

повышает устойчивость и сроки активного существования МКА, так как обеспечивается управление его движением и при продолжительном отсутствии связи с наземными командно-измерительными комплексами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов А. В. Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата, связанного с базовым космическим аппаратом // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 75—77.
2. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса „Салют-6“ — „Союз“ — „Прогресс“ / И. К. Бажин, В. П. Гаврилов, В. Д. Ястребов и др. М.: Наука, 1985. 376 с.
3. Басыров А. Г., Гончаренко В. А., Забузов В. С., Кремез Г. В., Эсаулов К. А. Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 70—74.
4. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит / Л. Ф. Порфирьев, В. В. Смирнов, В. И. Кузнецов. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.

Сведения об авторах

- Алексей Васильевич Аверьянов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: Aver957@mail.ru
- Константин Андреевич Эсаулов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: home5263@yandex.ru
- Олег Евграфович Молчанов** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: moevik5001@yandex.ru
- Татьяна Иоанновна Белая** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей, Санкт-Петербург; E-mail: studentszip@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-вычислительных
систем и сетей

Поступила в редакцию
16.09.14 г.

УДК 629.78

В. И. ЛУКАСЕВИЧ, С. О. КРАМАРОВ, С. В. СОКОЛОВ

АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Представлено решение задачи апостериорного оценивания динамически изменяющихся параметров углового движения объекта по спутниковым измерениям. Показаны преимущества методов стохастической нелинейной динамической фильтрации относительно одномоментных измерений.

Ключевые слова: апостериорное оценивание, угловое движение, спутниковые измерения.

Введение. Полное решение навигационной задачи для подвижного объекта всегда предполагает определение параметров не только линейного движения, но и углового. Поэтому доведение точности позиционирования объектов до субсантиметрового диапазона за счет использования спутниковых навигационных систем (СНС) [1—3] связано с задачей следующего этапа — повышением точности спутникового определения параметров углового движения

до значений, характерных для современных углоизмерительных систем геодезического класса [3—9].

В настоящее время методы определения ориентации с помощью СНС можно разделить в основном на два класса: определение параметров ориентации по предварительно найденным базовым векторам [7, 8] и непосредственное определение углов ориентации [9]. Для этих методов характерно использование одномоментных измерений по базовым векторам с последующей их обработкой с помощью традиционных статистических алгоритмов. Это не позволяет, во-первых, учесть особенности динамики вращения конкретного объекта и, следовательно, обеспечить требуемую точность оценки параметров средне- и высокодинамичных вращающихся объектов, а во-вторых, в полной мере использовать методы современной теории стохастической фильтрации, обеспечивающие возможность оптимального оценивания угловых параметров с произвольной динамикой их изменения. В связи с этим представляет интерес разработка подхода, позволяющего использовать для оценки углового положения объекта только по спутниковым измерениям методы динамической нелинейной фильтрации. В качестве измерений, используемых для построения реализующих данный подход алгоритмов, рассмотрим фазовые и доплеровские измерения, осуществляемые СНС. При этом решение задачи приведем для СНС с высокой частотой поступления навигационных сообщений, что позволяет считать характер спутниковых измерений по отношению к динамике изменения навигационных параметров объекта непрерывным. (В настоящее время частота приема спутниковых сообщений в навигационных приемниках “Topcon”, “Javad”, “Trimble” составляет 100 Гц с дальнейшей тенденцией к увеличению [3].)

Постановка задачи. Для возможности применения методов нелинейной стохастической фильтрации при оценке параметров ориентации объекта необходимо получить, во-первых, уравнения динамики их изменения, а во-вторых, уравнения их наблюдения.

