



УДК 629.05

© 2018 г. **А.С. Девятисильный**, д-р техн. наук,  
**А.В. Шурыгин**

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС

Представлена математическая модель обратной траекторной задачи, изложена технология, выполнено исследование и предложены процедуры для повышения разрешимости задачи в условиях конечной точности измерения и представления чисел в вычислительной среде. Предложен нейроподобный алгоритм решения калмановского типа. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** спутниковая навигационная система, ГЛОНАСС, обратная траекторная задача, движение, скорость, нейроподобный алгоритм.

DOI: 10.22250/isu.2018.55.42-50

### Введение

Разнообразная и интенсивная деятельность человека на море и в околоземном пространстве (коммерческая навигация и решение вопросов оборонного значения, гидрографические и геофизические исследования, разведка полезных ископаемых и т.п.) может быть обеспечена только при условии высококачественного решения базовой задачи навигации – определения параметров движения, т.е. местоположения объекта навигации, его скорости, реже ускорения, а еще реже – рывка. Немаловажным является и то, что знание параметров движения необходимо при оценке динамических и конструкционных характеристик подвижных объектов в процессе их ходовых испытаний и эксплуатации.

Выдающимся достижением в области навигационного обеспечения движения явилось создание первых низкоорбитальных навигационных спутниковых систем (НСС) в 60-е гг. XX столетия (Transit – США, Циклон – СССР). В начале XXI в. наиболее широкое применение нашли среднеорбитные НСС (типа GPS –

США, ГЛОНАСС – Россия). В таких НСС для определения параметров траектории подвижного объекта могут быть реализованы различные методы [1], но в качестве базового, справедливо было бы указать на псевдодальномерный метод (дополненный, безусловно, известными методологиями компенсации погрешностей, вносимых источниками различной природы), весьма эффективно решающий проблему прецизионного оценивания координат местоположения объекта. В настоящей статье рассматриваются именно координаты места объекта в качестве исходной информации при конструировании бортовых (на объекте) алгоритмов оценивания других параметров траектории, из числа которых важнейшим является вектор скорости объекта относительно твердой Земли.

### Основные модельные представления

Прежде всего, учитывая, что речь идет о навигации объектов в околоземном пространстве, причем главным образом о морских объектах и маловысотных объектах морского базирования, в качестве опорной модели формы Земли естественно принять эллипсоид вращения (эллипсоид Клеро) с поверхностью (называемой уровенной), ортогональной направлению силы тяжести на спокойной поверхности океана [2]. Соответственно этому введем эллиптическую (или геодезическую) систему отсчета с координатами  $\{\varphi^e, \lambda^e, h\}$ , определяемую так [2], что  $\varphi^e$  и  $\lambda^e$  – широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, а  $h$  – расстояние по нормам от поверхности эллипсоида. С подвижной точкой  $O_1$ , отождествляемой с подвижным объектом, свяжем декартову систему координат  $O_1\xi_1^e \xi_2^e \xi_3^e = O_1\xi^e$  с осями, ориентированными соответственно на Восток ( $O_1\xi_1^e$ ), Север ( $O_1\xi_2^e$ ), по нормали к поверхности эллипсоида ( $O_1\xi_3^e$ ). Введем также геоцентрическую систему отсчета  $O\eta = O\eta_1\eta_2\eta_3$  (в системе ГЛОНАСС определяемую как ПЗ-90, а в системе GPS – как WGS-84 [1]) с началом в точке  $O$  (центр Земли), декартовыми координатами  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$  и сферическими координатами  $\{\varphi, \lambda, r\}$ , где  $\varphi$  и  $\lambda$  – соответственно широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта,  $r$  – радиус точки  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$ , т.е. длина отрезка  $OO_1$ . Связь между координатами  $\{\varphi, \lambda, r\}$  и  $\{\varphi^e, \lambda^e, h\}$  известна [2]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda^e; \\ \operatorname{tg} \varphi &= \left[ 1 - \frac{ae}{a + h\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi^e}} \right] \operatorname{tg} \varphi^e; \\ r &= \left\{ \left[ \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi^e}} + h \right]^2 \cos^2 \varphi^e + \left[ \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi^e}} + h \right]^2 \sin^2 \varphi^e \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

С подвижной точкой  $O_1$  свяжем еще одну декартову систему координат  $O_1\xi_1 \xi_2 \xi_3 = O_1\xi$  с осями, ориентированными соответственно на Восток ( $O_1\xi_1$ ), Се-

