

ВЫЯВЛЕНИЕ НАЛИЧИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС / GPS

С. П. Москвитин, А. В. Мордовин, Н. А. Лежнева, А. А. Иванов

*Кафедра «Радиотехника»,
resbn@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аномальные измерения; местоположение объекта; определение координат; спутниковая радионавигационная система.

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования по определению координат местоположения объекта по сигналам ГЛОНАСС / GPS в целях подтверждения наличия аномальных измерений на выходе аппаратуры приема. Для выявления аномальных измерений радиосигналов спутниковой радионавигационной системы производится определение закона распределения невязок измерений методом статистической обработки. Для каждой координаты местоположения определены значения, которые выходят за пределы допустимых границ, и вероятности выхода значений за эти границы. Установлено, что по некоторым координатам местоположения превышение составляет в десятки раз больше допустимых границ. Предполагается, что превышение может быть связано с возникновением аномальных измерений псевдодальности в приемнике, приводящих к ошибкам определения координат местоположения.

Введение

Для определения координат местоположения и параметров движения подвижных объектов (летательных аппаратов, беспилотных летательных аппаратов, наземных транспортных средств, в том числе и беспилотных) широкое распространение получили навигационные системы (навигационные комплексы). Основу современных навигационных систем составляют инерциальная навигационная система (ИНС) и спутниковая радионавигационная система (СРНС). На сегодняшний день навигационные системы позволяют определять координаты местоположения и параметры движения подвижных объектов с высокой точностью, достаточной для решения многих навигационных задач, таких как счисления пути, движения по маршруту, вывод в заданную точку и т.д. [1, 2]. Характеристики некоторых навигационных систем по среднеквадратичному отклонению (СКО) для транспортных средств, работающих в совместном режиме с коррекцией от СРНС, приведены в табл. 1.

Высокую точность определения координат местоположения и параметров движения в навигационных системах обеспечивает спутниковая радионавигационная система. В то же время применение данной системы имеет существенный недостаток – возникновение в произвольный момент времени аномальных измерений на выходе аппаратуры приема сигналов СРНС, что приводит к ошибкам определения координат местоположения и параметров движения подвижного

Таблица 1

Точностные характеристики навигационных систем транспортных средств

Система	Координаты, м	Высота, м	Скорость, м/с	Вертикальная скорость, м/с	Крен, тангаж, °	Курс, °
КомпаНав-2Т	5	2	0,2	0,3	1,0	1,5
КомпаНав-3	6		0,2	0,2	0,2	0,4
КомпаНав-2М	5		5	0,3	0,3	0,5
КомпаНав- 5.2	6	–	0,1	–	0,07	0,2
БИНС-Тек	5	2-4		0,3	0,03	0,1
БИНС-ТЭК-С2	6	–	0,08	–	0,03	0,08
Ellipse-N	2		0,1		0,2	0,2
RT2002	1,5		0,36		0,05	0,1
RT3100	1,8		0,36		0,05	
Survey+	1,5		0,18		0,03	
3DM-RQ1	2,5	5	0,1		0,1	0,5
MMQ-G	3	4	0,2	0,2	–	

объекта. Причина возникновения аномальных измерений связана с кратковременным уменьшением отношения сигнал/шум на входе аппаратуры приема радиосигналов СРНС [3, 4]. Обусловлено это следующими причинами: затенением приемной антенны; влиянием канала распространения на радиосигнал (ионосферные и тропосферные задержки сигнала); возникновением многолучевости распространения радиосигнала. В результате, корреляционный приемник вместо максимума полезного сигнала захватывает максимум шумовых выбросов и измерения оказываются аномальными (искаженными).

Цель работы – провести экспериментальные исследования по определению координат местоположения объекта по сигналам СРНС в целях подтверждения наличия аномальных измерений на выходе аппаратуры приема.

