

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С КОНТРОЛЕМ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**А. В. Иванов, Д. В. Комраков, В. О. Сурков**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор С. Н. Данилов*

**Ключевые слова и фразы:** барометрический высотомер; инерциальная навигационная система; контроль целостности; навигационная система; наземный подвижный объект; спутниковая радионавигационная система.

**Аннотация:** Методами оптимальной линейной фильтрации получены алгоритмы для автономной системы контроля целостности навигационных данных спутниковой радионавигационной системы, входящей в состав навигационной системы наземного подвижного объекта. Разработана структурная схема автономной системы контроля целостности навигационных данных.

Для определения координат и параметров движения наземных подвижных объектов (**НПО**) используют навигационные системы, как правило, включающие в свой состав: датчик скорости движения; инерциальную навигационную систему (**ИНС**); аппаратуру приема сигналов спутниковой радионавигационной системы (**СРНС**); цифровой вычислитель; систему отображения информации [1, 2]. Основным элементом таких навигационных систем является приемная аппаратура СРНС. Однако ее применение требует наличия специального алгоритма контроля целостности навигационных данных, позволяющего выявлять факт отказа навигационного космического аппарата (**НКА**) или неправильные данные, передаваемые им [1].

Внешне нарушение целостности радиосигналов НКА проявляется в виде наличия резко выделяющихся из ряда измерений параметров этих

---

Иванов Александр Васильевич – доктор технических наук профессор кафедры «Радиотехника», e-mail: aleksandr-ivanov68@yandex.ru; Комраков Дмитрий Вячеславович – аспирант кафедры «Радиотехника»; Сурков Владимир Олегович – аспирант кафедры «Радиотехника», ТамбГТУ, г. Тамбов.

сигналов. Для обеспечения должной точности и надежности используют системы обеспечения целостности, которые обычно делят на две группы:

– использующие информацию внешних по отношению к потребителю средств контроля целостности;

– автономные, находящиеся на борту самого объекта.

Преимуществом автономных систем можно считать их оперативность. В основе их работы лежит один и тот же принцип, основанный на использовании избыточной информации. В работе [3] для этих целей в состав навигационной системы НПО введен барометрический высотомер (БВ) и синтезированы алгоритмы, позволяющие осуществлять контроль целостности навигационных данных СРНС. В статье предложено, используя методы оптимальной линейной фильтрации, разработать алгоритмы и структурную схему системы автономного контроля целостности навигационных данных СРНС, которая дополнительно использовала бы также информацию и от датчика линейных ускорений (ДЛУ).

Для создания автономной системы контроля целостности используем датчики и устройства, обеспечивающие определение высоты объекта, а именно БВ, и аппаратуру приема СРНС.

Полагаем, что измерение высоты при помощи БВ осуществляется относительно уровня, соответствующего известному  $R_0$  радиус-вектору геоцентрической системы координат, сигнал на выходе БВ имеет вид [4]

$$H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}(t_{k+1}) + \Delta H(t_{k+1}) + u_{\text{БВ}}(t_{k+1}), \quad (1)$$

где  $\Delta H(t_{k+1})$  и  $u_{\text{БВ}}(t_{k+1})$  – постоянная ошибка и флуктуационная погрешность соответственно, описываемые выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta H(t_{k+1}) &= \Delta H(t_k); \\ u_{\text{БВ}}(t_{k+1}) &= \varphi_u(t_{k+1}, t_k) u_{\text{БВ}}(t_k) + \gamma_u(t_{k+1}, t_k) n_u(t_k); \end{aligned} \quad (2)$$

$$u_{\text{БВ}}(t_0) = u_{\text{БВ}0},$$

в которых  $\varphi_u(t_{k+1}, t_k) = \exp(-\gamma_{\text{БВ}} T)$ ;  $\gamma_u(t_{k+1}, t_k) = \sigma_{\text{БВ}} \left[ 1 - \varphi_u^2(t_{k+1}, t_k) \right]^{0,5}$ ;  $\gamma_{\text{БВ}}$  – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности;  $\sigma_{\text{БВ}}^2$  – дисперсия флуктуационной погрешности;  $n_u(t_k)$  – независимые выборки гауссовского процесса (ГП) с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Сигнал о высоте объекта относительно центра Земли на выходе аппаратуры приема СРНС в дискретные моменты времени представим в виде [3]

$$H^{\text{СРНС}}(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}(t_{k+1}) + R_0 + \sigma_z n_z(t_{k+1}), \quad (3)$$

