

ВЛИЯНИЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСОВ В ТРАКТЕ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ПРИ КАЛИБРОВКЕ ЗАДЕРЖЕК ИМИТАТОРОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Н. М. Крат^{1,2*}, А. А. Савин²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

*E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена калибровка имитаторов навигационных сигналов (ИНС). Приведено описание погрешности измерения внутренней задержки в ИНС, вызываемой рассогласованием волновых сопротивлений ИНС, анализатора навигационных сигналов и измерительного кабеля, по которому проходит навигационный сигнал при калибровке. Цель работы – получение выражения для расчета погрешности измерения внутренней задержки ИНС при его калибровке и количественная оценка погрешности. Погрешность вызвана появлением отраженного сигнала на входе алгоритма оценки задержки сигнала. Отраженный сигнал появляется вследствие рассогласования волновых сопротивлений измерительных приборов. Приведена упрощенная математическая модель сигнала на входе алгоритма оценки задержки сигналов, проведен анализ работы корреляционного алгоритма для принятой модели сигнала, получены два выражения для расчета систематической погрешности оценки задержки и моделированием оценена их точность. Первое выражение является универсальным для всех навигационных сигналов, второе – более точное и учитывает спектральные характеристики имитируемого сигнала. Дана количественная оценка погрешности, полученная с учетом характеристик современных измерительных приборов – при длине измерительного кабеля около 1 м она может достигать 100–150 пс. Сделано заключение о том, что при современных требованиях к калибровке ИНС влияние рассогласования импедансов должно быть учтено. Приведенная информация может быть использована при оценке погрешности измерения внутренней задержки в навигационной аппаратуре потребителя при её калибровке с применением ИНС.

Ключевые слова: имитатор навигационных сигналов, калибровка, рассогласование импедансов, систематическая погрешность, внутренняя задержка.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 520–524

IMPEDANCE MISMATCH INFLUENCE AT INTERNAL DELAY OF NAVIGATION SIGNAL SIMULATOR CALIBRATION

N. M. Krat^{1,2*}, A. A. Savin²

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

*E-mail: kratnm@iss-reshetnev.ru

This paper is devoted to navigation signal simulator calibration. The description of uncertainty estimation of internal signal simulator delay, which is caused by impedance of measurement equipment (navigation signal simulator, analyzer and measurement cable) mismatch, is shown in the paper. The aim of research is to get expression to count uncertainty of simulator internal delay and to give its quantitative assessment. The uncertainty is caused by presence of reflected signal at the input of signal delay estimation algorithm. Reflected signal has place because input/output impedances of measurement equipment are different. The simplified mathematical model of signal at the signal delay estimation algorithm input is given. Correlation algorithm work for given model of signal has been analyzed. Two expressions for systematic uncertainty of delay estimation count have been derived and their inaccuracy has been estimated by means of modelling. The first expression is universal for all variety of navigation signals; the second is more accurate and takes into account spectral characteristics of the concrete navigation signal. The quantitative assessment of uncertainty, based on modern measurement equipment is given – at the length of measurement cable about one meter systematic uncertainty can reach 100–150 picoseconds. Conclusion was made, that at modern requirements to navigation

signal simulators calibration, impedance mismatch must be taken into account. The information, mentioned in this paper, can be used at internal delay of navigation receivers' estimation when receivers are calibrated by means of navigation signal simulator.

Keywords: navigation signal simulator, calibration, impedance mismatch, systematic uncertainty, internal delay.

Введение. Для оценки точностных характеристик навигационной аппаратуры потребителей (НАП) – приемников сигналов спутниковых радионавигационных систем, а также специализированных приемников из состава наземного сегмента космического комплекса (НС КК) системы ГЛОНАСС, могут быть применены имитаторы навигационных сигналов (ИНС). Учитывая тенденции развития НАП, в частности угломерной и синхронизирующей, необходимо подтверждать погрешность измерения задержки НАП с субнаносекундным уровнем точности [1–3]. Требования к приёмникам из состава НС КК аналогичны: неисключённая систематическая погрешность измерения задержки не должна превышать долей наносекунд.