Постановка задачи

Для определения координат местоположения по сигналам СРНС собрана экспериментальная установка (рис. 1). Схема установки включает:

- модуль GPS приемника u-bloxNEO-6М;

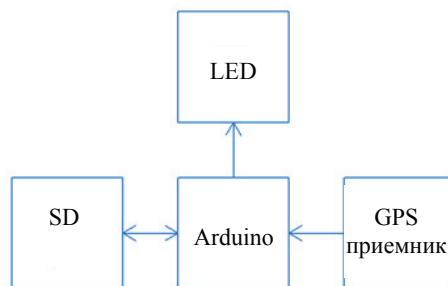


Рис. 1. Схема электрическая структурная экспериментальной установки для определения координат местоположения по сигналам СРНС

- платформу Arduino Nano V3.0, основанную на микроконтроллере (МК) ATmega 328;
- модуль для подключения SD-карты с интерфейсом SPI, карта на 16 Гб;
- светодиод с токоограничивающим резистором для сигнализации окончания записи данных.

Источником питания для установки служит источник постоянного тока с напряжением 5 В и силой тока не менее 100 мА. Установка собрана на макетной плате с механическим соединением проводников. GPS-модуль вынесен на проводниках за пределы платы для улучшения качества приема.

Результаты исследований

Для проведения исследования проведена запись на SD-карту координат местоположения в течение часа, с частотой получения данных 5 Гц в двух точках местности, удаленных друг от друга на 3 км. В результате записи получено 17 000 значений координат для каждого местоположения. Далее проведена предобработка собранных данных для последующего импорта в ПО Microsoft Office Excel через встроенную функцию импорта данных.

Методами математической статистики определены средние значения (математические ожидания) $M[x]$ и дисперсии σ_x^2 для координат местоположения каждой точки: φ – широты; λ – долготы; H – высоты, в которых проходили испытания. Вычисления проводились в соответствии с выражениями:

$$M[x] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad D_x = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - M[x])^2; \quad x = \varphi, \lambda, H,$$

где n – число значений, полученных по каждой координате.

Для первой и второй точек значения математических ожиданий координат местоположения (широты, долготы, высоты относительно уровня Балтийского моря) составили соответственно:

$$\begin{aligned} M[\varphi_1] &= 52,40829237^\circ \text{ с. ш.}; & M[\varphi_2] &= 52,41807983^\circ \text{ с. ш.}; \\ M[\lambda_1] &= 41,48589107^\circ \text{ в. д.}; & M[\lambda_2] &= 41,43652876^\circ \text{ в. д.}; \\ M[H_1] &= 139,0992017 \text{ м}; & M[H_2] &= 139,4268726 \text{ м}. \end{aligned}$$

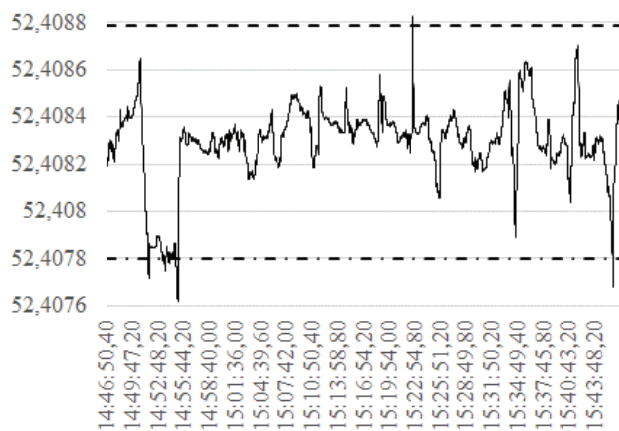
По полученным данным построены графики зависимости координат каждой точки от времени (рис. 2, 3).

Предполагалось, что закон распределения полученных данных по каждой координате является гауссовским. Для гауссовского закона распределения для полученных данных по каждой координате с вероятностью $P = 0,997$ должны выполняться условия:

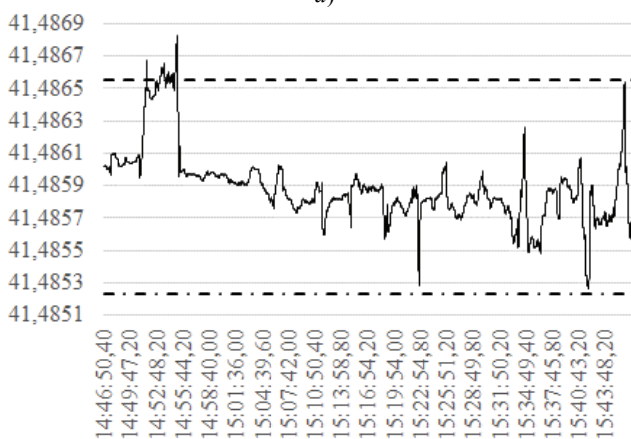
$$\begin{aligned} P\{|\varphi_1 - M[\varphi_1]| < 3\sigma_{\varphi_1}\} &= 0,997; \\ P\{|\lambda_1 - M[\lambda_1]| < 3\sigma_{\lambda_1}\} &= 0,997; \\ P\{|\lambda_1 - M[\lambda_1]| < 3\sigma_{\lambda_1}\} &= 0,997; \\ P\{|\varphi_2 - M[\varphi_2]| < 3\sigma_{\varphi_2}\} &= 0,997; \\ P\{|\lambda_2 - M[\lambda_2]| < 3\sigma_{\lambda_2}\} &= 0,997; \\ P\{|\lambda_2 - M[\lambda_2]| < 3\sigma_{\lambda_2}\} &= 0,997; \\ P\{|\lambda_2 - M[\lambda_2]| < 3\sigma_{\lambda_2}\} &= 0,997, \end{aligned} \tag{1}$$

где $P\{*\}$ – вероятность того, что значения полученных данных лежат в указанных пределах. При этом закон допускает невыполнение условий (1) с вероятностью

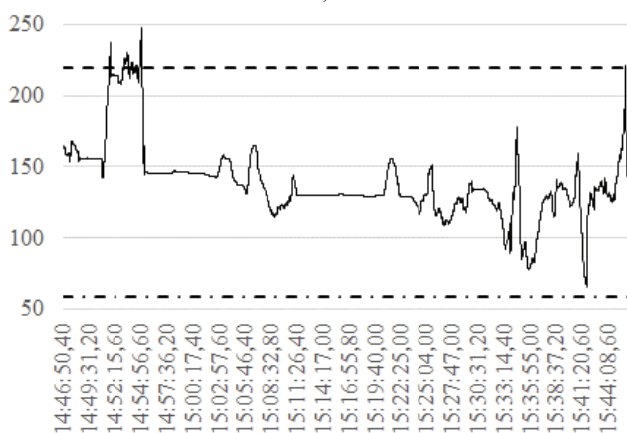
$$1 - P\{*\} = 0,003. \quad (2)$$



a)

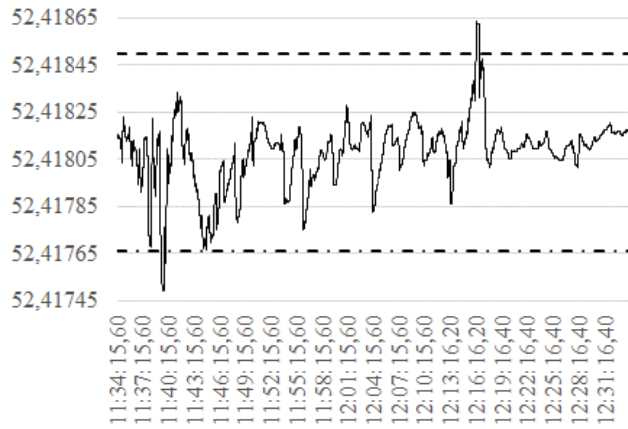


b)

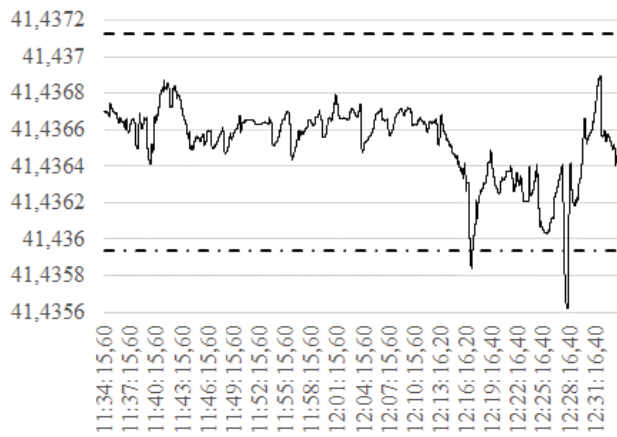


в)

