

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ЛЕТАЮЩЕГО БЕСПИЛОТНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ВЫЯВЛЕНИЕМ
АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

© А. В. Иванов¹, С. Н. Данилов¹✉, А. А. Иванов¹, Н. А. Лежнева¹

¹Кафедра «Радиотехника», *plabz@mail.ru*;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: аномальные измерения; выборочный коэффициент эксцесса; летающее беспилотное транспортное средство; отношение средних отклонений; спутниковая радионавигационная система.

Аннотация: Представлен новый метод для выявления аномальных измерений на выходе аппаратуры приема сигналов спутниковых радионавигационных систем в информационно-измерительной системе определения высоты летающего беспилотного транспортного средства. Метод базируется на использовании математической статистики. Аномальные измерения определяются по отношению средних отклонений и выборочному коэффициенту эксцесса. Проведено компьютерное моделирование. Предложен критерий для выявления аномальных измерений.

Введение

Для перевозки пассажиров и грузов в последнее время широкое распространение начинают получать летающие беспилотные транспортные средства (БТС) – автомобили, беспилотники и коптер-беспилотники [1, 2]. Взлет, посадку и полет по маршруту летающих БТС обеспечивает информационно-измерительная система, функционально включающая в себя набор датчиков, устройств и систем, с помощью которых проводится точное позиционирование местоположения в пространстве. Для беспилотных летательных аппаратов, которые на сегодняшний день широко применяются для решения различных гражданских и военных задач, в качестве информационно-измерительной системы используется навигационно-посадочный комплекс. В связи с этим целесообразно и для летающих БТС под общим названием «информационно-измерительная система» понимать также навигационно-посадочный комплекс.

Основу всех навигационно-посадочных комплексов составляет аппаратура приема (АП) сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС, NAVSTAR (GPS), Галилео (Galileo), Бэйдоу (BeiDou) [3]. Применение многоканальной совмещенной аппаратуры приема обеспечивает высокую точность определения координат местоположения и параметров движения летающих БТС. Однако аппаратура приема сигналов СРНС имеет один существенный недостаток, а именно: возникновение в случайные моменты времени на выходе следящей системы за псевдодальностью до навигационного космического аппарата

аномальных измерений [4]. Причиной возникновения аномальных измерений псевдодалности является малое отношение сигнал–шум на входе канала приема радиосигналов от данного навигационного космического аппарата. Появление аномальных измерений псевдодалности приводит к ошибкам определения координат и параметров движения беспилотных автомобилей. Для выявления аномальных измерений используются различные методы и подходы [5 – 8]. В данной работе рассмотрены методы, основанные на математической статистике.

Цель работы – выявление аномальных измерений на выходе АП СРНС путем определения методами математической статистики закона распределения набора выборок невязок измерений, формируемого по измерениям СРНС в вертикальном канале навигационно-посадочного комплекса.

Постановка задачи

В работе [8] методами марковской теории оптимального оценивания синтезированы оптимальные алгоритмы обработки информации в вертикальном и горизонтальном каналах навигационной системы, включающей в свой состав аппаратуру приема сигналов спутниковых радионавигационных систем, инерциальную навигационную систему (ИНС), барометрический высотомер (БВ). Алгоритмы обработки информации в вертикальном канале позволяют определять высоту, на которой находится автомобиль, и скорость изменения этой высоты, постоянные составляющие ошибки БВ и ошибки измерения вертикального ускорения ИНС. Одним из параметров алгоритма является формируемая в канале обработки выходного сигнала АП СРНС обновляемая последовательность (невязка измерений), представляющая собой разность между выходным значением измеренной АП СРНС высоты и значением ее прогноза, формируемым по априорным данным о движении БТС. Обновляемая последовательность в дискретные моменты времени t_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, описывается выражением

$$\varepsilon_{B2}(t_{k+1}) = \xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Psi_B(t_{k+1}, t_k)\mathbf{W}_B(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1})\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{X}_B^*(t_k), \quad (1)$$