вер ( $O_1\xi_2$ ), по радиус-вектору точки  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$ , т.е.  $O_1\xi_3$ . Имеет место следующее ортогональное преобразование [2]:

$$\begin{aligned}\xi_1^e &= \xi_1; \\ \xi_2^e &= \cos(\varphi^e - \varphi)\xi_2 - \sin(\varphi^e - \varphi)\xi_3; \\ \xi_3^e &= \sin(\varphi^e - \varphi)\xi_2 + \cos(\varphi^e - \varphi)\xi_3.\end{aligned}$$

С учетом изложенного выше отметим, что, вообще говоря, все равно, в какой из связанных с Землей систем отсчета решать навигационную задачу, вместе с тем результат интерпретации ее решения неизбежно потребует более внимательного отношения к этой несложной проблеме. Например, если, в конечном итоге, обсуждаются скорости морских течений, то, очевидно, они должны быть представлены в касательных плоскостях эллипсоида.

Перейдем к модели траектории. Обратимся к подвижной системе отсчета  $O_1\xi$ . В проекции на ее оси вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, т.е.  $V = (V_1, V_2, V_3)^T$ , определяется следующим образом:  $V_i = e_{ikj}\omega_k r_j = r_i(i, k, j) = 1, 3$ , где  $e_{ikj}$  – псевдотензор Леви-Чивиты;  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$  – вектор угловой скорости вращения трехгранника  $O_1\xi$  в проекциях на собственные оси;

$$\begin{aligned}\omega_1 &= -\frac{d\varphi}{dt}; \\ \omega_2 &= \frac{d\lambda}{dt} \cos \varphi; \\ \omega_3 &= \frac{d\lambda}{dt} \sin \varphi;\end{aligned}$$

$r^v = (0, 0, r)^T$  – вектор местоположения объекта в проекциях на оси трехгранника  $O\xi$ . Тогда  $d\varphi/dt = V_2/r$ ,  $d\lambda/dt = (V_1/r)\cos\varphi$ ,  $dr/dt = V_3$ . отождествляя теперь по координатные составляющие скорости с полиномиальными степени  $n - 2$  функциями времени, определенными на интервале, вообще говоря, произвольной длины  $\tau$ , модель эволюции геодезических сферических координат объекта можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1^{(i)}}{dt} &= \rho^{(i)} x_2^{(i)}; & x_1^{(i)}(t_0) &= x_{1,0}^{(i)}; \\ \frac{dx_1^{(i)}}{dt} &= x_2^{(i)}; & x_2^{(i)}(t_0) &= x_{2,0}^{(i)}; \\ &\vdots & & \\ \frac{dx_1^{(i)}}{dt} &= 0; & x_n^{(i)}(t_0) &= x_{n,0}^{(i)};\end{aligned}$$

или в общем виде:

$$\frac{dx^{(i)}}{dt} = A^{(i)} x^{(i)}; x^{(i)}(0) = x_0^{(i)}; i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где индексы  $i = 1, 2, 3$  кодируют процессы, соответствующие  $\varphi(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $r(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + \tau]$ ;  $x_1^{(1)} = \varphi$ ,  $x_1^{(2)} = \lambda$ ,  $x_1^{(3)} = r$ ,  $x_2^{(1)} = V_2$ ,  $x_2^{(2)} = V_1$ ,  $x_2^{(3)} = V_3$  и т.д.;  $\rho^{(1)} = 1/r$ ,

$$\rho^{(2)} = (-1/r)\cos \varphi, \rho^{(3)} = 1.$$

Полагая, что НСС доставляет потребителю (объекту) информацию в виде оценок его координат  $(\varphi, \lambda, r)$ , будем интерпретировать эти оценки как измерения, т.е.  $z^{(i)} = x_1^{(i)} + \varepsilon^{(i)}$ , или

$$z^{(i)} = Hx^{(i)} + \varepsilon^{(i)}, i = \overline{1,3}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon^{(i)}$  – погрешности оценок;  $H = (1, 0, 0)$ .

Легко видеть, что совокупность уравнений (1) и (2) может рассматриваться в качестве совокупности трех схожих обратных задач типа «состояния – измерения», целью решения которых являются оценки векторов  $x^{(i)}$ , причем прежде всего их компонент  $x_2^{(i)}$ , т.е. составляющих вектора  $V$  скорости объекта.

