (11) в развернутом виде

$$\mathbf{a}_l \mathbf{e} = \mathbf{y}_l, \ l = 1, 2 \ldots 3 \cdot (m1 + m2), \tag{16}$$

где $\mathbf{a}_l$ — l-я строка матрицы **A**, y_l — l-й элемент вектора **Y**. Так как измерения производятся с погрешностями, то вместо вектора **Y** нам доступен вектор

$$\breve{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} + \delta\mathbf{Y}, \tag{17}$$

где $\delta\mathbf{Y}$ — погрешность измерений. Выразив из (17) вектор **Y** и подставив найденное выражение в (16), получим

$$\mathbf{a}_l \mathbf{e} = \breve{y}_l - \delta\breve{y}_l. \tag{18}$$

В выражении (18) $\delta\breve{y}_l$ — l-й элемент вектора $\delta\mathbf{Y}$. Очевидно, что

$$\delta\breve{y}_l^2 \leq \|\delta r\|^2 + \|\delta_s\|^2. \tag{19}$$

Пусть $\hat{\mathbf{e}}_l$ — решение системы (11), полученное путем решения системы из l уравнений вида (18). Уточненную оценку $\hat{\mathbf{e}}_{l+1}$ вектора малого поворота **e** по $l+1$ уравнению будем находить как решение следующей оптимизационной задачи.

Необходимо найти

$$\inf_{\mathbf{e} \in Y_h} \frac{1}{2} (\mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}}_l)^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_l^{-1} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_l), \tag{20}$$

$$Y_h = \{\mathbf{e} \in R^3, \mathbf{e} : (\breve{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}\mathbf{e})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}.$$

Заменой переменных $\boldsymbol{\eta}_{l+1} = \mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}}_l$ задача (20) преобразуется к виду

$$\inf_{e \in Y_h} \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_{l+1}^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_l^{-1} \boldsymbol{\eta}_{l+1}, \tag{21}$$

$$Y_h = \{\boldsymbol{\eta} \in R^3, \boldsymbol{\eta} : (\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}, \tag{22}$$

где $\tilde{y}_{l+1} = \breve{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}\hat{\mathbf{e}}_l$. Если $\tilde{y}_{l+1}^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2$, то решение задачи (22) тривиально:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} = 0. \tag{23}$$

При значении $\tilde{y}_{l+1}^2 > \delta_r^2 + \delta_s^2$ решение можно найти, используя лемму [2], согласно которой задача минимизации функционала

$$\Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_{l+1}^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_l^{-1} \boldsymbol{\eta}_{l+1}$$

с невыпуклыми ограничениями

$$Y_h = \{\boldsymbol{\eta} \in R^3, \boldsymbol{\eta} : (\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}$$

сводится к задаче минимизации $\Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$ при условии, что $(\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}\boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 = \delta_r^2 + \delta_s^2$. Она решается методом неопределенных множителей Лагранжа путем минимизации на Y_h сглаживающего функционала

$$M(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) = \Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) + \lambda(\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}\boldsymbol{\eta}_{l+1})^2. \tag{24}$$

При этом λ определяется из уравнения обобщенной невязки

$$(\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1})^2 = \delta_r^2 + \delta_s^2 , \qquad (25)$$

которое в этом случае всегда имеет положительный корень [2]. В уравнении (25) $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$ — элемент из Y_h, минимизирующий функционал $M(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$. Найдем минимум $M(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$. Для того чтобы вектор $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$ был точкой минимума функционала (24), необходимо, чтобы он удовлетворял уравнению

$$\mathbf{R}_k^{-1}(\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}) + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} - \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \tilde{y}_{l+1} = 0 .$$

Разрешив это уравнение относительно $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$, получим

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} = (\mathbf{R}_l^{-1} + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{a}_{l+1})^{-1} \cdot \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \tilde{y}_{l+1} \qquad (26)$$

Введем обозначения

$$\psi_{l+1} = 1 + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} ,$$

$$\mathbf{R}_{l+1} = (\mathbf{R}_l^{-1} + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{a}_{l+1})^{-1} .$$

Тогда на основании леммы об обращении матрицы [1] имеем

$$\mathbf{R}_{l+1} = \mathbf{R}_l - \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \psi_{k+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l . \qquad (27)$$