Рассмотрим последовательно решение этих задач, опираясь на следующие исходные положения. Пусть на объекте расположены три навигационных приемника, причем координаты $\{x_i, y_i, z_i\}$ каждого i -го, $i=1, 2, 3$, приемника в системе координат $Oxyz$, связанной с объектом (ССК), неизменны и известны с высокой точностью, а координаты $\{\xi_i, \eta_i, \zeta_i\}$ каждого i -го приемника в гринвичской СК (ГСК) $O\xi\eta\zeta$ определяются по спутниковым измерениям. В этом случае координаты трех возможных векторов, построенных по точкам расположения приемников, в ГСК имеют вид $|\xi_i - \xi_j \quad \eta_i - \eta_j \quad \zeta_i - \zeta_j|^T$, а в ССК соответственно — $|x_i - x_j \quad y_i - y_j \quad z_i - z_j|^T$, $i > j$; $i, j = 1, 2, 3$. Введя для краткости обозначения:

$$\xi_i - \xi_j = \xi_{ij}, \quad \eta_i - \eta_j = \eta_{ij}, \quad \zeta_i - \zeta_j = \zeta_{ij}, \quad x_i - x_j = x_{ij}, \quad y_i - y_j = y_{ij}, \quad z_i - z_j = z_{ij},$$

взаимную ориентацию указанных векторов можно представить следующим образом:

$$\begin{vmatrix} \xi_{ij} \\ \eta_{ij} \\ \zeta_{ij} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где M — подлежащая определению по спутниковым измерениям матрица направляющих косинусов ориентации ГСК относительно ССК.

Так как любые три из девяти элементов матрицы M могут быть выражены через остальные шесть (через свои алгебраические дополнения) [10], то в целях сокращения определяемых направляющих косинусов используем эти известные нелинейные связи и представим матрицу M в следующем виде, учитывая зависимости

$$m_{11} = m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32}, \quad m_{21} = m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32}, \quad m_{31} = m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22}:$$

$$M = \begin{pmatrix} m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32} & m_{22} & m_{23} \\ m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Полученные соотношения (1), (2) позволяют записать для двух векторов из трех (например, при $ij = 12, ij = 23$) следующие представления:

$$\begin{pmatrix} \xi_{12} \\ \eta_{12} \\ \zeta_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32} & m_{22} & m_{23} \\ m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{12} \\ y_{12} \\ z_{12} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \xi_{23} \\ \eta_{23} \\ \zeta_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32} & m_{22} & m_{23} \\ m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{23} \\ y_{23} \\ z_{23} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Данные соотношения являются исходными для вывода дифференциальных уравнений, определяющих динамику изменения направляющих косинусов.

Продифференцируем соотношения (3) по времени:

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}_{12} \\ \dot{\eta}_{12} \\ \dot{\zeta}_{12} \\ \dot{\xi}_{23} \\ \dot{\eta}_{23} \\ \dot{\zeta}_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{12} \dot{m}_{22} m_{33} + x_{12} m_{22} \dot{m}_{33} - x_{12} \dot{m}_{23} m_{32} - x_{12} m_{23} \dot{m}_{32} + y_{12} \dot{m}_{12} + z_{12} \dot{m}_{13} \\ x_{12} \dot{m}_{12} m_{33} + x_{12} m_{12} \dot{m}_{33} - x_{12} \dot{m}_{13} m_{32} - x_{12} m_{13} \dot{m}_{32} + y_{12} \dot{m}_{22} + z_{12} \dot{m}_{23} \\ x_{12} \dot{m}_{12} m_{23} + x_{12} m_{12} \dot{m}_{23} - x_{12} \dot{m}_{13} m_{22} - x_{12} m_{13} \dot{m}_{22} + y_{12} \dot{m}_{32} + z_{12} \dot{m}_{33} \\ x_{23} \dot{m}_{22} m_{33} + x_{23} m_{22} \dot{m}_{33} - x_{23} \dot{m}_{23} m_{32} - x_{23} m_{23} \dot{m}_{32} + y_{23} \dot{m}_{12} + z_{23} \dot{m}_{13} \\ x_{23} \dot{m}_{12} m_{33} + x_{23} m_{12} \dot{m}_{33} - x_{23} \dot{m}_{13} m_{32} - x_{23} m_{13} \dot{m}_{32} + y_{23} \dot{m}_{22} + z_{23} \dot{m}_{23} \\ x_{23} \dot{m}_{12} m_{23} + x_{23} m_{12} \dot{m}_{23} - x_{23} \dot{m}_{13} m_{22} - x_{23} m_{13} \dot{m}_{22} + y_{23} \dot{m}_{32} + z_{23} \dot{m}_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