где  $n_z(t_{k+1})$  – независимые выборки ГП с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;  $\sigma_z$  – среднеквадратическая ошибка флуктуационной погрешности измерения.

Для задания модели движения объекта применим принцип распределения информации [4], заменив истинные значения ускорения по высоте на измеренные ИНС, то есть используем в качестве компоненты вектора управления выходной сигнал ИНС, имеющий вид

$$a_z^{\text{ИНС}}(t_{k+1}) = a_z(t_{k+1}) + \Delta_{a_z}(t_{k+1}) + g + \sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}n_{a_z}(t_{k+1}),$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha_a$  – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности;  $\sigma_a^2$  – дисперсия флуктуационной погрешности;  $t_{k+1} - t_k = T$  – интервал дискретизации;  $n_{a_z}(t_{k+1})$  – взаимонезависимые выборки ГП с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;  $\Delta_{a_z}(t_{k+1})$  – постоянная составляющая погрешности измерения ускорения

$$\Delta_{a_z}(t_{k+1}) = \Delta_{a_z}(t_k). \quad (4)$$

В результате для дискретных моментов времени получим:

$$H_{\text{отн}}(t_{k+1}) = H_{\text{отн}}(t_k) + TV_z(t_k) + 0,5T^2a_z^{\text{ИНС}}(t_k) - 0,5T^2\Delta_{a_z}(t_k) - 0,5T^2g - 0,5T^2\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}n_{a_z}(t_k); \quad (5)$$

$$V_z(t_{k+1}) = V_z(t_k) + Ta_z^{\text{ИНС}}(t_k) - T\Delta_{a_z}(t_k) - Tg - T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}n_{a_z}(t_k). \quad (6)$$

Подлежащий оцениванию вектор состояния  $\mathbf{X}(t_k) = [H_{\text{отн}}(t_k), V_z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{a_z}(t_k)]^T$  в соответствии с (2), (4) – (6) описывается разностным векторно-матричным стохастическим уравнением

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \mathbf{\Phi}_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}(t_k) + \mathbf{\Psi}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}(t_k) + \mathbf{\Gamma}_x(t_{k+1}, t_k)N_x(t_k), \quad (7)$$

где  $\mathbf{W} = [a_z^{\text{ИНС}}, g]^T$  – известный вектор управления;  $N_x(t_k) = n_{a_z}(t_k)$  – формирующие стандартные гауссовские случайные величины;  $\mathbf{\Phi}_{xx}$  – фундаментальная матрица размером  $4 \times 4$  с ненулевыми элементами  $\phi_{xx_{11}} = \phi_{xx_{22}} = \phi_{xx_{33}} = \phi_{xx_{44}} = 1$ ,  $\phi_{xx_{12}} = T$ ,  $\phi_{xx_{14}} = -0,5T^2$ ,  $\phi_{xx_{24}} = -T$ ;  $\mathbf{\Psi}$  – переходная матрица управления размером  $4 \times 2$  с ненулевыми элементами  $\psi_{11} = 0,5T^2$ ,  $\psi_{12} = -0,5T^2$ ,  $\psi_{21} = T$ ,  $\psi_{22} = -T$ ;  $\mathbf{\Gamma}_x$  – переходной вектор возмущения размером  $4 \times 1$  с ненулевыми элементами  $\gamma_{x_{11}} = -0,5T^2\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}$ ,  $\gamma_{x_{21}} = -T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}$ .