где $\xi_2(t_{k+1}) = H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$ – измеренное значение высоты на выходе аппаратуры приема сигналов СРНС; $\mathbf{W}_B(t_k) = [a_Z^{\text{ИНС}}(t_k), g]^T$ – известный вектор управления, у которого $a_Z^{\text{ИНС}}(t_k)$ – измеренное ИНС значение составляющей вектора ускорения БТС в вертикальной плоскости, g – ускорение свободного падения; $\mathbf{X}_B^*(t_k) = [H_{\text{отн}}^*(t_k), V_Z^*(t_k), \Delta H^*(t_k), \Delta a_Z^*(t_k)]^T$ – оценка вектора состояния, в состав которого входят оценки высоты $H_{\text{отн}}^*(t_k)$, вертикальной скорости $V_Z^*(t_k)$, постоянных составляющих ошибки барометрического высотомера $\Delta H^*(t_k)$ и ошибки измерения вертикального ускорения ИНС $\Delta a_Z^*(t_k)$; $V_2 = R_0$ – известная величина, R_0 – радиус-вектор геоцентрической (сферической) системы координат, описывающей Землю; $\mathbf{H}_2(t_{k+1})$ – известный вектор наблюдения, $\Psi_B(t_{k+1}, t_k)$ – известная переходная матрица управления, $\Phi_{xxB}(t_{k+1}, t_k)$ – фундаментальная матрица; $t_{k+1} - t_k = T$ – интервал дискретизации.

При отсутствии аномальных измерений обновляемая последовательность распределена по гауссовскому закону, а при их наличии – по равномерному закону [9]. Поэтому естественно предполагать, что если закон распределения обновляемой последовательности не является гауссовским, то измерения на выходе АП сигналов СРНС являются аномальными. Для проверки закона распределения на временном

интервале длительностью $\Delta T = N \times (t_{k+1} - t_k)$ возьмем N выборок обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, и вычислим:
 – отношение средних отклонений по формуле [10]

$$d_N = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=m}^{m+(N-1)} |\epsilon_{B2}(t_i) - m_\epsilon|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=m}^{m+(N-1)} (\epsilon_{B2}(t_i) - m_\epsilon)^2}} \quad (2)$$

и выборочный коэффициент эксцесса [10]

$$\beta_2(N) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=m}^{m+(N-1)} (\epsilon_{B2}(t_i) - m_\epsilon)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=m}^{m+(N-1)} (\epsilon_{B2}(t_i) - m_\epsilon)^2 \right]^2}, \quad (3)$$

где m_ϵ – математическое ожидание обновляемой последовательности $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$

$$m_\epsilon = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=m}^{m+(N-1)} \epsilon_{B2}(t_i).$$

Первоначально для выявления аномальных измерений по совокупности случайных величин $\{\epsilon_{B2}(t_k), \epsilon_{B2}(t_{k+1}), \dots, \epsilon_{B2}(t_{k+N})\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$, было предложено применять критерий, который используется для определения гауссовского распределения случайного процесса [10] и в соответствии с которым, если не выполняются совместно два неравенства:

$$\begin{aligned} d_{NQ} < d_N < d_{N(1-Q)}; \\ \gamma_{2Q_2}(N) < \beta_2(N) < \gamma_{2(1-Q_2)}(N), \end{aligned} \quad (4)$$

то закон распределения не является гауссовским. Для решаемой задачи это означает, что измерения на выходе АП СРНС являются аномальными.

Для вычисления d_{NQ} и $d_{N(1-Q)}$ необходимо задать Q одним из значений 0,01 или 0,05 и, принимая во внимание объем выборки N , по таблице 4.7а [11] найти величины 100 Q %-ной точки d_{NQ} и 100(1- Q)%-ной точки $d_{N(1-Q)}$. Для вычисления $\gamma_{2Q_2}(N)$ и $\gamma_{2(1-Q_2)}(N)$ необходимо задать Q_2 одним из значений 0,01 или 0,05 и, принимая во внимание объем выборки N , по таблице 4.7в [11] найти величины 100 Q_2 %-ной точки $\gamma_{2Q_2}(N)$ и 100(1- Q_2)%-ной точки $\gamma_{2(1-Q_2)}(N)$.