и в правой части выражения (4) выделим вектор производных направляющих косинусов:

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}_{12} \\ \dot{\eta}_{12} \\ \dot{\zeta}_{12} \\ \dot{\xi}_{23} \\ \dot{\eta}_{23} \\ \dot{\zeta}_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{12} & z_{12} & x_{12} m_{33} & -x_{12} m_{32} & -x_{12} m_{23} & x_{12} m_{22} \\ x_{12} m_{33} & -x_{12} m_{32} & y_{12} & z_{12} & -x_{12} m_{13} & x_{12} m_{12} \\ x_{12} m_{23} & -x_{12} m_{22} & -x_{12} m_{13} & x_{12} m_{12} & y_{12} & z_{12} \\ y_{23} & z_{23} & x_{23} m_{33} & -x_{23} m_{32} & -x_{23} m_{23} & x_{23} m_{22} \\ x_{23} m_{33} & x_{23} m_{32} & y_{23} & z_{23} & -x_{23} m_{13} & x_{23} m_{12} \\ x_{23} m_{23} & x_{23} m_{22} & -x_{23} m_{13} & x_{23} m_{12} & y_{23} & z_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{13} \\ \dot{m}_{22} \\ \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_{32} \\ \dot{m}_{33} \end{pmatrix} = \Phi(M) \cdot \begin{pmatrix} \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{13} \\ \dot{m}_{22} \\ \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_{32} \\ \dot{m}_{33} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) получим следующее дифференциальное уравнение для искомых направляющих косинусов:

$$\begin{pmatrix} \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{13} \\ \dot{m}_{22} \\ \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_{32} \\ \dot{m}_{33} \end{pmatrix} = \Phi^{-1}(M) \begin{pmatrix} \dot{\xi}_{12} \\ \dot{\eta}_{12} \\ \dot{\zeta}_{12} \\ \dot{\xi}_{23} \\ \dot{\eta}_{23} \\ \dot{\zeta}_{23} \end{pmatrix}, \quad m_{ij0} = m_{ij}(0), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где $\Phi^{-1}(M)$ — матрица, обратная $\Phi(M)$.

Полученное уравнение позволяет применить для оценки параметров ориентации объекта методы динамической нелинейной фильтрации путем преобразования его в уравнение динамики оцениваемого вектора угловых параметров (вектора ориентации) в форме Ланжевена.

Стохастические уравнения параметров углового движения объекта по спутниковым измерениям. Введем обозначения:

$$\dot{\xi}_{ij} = \dot{\xi}_i - \dot{\xi}_j = V_{\xi i} - V_{\xi j}, \quad \dot{\eta}_{ij} = \dot{\eta}_i - \dot{\eta}_j = V_{\eta i} - V_{\eta j}, \quad \dot{\zeta}_{ij} = \dot{\zeta}_i - \dot{\zeta}_j = V_{\zeta i} - V_{\zeta j},$$

где $V_{\xi i}, V_{\eta i}, V_{\zeta i}, i=1, 2, 3$, — проекции линейной скорости i -й антенны навигационного приемника на оси ГСК.

С учетом данных обозначений с помощью стандартных алгоритмов [2] сначала определяются оценки проекций скорости $\hat{V}_{\xi i}, \hat{V}_{\eta i}, \hat{V}_{\zeta i}$ (по доплеровским измерениям), после чего определяются их разности с соответствующими случайными ошибками $W_{\xi ij}, W_{\eta ij}, W_{\zeta ji}, i, j=1, 2, 3$, которые могут быть в неблагоприятном случае аппроксимированы центрированными белыми гауссовыми шумами (БГШ) с известными интенсивностями $D_{\xi ij}, D_{\eta ij}, D_{\zeta ji}, i, j=1, 2, 3$. Тогда из уравнения (6) получаем стохастическое дифференциальное уравнение вектора угловых параметров в форме Ланжевена