Вектор наблюдения  $\mathbf{\Xi}(t_k) = [\xi_1(t_k), \xi_2(t_k)]^T$  включает наблюдения на выходе БВ  $\xi_1(t_k) = H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_k)$  и аппаратуры приема сигналов СРНС  $\xi_2(t_k) = H^{\text{СРНС}}(t_k)$ , которые в соответствии с (1), (3) описываются выражениями:

$$\xi_1(t_k) = \mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}(t_k) + u_{\text{БВ}}(t_k); \quad (8)$$

$$\xi_2(t_k) = \mathbf{H}_2(t_k)\mathbf{X}(t_k) + V_2 + \Gamma_2(t_k)N_2(t_k),$$

где  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  – векторы наблюдения размером  $1 \times 4$  с ненулевыми элементами  $h_{111} = h_{113} = 1$ ,  $h_{211} = 1$ ;  $V_2 = R_0$  – известная величина;  $\Gamma_2 = \sigma_z$ ;  $N_2(t_k) = n_z(t_k)$  – шум наблюдения.

Получим комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации для наблюдения (8) с учетом модели изменения (7).

Уравнение наблюдения (8) и модель изменения вектора состояния (7) являются линейными. Оценка вектора состояния в соответствии с методами оптимальной линейной фильтрации определяется выражением

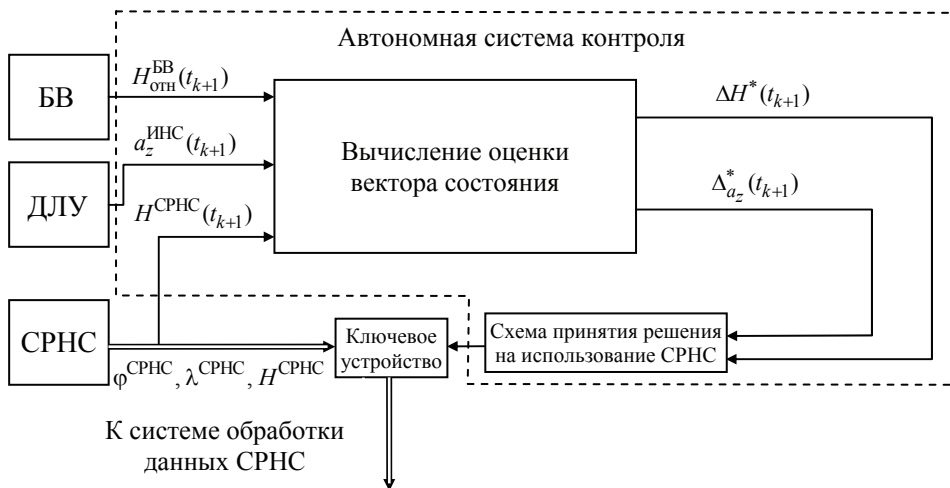
$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_{k+1}) &= \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}(t_k) + \\ &+ \mathbf{K}_1(t_{k+1}) \left[ \xi_1(t_{k+1}) - \varphi_u(t_{k+1}, t_k)\xi_1(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Psi(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}(t_k) + \right. \\ &+ \varphi_u(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1(t_k)\mathbf{X}^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}^*(t_k) \left. \right] + \\ &+ \mathbf{K}_2(t_{k+1}) \left[ \xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Psi(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}(t_k) - \right. \\ &\left. - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}^*(t_k) \right], \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$  и  $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$  – вектор-столбцы размером  $4 \times 1$  матрицы оптимальных коэффициентов передачи  $\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})]$ , определяемой соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(t_{k+1}) &= \left[ \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xy} \right] \times \\ &\times \left[ \mathbf{B}_{yy}^{-1} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) \right]^{-1}; \\ \mathbf{P}(t_{k+1}) &= \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}(t_k)\Phi_{xx}^T(t_{k+1}, t_k) - \\ &- \mathbf{K}(t_{k+1}) \left[ \mathbf{B}_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{P}(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) \right]^T, \quad (10) \end{aligned}$$

