

Оценка угловой скорости линии визирования в процессе сближения космических аппаратов по результатам измерения дальности и скорости продольного движения

© Н.Е. Зубов^{1,2}, Е.А. Микрин^{1,2}, А.С. Олейник¹

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва»,
г. Королев Московской области, 141070, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассматривается задача оценки угловой скорости линии визирования в процессе сближения космических аппаратов по результатам измерения дальности и скорости продольного движения. Получено ее аналитическое решение. Приведены численные решения данной задачи.

Ключевые слова: сближение КА, дальность, угловая скорость линии визирования, скорость продольного движения, метод точного размещения полюсов.

Введение. В пилотируемой космонавтике сближение космических аппаратов является штатной операцией, при этом она должна обладать повышенной надежностью реализации. В качестве измерительных средств параметров взаимного сближения в практике отечественных полетов используют радиотехнические системы. Несмотря на высокую надежность этих систем, возможность их отказов существует. В данной статье рассматривается один из возможных таких отказов, связанный с отсутствием измерений угловой скорости линии визирования. В этом случае для продолжения процесса сближения необходимо иметь бортовой алгоритм оценки угловой скорости линии визирования. Решению этой проблемы и посвящена данная работа.

1. Уравнения относительного движения в орбитально-лучевой системе координат. Рассмотрим орбитально-лучевую систему координат (рис. 1). Ось x направлена вдоль вектора дальности от цели до перехватчика (вдоль линии визирования), ось y лежит в плоскости орбиты цели, а ось z дополняет систему координат до правой тройки.

Векторы угловой скорости вращения орбитально-лучевой системы координат относительно инерциального пространства и относительной дальности имеют следующие компоненты:

$$\Omega = [\Omega_x \quad \Omega_y \quad \Omega_z]^T, \quad (1.1)$$

$$\mathbf{D} = [D, 0, 0]^T, \quad (1.2)$$

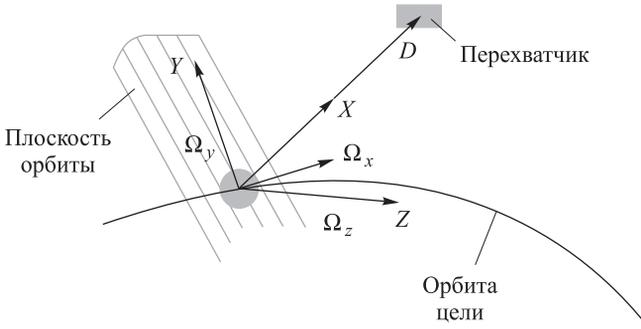


Рис. 1. Орбитально-лучевая система координат

Выполняя последовательно дифференцирование, получим:

$$\dot{\mathbf{D}} = [\dot{D}, \Omega_z D, -\Omega_y D]^T, \quad (1.3)$$

$$\ddot{\mathbf{D}} = [\ddot{D} - (\Omega_y^2 + \Omega_z^2)D, (\dot{\Omega}_z + \Omega_x \Omega_y)D + 2\Omega_z \dot{D}, (-\dot{\Omega}_y + \Omega_x \Omega_z)D - 2\Omega_y \dot{D}]^T.$$

Векторное уравнение взаимного сближения движения записывается так:

$$\ddot{\mathbf{D}} = \mathbf{g} + \mathbf{a}. \quad (1.4)$$

Здесь \mathbf{g} — вектор относительного гравитационного ускорения; \mathbf{a} — вектор управляющего ускорения.

Подставляя (1.3) в уравнение (1.4) и принимая во внимание тот факт, что на небольших расстояниях между перехватчиком и целью можно пренебречь относительным гравитационным ускорением, получим систему уравнений относительного движения в орбитально-лучевой системе координат:

$$\begin{aligned} \ddot{D} - (\Omega_y^2 + \Omega_z^2)D &= a_x, \\ (\dot{\Omega}_z + \Omega_x \Omega_y)D + 2\Omega_z \dot{D} &= a_y, \\ (-\dot{\Omega}_y + \Omega_x \Omega_z)D - 2\Omega_y \dot{D} &= a_z. \end{aligned} \quad (1.5)$$

2. Линеаризация системы уравнений относительного движения. Уравнение невязок. Перепишем систему (1.5) следующим образом (без учета управляющих воздействий):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (x_3^2 + x_4^2)x_1, \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= \frac{-2x_3x_2}{x_1} + \Omega_x x_4, \\ \dot{x}_4 &= \frac{-2x_4x_2}{x_1} - \Omega_x x_3,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [D \ \dot{D} \ \Omega_y \ \Omega_z]^T$.