$$\begin{pmatrix} \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{13} \\ \dot{m}_{22} \\ \dot{m}_{23} \\ \dot{m}_{32} \\ \dot{m}_{33} \end{pmatrix} = \Phi^{-1}(M) \begin{pmatrix} \hat{V}_{\xi 1} - \hat{V}_{\xi 2} \\ \hat{V}_{\eta 1} - \hat{V}_{\eta 2} \\ \hat{V}_{\zeta 1} - \hat{V}_{\zeta 2} \\ \hat{V}_{\xi 2} - \hat{V}_{\xi 3} \\ \hat{V}_{\eta 2} - \hat{V}_{\eta 3} \\ \hat{V}_{\zeta 2} - \hat{V}_{\zeta 3} \end{pmatrix} + \Phi^{-1}(M) \begin{pmatrix} W_{\xi 12} \\ W_{\eta 12} \\ W_{\zeta 12} \\ W_{\xi 23} \\ W_{\eta 23} \\ W_{\zeta 23} \end{pmatrix}$$

или в векторной форме

$$\dot{Y} = F(Y, t) + F_1(Y)\varphi, \quad (7)$$

где

$$Y = \begin{pmatrix} m_{12} & m_{13} & m_{22} & m_{23} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}^T; \quad Y_0 = Y(0);$$

$$F(Y, t) = \Phi^{-1}(M) \begin{pmatrix} \hat{V}_{\xi 1} - \hat{V}_{\xi 2} \\ \hat{V}_{\eta 1} - \hat{V}_{\eta 2} \\ \hat{V}_{\zeta 1} - \hat{V}_{\zeta 2} \\ \hat{V}_{\xi 2} - \hat{V}_{\xi 3} \\ \hat{V}_{\eta 2} - \hat{V}_{\eta 3} \\ \hat{V}_{\zeta 2} - \hat{V}_{\zeta 3} \end{pmatrix}; \quad F_1(Y) = \Phi^{-1}(M), \quad \varphi = \begin{pmatrix} W_{\xi 12} \\ W_{\eta 12} \\ W_{\zeta 12} \\ W_{\xi 23} \\ W_{\eta 23} \\ W_{\zeta 23} \end{pmatrix}.$$

Принципиальными особенностями полученных уравнений (7) являются, во-первых, их общий характер (так как при их выводе не было сделано никаких допущений о модели объекта, характере его движения и пр.), а во-вторых, возможность использования на их основе методов стохастической фильтрации, обеспечивающих оптимальность оценок навигационных переменных.

Уравнения наблюдения и оценки параметров вращения объекта. При динамическом оценивании вектора Y угловых параметров необходимо получить [2, 5] уравнение наблюдателя за вектором Y , т.е. аналитическую модель сигнала, несущего информацию

о компонентах вектора Y . Для формирования наблюдателя воспользуемся соотношениями (3), полагая, что оценки текущих координат $\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_i, \hat{\zeta}_i, i=1, 2, 3$, всех приемников в ГСК определяются аналогично рассмотренным выше оценкам проекций скорости с помощью стандартных алгоритмов [2], в результате чего разности $\hat{\xi}_{ij} = \hat{\xi}_i - \hat{\xi}_j, \hat{\eta}_{ij} = \hat{\eta}_i - \hat{\eta}_j, \hat{\zeta}_{ij} = \hat{\zeta}_i - \hat{\zeta}_j$ определяются со случайными ошибками $q_{\xi ij}, q_{\eta ij}, q_{\zeta ji}, i, j=1, 2, 3$, которые, как и ранее, могут быть аппроксимированы центрированными БГШ с известными интенсивностями $d_{\xi ij}, d_{\eta ij}, d_{\zeta ji}, i, j=1, 2, 3$. В этом случае минимальная размерность наблюдателя вектора Y угловых параметров, согласно соотношению (3), определяется как

$$Z_{12} = \begin{vmatrix} \hat{\xi}_{12} \\ \hat{\eta}_{12} \\ \hat{\zeta}_{12} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32} & m_{22} & m_{23} \\ m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{12} \\ y_{12} \\ z_{12} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} q_{\xi 12} \\ q_{\eta 12} \\ q_{\zeta 12} \end{vmatrix} = H_{12}(Y) + Q_{12}, \quad (8)$$