Для формирования N выборок обновляемой последовательности используем метод скользящего окна, который позволяет сформировать из дискретных значений временного ряда обновляемой последовательности набор данных. Под окном будем понимать временной интервал длительностью $\Delta T = N \times (t_{k+1} - t_k)$, содержащий набор N дискретных значений (выборок) обновляемой последовательности, который используется для проверки условия (4). В процессе работы алгоритмов обработки информации в навигационной системе будем смещать окно по мере поступления новых выходных сигналов с АП СРНС.

Моделирование комплексных оптимальных алгоритмов обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов

Проверка работоспособности разработанных алгоритмов, позволяющих определять аномальные измерения АП СРНС, проводилась путем статистического компьютерного моделирования. Проведено моделирование сигнала $H^{\text{СРНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе АП сигналов СРНС, моделирование сигнала $H_{\text{отн}}^{\text{БВ}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе БВ, моделирование сигнала $a_Z^{\text{ИНС}}(t_{k+1})$, $k = 0, 1, 2, \dots$, на выходе ИНС и алгоритмов обработки информации в навигационной системе, приведенных в [8].

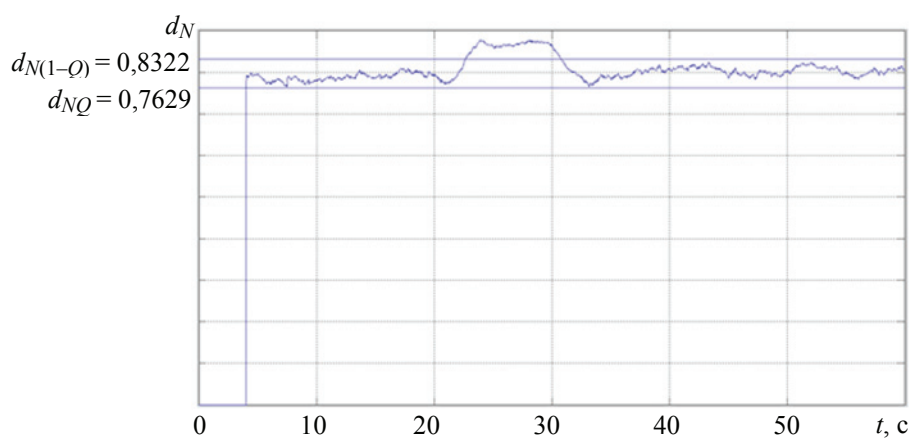
Проведены вычисления отношений средних отклонений d_N и выборочных коэффициентов эксцесса $\beta_2(N)$ по выборке обновляемой последовательности размером $N = 200$. В соответствии с таблицами, приведенными в [11], значения допусков брались равными: $d_{N_Q} = 0,7629$, $d_{N(1-Q)} = 0,8322$, $\gamma_{2Q_2}(N) = 2,37$, $\gamma_{2(1-Q_2)}(N) = 3,98$.

При моделировании предполагалось, что в интервале 20...30 с возникли аномальные измерения высоты на выходе АП СРНС. На этом интервале времени сигнал на выходе АП СРНС представлял собой аддитивную смесь истинного значения высоты и шума, описываемого равномерным законом распределения.