Считаем, что на борту активного КА имеется бортовая вычислительная машина с тактом вычисления Δt . Для линеаризации системы (2.1) в окрестности значения вектора состояния на момент начала такта работы бортовой машины воспользуемся разложением в ряд Тейлора [1]:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= ([x_3^2 + x_4^2]x_1)\Big|_0 + (x_3^2 + x_4^2)\Big|_0 (x_1 - x_1^0) + (2x_3x_1)\Big|_0 (x_3 - x_3^0) + \\ &\quad + (2x_4x_1)\Big|_0 (x_4 - x_4^0),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= \left(\frac{-2x_3x_2}{x_1} + \omega_x x_4\right)\Big|_0 + \left(\frac{2x_3x_2}{x_1^2}\right)\Big|_0 (x_1 - x_1^0) - \left(\frac{2x_3}{x_1}\right)\Big|_0 (x_2 - x_2^0) - \\ &\quad - \left(\frac{2x_2}{x_1}\right)\Big|_0 (x_3 - x_3^0) + \omega_x (x_4 - x_4^0),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_4 &= \left(\frac{-2x_4x_2}{x_1} - \omega_x x_3\right)\Big|_0 + \left(\frac{2x_4x_2}{x_1^2}\right)\Big|_0 (x_1 - x_1^0) - \left(\frac{2x_4}{x_1}\right)\Big|_0 (x_2 - x_2^0) - \\ &\quad - \omega_x (x_3 - x_3^0) - \left(\frac{2x_2}{x_1}\right)\Big|_0 (x_4 - x_4^0).\end{aligned}$$

Запишем линеаризованную систему уравнений относительного движения в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{F}_0,\tag{2.2}$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_3^2 + x_4^2 & 0 & 2x_3x_1 & 2x_4x_1 \\ \frac{2x_3x_2}{x_1^2} & -\frac{2x_3}{x_1} & -\frac{2x_2}{x_1} & \Omega_x \\ \frac{2x_4x_2}{x_1^2} & -\frac{2x_4}{x_1} & -\Omega_x & -\frac{2x_2}{x_1} \end{bmatrix}\Big|_0,\tag{2.3}$$

$$F_0 = [0 \quad -2x_1^0 \{(x_3^0)^2 + (x_4^0)^2\} \quad 0 \quad 0]^T. \quad (2.4)$$

В дискретном случае система (2.2) будет иметь следующий вид:

$$x(n+1) = A^D(n)x(n) + F(n), \quad (2.5)$$

где индекс n — номер такта работы дискретной системы, $h = 0,2$ с — период квантования (длительность такта вычислительной бортовой ЭВМ),

$$A^D(n) = \begin{bmatrix} 1 & h & 0 & 0 \\ h(x_3^2 + x_4^2) & 1 & 2hx_3x_1 & 2hx_4x_1 \\ \frac{2x_3x_2}{x_1^2}h & -\frac{2x_3}{x_1}h & 1 - \frac{2x_2}{x_1}h & \Omega_x h \\ \frac{2x_4x_2}{x_1^2}h & -\frac{2x_4}{x_1}h & -\Omega_x h & 1 - \frac{2x_2}{x_1}h \end{bmatrix}_n, \quad (2.6)$$

$$F(n) = [0 \quad -2x_1h\{(x_3)^2 + (x_4)^2\} \quad 0 \quad 0]^T \Big|_n. \quad (2.7)$$

3. Алгоритм точного размещения полюсов при решении задач наблюдения и идентификации. Далее будем рассматривать динамический объект, описываемый уравнениями вида

$$x(n+1) = A(n)x(n) + F(n), \quad y(n) = Cx(n). \quad (3.1)$$

Наблюдатель полного ранга для системы (3.1) определяется уравнением

$$\hat{x}(n+1) = (\hat{A}(n) - LC)\hat{x}(n) + Ly(n) + \hat{F}(n). \quad (3.2)$$

Объединив (3.1) и (3.2), получим уравнение невязок

$$\tilde{x}(n+1) = (A_L(n) - LC)\tilde{x}(n). \quad (3.3)$$

В соответствии со сформулированной задачей известными параметрами измерения являются x_1, x_2 и неизвестными — x_3, x_4 . Следовательно, матрица C имеет вид