Необходимым условием для этого является наличие ИНС, калиброванного с лучшей точностью. Анализ доступных источников показал, что в настоящее время при прецизионной калибровке ИНС не оценивается и не учитывается влияние рассогласования импедансов в линии передачи высокочастотного навигационного сигнала [4–6]. Различие рассогласований входных импедансов аппаратуры, используемой для калибровки ИНС и НАП, тестируемой с использованием ИНС, может привести к появлению дополнительной систематической погрешности оценки точностных характеристик НАП. В связи с этим целью данной работы является определение величины погрешности оценки задержки, вызванной рассогласованием для определения её вклада в бюджет погрешности калибровки ИНС.

Математическая модель сигнала на входе устройства обработки сигналов с учетом рассогласования. На рис. 1 изображена схема калибровки ИНС (управляющая ЭВМ, стандарт частоты, кабельные сборки, необходимые для подключения вспомогательных элементов схемы, не показаны). В общем случае калибровка задержки ИНС заключается в том, что ИНС настраивается на формирование навигационного сигнала с заданной задержкой, устройство обработки сигналов (УОС) производит измерение

задержки, и рассчитывается калибровочная поправка, соответствующая внутренней задержке сигнала в ИНС. При этом каждая имеющаяся в линии передачи навигационного сигнала электрическая неоднородность приводит к появлению дополнительного отраженного сигнала. На рис. 1 изображен только первый отраженный сигнал, попадающий на вход УОС и оказывающий наибольшее влияние на оценку задержки, так как он обладает наибольшей мощностью по сравнению с остальными.

Модель отраженного сигнала дополнительно упрощена за счет того, что рассматривается только сигнал, отраженный от высокочастотных разъемов УОС и ИНС, и не рассматриваются сигналы, вызванные рассогласованиями внутри ВЧ-кабеля, ИНС, УОС и переходов. Тогда, если принять, что ВЧ-кабель не вносит никаких искажений в сигнал (АЧХ постоянна и ФЧХ линейна в полосе частот сигнала), справедлива следующая модель сигнала на нулевой частоте на входе алгоритма обработки, реализованного в УОС:

$$s_{\text{УОС}}(t) = s_{\text{ИНС}}(t - t_{\text{каб}}) + |\Gamma| \cdot s_{\text{ИНС}}(t - 3 \cdot t_{\text{каб}}) \times \exp(j \cdot [\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot 3 \cdot t_{\text{каб}}]), \quad (1)$$

где $s_{\text{УОС}}$ – сигнал на входе УОС; $s_{\text{ИНС}}$ – сигнал на выходе ИНС; $t_{\text{каб}}$ – задержка на распространение сигнала в кабеле; $|\Gamma|$ – произведение модулей коэффициентов отражения (КО) ИНС и УОС; φ_{Γ} – сумма фаз КО ИНС и УОС; f_0 – несущая частота сигнала.

Анализ работы алгоритма корреляционной обработки для принятой модели отраженного сигнала. Оптимальным методом при оценке задержки сигнала в присутствии белого гауссовского шума с точки зрения минимума среднего квадрата погрешности оценки является корреляционный метод [7–9]. Оценка задержки корреляционным методом соответствует моменту времени, при котором модуль огибающей взаимокорреляционной функции входного и опорного сигналов максимален.

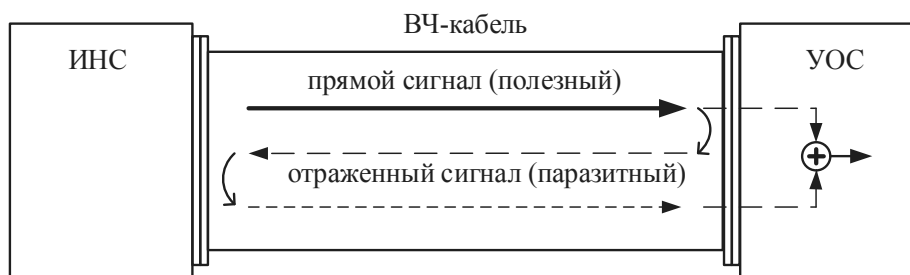


Рис. 1. Появление отраженного сигнала при калибровке ИНС

Fig. 1. Appearance of a reflected signal during ANN calibration

В силу линейности алгоритма корреляционной обработки модели сигнала (1) соответствует комплексная огибающая сигнала на выходе коррелятора:

$$K_{\Sigma}(t) = K_0(t) + |\Gamma| \cdot K_0(t - \Delta t) \times \exp(j[\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t]), \quad (2)$$