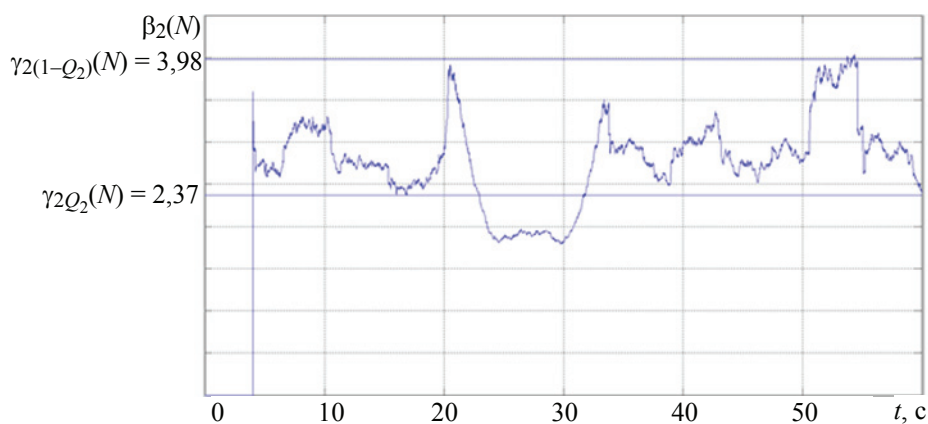
В первом случае шумовая составляющая представляла собой взаимонезависимые выборки случайного процесса, равномерно распределенного на интервале ± 25 м относительно истинного значения псевдодальности. На рисунке 1, а представлена реализация значений отношений средних отклонений d_N на интервале времени 0...60 с; на рис. 1, б для этого же интервала времени – реализация выборочных коэффициентов эксцесса $\beta_2(N)$.

Во втором случае шумовая составляющая представляла собой взаимонезависимые выборки случайного процесса, равномерно распределенного на интервале 0...50 м. На рисунке 1, в представлена реализация значений отношений средних отклонений d_N на интервале времени 0...60 с; на рис. 1, г для этого же интервала времени – реализация выборочных коэффициентов эксцесса $\beta_2(N)$.

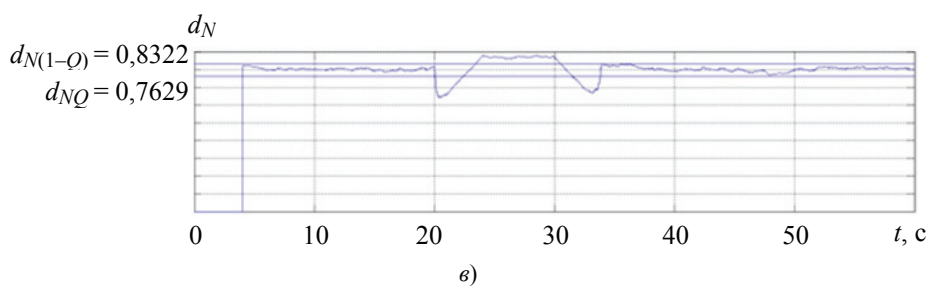
Результаты моделирования показали, что если шумовая составляющая представляет собой взаимонезависимые выборки случайного процесса, равномерно распределенного на интервале ± 25 м, то известный критерий (4) определения гауссовского закона распределения [10] вполне подходит для решения задачи выявления аномальных измерений на выходе АП сигналов СРНС. Однако в случае, когда шумовая составляющая представляет собой взаимонезависимые выборки случайного процесса, равномерно распределенного на достаточно большом интервале, например ± 50 м (см. рис. 1, в, г), то применение критерия (4) приводит к ложным определениям аномальных измерений. Во-первых, после окончания аномальных измерений (30-я с) имеется временной интервал превышения порогов значением отношения средних отклонений и выборочного коэффициента эксцесса. Во-вторых, имеется временной интервал 20...30 с, когда аномальные измерения присутствуют, а значения отношения средних отклонений и выборочного коэффициента эксцесса, находясь в допустимых границах по критерию (4), говорят об их отсутствии. В связи с этим предложен новый критерий, в соответствии с которым, если выполняются совместно два неравенства:



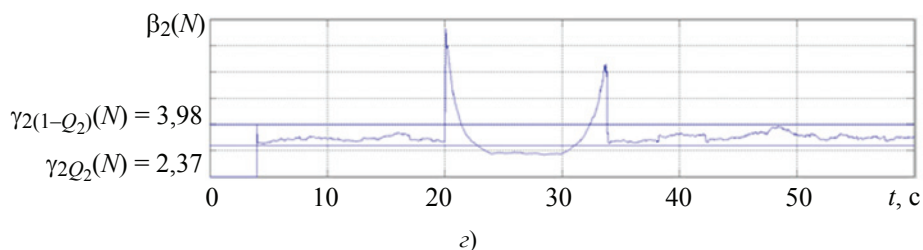
a)