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для получения матрицы A_L для системы (2.5) необходимо разложить $x(n+1)$ и $F(n)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $\hat{x}(n)$:

$$x_2(n+1) = \hat{x}_2(n+1) + (2h\hat{x}_3x_1 + 4h\hat{x}_3x_1)\tilde{x}_3 + (2h\hat{x}_4x_1 + 4h\hat{x}_4x_1)\tilde{x}_4, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 x_3(n+1) &= \hat{x}_3(n+1) + \left(\frac{2x_2}{x_1} h - \frac{x_2}{x_1} h + \left[1 - \frac{x_2}{x_1} h \right] \right) \tilde{x}_3 + \Omega_x h \tilde{x}_4 = \tilde{x}_3 + \Omega_x h \tilde{x}_4, \\
 x_4(n+1) &= \hat{x}_4(n+1) - \Omega_x h \tilde{x}_3 + \left(\frac{2x_2}{x_1} h - \frac{x_2}{x_1} h + \left[1 - \frac{x_2}{x_1} h \right] \right) \tilde{x}_4 = -\Omega_x h \tilde{x}_3 + \tilde{x}_4, \\
 F &= \hat{F} - 4hx_1\hat{x}_3\tilde{x}_3 - 4hx_1\hat{x}_4\tilde{x}_4.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Окончательно матрица для системы невязок примет вид

$$A_L = \begin{bmatrix} 1 & h & 0 & 0 \\ h(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^2) & 1 & 2h\hat{x}_3x_1 & 2h\hat{x}_4x_1 \\ \frac{2\hat{x}_3x_2}{x_1^2} h & -\frac{2\hat{x}_3}{x_1} h & 1 & \Omega_x h \\ \frac{2\hat{x}_4x_2}{x_1^2} h & -\frac{2\hat{x}_4}{x_1} h & -\Omega_x h & 1 \end{bmatrix}. \tag{3.5}$$

Выбором матрицы коэффициентов L при известных матрицах A_L и C всегда можно обеспечить любое заданное размещение на комплексной плоскости корней характеристического полинома

$$\det(\lambda J_n - (A_L - LC)).$$

Для решения задачи оценки угловой скорости линии визирования воспользуемся следующим алгоритмом синтеза наблюдателя состояния полного ранга [2].

1. Задать матрицы
2. $A_0 = A^\Gamma$, $B_0 = C^\Gamma$.
2. Вычислить

$$N = \text{ceil}\left(\frac{n}{m}\right) - 1. \tag{3.6}$$

3. Задать матрицы $\Phi = \Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_N$ такие, что

$\bigcup_{i=1}^{N+1} \text{eig}(\Phi_{i-1})$ — желаемый спектр наблюдателя состояния.

4. Вычислить ортогональный аннулятор B_{k-1}^\perp , а затем матрицы

$$\begin{aligned}
 A_k &= B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}^{\perp\Gamma}, \\
 B_k &= B_{k-1}^\perp A_{k-1} B_{k-1}, \\
 k &= \overline{1, N}.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

5. Последовательно вычислить матрицы

$$\begin{aligned} L_N^\Gamma &= \Phi_N B_N^+ - B_N^+ A_N, \\ B_k^- &= B_k^+ - L_{k+1}^\Gamma B_k^\perp, \\ L_k^\Gamma &= \Phi_k B_k^- - B_k^- A_k, \\ k &= \overline{N-1, 0}. \end{aligned} \tag{3.8}$$

Здесь B_0^+, \dots, B_N^+ — псевдообратные матрицы Мура — Пенроуза.

В случае если некоторые матрицы B_k (3.7) не являются матрицами полного ранга, воспользоваться алгоритмом напрямую нельзя. Тогда необходимо воспользоваться скелетным разложением матрицы B_k :

$$B_k = \widehat{B}_k T. \tag{3.9}$$

Если приведенный алгоритм «перезапустить» для пары матриц $(A_{k,k-1}, B_{k,k-1})$

$$\begin{aligned} A_{k,k-1} &= A_k, \\ B_{k,k-1} &= \widehat{B}_k, \end{aligned}$$

то получим новый подуровень декомпозиции

$$\begin{aligned} A_{k,k} &= B_{k,k-1}^\perp A_k B_{k,k-1}^{\perp\Gamma}, \\ B_{k,k} &= B_{k,k-1}^\perp A_k B_{k,k-1}, \end{aligned} \tag{3.10}$$

где $B_{k,k} \neq 0$.