где $K_0(t)$ – автокорреляционная функция сигнала на выходе ИНС; $K_{\Sigma}(t)$ – взаимная корреляционная функция между сигналом на выходе ИНС и сигналом на входе УОС; $\Delta t = 2 \cdot t_{\text{каб}}$ – задержка отраженного сигнала по отношению ко времени прихода прямого сигнала (дополнительная задержка).

Модуль корреляционной функции (2) для значений $|\Gamma| \ll 1$ приблизительно равен

$$|K_{\Sigma}(t)| = |K_0(t)| + |\Gamma| \times |K_0(t - \Delta t)| \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t). \quad (3)$$

Выражение (3) получено в предположении, что фаза комплексной автокорреляционной функции сигнала на выходе ИНС постоянна на интервале от момента прихода прямого сигнала до прихода отраженного сигнала, т. е. $\arg(K_0(t)) = \arg(K_0(t - \Delta t))$.

Погрешность оценки задержки как разность положений максимумов функций $K_0(t)$ и $K_{\Sigma}(t)$ может быть получена в результате решения следующего уравнения относительно σ_t :

$$|K_0(t_0 + \sigma_t)| + |\Gamma| \cdot |K_0(t_0 - \Delta t + \sigma_t)| \times \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t) = 0, \quad (4)$$

где t_0 – момент, соответствующий максимуму корреляционной функции; σ_t – погрешность оценки задержки корреляционным методом.

При небольших значениях σ_t решение (4) имеет следующий вид:

$$\sigma_t = -|\Gamma| \cdot \frac{|K_0(\Delta t)|}{|K_0(0)|} \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t).$$

Для получения решения уравнения (4) в аналитическом виде необходимо аппроксимировать функцию $|K_0(t)|$ в районе основного максимума некоторой аналитической функцией. Ниже приведены решения при аппроксимации функции $|K_0(t)|$ параболой и гауссоидой:

$$\sigma_t = -|\Gamma| \cdot \Delta t \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t), \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{-|\Gamma| \cdot \Delta t \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t)}{\exp\left(-\frac{\Delta t^2}{c^2}\right) + |\Gamma| \cdot \cos(\varphi_{\Gamma} - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta t)}, \quad (6)$$

где c – коэффициент, пропорциональный длительности чипа дальномерного кода сигнала на выходе ИНС.

На рис. 2 приведены зависимости погрешности оценки задержки, полученные для сигнала ГЛОНАСС L3OC [10] (тактовая частота 10,23 МГц, $|\Gamma| = 0,01$, φ_{Γ} рассчитывается для каждого значения дополнительной задержки из условия, что прямой и отраженный сигналы синфазны).