где $Q_{12} = \begin{vmatrix} q_{\xi 12} & q_{\eta 12} & q_{\zeta 12} \end{vmatrix}^T$, или

$$Z_{23} = \begin{vmatrix} \hat{\xi}_{23} \\ \hat{\eta}_{23} \\ \hat{\zeta}_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} m_{33} - m_{13} m_{32} & m_{22} & m_{23} \\ m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_{23} \\ y_{23} \\ z_{23} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} q_{\xi 23} \\ q_{\eta 23} \\ q_{\zeta 23} \end{vmatrix} = H_{23}(Y) + Q_{23}.$$

Максимальная размерность наблюдателя вектора Y может быть увеличена до шести путем комплексирования наблюдателей минимальной размерности:

$$Z = \begin{vmatrix} Z_{12} \\ Z_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_{12}(Y) \\ H_{23}(Y) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} Q_{12} \\ Q_{23} \end{vmatrix} = H(Y) + Q, \quad (9)$$

где Q — векторный БГШ с нулевым средним и матрицей интенсивности D_Q , что повышает точность оценки вектора Y угловых параметров по сравнению с оценкой по наблюдениям минимальной размерности (8).

Полученное представление вектора Y в форме „объект — наблюдатель“ (7), (9) позволяет найти апостериорную плотность вероятности $\rho_Z(Y, t)$, что, в свою очередь, позволяет определить любые вероятностные оценки параметров движения [5]. Но так как формирование величины $\rho_Z(Y, t)$ сводится к решению интегродифференциального уравнения Стратоновича, которое не имеет аналитического решения, то в теории фильтрации для получения оценок нелинейных процессов вида (7) используют различные субоптимальные методы [5]. Наиболее известным и востребованным из них является обобщенный (нелинейный) фильтр Калмана. Согласно работе [5], используя уравнения (7), (9), можно определить следующий обобщенный фильтр Калмана для оценки рассматриваемого вектора параметров ориентации объекта:

$$\dot{\hat{Y}} = F(\hat{Y}, t) + K(\hat{Y}, t)[Z - H(\hat{Y})], \quad K(\hat{Y}, t) = R(\hat{Y}, t) \frac{\partial H^T(\hat{Y})}{\partial \hat{Y}} D_Q^{-1}, \quad (10)$$

$$\dot{R}(\hat{Y}, t) = \frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} R(\hat{Y}, t) + R(\hat{Y}, t) \frac{\partial F^T(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} + F_1(\hat{Y}) D_\gamma F_1^T(\hat{Y}) - K(\hat{Y}, t) D_Q K^T(\hat{Y}, t),$$

где \hat{Y} — оценка вектора состояния $Y(t)$; $R(\hat{Y}, t)$ — апостериорная ковариационная матрица;

$\hat{Y}_0 = M(Y_0)$; $R_0 = M\left\{(Y_0 - \hat{Y}_0)(Y_0 - \hat{Y}_0)^T\right\}$; матрицы D_Q, D_γ определяются как

$$D_Q = \begin{vmatrix} d_{\xi 12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{\eta 12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{\zeta 12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{\xi 23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{\eta 23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{\zeta 23} \end{vmatrix}, \quad D_\gamma = \begin{vmatrix} D_{\xi 12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{\eta 12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{\zeta 12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{\xi 23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\eta 23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{\zeta 23} \end{vmatrix}.$$

Пример. Для подтверждения эффективности предложенного подхода было проведено моделирование алгоритма фильтрации (10) на временном интервале $t \in [0; 1000]$ с с шагом $\Delta t = 0,01$ с методом Рунге — Кутты 4-го порядка. Моделирование текущей матрицы M осуществлялось путем решения уравнений Пуассона при постоянных проекциях угловой скорости объекта на оси СК $Oxyz$: $\omega_x = 10,47 \cdot 10^{-2}$ рад/с, $\omega_y = 1,74 \cdot 10^{-2}$ рад/с, $\omega_z = 2,6 \cdot 10^{-2}$ рад/с (изменение ориентации в инерциальной СК), с последующим умножением полученной транспонированной матрицы направляющих косинусов на матрицу поворота ГСК относительно инерциальной СК:

$$G(\Omega t) = \begin{vmatrix} \cos \Omega t & 0 & -\sin \Omega t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Omega t & 0 & \cos \Omega t \end{vmatrix}, \quad \Omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}.$$