Учитывая отмеченную схожесть задач, далее будем обсуждать только одну из них (как типовую с  $i = 1$ ), опуская в ее записи индекс, т.е. задачу

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax; & x(0) &= x_0; \\ z &= Hx + \varepsilon; & \dim x &= n. \end{aligned} \quad (3)$$

Матрица  $A$  нильпотентна с индексом  $q = n$ , т.е.  $A^n = 0$ ; она имеет  $(n - 1)$  отличных от нуля элементов:  $A_{1,2} = \rho$  и  $A_{i,j} = 1$  при  $i > 1$  и  $j = i + 1$ .

При численном решении сформулированной обратной задачи требуется обращение к дискретной модификации модели (3), которую, с учетом сказанного выше о матрице  $A$ , на интервале времени  $[t_k, t_{k+1}]$ ,  $t_{k+1} - t_k = \tau = \text{const}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , можно записать в виде

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_k(\tau)x_k; \\ z_{k+1} &= H_{k+1}x_{k+1} + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_k(\tau)x_k; \\ z_{k+1} &= H_{p,k+1}x_{k+1} + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\Phi_k(\tau) = \begin{pmatrix} 1 & \rho\tau & \frac{\rho\tau^2}{2!} & \dots & \frac{\rho\tau^{n-2}}{(n-2)!} & \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \\ 0 & 1 & \tau & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$H_{k+1} = H = (1, 0, \dots, 0),$$

$$H_{p,k+1} = H_{k+1}\Phi_k(\tau) = \left( 1, \rho\tau, \frac{\rho\tau^2}{2!}, \dots, \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \right).$$

Представление (4) является точным по отношению к (3), если  $\rho = \text{const}$ , и тем точнее, чем меньше  $\tau$ , если  $\rho = \rho(t)$ ; вместе с этим следует особо отметить, что с уменьшением  $\tau$  неизбежно ухудшение разрешимости обратной задачи (по Адамару) в условиях конечной точности измерений и вычислений. Изменить ситуацию к лучшему можно, вводя процедуры преобразования переменных, приводящие к формам, не зависящим от  $\rho$  и  $\tau$ .

Здесь рассматриваются две такие процедуры (соответственно – два метода, две методологии, две технологии) – одноэтапная и двухэтапная.

Одноэтапная процедура выполняется в следующей последовательности:

1. Форматируется матрица наблюдаемости  $N_p$  для пары  $(H_p, \Phi(\tau))$  модели (4).
2. Определяются евклидовы нормы  $\|N_{p,i}\|$  столбцов  $N_{p,i}$  ( $i = 1, n$ ) матрицы  $N_p$ .
3. Формируется диагональная матрица  $D = \text{diag}(\|N_{p,1}\|, \dots, \|N_{p,n}\|)$  – матрица преобразования переменных  $x^q = Dx$ .
4. Модель (4) приводится к форме

$$\begin{aligned} x_{k+1}^q &= \Phi_k^- x_k^q; \\ z_{k+1} &= H_k^- x_k^q + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \tag{5}$$

где  $\Phi_k^- = D \Phi_k(\tau) D^{-1}$ ,  $H_k^- = H_{p,k} D^{-1}$ .

Сравниваются числа обусловленности матриц наблюдаемости исходной модели (4) и полученной модели (5), т.е.  $\mu(N_p)$  и  $\mu(N_{pN})$ , где  $N_{pN} = N_p D^{-1}$ , и делаются выводы о рассмотренном преобразовании переменных.

Двухэтапная процедура учитывает особенность вида матрицы  $H_p$ . При изложении этой процедуры для наглядности примем  $n = 5$ . На первом этапе выполняется следующее:

1. Модель (4) с помощью преобразования  $f = D_f x$ , где  $D_f = \text{diag}(1, \rho\tau, \rho\tau^2/2!, \rho\tau^3/3!, \rho\tau^4/4!)$  приводится к виду

$$\begin{aligned} f_{k+1} &= \Phi_{f,k} f_k; \\ z_{k+1} &= H_{f,k} f_k + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \tag{6}$$

где

$$\Phi_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$H_f = (1, 1, 1, 1, 1).$$

2. Для пары  $(\Phi_f, H_f)$  строится матрица наблюдаемости

$$N_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 16 \\ 1 & 3 & 9 & 27 & 81 \\ 1 & 4 & 16 & 64 & 256 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 \end{pmatrix}.$$