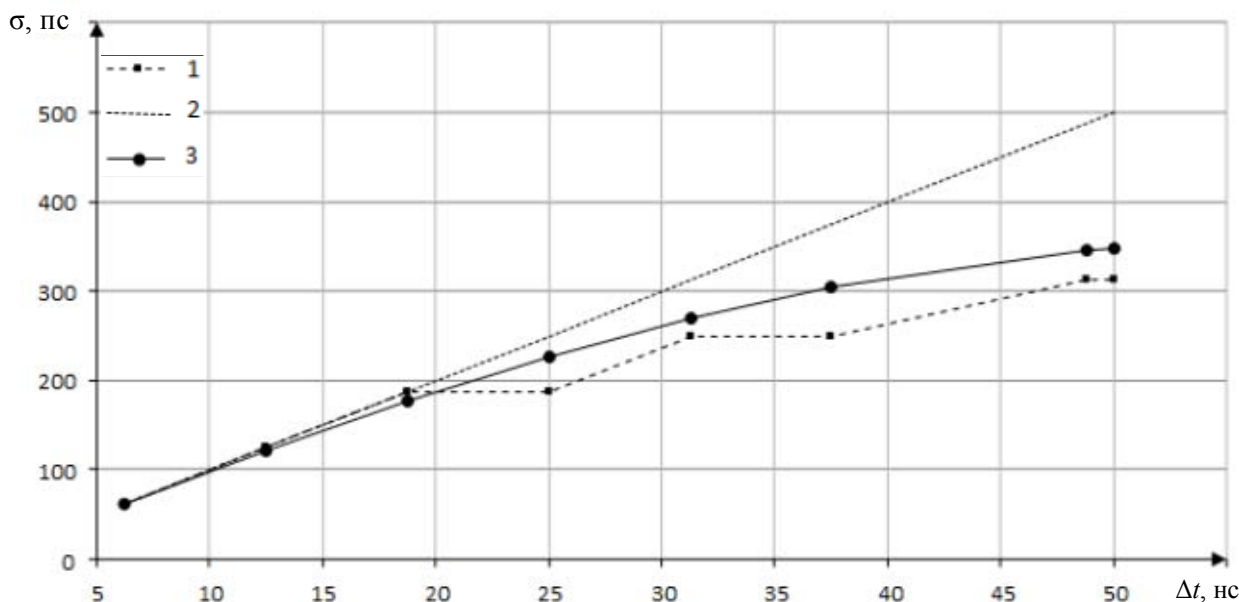


Рис. 2. Погрешности оценки задержки: 1 – значение погрешности, определенное по результатам имитационного моделирования в среде MatLAB для заданных условий работы; 2 – значение, вычисленное по (5); 3 – значение, вычисленное по (6) при $c = 83$ нс

Fig. 2. Delay evaluation errors: 1 is the error value determined from the simulation results in the MatLAB environment for the specified operating conditions, 2 is the value calculated from (5), 3 is the value calculated from (6) at $c = 83$ ns

Характеристики измерительных устройств, связанные со значением КО

Устройство	Характеристика и ее значение	Значение КО
ИНС Spirent GSS 9000 [12]	КСВН ВЧ-выхода 1,2	0,09 (–20,8 дБ)
ИНС Aeroflex Avionics GPSG-1000 [13]	КСВН ВЧ-выхода 1,3	0,13 (–17,7 дБ)
Цифровой осциллограф Agilent DSO9404a [14]	Входное сопротивление 50 Ом ± 2,5 %	0,0123 (–38,2 дБ)
Цифровой осциллограф Rohde&Schwarz RTO1044 [15]	Входное сопротивление 50 Ом ± 1,5 %	0,0074 (–42,6 дБ)

Анализ рис. 2 приводит к выводу, что выражения (5) и (6) достаточно точно описывают погрешность, полученную по результатам моделирования при значениях Δt менее 50 нс (что соответствует длине измерительного кабеля 5,76 м при коэффициенте укорочения волны 1,3).

При этом погрешность, полученная по (6), является более близкой к результатам моделирования (разность фактического значения и расчетного не превышает 60 пс). Это связано в первую очередь с тем, что выражение (6) учитывает спектральные характеристики сигнала (параметр c). Выражение (5) является более универсальным и менее точным (разность пропорциональна $|\Gamma|$ и Δt и не превышает 200 пс).

Как следует из (4), погрешность (5) и (6) напрямую зависит от погрешности аппроксимации первой производной $|K_0(t)|$, которая определяется видом и значениями параметров аппроксимирующей функции, а также интервалом аппроксимации. Чтобы получить наиболее точное выражение для расчета погрешности, вызванной рассогласованием при различных значениях дополнительной задержки, необходимо выбирать интервал аппроксимации производной модуля автокорреляционной функции сигнала на выходе ИНС, соответствующий диапазону изменения дополнительной задержки отраженного сигнала, имеющему место при калибровке ИНС. Этот диапазон необходимо выбирать, исходя из следующих фактов:

- 1) длина измерительного кабеля обычно составляет единицы метров (1–5 м);
- 2) скорость распространения сигнала в кабеле меньше скорости света на 15–30 %.