Подставив (27) в (26), получим

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} &= (\mathbf{R}_l - \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l) \cdot \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \tilde{y}_{l+1} - \lambda^2 \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \psi_{l+1}^{-1} \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot (\tilde{y}_{k+1} - \lambda \cdot \psi_{l+1}^{-1} \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \tilde{y}_{l+1}) = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot (\psi_{l+1} - \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}}) \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \beta \cdot \mathbf{K}_{l+1} \cdot \tilde{y}_{l+1}, \end{aligned} \qquad (28)$$

где

$$\mathbf{K}_{l+1} = \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{T} \cdot \sigma^{-2} , \qquad (29)$$

$$\sigma^2 = \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^{T} , \qquad (30)$$

$$\beta = \frac{\lambda \cdot \sigma^2}{1 + \sigma^2} . \qquad (31)$$

Перейдя к исходным переменным, с учетом (23) получим

$$\hat{\mathbf{e}}_{l+1} = \hat{\mathbf{e}}_l + \beta \cdot \mathbf{K}_{l+1} \tilde{y}_{l+1} . \qquad (32)$$

Рассмотрим уравнение обобщенной невязки (25). Подставив в него выражения (28)—(31), получим уравнение для нахождения параметра β:

$$(1 - \beta) \cdot \left| \tilde{y}_{l+1} \right| = \delta_r^2 + \delta_s^2 . \qquad (33)$$

Разрешив уравнение (33) относительно β, находим

$$\beta = 1 - \frac{\delta_r^2 + \delta_s^2}{\left| \tilde{y}_{l+1} \right|} , \qquad (34)$$

что приводит к следующему алгоритму вычисления уточненной оценки кватерниона Q_{IP1}:

$$\tilde{y}_{l+1} = \breve{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \hat{\mathbf{e}}_l ,$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{l+1} = \hat{\mathbf{e}}_l + \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \tilde{y}_{l+1} ,$$

$$\mathbf{R}_{l+1} = \left(\mathbf{R}_l - \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{R}_l \right),$$

$$\mathbf{K}_{l+1} = \mathbf{R}_l \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} \sigma_{l+1}^{-2} ,$$

$$\sigma_{l+1}^2 = \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{R}_l \mathbf{a}_{l+1}^{\mathrm{T}} ,$$

$$\beta_{l+1} = \begin{cases} 0, & \left| \tilde{y}_{l+1} \right| \le \delta_r^2 + \delta_s^2, \\ 1 - \dfrac{\delta_r^2 + \delta_s^2}{\left| \tilde{y}_{l+1} \right|}, & \left| \tilde{y}_{l+1} \right| > \delta_r^2 + \delta_s^2. \end{cases}$$

$$Q_{IP1} = \widehat{Q}_{IP1} \circ E ,$$

$$E = e_0 + \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}} ,$$

$$e_0 = \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left\| \hat{\mathbf{e}} \right\|^2} .$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

Для поверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено численное моделирование. Моделировался процесс определения ориентации спутника, стабилизированного относительно инерциальной системы координат. Взаимное расположение астродатчиков было выбрано таким образом, что угол α между их оптическими осями был равен 66°.

Численные значения параметров модели астродатчиков были следующими:

• поле зрения — 17°;

• максимально допустимая ошибка измерения угловых координат осей ВСК относительно ИСК: для оси $O_B Z_B$ — не более 6″; для осей $O_B X_B$ и $O_B Y_B$ — не более 45″;

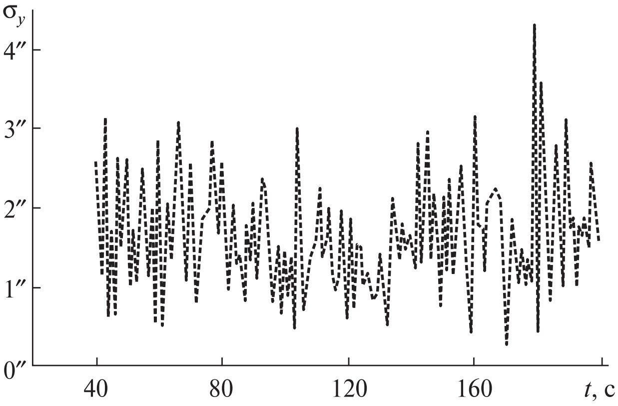

Рис. 1. Изменения нормы σ_y вектора погрешности уточненного кватерниона ориентации, полученного по информации астродатчиков АД1 и АД2 с использованием предлагаемого алгоритма