Оценивается сингулярное число обусловленности  $\mu(N_f)$  и делается заключение о целесообразности решения обратной задачи (при заданном  $n$ ) уже на этом этапе; здесь заметим, что матрицы  $\Phi_f$  и  $N_f$  имеют специальный вид: матрица  $\Phi_f$  является верхнетреугольной с целочисленными элементами  $\Phi_{i,i} = 1$ ,  $\Phi_{1,j} = 1$ ,  $\Phi_{i+i,j+1} = \Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,j}$ ,  $(i, j) = 1, n$ ,  $i \geq j$ , а матрица  $N_f$  состоит из целочисленных элементов  $N_{i,j} = i^{j-1}$ ,  $(i, j) = 1, n$ .

На втором этапе, если он оказывается необходим, выполняется еще одно преобразование переменных  $S_k = D_s f$ , где  $D_s = \text{diag}(\|N_{f,1}\|, \dots, \|N_{f,n}\|)$ , при котором матрица  $N_f = N_s D_s$ , где  $N_s$  – матрица с единичными нормами столбцов. Учитывая далее, что  $N_p = N_f D_f = N_s D_s D_f$  и  $D = D_s D_f$  (это легко проверяется), находим, что  $N_s = N_{pN}$ , т.е.  $S_k = x_k^q$ , и, таким образом, актуализируется модель (5).

Несмотря на то, что конечный результат обеих процедур, как видим, одинаковый, вторая из них более продуктивна, когда речь идет об исследовании сепаратного влияния параметров  $(\rho, \tau)$  и  $n$  («проклятие размерности») на разрешимость рассматриваемой задачи. Заметим, что число этапов в поставленной задаче можно увеличить, если, например, в качестве первого преобразования взять преобразование с матрицей  $D_p = \text{diag}(1, \rho, \dots, \rho)$ . Наконец, возможны и экзотические процедуры, когда переменные преобразуются по-разному, если актуальны какие-либо системные представления, отличные от придерживаемых здесь.

Некоторые результаты исследования проблемы «проклятия размерности» будут представлены несколько в таблице, где указаны числа обусловленности матриц наблюдаемости.

Перейдем теперь к представлению алгоритма динамического обращения и остановимся на нейросетевой концепции [3], приняв за основу линейный динамический алгоритм (согласованный с моделями (4) и (5)) следующего вида:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= C_k y_k + K z_{k+1}; \\ y(0) &= y_0, \end{aligned}$$

где  $y_k$  – оценка вектора  $x_k^q$ ;  $x_k^q = D^{-1} p y_k$  – оценка вектора  $x_k$ ;  $C_k = \Phi_k^- - K_k H_k^0$ ;  $K_k = (K_1, \dots, K_n)^T$  – матрица (вектор) синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум квадратического критерия  $J_{k+1} = \|z_{k+1} - H_k x_k^*\|^2 + \|x_{2,k}^* - x_{2,k+1}^*\|^2 \tau + \|x_{3,k}^* - x_{3,k+1}^*\|^2 \tau^2$  при обращении к ядерному механизму настройки [3], базирующемуся на калмановской модели фильтрации [4]:

$$\begin{aligned}
K_{k+1} &= P_{k+1}^- (H_{k+1}^-)^T \left[ H_{k+1}^- P_{k+1}^- (H_{k+1}^-)^T + R_{k+1} \right]^{-1}; \\
P_{k+1}^- &= \Phi_k^- P_k (\Phi_k^-)^T + Q_k^*; \\
P_{k+1} &= \left[ E - K_{k+1} H_{k+1}^- \right] P_{k+1}^-; \\
P(0) &= P_0,
\end{aligned}$$

где  $E$  – единичная матрица;  $(P_k, P_k^-)$  – матрицы, отождествляемые с дисперсионными (но, строго говоря, не являющиеся таковыми);  $R_k$  – положительно определенная матрица, отождествляемая с известной интенсивностью шумов измерения (в нашем случае это заданная скалярная величина);  $Q_{k+1}^* = \arg \min_Q J_{k+1}$ ,  $Q$  – положительная диагональная матрица; при этом механизм настройки синаптических коэффициентов  $K$  на каждом шаге отождествляется с решением экстремальной задачи  $J_{k+1}^* = \min_{Q^* \in Q} J_{k+1}$ , над полем  $N_Q = 3^n$  значений  $J$  (например, при  $n = 5$ ,  $N_Q = 242$ ).