Известно, что регулятор \widehat{F}_k , обеспечивающий заданное размещение полюсов управляемой пары матриц (A_k, \widehat{B}_k) , т. е.

$$\text{eig}(A_k + \widehat{B}_k \widehat{F}_k) \subset C^{\text{stab}},$$

дает в преобразованном виде $T_k^+ \widehat{F}_k$ такое же размещение полюсов исходной пары матриц (A_k, B_k) :

$$\text{eig}(A_k + B_k T_k^+ \widehat{F}_k) = \text{eig}(A_k + \widehat{B}_k \widehat{F}_k) \subset C^{\text{stab}}. \tag{3.11}$$

4. Применение алгоритма точного размещения полюсов при решении задачи оценки угловой скорости линии визирования в процессе сближения космических аппаратов. Применим изложенный выше подход к решению задачи оценки угловой скорости линии визирования при сближении КА.

В соответствии с (3.10) имеем:

$$A^T = \begin{bmatrix} 1 & a_{21} & a_{31} & a_{41} \\ h & 1 & a_{32} & a_{42} \\ 0 & a_{23} & 1+a_{33} & -a_{34} \\ 0 & a_{24} & a_{34} & 1+a_{33} \end{bmatrix}, \quad C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

В данном случае размерность подпространств состояний, описывающих систему, — $n = 4$, наблюдаемых переменных — $m = 2$. Число уровней декомпозиции для каждого канала из выражения (3.6)

$$N = \text{ceil}\left(\frac{n}{m}\right) - 1 = 2 - 1 = 1$$

— два (нулевой и первый).

Согласно введенной многоуровневой декомпозиции, нулевой уровень для системы (3.3) с матрицами (4.1) имеет вид:

$$A_0 = A^T, \quad B_0 = C^T. \quad (4.2)$$

С учетом (4.1) имеем:

$$B_0^\perp = (C^T)^\perp = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_0^+ = (C^T)^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Первый уровень выглядит следующим образом:

$$A_1 = B_0^\perp A_0 B_0^{\perp T} = (C^T)^\perp A^T (C^T)^{\perp T} = \begin{bmatrix} 1+a_{33} & -a_{34} \\ a_{34} & 1+a_{33} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$B_1 = B_0^\perp A_0 B_0 = (C^T)^\perp A^T C^T = \begin{bmatrix} 0 & a_{23} \\ 0 & a_{24} \end{bmatrix}.$$

Анализ матрицы B_1 показывает наличие у нее нарушения полноты ранга по столбцам и необходимости выполнения «скелетного разложения». В соответствии с выражением (3.9) определим

$$B_1 = \widehat{b}_1 T, \quad \widehat{b}_1 = \begin{bmatrix} a_{23} \\ a_{24} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Тогда:

$$\widehat{b}_1^\perp = \begin{bmatrix} -\frac{a_{24}}{a_{23}} & 1 \end{bmatrix}, \quad \widehat{b}_1^+ = \begin{bmatrix} \frac{a_{23}}{a_{23}^2 + a_{24}^2} & \frac{a_{24}}{a_{23}^2 + a_{24}^2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

В соответствии с (3.10) для пары матриц (\widehat{b}_1, A_1) получим новый подуровень декомпозиции:

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= b_{1,0}^\perp A_1 b_{1,0}^{\perp\Gamma} = \widehat{b}_1^\perp A_1 \widehat{b}_1^{\perp\Gamma} = \\ &= \frac{-\left(-\frac{a_{24}}{a_{23}}(1+a_{33})+a_{34}\right)a_{23}a_{24}}{a_{23}^2+a_{24}^2} + \frac{\left(\frac{a_{24}}{a_{23}}a_{34}+1+a_{33}\right)a_{23}^2}{a_{23}^2+a_{24}^2}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$b_{1,1} = b_{1,0}^\perp A_1 b_{1,0} = \widehat{b}_1^\perp A_1 \widehat{b}_1 = \left(-\frac{a_{24}}{a_{23}}(1+a_{33})+a_{34}\right)a_{23} + \left(\frac{a_{24}}{a_{23}}a_{34}+1+a_{33}\right)a_{24}.$$

