

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕКОНФИГУРАЦИИ*

А. В. Иванов¹, Д. В. Комраков¹, С. П. Москвитин¹, В. А. Чернышов²

*Кафедры: «Радиотехника» (1), «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
aleksandr-ivanov68@yandex.ru*

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

Аннотация: Выполнен расчет потенциальных характеристик точности для полученных методами оптимальной линейной фильтрации алгоритмов обработки информации в вертикальном канале навигационных систем подвижных наземных объектов, который дополнительно используется для решения задачи контроля целостности навигационных данных.

В настоящее время широкое применение для определения координат и параметров движения наземных подвижных объектов, в том числе и военного назначения, получают навигационные комплексы [1, 2]. Под навигационным комплексом понимают совокупность навигационных систем, бортовых измерительных средств и вычислителей, позволяющих определить местоположение и параметры движения объекта относительно Земли. Основой для таких комплексов служат спутниковые радионавигационные системы (СРНС), такие как ГЛОНАСС [3] и инерциальные навигационные системы (платформенные или бесплатформенные). Применение в составе навигационных комплексов СРНС требует наличия системы контроля целостности навигационных данных, которая позволяет выявить факт отказа навигационного космического аппарата (НКА) или неправильные данные, передаваемые им, и тем самым исключить радиосигнал НКА из обработки, предотвратив неправильное определение текущего местоположения объекта. Это позволяет провести реконфигурацию рабочего созвездия НКА, обеспечив таким образом высокую точность определения координат и параметров движения подвижного наземного объекта.

Наиболее перспективными на сегодняшний день можно считать автономные системы контроля целостности на борту самого объекта ввиду их автономности и независимости от внешнего канала передачи данных. При синтезе оптимальных алгоритмов обработки информации в навигационных комплексах наземных подвижных объектов целесообразно рассматривать два канала: горизонтальный

* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (см. 2015. Т. 21, № 3).

и вертикальный. Возможность такого разделения обусловлена независимостью систем уравнений, описывающих математические модели изменения параметров движения объекта в этих каналах. При синтезе алгоритмов обработки информации для вертикального канала совместно с алгоритмами оценивания высоты и вертикальной скорости объекта можно получить алгоритмы контроля целостности навигационных данных СРНС за счет введения в ее состав дополнительных датчиков и расширения вектора состояния [4].

Цель работы – проанализировать потенциальные характеристики точности разработанных алгоритмов обработки информации для навигационных систем наземных подвижных объектов с контролем целостности навигационных данных СРНС.

В работе [4] методами оптимальной линейной фильтрации получены алгоритмы и структурная схема вертикального канала навигационной системы подвижного наземного объекта. Отличительной особенностью разработанной схемы является наличие автономной системы контроля целостности навигационных данных СРНС. Полученные алгоритмы имеют вид [4]:

$$X^*(t_{k+1}) = \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)X^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k)W(t_k) + K_1(t_{k+1}) \times \\ \times \left[\xi_1(t_{k+1}) - \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k)\xi_1(t_k) - H_1(t_{k+1})\Psi(t_{k+1}, t_k)W(t_k) + \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k)H_1(t_k)X^*(t_k) - \right. \\ \left. - H_1(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)X^*(t_k) \right] + K_2(t_{k+1}) \left[\xi_2(t_{k+1}) - H_2(t_{k+1})\Psi(t_{k+1}, t_k)W(t_k) - \right. \\ \left. - V_2 - H_2(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)X^*(t_k) \right], \quad (1)$$

где $X(t_k) = [H_{отн}(t_k), V_Z(t_k), \Delta H(t_k), \Delta_{aZ}(t_k)]^T$ – вектор состояния, включающий относительную высоту $H_{отн}(t_k)$ и вертикальную скорость $V_Z(t_k)$ объекта, постоянную ошибку $\Delta H(t_k)$ барометрического высотомера (**БВ**) и постоянную составляющую погрешности измерения ускорения $\Delta_{aZ}(t_k)$ инерциальной навигационной системой (**ИНС**); $W = [a_Z^{ИНС}, g]^T$ – известный вектор управления, включающий наблюдение $a_Z^{ИНС}(t_{k+1})$ на выходе ИНС и ускорение свободного падения g ; $N_x(t_k) = n_{aZ}(t_k)$ – формирующие стандартные гауссовские случайные величины; Φ_{xx} – фундаментальная матрица размером (4×4) с ненулевыми элементами $\Phi_{xx11} = \Phi_{xx22} = \Phi_{xx33} = \Phi_{xx44} = 1$, $\Phi_{xx12} = T$, $\Phi_{xx14} = -0,5T^2$, $\Phi_{xx24} = -T$, где T – интервал дискретизации; Ψ – переходная матрица управления размером (4×2) с ненулевыми элементами $\Psi_{11} = 0,5T^2$, $\Psi_{12} = -0,5T^2$, $\Psi_{21} = T$, $\Psi_{22} = -T$; Γ_x – переходной вектор возмущения размером (4×1) с ненулевыми элементами, $\gamma_{x11} = -0,5T^2\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}$, $\gamma_{x21} = -T\sigma_a(2T/\alpha_a)^{0,5}$, где σ_a^2 – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности ИНС; $\Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k) = \exp(-\gamma_{БВ}T)$; $\gamma_u(t_{k+1}, t_k) = \sigma_{БВ} \left[1 - \Phi_{uu}^2(t_{k+1}, t_k) \right]^{0,5}$; $\gamma_{БВ}$ и $\sigma_{БВ}^2$ – коэффициент, характеризующий ширину спектра погрешности, и дисперсия флуктуационной погрешности соответственно; $\xi_1(t_k) = H_{отн}^{БВ}(t_k)$ – наблюдение на выходе БВ; $\xi_2(t_k) = H^{СРНС}(t_k)$ – наблюдение на выходе аппаратуры приема радиосигналов СРНС; H_1 и H_2 – векторы наблюдения размером (1×4) с ненулевыми элементами $h_{11} = h_{13} = 1$, $h_{21} = 1$; $V_2 = R_0$ – известная величина; $K_1(t_{k+1})$ и $K_2(t_{k+1})$ –