$n$	$\mu(N_p, \tau_1)$	$\mu(N_p N, \tau_1)$	$\mu(N_f, \tau_1)$	$\mu(N_s, \tau_1)$
	$\mu(N_p, \tau_2)$	$\mu(N_p N, \tau_2)$	$\mu(N_f, \tau_2)$	$\mu(N_s, \tau_2)$
2	6.3710e+07	6.1623	6.8541	6.1623
	1.2742e+07	6.1623	6.8541	6.1623
3	7.2795e+08	39.0077	70.9231	39.0077
	6.0844e+07	39.0077	70.9231	39.0077
4	8.0047e+09	262.9437	1.1710e+03	262.9437
	2.2291e+08	262.9437	1.1710e+03	262.9437
5	8.7781e+10	1.8524e+03	2.6170e+04	1.8524e+03
	7.4783e+08	1.8524e+03	2.6170e+04	1.8524e+03
10	1.3968e+16	4.1966e+07	2.1063e+12	4.1966e+07
	2.4634e+11	4.1966e+07	2.1063e+12	4.1966e+07
19	3.3225e+25	4.0542e+15	2.8640e+26	4.0793e+15
	1.0438e+16	4.0431e+15	5.1125e+24	4.0507e+15
20	3.7743e+26	2.9984e+16	1.4788e+26	2.9904e+16
	7.5995e+16	3.0201e+16	3.3490e+26	3.0396e+16

### Вычислительный эксперимент

Основная цель численных исследований – это верификация особенностей и эффективности представлений, изложенных выше.

Обратимся к таблице и отметим следующее: пробные реализации алгоритмов динамического обращения рассматриваемой обратной задачи в исходных (физических) переменных (модель (4)) показали их несостоятельность в используемой вычислительной среде с конечной относительной точностью ( $\varepsilon_0 = 2,2 \cdot 10^{-16}$ ) представления чисел, что объяснимо большими значениями чисел обусловлен-

ности матриц наблюдаемости ( $\mu(N_p)$ ) при актуальных значениях  $\tau \leq 1$ . Преобразование переменных с неизбежностью приводит к новой модели задачи (5) со значительно лучшей ее обусловленностью ( $\mu(N_{pN}) \ll \mu(N_p)$ ) и, как следствие, устойчивому и эффективно по точности ее решению (рис. 1 – 4). Вместе с тем обращает на себя внимание и то, что сам процесс численного преобразования переменных и вычисления чисел обусловленности в среде с ограниченной точностью представления чисел в ней с ростом  $n$  приводит к заметным искажениям значений этих важнейших показателей разрешимости задачи («проклятие размерности»), что хорошо видно по таблице при  $n = 19$  и  $n = 20$ , когда нарушается очевидное из ранее изложенного свойства независимости нормированных матриц, а следовательно, и их чисел обусловленности  $\mu(N_{pN})$ ,  $\mu(N_f)$  и  $\mu(N_s)$  от значений  $\tau$ , а также равенство  $\mu(N_{pN}) = \mu(N_s)$ ; в таблице  $\tau_1 = 0,2$  с и  $\tau_2 = 1$  с.

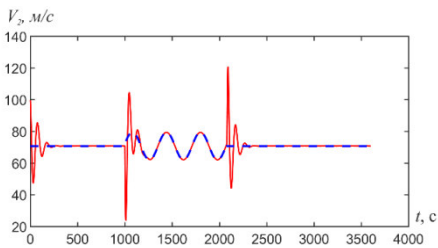


Рис. 1. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинной (пунктирная линия) скорости  $V_2$ .

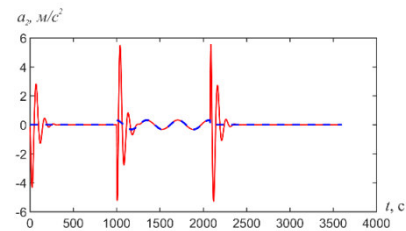


Рис. 2. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинного (пунктирная линия) ускорения  $a_2 = dV_2/dt$ .

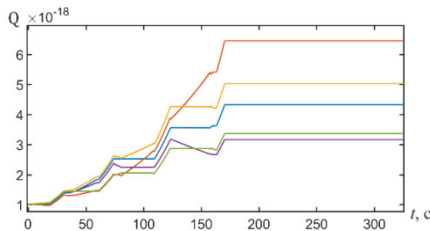


Рис. 3. Графики настройки элементов матрицы  $Q$ .