Зададим матрицы Φ_0, Φ_1 в следующем виде:

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} f_{01} & 0 \\ 0 & f_{02} \end{bmatrix}, \quad \Phi_1 = \begin{bmatrix} f_{11} & 0 \\ 0 & f_{12} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Выполняя вычисления по формулам (3.8) с учетом (4.2)–(4.8), получим

$$\begin{aligned} L_{1,1}^\Gamma &= \frac{f_{12}-a_{1,1}}{b_{1,1}} = -\frac{(-f_{12}+1+a_{33})a_{23}}{a_{34}(a_{23}^2+a_{24}^2)}, \\ \widehat{b}_1^- &= \widehat{b}_1^+ - L_{1,1}^\Gamma \widehat{b}_1^\perp, \\ \widehat{L}_1^\Gamma &= f_{11} \widehat{b}_1^- - \widehat{b}_1^- A_1. \end{aligned}$$

Принимая во внимание (3.11) и (4.5), получим:

$$\begin{aligned} L_1^\Gamma &= [0 \quad 1]^\Gamma \widehat{L}_1^\Gamma, \\ B_0^- &= B_0^+ - L_1^\Gamma B_0^\perp, \\ L^\Gamma &= \Phi_0 B_0^- - B_0^- (A^\Gamma)_0 = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

где:

$$\begin{aligned} l_{11} &= f_{01} - 1, \\ l_{12} &= -a_{21}, \\ l_{13} &= -a_{31}, \\ l_{14} &= -a_{41}, \\ l_{21} &= -h, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{22} &= f_{02} + f_{11} + f_{12} - 2a_{33} - 3, \\
 l_{23} &= \frac{-a_{24}(f_{02} + f_{11} + f_{12} - f_{02}f_{11} - f_{02}f_{12} - f_{11}f_{12} + f_{02}f_{11}f_{12} - 1)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{(a_{24}a_{34}^2 - a_{24}a_{33}^2 + 2a_{23}a_{33}a_{34})(f_{02} + f_{11} + f_{12} - 3)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{(a_{23}a_{34} - a_{24}a_{33})(2f_{02} + 2f_{11} + 2f_{12} - f_{02}f_{11} - f_{02}f_{12} - f_{11}f_{12} - 3)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{a_{24}a_{33}^3 + a_{23}a_{34}^3 - a_{32}a_{34}a_{23}^2 - a_{32}a_{34}a_{24}^2 - 3a_{23}a_{34}a_{33}^2 - 3a_{24}a_{33}a_{34}^2}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)}, \\
 l_{14} &= \frac{a_{23}(f_{02} + f_{11} + f_{12} - f_{02}f_{11} - f_{02}f_{12} - f_{11}f_{12} + f_{02}f_{11}f_{12} - 1)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{(a_{23}a_{33}^2 - a_{23}a_{34}^2 + 2a_{24}a_{33}a_{34})(f_{02} + f_{11} + f_{12} - 3)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{(a_{23}a_{33} + a_{24}a_{34})(2f_{02} + 2f_{11} + 2f_{12} - f_{02}f_{11} - f_{02}f_{12} - f_{11}f_{12} - 3)}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)} + \\
 &+ \frac{a_{24}a_{34}^3 - a_{23}a_{33}^3 - a_{34}a_{42}a_{23}^2 - a_{34}a_{42}a_{24}^2 + 3a_{23}a_{33}a_{34}^2 - 3a_{24}a_{34}a_{33}^2}{a_{34}(a_{23}^2 + a_{24}^2)}.
 \end{aligned}$$