б)



в)



з)

Рис. 1. Вычисленные значения отношений средних отклонений d_N (а, в) и выборочных коэффициентов эксцесса $\beta_2(N)$ (б, з): случайный процесс равномерно распределен на интервале ± 25 м (а, б) и ± 50 м (в, з)

$$\begin{aligned} d_{NQ} &< d_N; \\ \beta_2(N) &< \gamma_{2(1-Q_2)}(N), \end{aligned} \quad (5)$$

то измерения на выходе АП СРНС являются аномальными.

Применение критерия позволяет устранить недостатки, представленные выше. Однако применение критерия (5) увеличивает время определения аномальных измерений на выходе АП сигналов СРНС. Из приведенных зависимостей видно, что время обнаружения аномальных измерений на выходе АП СРНС по критерию (5) составляет порядка 4 с (см. рис. 1).

Заключение

Таким образом, для выявления аномальных измерений на выходе АП сигналов СРНС в информационно-измерительных системах определения высоты летающего беспилотного транспортного средства предложен новый метод, базирующийся на использовании математической статистики. Аномальные измерения определяются по отношению средних отклонений и выборочному коэффициенту эксцесса. Проведено компьютерное моделирование, которое показало работоспособность предложенного метода и позволило разработать новый критерий выявления аномальных измерений.

Список литературы

1. Топ летающих машин, существующих в реальности: обзор, цена, особенности. – URL : <https://habr.com/ru/articles/684892/> (дата обращения: 25.12.2025).
2. На работу без пробок: какое будущее ждет летающие автомобили. – URL : <https://trends.rbc.ru/trends/industry/60e6cc5d9a7947e90d9004c8> (дата обращения: 25.12.2025).
3. Веремейко, К. К. Навигационно-посадочный комплекс на основе спутниковой радионавигационной системы / К. К. Веремейко, В. А. Тихонов // Радиотехника. – 1996. – № 1. – С. 94–107.
4. Выявление аномальных измерений при определении координат местоположения объекта по сигналам ГЛОНАСС/GPS / С. П. Москвитин, А. В. Мордовин, Н. А. Лежнева, А. А. Иванов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 586–593. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.586-593
5. Иванов, А. В. Автономные системы контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2014. – № 7. – С. 55–64.
6. Иванов, А. В. Автономный контроль целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем методами сравнения и невязок / А. В. Иванов, А. П. Негуляева, С. П. Москвитин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 358–367. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.358-367
7. Иванов, А. В. Оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах наземных подвижных объектов с автономным контролем целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов, Д. В. Комраков // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62, № 4. – С. 332–343. doi: 10.7868/S003384941704009X
8. Адаптивные алгоритмы обработки информации в навигационных комплексах подвижных наземных объектов / А. В. Иванов, В. Ю. Шишкин, Д. В. Бойков, А. Н. Лежнева, А. А. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 8. – С. 760–771. doi: 10.31857/S0033849421080040

9. Радиотехнические системы : учебник для вузов / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1990. – 495 с.

10. Айвазян, С. А. Прикладная статистика = Applied statistics : Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – Справ. изд. – Москва : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

11. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва : Наука, 1983. – 416 с.

Data-Measuring System to Determine the Flying Unmanned Vehicle Altitude and Detect Anomalous Measurements of Satellite Radio Navigation System Signal

© A. V. Ivanov¹, S. N. Danilov¹✉, A. A. Ivanov¹, N. A. Lezhneva¹

¹*Department of Radio Engineering, plabz@mail.ru;
TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: anomalous measurements; sample kurtosis coefficient; flying unmanned vehicle; mean-error ratio; satellite radio navigation system.