Учитывая эти факты, диапазон значений дополнительной задержки целесообразно задать от 8 до 50 нс. При этом для расчета погрешности можно использовать выражение (5).

Количественная оценка значения погрешности. Для количественной оценки исследуемой погрешности необходимо задать диапазон возможных значений параметров отражения. Источником этих данных могут служить технические характеристики ИНС и УОС. Следует отметить, что для точных оценок параметров сигналов ИНС обычно используются анализаторы навигационных сигналов, представляющие собой совокупность цифрового осциллографа и специального программного обеспечения [11]. В таблице приведены технические характеристики приборов, определяющие значения $|\Gamma|$.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать вывод, что значение $|\Gamma|$, т. е. произведения модулей КО ИНС и УОС, может достигать значений от 0,00067 до 0,0016 при значении импеданса разъе-

мов кабеля 50 Ом. Поскольку импеданс разъемов кабелей отличается от номинального значения (КСВ до 1,15 для прецизионных соединителей), диапазон значений $|\Gamma|$ будет составлять от 0,012 до 0,017.

Подстановка имеющихся значений параметров отражения в (5) позволяет заключить, что значение систематической погрешности кодовой оценки задержки ИНС, вызванной отраженным сигналом при калибровке ИНС, может достигать 100–150 пс для кабеля длиной 1 м и 600–750 пс для кабеля длиной 5 м (без учета потерь в кабеле) для различных сигналов, значений несущей частоты и параметров отражения.

Заключение. В данной статье был проведен анализ влияния рассогласования импедансов в линии передачи высокочастотного сигнала при калибровке ИНС. В результате анализа получена модель сигнала на входе алгоритма обработки и определены предельные значения систематической погрешности измерения задержки. Учитывая, что калибровка ИНС должна проводиться с субнаносекундным уровнем точности, необходимо учитывать влияние рассогласования. Самый простой способ учета – измерение значений параметров отражения, например, рефлектометрами или векторными анализаторами цепей с последующим вычетом рассчитанных значений погрешности из измеренных УОС задержек. Получены выражения для расчета значения погрешности по известным параметрам отражения. Для сигнала ГЛОНАСС ЛЗОС расчетные значения отличаются от истинного не более чем на 60 и 200 пс (для выражений (5) и (6) соответственно). Поскольку данный сигнал является сигналом ГЛОНАСС с наиболее широким спектром, можно предположить, что для других сигналов погрешность будет ещё меньше.

Библиографические ссылки

1. Поверка радионавигационного оборудования космического применения / В. И. Крившич [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : тезисы докладов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. (10–14 окт. 2012 г.). С. 72–75.
2. Гребенников А. В. Совместная фильтрация кодовых и фазовых измерений в высокоточной аппаратуре радионавигации // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 118–128.
3. Аппаратура для калибровки и метрологической проверки источников навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / А. В. Гребенников [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : тезисы докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. (10–14 окт. 2012 г.). С. 239–241.

4. Absolute calibration of dual frequency timing receivers for Galileo / B. P. B. Elwischger [et al.] // European Navigation Conference (ENC). Vienna, 2013.

5. Absolute calibration of time receivers with DLR's GPS/Galileo HW simulator / S. Thoelet [et al.] // 39th annual precise time and time interval (PTTI) meeting. Pp. 323–330.

6. Fischer J., Perdue L. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications // Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Washington, 2013. Pp. 107–111.

7. Ширман Я. Д., Голиков В. Н. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов. М. : Советское радио, 1970. 560 с.

8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 656 с.

9. Радиотехнические системы : учебник / Ю. М. Казаринов [и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Академия, 2008. 529 с.

10. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС : интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. Редакция 1.0. М. : АО «Российские космические системы», 2016. 57 с.