Значения базовых векторов в СК $Oxyz$ были выбраны, соответственно, равными $|x_{12} y_{12} z_{12}|^T = |1,5 \ 1,8 \ 1,9|^T$, $|x_{23} y_{23} z_{23}|^T = |1,7 \ 1,7 \ 2|^T$, текущие их значения в ГСК вычислялись согласно соотношениям (3), после чего путем численного дифференцирования полученных значений определялись разности проекций скорости $V_{\xi i} - V_{\xi j}$, $V_{\eta i} - V_{\eta j}$, $V_{\zeta i} - V_{\zeta j}$, $i, j = 1, 2, 3$. В качестве модели шумов оценивания текущих значений базовых векторов и разностей проекций скорости был использован аддитивный гауссов вектор-шум с нулевым математическим ожиданием и СКО для векторов — 0,6 м, для разностей проекций скорости — 0,1 м/с. По окончании временного интервала моделирования и пересчета направляющих косинусов в углы Эйлера — Крылова α , β , γ по известным формулам [10] максимальные ошибки оценки углов составили: $\Delta \alpha = 7,5 \cdot 10^{-4}$ рад, $\Delta \beta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад, $\Delta \gamma = 8,4 \cdot 10^{-4}$ рад, что свидетельствует о возможности весьма эффективного практического использования предложенного подхода.

Заключение. По сравнению с существующими алгоритмами определения углового положения объекта [2, 6—9] предложенный динамический алгоритм, во-первых, обладает всеми известными преимуществами фильтра Калмана относительно одномоментных алгоритмов. Во-вторых, представленный алгоритм не предполагает увеличения числа спутников по сравнению со стандартным режимом определения линейных параметров движения (в отличие от большинства существующих алгоритмов [3, 7, 9]). И, в-третьих, преимуществом предложенного подхода является возможность построения многоструктурного фильтра параметров ориентации на базе трех навигационных приемников — за счет использования всех трех возможных сочетаний пар базовых векторов: для $ij \in \{12, 23\}, \{12, 13\}, \{23, 13\}$. При этом на выходах всех фильтров одновременно формируются три вектора угловых параметров, последующая обработка которых известными статистическими методами (например, робастными [5]) позволит существенно увеличить точность и устойчивость процесса оценивания углового положения объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС (5.1 редакция). М.: РНИИ КП, 2008.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. [Электронный ресурс]: <www.trimble.com>.
4. Анучин О. Н., Емельянцева Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ. ред. В. Г. Пешехонова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2003. 390 с.
5. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
6. Kleusberg B. Mathematics of attitude determination with GPS // GPS World. 1995. Sept. P. 72.
7. Nadler A., Bar-Itzhack I. Y. An efficient algorithm for attitude determination using GPS // ION GPS. 1998. P. 1783—1789.
8. Rapoport L., Varabanov I., Khvalkov A., Kutuzov A., Ashjaee J. Octopus: Multi antennae GPS/GLONASS RTK System // ION GPS. 2000. P. 797—804.
9. Перьков А. Е. Синтез и анализ алгоритмов определения пространственной ориентации объекта по сигналам навигационных спутников // Радиотехника. 2000. № 7. С. 17—30.
10. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 672 с.

Сведения об авторах

- Виктор Иванович Лукаевич** — аспирант; Институт управления, бизнеса и права, кафедра информационных систем, Ростов-на-Дону; E-mail: lukasevichvi@cmp.ru
- Сергей Олегович Крамаров** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт управления, бизнеса и права, Научный центр „МИР“, Ростов-на-Дону; директор; E-mail: mir@iubip.ru
- Сергей Викторович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматизации и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и телемеханики
на железнодорожном транспорте РГУПС

Поступила в редакцию
24.03.14 г.