векторы столбцы размером (4×1) , матрицы оптимальных коэффициентов передачи $K(t_{k+1}) = [K_1(t_{k+1}); K_2(t_{k+1})]$, определяемой соотношениями:

$$\begin{aligned} K(t_{k+1}) &= [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)P(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + B_{xy}] \times \\ &\quad \times [B_{yy} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)P(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^{-1}; \\ P(t_{k+1}) &= [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)P(t_k)\Phi_{xx}^T(t_{k+1}, t_k) + B_{xx}] - \\ &\quad - K(t_{k+1})[B_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)P(t_k)\Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

в которых $P(t_{k+1})$ – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером (4×4) ; $B_{xx}(t_{k+1}, t_k) = \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)$; $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$, B_{xy} , B_{yy} – блочные матрицы вида:

$$\begin{aligned} \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) &= \left[\frac{H_1(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k)H_1(t_k)}{H_2(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)} \right]; \\ B_{xy} &= \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_1^T(t_{k+1}) | \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_2^T(t_{k+1}); \\ B_{yy} &= \left[\frac{H_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_1^T(t_{k+1}) + \gamma_u^2(t_{k+1}, t_k)}{H_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_1^T(t_{k+1})} \right] | \\ &\quad | \frac{H_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_2^T(t_{k+1})}{H_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)H_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_k)} \right]. \end{aligned}$$

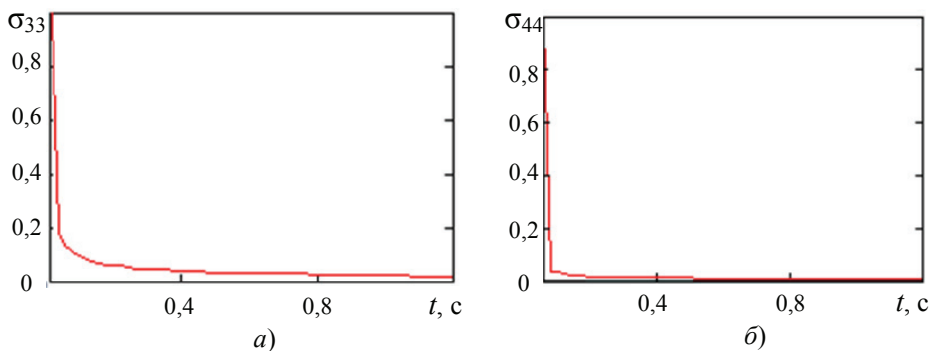
Для определения потенциальных характеристик точности полученных алгоритмов (1) произведем расчет матрицы вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания в соответствии с выражениями (2).

Оценка потенциальных характеристик точности синтезированных алгоритмов осуществлялась при следующих значениях параметров: среднеквадратичным значением ошибки измерения относительной высоты объекта спутниковой радионавигационной системой $\sigma_z = 5$ м; среднеквадратичным значением флуктуационной погрешности барометрического высотомера $\sigma_{БВ} = 1$ м; коэффициентом, характеризующим ширину спектра погрешности барометрического высотомера $\gamma_{БВ} = 10 \text{ с}^{-1}$; тактовым интервалом времени, равным $T = 0,02$ с; числом шагов дискретизации $k = 60$.

Начальные значения вторых центральных моментов ошибок оценивания компонент вектора состояния вертикального канала: $p_{11}(t_0) = 300 \text{ м}^{-2}$, $p_{22}(t_0) = 20 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$, $p_{33}(t_0) = 625 \text{ м}^2$, $p_{44}(t_0) = 0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-4}$.