11. Крат Н. М., Савин А. А., Шарыгин Г. С. Контрольно-проверочная аппаратура системы автономной навигации космических аппаратов // Доклады ТУСУР. 2014. № 1 (31). С. 28–32.

12. Spirent GSS9000 constellation simulator datasheet [Электронный ресурс]. URL: https://www.spirent.com/-/media/Datasheets/Positioning/GSS9000_Specifications.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

13. Avionics GPSG-1000 GPS/Galileo Portable Positional Simulator datasheet [Электронный ресурс]. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1062_gpsg-1000iss4.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

14. Agilent Technologies Infiniium 9000 Series Oscilloscopes Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: http://data.datasheetlib.com/pdf1/13/95/139508/n2902a_441f06e901.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

15. R&S RTO digital oscilloscope specifications [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/campaigns-media/data/sota/rto/downloads/RTO_dat-sw_en_5214-5155-22_v1900.pdf (дата обращения: 10.05.2016).

References

1. Krivshich V. I., Krasnenko S. S., Pichkalev A. V., Shkol'nyi V. N. [Checking of the radionavigating equipment for space application]. *Tezisy dokl. 2 Mezhdunar. Nauch.-tekhnich. konf. "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Proc. 2nd Int. scientific and technical conference "Navigation satellite systems: their part and significance in the life of modern man"]. 2012, P. 72–75 (In Russ.).

2. Grebennikov A. V. [Combined filtration of code and phase measurements in the high precision radio navigation equipment]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2012, No. 9, P. 118–128 (In Russ.).

3. Grebennikov A. V., Kondrat'ev A. S., Sizasov S. V., Khazagarov Yu. G. [Equipment for the calibration and the metrological check of the sources of navigation signals GNSS]. *Tezisy dokl. 2 mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Proc. 2nd Int. scientific and technical conference "Navigation satellite systems: their part and significance in the life of modern man"]. 2012, P. 239–241 (In Russ.).

4. Elwischger B. P. B., Thoelet S., Suess M., Furthner J. Absolute calibration of dual frequency timing receivers for Galileo. *European Navigation Conference (ENC)*. Vienna, 2013.

5. Thoelet S., Grunert U., Denks H., Furthner J. Absolute calibration of time receivers with DLR's GPS/Galileo HW simulator. 39th annual precise time and time interval (PTTI) meeting. P. 323–330.

6. Fischer J., Perdue L. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications. Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Washington 2013. P. 107–111.

7. Shirman Ya. D., Golikov V. N. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical bases of radiolocation]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 560 p.

8. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering] 3rd edition, complemented and conversed]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989, 656 p.

9. Grishin Yu. P., Ipatov V. P. et al. *Radioelektronnye sistemy*. [Radio engineering systems], Moscow, Akademiya Publ., 2008, 529 p.

10. *Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal otkrytogo dostupa s kodovym razdeleniem v diapazone L3. Redaktsiya 1.0*. [Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. Open service navigation signal with code division in L3 frequency band]. Moscow, 2016, Rossiyskie kosmicheskie sistemy Publ., 57 p.

11. Krat N. M., Savin A. A., Sharygin G. S. [Test equipment for autonomous navigation system of space vehicles]. *Doklady TUSUR*. 2014, No. 1 (31), P. 28–32 (In Russ.).

12. *Spirent GSS9000 constellation simulator datasheet*. Available at: https://www.spirent.com/-/media/Datasheets/Positioning/GSS9000_Specifications.pdf (accessed: 10.05.2016).

13. *Avionics GPSG-1000 GPS/Galileo Portable Positional Simulator datasheet*. Available at: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1062_gpsg-1000iss4.pdf (accessed: 10.05.2016).

14. *Agilent technologies infiniium 9000 series oscilloscopes datasheet*. Available at: http://data.datasheetlib.com/pdf1/13/95/139508/n2902a_441f06e901.pdf (accessed: 10.05.2016).

15. *R&S RTO digital oscilloscope specifications*. Available at: https://cdn.rohde-schwarz.com/campaigns-media/data/sota/rto/downloads/RTO_dat-sw_en_5214-5155-22_v1900.pdf (accessed: 10.05.2016).