Abstract: A new method for detecting anomalous measurements at the output of satellite radio navigation system signal reception equipment in an unmanned aerial vehicle altitude measurement system is presented. The method is based on the use of mathematical statistics. Anomalous measurements are determined by the ratio of mean deviations and the sample kurtosis coefficient. Computer modeling is conducted. A criterion for detecting anomalous measurements is proposed.

References

1. Available at: <https://habr.com/ru/articles/684892/> (accessed 25 December 2025).
2. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/60e6cc5d9a7947e90d9004c8> (accessed 25 December 2025).
3. Veremeyko K.K., Tikhonov V.A. [Navigation and Landing Complex Based on a Satellite Radio Navigation System], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 1996, no. 1, pp. 94-107. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Moskvitin S.P., Mordovin A.V., Lezhneva N.A., Ivanov A.A. [Detection of Anomalous Measurements in Determining the Coordinates of an Object's Location Using GLONASS/GPS Signals], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 586-593. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.586-593 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Ivanov A.V. [Autonomous Systems for Monitoring the Integrity of Navigation Data of Satellite Radio Navigation Systems], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2014, no. 7, pp. 55-64. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Ivanov A.V., Negulyayeva A.P., Moskvitin S.P. [Autonomous Integrity Monitoring of Navigation Data of Satellite Radio Navigation Systems Using Comparison and Residual Methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 358-367. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.358-367 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Ivanov A.V., Komrakov D.V. [Optimal Algorithms for Information Processing in Navigation Systems of Ground-Based Mobile Objects with Autonomous Integrity Monitoring of Navigation Data of Satellite Radio Navigation Systems], *Radiotekhnika i*

elektronika [Radio Engineering and Electronics], 2017, vol. 62, no. 4, pp. 332-343. doi: 10.7868/S003384941704009X (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ivanov A.V., Shishkin V.Yu., Boykov D.V., Lezhneva A.N., Ivanov A.A. [Adaptive algorithms for processing information in navigation systems of mobile ground-based objects], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 2021, vol. 66, no. 8, pp. 760-771. doi: 10.31857/S0033849421080040 (In Russ., abstract in Eng.)

9. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M. [et al.]. *Radiotekhnicheskiye sistemy: uchebnik dlya vuzov* [Radio engineering systems: a textbook for universities], Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 495 p. (In Russ.)

10. Ayvazyan S.A., Yenyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika = Applied statistics: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing], Moscow: Finansy i statistika, 1983, 471 p. (In Russ.)

11. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of mathematical statistics], Moscow: Nauka, 1983, 416 p. (In Russ.)

Informations- und Messsystem zur Bestimmung der Flughöhe unbemannter Fahrzeuge unter Berücksichtigung von anomalen Messungen der Satellitennavigationssystemsignale

Zusammenfassung: Es ist eine neue Methode zur Erkennung von Anomalien in den Ausgangssignalen von Satellitenradionavigationssystemen in Höhenmesssystemen unbemannter Luftfahrzeuge vorgestellt. Die Methode basiert auf mathematischer Statistik. Anomale Messwerte werden anhand des Verhältnisses der mittleren Abweichungen und des Stichproben-Überschusskoeffizienten bestimmt. Es ist eine Computermodellierung durchgeführt. Ein Kriterium zur Erkennung von Anomalien ist vorgeschlagen.

Système d'information et de mesure de la définition de l'altitude d'un véhicule sans pilote avec la détection des mesures anormales des signaux des systèmes de radionavigation par satellite

Résumé: Est présentée une nouvelle méthode pour détecter les variations anormales à la sortie de l'équipement de la réception des signaux des systèmes de la radionavigation par satellite dans le système d'information et de mesure de la définition de l'altitude d'un véhicule volant sans pilote. La méthode est basée sur des statistiques mathématiques. Sont déterminées les mesures anormales par le rapport à l'écart moyen et le coefficient d'excès de l'échantillon. Sont réalisées des simulations informatiques. Est proposé un critère pour identifier les mesures anormales.

Авторы: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»; *Иванов Андрей Александрович* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Лежнева Наталья Александровна* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.