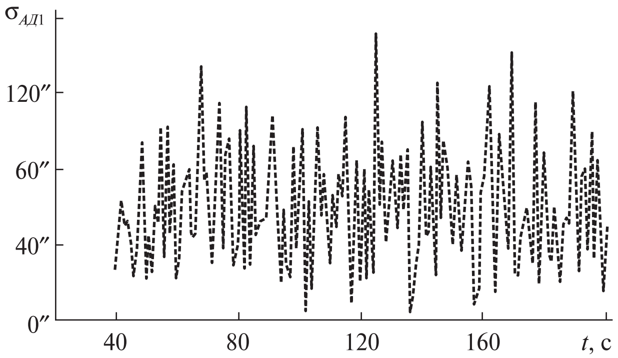

Рис. 2. Норма $\sigma_{АД1}$ вектора ошибки определения кватерниона ориентации по показаниям астродатчика АД1

• максимально допустимая ошибка измерения угловых координат единичного вектора направления на опознанную звезду относительно ВСК — не более 3″.

При моделировании полагалось, что в первом астродатчике опознано пять звезд, во втором — десять звезд. На рис. 1 показан график изменения нормы σ_y вектора погрешности уточненного кватерниона ориентации, полученного по информации астродатчиков АД1 и АД2 с использованием предлагаемого алгоритма. На рис. 2 приведена норма $\sigma_{АД1}$ вектора ошибки определения кватерниона ориентации по показаниям только одного астродатчика АД1.

Как видно из рисунков, предлагаемый алгоритм обеспечивает высокую точность определения ориентации внутренней системы координат астродатчика АД1 относительно инерциальной системы координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм уточнения параметров ориентации по информации двух астродатчиков. Для нахождения оценки применен рекуррентный метод наименьших квадратов с регуляризацией по Тихонову решения некорректно поставленной задачи. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма. Результаты моделирования показали, что предлагаемый алгоритм обеспечивает значительно более высокую точность определения ориентации по сравнению с алгоритмом определения ориентации по информации одного астродатчика. Алгоритм может быть применен при разработке высокоточных систем определения ориентации.

1. *Гончарский А. Б., Леонов А. С., Ягола А. Г.* Обобщенный принцип невязки // Журн. вычислительной математики и математической физики. — 1973. — **13**, № 2. — С. 294—302.
2. *Ефименко Н. В.* Взаимная привязка внутренних систем координат астродатчиков в задаче высокоточного определения ориентации космического аппарата // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 12—17.
3. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 286 с.
4. *Хорн Р., Джонсон Ч.* Матричный анализ. — М.: Мир, 1989. — 655 с.
5. *Mortari D.* EULER-q algorithm for attitude determination from vector observations // J. Guidance, Control, and Dynamics. — 1998. — **21**, N 2. — P. 328—334.
6. *Mortari D.* Second estimator of the optimal quaternion // J. Guidance, Control, and Dynamics. — 2000. — **23**, N 5. — P. 885—888.
7. *Rupert P.* SMART — a three-axis stabilized attitude reference technique // J.Spacecraft and Rockets. — 1971. — **8**. — P. 1195—1201.
8. *Shuster M. D.* Effective – direction measurements for spacecraft attitude: II. Predicted directions // J. Astronaut. Sci. — 2007. — **55**, N 4. — P. 479—492.
9. *Zanetti R., Bishop R. H.* A new method to introduce a priori information in QUEST // J. Astronaut. Sci. — 2007. — **55**, N 4. — P. 451—461.

Стаття надійшла до редакції 24.04.14

М. В. Єфіменко

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ПО ЗІРКАХ ШЛЯХОМ СПІЛЬНОЇ ОБРОБКИ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДВОХ АСТРОДАВАЧІВ

Розглядається задача підвищення точності визначення орієнтації КА по зірках шляхом спільної обробки інформації двох астродавачів. При цьому передбачається, що один з астродавачів є базовим, і його вихідна інформація уточнюється за даними другого астродавача. Отримано математичну модель помилки базового астродавача та запропоновано алгоритм зменшення цієї помилки шляхом спільної обробки вихідної інформації двох астродавачів. Наведено результати чисельного моделювання запропонованого алгоритму.

N. V. Efimenko

DETERMINING SPACECRAFT ORIENTATION USING INFORMATION FROM TWO JOINTLY PROCESSED STAR TRACKERS

We consider the problem to increase the accuracy of determining spacecraft orientation using information obtained from two jointly processed star trackers. One of the trackers is the main one. Its information is specified by the second tracker. A mathematical model of the main star tracker error is constructed and an error correction algorithm of using second star tracker is proposed. We present some results of numerical simulation of the algorithms.