в которых  $\mathbf{P}(t_{k+1})$  – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером  $4 \times 4$ ;  $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$ ,  $\mathbf{B}_{xy}$ ,  $\mathbf{B}_{yy}$  – блочные матрицы вида

$$\begin{aligned} \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) &= \left[ \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \varphi_u(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1(t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)} \right]; \\ \mathbf{B}_{xy} &= \left[ \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) \mid \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) \right]; \\ \mathbf{B}_{yy} &= \left[ \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) - \varphi_u^2(t_{k+1}, t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1})} \mid \right. \\ &\left. \mid \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1})}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_k)} \right]. \end{aligned}$$



**Структурная схема автономной системы контроля целостности**

В отличие от [2], для контроля целостности используем не только оценку постоянной ошибки  $\Delta H^*(t_{k+1})$  БВ, но и оценку постоянной составляющей погрешности измерения ускорения  $\Delta_{a_z}^*(t_k)$  ДЛУ. В нормальном режиме функционирования СРНС оценки  $\Delta H^*(t_{k+1})$  и  $\Delta_{a_z}^*(t_k)$  будут стремиться к некоторым постоянным значениям, определяемым типами БВ и ДЛУ. При сбоях в работе НКА или при искусственной передаче ошибочной информации с НКА значения оценок  $\Delta H^*(t_{k+1})$  и  $\Delta_{a_z}^*(t_k)$  начнут возрастать. Данные свойства можно использовать для контроля целостности путем:

- задания порогов  $\Delta H_{\max}$  величины оценки постоянной ошибки  $\Delta H^*(t_{k+1})$  БВ и  $\Delta_{a_z \max}$  величины оценки постоянной составляющей погрешности измерения ускорения  $\Delta_{a_z}^*(t_k)$  ДЛУ;

- если  $\Delta H^*(t_{k+1}) \geq \Delta H_{\max}$  и  $\Delta_{a_z}^*(t_{k+1}) \geq \Delta_{a_z \max}$ , то использовать данные полученные от НКА нельзя.

Структурная схема автономной системы контроля целостности, разработанная в соответствии с синтезированным алгоритмом (9), представлена на рисунке. Выходной сигнал СРНС, поступающий на ключевое устройство, представляет собой данные о широте  $\varphi^{\text{СРНС}}$ , долготе  $\lambda^{\text{СРНС}}$  и высоте относительно центра Земли  $H^{\text{СРНС}}$  подвижного наземного объекта.

Использование двух оценок позволяет исключить возможность принятия решения о целостности навигационных данных СРНС при отказе БВ, повышая таким образом достоверность принятия решения.

### Список литературы

1. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 с.
2. Павлов, В. И. Оптимизация функционирования измерительных систем, устанавливаемых на подвижные объекты / В. И. Павлов, В. В. Аксенов, Т. В. Аксенова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 821 – 826.
3. Иванов, А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 15 – 20.
4. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации / М. С. Ярлыков. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.

### References

1. Ivanov A.V., Ivanova N.A. *Navigatsiya nazemnykh ob"ektov* (Navigation onshore facilities), Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 120 p.
2. Pavlov V.I., Aksenov V.V., Aksenova T.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 821-826.
3. Ivanov A.V. *Radiotekhnika*, 2010, no. 12, pp. 15-20.
4. Yarlykov M.S. *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* (Statistical theory of navigation), Moscow: Radio i svyaz', 1985, 344 p.

---

## Algorithms of Information Treatment of Navigation Systems of Surface-Mobile Objects with Continuity Test of Navigation Data of Satellite Navigation Systems

A. V. Ivanov, D. V. Komrakov, V. O. Surkov

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** barometric altitude indicator; inertial navigation system; continuity test; navigation system; surface-mobile object; satellite navigation systems.

**Abstract:** Using methods of optimal linear filtering we obtained algorithms for autonomous control system of navigation data integrity of satellite radio navigation system, which is a part of the navigation system of the surface-mobile object. We constructed the block diagram of the autonomous control system of navigation data integrity.

---

© А. В. Иванов, Д. В. Комраков, В. О. Сурков, 2014