Результаты расчетов показывают, что с течением времени ошибки убывают достаточно быстро, стремясь к стационарным значениям. Время переходного процесса практически не превышает 1 с.

Среднеквадратичная ошибка оценивания относительной высоты местоположения объекта через 5 с примет значение $\sqrt{p_{11}} = 0,045$ м; вертикальной составляющей скорости – $\sqrt{p_{22}} = 0,02$ м/с; постоянной составляющей ошибки относительной высоты – $\sqrt{p_{33}} = 1,49$ м.



**Зависимость изменения нормированной апостериорной
среднеквадратичной ошибки оценивания постоянной составляющей
ошибки $\Delta H(t_k)$ барометрического высотомера (а) и погрешности измерения
ускорения $\Delta_{aZ}(t_k)$ инерциальной навигационной системой (б) от времени**

Наибольший интерес для решения задачи контроля целостности по точности оценивания представляют две составляющие вектора состояния – постоянная ошибка $\Delta H(t_k)$ барометрического высотомера и постоянная составляющая погрешности измерения ускорения $\Delta_{aZ}(t_k)$ инерциальной навигационной системы. Обусловлено это тем, что они используются в автономной системе для определения целостности навигационных данных СРНС [4]. Точность их оценивания влияет на выбор порога.

Зависимость изменения $\sigma_{33} = \frac{\sqrt{p_{33}(t_k)}}{\sqrt{p_{33}(t_0)}}$ нормированной апостериорной среднеквадратичной ошибки оценивания постоянной составляющей ошибки $\Delta H(t_k)$ барометрического высотомера от времени представлена на рисунке, а.

Зависимость изменения $\sigma_{44} = \frac{\sqrt{p_{44}(t_k)}}{\sqrt{p_{44}(t_0)}}$ нормированной апостериорной среднеквадратичной ошибки оценивания постоянной составляющей погрешности измерения ускорения $\Delta_{aZ}(t_k)$ инерциальной навигационной системой от времени представлена на рисунке, б.

Таким образом, в работе проведен анализ потенциальных характеристик точности алгоритмов обработки информации в вертикальном канале навигационных систем подвижных наземных объектов, который дополнительно имеет автономную систему контроля целостности навигационных данных. Показано, что разработанные алгоритмы имеют высокую точность оценивания.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Теоретические основы построения радиоэлектронных комплексов с реконфигурируемой информационной системой», договор № НК 14-08-00523/14 от 06.03.14 г.

Список литературы

1. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 с.
2. Глистин, В. Н. Модель дальномерного канала автоматической системы управления воздушным движением в режиме посадки/ В. Н. Глистин, Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2014. – № 2 (52). – С. 27 – 31.

3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. И. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.

4. Иванов, А. В. 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 // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского.* – 2014. – № 2 (52). – С. 53 – 58.

Accuracy Characteristics of Navigation Systems Using Continuity Testing of Satellite Navigation Systems for Solving Problems of Reconfiguration

A. V. Ivanov¹, D. V. Komrakov¹, S. P. Moskvitin¹, V. N. Chernyshov²

*Department of Radio Engineering (1);
Department of Criminal Law and Applied Computer Science in Law (2), TSTU;
aleksandr-ivanov68@yandex.ru*

Keywords: barometric altitude indicator; continuity test; inertial navigation system; navigation system; satellite navigation systems; surface-mobile object.

Abstract: The calculation of potential characteristics obtained by means of precision for optimal linear filtering algorithms of processing information in a vertical channel of navigation systems of surface-mobile objects has been made; it is also used for continuity testing of navigation data.

References

1. Ivanov A.V., Ivanova N.A. *Navigatsiya nazemnykh ob"ektov* (Navigation ground facilities), Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 120 p.
2. Glistin V.N., Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2014, no. 2 (52), pp. 27-31.
3. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and operation), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 800 p.
4. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Surkov V.O. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2014, no. 2 (52), pp. 53-58.

Präzisionscharakteristiken der die Kontrolle der Ganzheit der Satellitenfunknavigationssysteme für die Rekonfiguration benutzenden Navigationskomplexe

Zusammenfassung: Es ist die Berechnung der Potentialcharakteristiken der Präzision für die von den Methoden der optimalen linearen Filtrierung der Algorithmen der Informationsbearbeitung im senkrechten Kanal der Navigationssysteme der beweglichen Bodenobjekte, der für die Lösung der Aufgabe der Kontrolle der Ganzheit der Navigationsangaben ergänzend benutzt wird, erfüllt.

Caractéristiques de précision des complexes de navigation utilisant le contrôle de l'intégrité des systèmes par satellite de radionavigation pour la configuration

Résumé: Est effectué le calcul des caractéristiques potentielles de la précision pour les systèmes des objets mobiles terrestres par les méthodes de filtration linéaire du traitement d'information. Ce calcul est utilisé aussi pour la solution du problème de contrôle de l'intégrité des données de navigation.

Авторы: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Комраков Дмитрий Вячеславович* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