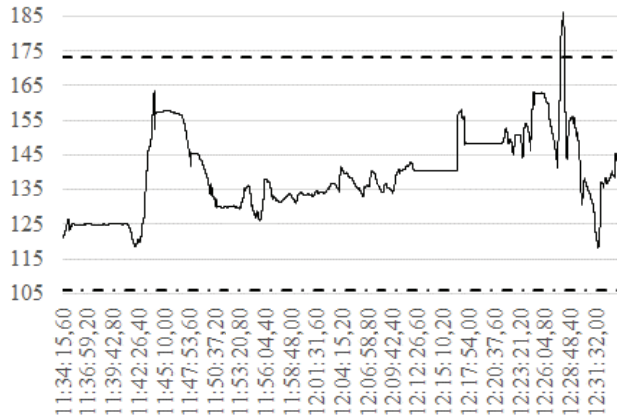
Рис. 2. Графики широты (а), долготы (б) и высоты (в) первой точки местности



a)



б)



в)

Рис. 3. Графики широты (а), долготы (б) и высоты (в) второй точки местности

На рисунках 2, 3 штриховой линией отмечена граница $(M[x] + 3\sigma_x)$; штрихпунктирной – $(M[x] - 3\sigma_x)$, $x = \varphi, \lambda, H$. Величины $3\sigma_x$, $x = \varphi, \lambda, H$ для координат по каждой точке имели следующие значения:

– для первой:

$$3\sigma_{\varphi_1} = 0,000494602^\circ;$$

$$3\sigma_{\lambda_1} = 0,000659588^\circ;$$

$$3\sigma_{H_1} = 80,30160085 \text{ м};$$

– для второй:

$$3\sigma_{\varphi_2} = 0,000420587^\circ;$$

$$3\sigma_{\lambda_2} = 0,000593797^\circ;$$

$$3\sigma_{H_2} = 33,66697913 \text{ м}.$$

Для каждой координаты местоположения двух точек определено количество значений, выходящих за пределы границ (рис. 2, 3), и вероятности выхода за эти границы. В результате получены следующие значения:

$$\begin{aligned} P\{|\varphi_1 - M[\varphi_1]| > 3\sigma_{\varphi_1}\} &= 0,016; \\ P\{|\lambda_1 - M[\lambda_1]| > 3\sigma_{\lambda_1}\} &= 0,027; \\ P\{ |H_1 - M[H_1]| > 3\sigma_{H_1}\} &= 0,997; \\ P\{|\varphi_2 - M[\varphi_2]| > 3\sigma_{\varphi_2}\} &= 0,017; \\ P\{|\lambda_2 - M[\lambda_2]| > 3\sigma_{\lambda_2}\} &= 0,013; \\ P\{ |H_2 - M[H_2]| > 3\sigma_{H_2}\} &= 0,007. \end{aligned} \quad (3)$$

Из полученных значений (3) видно, что по всем координатам местоположения для двух точек полученные вероятности превышают значение, приведенное в (2), причем по некоторым координатам местоположения это превышение больше в десятки раз. Превышение вероятностей может быть связано только с тем, что в приемнике возникают аномальные измерения псевдодалности, приводящие к ошибкам определения координат местоположения подвижного объекта.

Заключение

Таким образом, проведено экспериментальное исследование работы аппаратуры приема сигналов спутниковых радионавигационных устройств. Установлено, что в приемном устройстве возникают ошибки определения координат местоположения, связанные с аномальными измерениями псевдодалности в приемном устройстве.

Список литературы

1. Иванов, А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения / А. В. Иванов // Радиотехника. – 2010. – № 5. – С. 12. – 17.
2. Данилов, С. Н. Синтез тестовых траекторий для оценки точности и устойчивости следящих систем / С. Н. Данилов, Е. А. Антонов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 406–416. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.406-416
3. Гришин, Ю. П. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов [и др.]. ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высшая школа, 1990. – 496 с.
4. Ярлыков, М. С. Марковская теория оценивания случайных процессов / М. С. Ярлыков, М. А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1993. – 464 с.