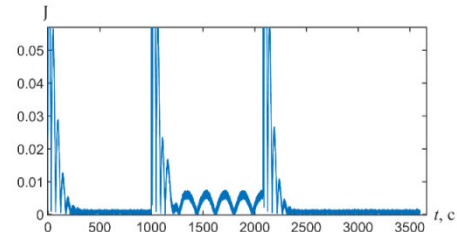


Рис. 4. График эволюции значений  $J$ .

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты имитационного численного эксперимента при  $n = 5$  и  $\tau = 0,2$  с, проводимого для северной широты  $\varphi = 45^\circ$  и скорости движения объекта  $|V| = 100$  м/с. Наблюдаемое время движения объекта,  $0 \leq t \leq 3600$ , разбито на три подинтервала: на первом,  $0 \leq t < 1000$ , и третьем,  $2080 < t \leq 3600$ , объект движется прямым истинным курсом  $\psi = 45^\circ$ , на втором,  $1000 \leq t \leq 2080$ , с рысканьем —  $\psi = 45^\circ + 5^\circ \cos(2\pi t / T)$ ,  $T = 360$  с. С достаточностью, обоснованной ранее, результаты эксперимента представляются только для северных элементов движения. Погрешность позиционирования ГЛОНАСС распределена равномерно на интервале  $[-\sqrt{3}m, \sqrt{3}m]$ , так что ее среднеквадратическое значение (СКП)  $\sigma_\epsilon = 1$  м. При этом СКП погрешностей оценок, показанных на рисунках, имеют значения: для положения —  $\sigma_\varphi = 1,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,06 м); для скорости ( $V_2$ ) на прямых курсах  $\sigma_v = 0,019$  м, при рыскании —  $\sigma_v = 0,090$  м; для ускорения на



прямых курсах  $\sigma_a = 0,003 \text{ м/с}^2$ , при рыскании  $\sigma_a = 0,01 \text{ м/с}^2$ . На рис. 3 представлен процесс настройки элементов диагональной матрицы  $Q$ , а на рис. 4 представлена эволюция функционала  $J$ . Настройка прекращена в момент времени  $t = 168,8 \text{ с}$ , а далее алгоритм работает при постоянных значениях вектора синаптических коэффициентов  $K = (9,19 \cdot 10^{-2}; 6,55 \cdot 10^{-3}; 2,26 \cdot 10^{-4}; 4,04 \cdot 10^{-6}; 3,2 \cdot 10^{-8})^T$ .

Учитывая, что при проведении некоторых исследований на море требуются небольшие скорости движения носителей, укажем значения СКП погрешностей оценок при  $|V| = 2 \text{ м/с}$ , сохраняя прежние условия эксперимента. Имеем:  $\sigma_\varphi = 2,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,1 м); на прямом курсе  $\sigma_v = 0,06 \text{ м/с}$ ; при рысканье  $\sigma_v = 0,07 \text{ м/с}$ .

Наконец, для больших скоростей, поступая аналогично предыдущему, имеем (при  $|V| = 300 \text{ м/с}$ )  $\sigma_\varphi = 2,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,1 м); на прямом курсе  $\sigma_v = 0,08 \text{ м/с}$ ; при рысканье  $\sigma_v = 0,09 \text{ м/с}$ . Заметим, что общий вид графиков во всех указанных случаях тот же, что и на рис. 1 – 4.

### Заключение

Таким образом, в статье разработана математическая (аналитическая) модель и ее компьютерный образ для численной оценки производных измеряемой функции, отождествляемая с задачей оценки траекторных параметров движения объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС; разработана методология (технология) оценки разрешимости и обеспечения устойчивого решения навигационной задачи в условиях конечной точности представления чисел в вычислительной среде и погрешностей измерения; разработан нейророботный алгоритм калмановского типа для решения задачи; выполнена серия вычислительных экспериментов, результаты которых (часть из них представлена в статье) с достаточностью верифицируют и иллюстрируют эффективность предложенных методологий, моделей и алгоритмов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М.: Радиотехника, 2005.
2. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. – М.: Наука, 1966.
3. Девятисильный А.С. Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли // Журнал технической науки. – 2016. – Т. 86, № 9. – С. 20-23.
4. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. – М.: Энергия, 1972.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Абакумовым.*

*E-mail:*

*Девятисильный Александр Сергеевич – devyatis@dvo.ru;*

*Шурыгин Артем Владимирович – artem.shurygin@bunjlabs.com*