Соответственно матричное произведение LC , входящее в (3.3), для каналов управления будет равно:

$$LC = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & 0 & 0 \\ l_{12} & l_{22} & 0 & 0 \\ l_{13} & l_{23} & 0 & 0 \\ l_{14} & l_{24} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Уравнения (3.2) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_1(n+1) &= x_1(n) + hx_2(n) + l_{11}\varepsilon_1(n+1) + l_{21}\varepsilon_2(n+1), \\
 \hat{x}_2(n+1) &= h(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^2)x_1(n) + x_2(n) + l_{12}\varepsilon_1(n+1) + l_{22}\varepsilon_2(n+1), \\
 \hat{x}_3(n+1) &= \left(1 - \frac{2\hat{x}_3x_2}{x_1}h\right)\hat{x}_3(n) + h\Omega_x\hat{x}_4(n) + l_{13}\varepsilon_1(n+1) + l_{23}\varepsilon_2(n+1), \\
 \hat{x}_4(n+1) &= -h\Omega_x\hat{x}_3(n) + \left(1 - \frac{2\hat{x}_4x_2}{x_1}h\right)\hat{x}_4(n) + l_{14}\varepsilon_1(n+1) + l_{24}\varepsilon_2(n+1),
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

где

$$\varepsilon_1(n) = x_1(n) - \hat{x}_1(n), \quad \varepsilon_2(n) = x_2(n) - \hat{x}_2(n). \quad (4.12)$$

Рассмотрим несколько численных примеров оценки угловой скорости линии визирования по результатам измерения дальности и скорости продольного движения для различных наборов начальных значений вектора состояния активного КА относительно пассивного. Величина $\hat{\Omega}_y^2 + \hat{\Omega}_z^2$ представлена на конец пятой вычислительной итерации. Результаты сведем в таблицу.

№	$D, \text{ м}$	$\dot{D}, \text{ м/с}$	$\Omega_y,$ 1/с	$\Omega_z,$ 1/с	$\hat{\Omega}_y,$ 1/с	$\hat{\Omega}_z,$ 1/с	$\Omega_y^2 + \Omega_z^2;$ $10^{-5}, 1/\text{с}^2$	$\hat{\Omega}_y^2 + \hat{\Omega}_z^2,$ $10^{-5} 1/\text{с}^2$
1.	200	-1,0	0,006	0,008	0,005	0,005	10,040	9,974
2.	150	-0,7	-0,003	0,007	0,005	0,005	5,821	5,794
3.	100	-0,5	0,003	-0,004	0,005	0,005	2,510	2,524
4.	50	-0,2	-0,009	-0,003	0,005	0,005	9,028	8,977

Изменение величины отклонения квадрата угловой скорости линии визирования за пять вычислительных итераций представлено на рис. 2.

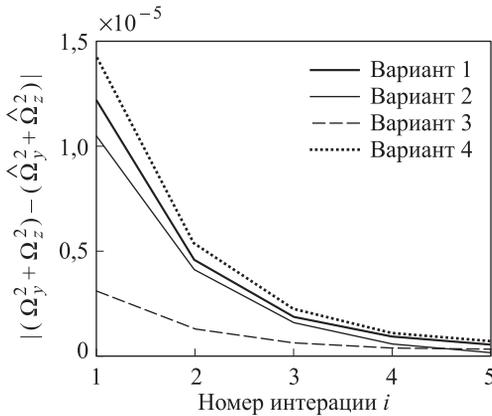


Рис. 2. Отклонение квадрата угловой скорости линии визирования

Следовательно, за пять тактов работы бортового алгоритма обеспечивается сходимость итерационного процесса оценки вектора угловой скорости линии визирования. Учитывая, что решение (4.9) представляет собой аналитические выражения, вычислительные затраты незначительны, и он вполне может быть реализован в реальном масштабе времени.

Заключение. В статье рассмотрена задача восстановления вектора состояния при сближении космических аппаратов при наличии отказа в канале измерения угловой скорости линии визирования. Раз-

работан бортовой алгоритм оценки и получено аналитическое решение для этого алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Определения, теоремы, формулы. Москва, Наука, 1973.
- [2] Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением КА. *Изв. РАН. ТуСУ*, 2013, № 2, с. 148–162.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1079.html>

Зубов Николай Евгеньевич — д-р техн. наук, заместитель руководителя по науке научно-технического центра ОАО «РКК "Энергия" имени С.П. Королёва», профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 работ в области проблем управления космических аппаратов. e-mail: Nikolay.Zubov@rsce.ru

Микрин Евгений Анатольевич — д-р техн. наук, академик РАН, первый заместитель генерального конструктора ОАО «РКК "Энергия" имени С.П. Королёва», заведующий кафедрой «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 работ в области проблем управления космических аппаратов.

Олейник Алексей Сергеевич — аспирант ОАО «РКК "Энергия" имени С.П. Королёва». Автор 2 работ в области проблем управления космических аппаратов.