Detecting the Presence of Anomalous Measurements when Determining the Coordinates of an Object Location by GLONASS/GPS Signals

S. P. Moskvitin, A. V. Mordovin, N. A. Lezhneva, A. A. Ivanov

Department of Radio Engineering, resbn@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: anomalous measurements; object location; determination of coordinates; satellite radio navigation system.

Abstract: Experimental studies were carried out to determine the coordinates of an object's location using GLONASS / GPS signals in order to confirm the presence of anomalous measurements at the output of receiving equipment. To identify anomalous measurements of radio signals from a satellite radio navigation system, the law of distribution of measurement residuals is determined by statistical processing. For each location coordinate, values that go beyond acceptable limits and the probabilities of values going beyond these limits are determined. It has been established that for some location coordinates the excess is tens of times greater than the permissible limits. It is assumed that the excess may be associated with the occurrence of anomalous pseudo-range measurements in the receiver, leading to errors in determining the location coordinates.

References

1. Ivanov A.V. [Complex optimal algorithms for information processing in navigation systems of mobile ground objects with control of the integrity of navigation support], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2010, no. 5, pp. 12-17. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Danilov S.N. Antonov Ye.A. [Synthesis of test trajectories for assessing the accuracy and stability of tracking systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 406-416. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.406-416 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M. (Ed.), Kolomenskiy Yu.A., Ul'yanitskiy Yu.D. *Radiotekhnicheskiye sistemy* [Radio engineering systems], Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 496 p. (In Russ.)
4. Yarlykov M.S., Mironov M.A. *Markovskaya teoriya otsenivaniya sluchaynykh protsessov* [Markov theory of estimation of random processes], Moscow: Radio i svyaz', 1993, 460 p. (In Russ.)

Erkennen des Vorhandenseins anomaler Messungen bei der Bestimmung der Koordinaten des Objektstandortes durch GLONASS / GPS-Signale

Zusammenfassung: Es sind experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Koordinaten des Objektstandorts unter Verwendung von GLONASS/GPS-Signalen durchgeführt, um das Vorhandensein von anomalen Messungen am Ausgang der Empfangsanlage zu bestätigen. Um anomale Messungen von Funksignalen des Satelliten-Funknavigationssystems zu identifizieren, ist die Bestimmung des Gesetzes der Verteilung von Messfehlern durch die Methode der statistischen Verarbeitung vorgenommen. Für jede Standortkoordinate sind die Werte, die außerhalb der zulässigen Grenzen liegen, und die Wahrscheinlichkeiten von Werten außerhalb dieser Grenzen bestimmt. Es ist festgestellt, dass für einige Koordinaten des Standorts die

Überschreitung der zulässigen Grenzwerte um das Zehnfache übersteigt. Es wird angenommen, dass die Überschreitung mit dem Auftreten anomaler Pseudoentfernungsmessungen im Empfänger in Verbindung gebracht werden kann, die zu Fehlern bei der Bestimmung der Standortkoordinaten führen.

Détection des mesures anormales lors de la détermination des coordonnées de l'emplacement d'un objet à l'aide des signaux GLONASS / GPS

Résumé: Sont réalisées des études expérimentales pour déterminer les coordonnées de l'emplacement d'un objet sur les signaux GLONASS / GPS afin de confirmer la présence des mesures anormales à la sortie de l'équipement de réception. Pour détecter les mesures anormales des signaux radio du système de radionavigation par satellite, est déterminée la loi de la répartition des valeurs résiduelles par traitement statistique. Pour chaque coordonnée de localisation, sont définies les valeurs qui dépassent les limites autorisées ainsi que les probabilités de dépasser ces limites. Est établi que pour certaines coordonnées de l'emplacement le dépassement est dix fois supérieur aux limites autorisées. Est supposé que le dépassement peut être dû à l'apparition de mesures anormales de pseudodalité dans le récepteur, entraînant des erreurs de localisation.

Авторы: *Москвитин Сергей Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Мордовин Александр Владимирович* – магистрант; *Лежнева Наталия Александровна* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Иванов Андрей Александрович* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.