

Расширение полосы сигналов системы ГЛОНАСС в диапазоне L1 с использованием особенностей ВОС-модуляции

Д. А. Астахов, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Ткачев, *к. т. н., otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена проблеме повышения потенциальной точности кодовых измерений псевдодальности сигналов системы ГЛОНАСС диапазона L1 при существующих ограничениях спектра, вызванных близким расположением радиоастрономического диапазона. Указанную проблему предлагается решать за счет расширения спектра навигационных сигналов за пределы радиоастрономического диапазона с использованием особенностей меандровой поднесущей модуляции (ВОС). В работе рассмотрены разные виды сигналов с модуляцией ВОС, приведены спектры их излучения в диапазоне L1 и в радиоастрономическом диапазоне. Проведено сравнение потенциальной точности предлагаемых и существующих навигационных сигналов ГЛОНАСС в диапазоне L1. Для сравнения была использована методика, позволяющая оценивать потенциально достижимые значения дисперсии ошибок для навигационных сигналов с ВОС-модуляцией, обрабатываемых перспективными широкополосными приемниками. В результате сравнения было показано, что предлагаемые сигналы значительно превосходят существующие по потенциальной точности и при этом не создают значительного излучения в радиоастрономическом диапазоне. Из предлагаемых сигналов наиболее перспективным выбран сигнал с модуляцией $\cos\text{BOC}(15, 2.5)$, который обеспечивает наибольшую потенциальную точность.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), ГЛОНАСС, расширение спектра, точность, радиоастрономический диапазон, ВОС-сигналы

Expansion of the GLONASS Signal Bandwidth in the L1 Band Using BOC Modulation Features

D. A. Astachov, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Tkachev, *Cand. Sci. (Engineering), otdelenie_74@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of increasing the potential accuracy of code measurements of pseudorange of GLONASS signals in the L1 range under the existing spectrum limitations caused by the close location of the radio astronomy range. This problem is proposed to be solved by expanding the spectrum of navigation signals beyond the radio astronomy range using the features of the meander subcarrier modulation (BOC). The paper considers different types of signals with BOC modulation and shows their emission spectra in the L1 band and in the radio astronomy band. The potential accuracy of the proposed and existing GLONASS navigation signals in the L1 range is compared. For comparison, a technique was used that allows estimating the potentially achievable values of the error dispersion for navigation signals with BOC modulation processed by advanced broadband receivers. As a result of the comparison, it was shown that the proposed signals significantly exceed the existing ones in terms of potential accuracy and at the same time do not create significant radiation in the radio astronomy range. Of the proposed signals, the most promising is the signal with $\cos\text{BOC}(15, 2.5)$ modulation, which provides the highest potential accuracy.

Keywords: global navigation satellite system (GNSS), GLONASS, spread spectrum, accuracy, radio astronomy range, BOC signals

Существует проблема, связанная с тем, что используемые в настоящее время и внедряемые в ближайшем будущем навигационные радиосигналы системы ГЛОНАСС не отвечают современным требованиям по критерию потенциальной точности, так как были разработаны 10–30 лет назад. Кроме того, в диапазоне L1 они уступают по потенциальным свойствам сигналам других ГНСС (GPS, Galileo, Beidou). Повышение потенциальной точности кодовых измерений и уменьшение влияния многолучевости [1] обусловлено расширением полосы навигационного сигнала. Необходимо исследовать и разработать перспективные типы сигналов ГЛОНАСС в условиях значительных ограничений по возможности расширения полосы частот и с учетом сигналов других радиоэлектронных систем в выделенных частотных диапазонах.

Предлагаемая тема соответствует направлению междисциплинарных исследований из перечня прорывных технологий, включенных в «Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 года» (ТОП-20), а именно, «Технологии координатно-временного и навигационного обеспечения».

На рис. 1–8 приведена информация о размещении спектров предлагаемых сигналов ГЛОНАСС в наиболее проблемном диапазоне L1. Существующие сигналы ГЛОНАСС с частотным и кодовым разделением размещены в выделенном диапазоне 1592,9–1610 МГц. Справа от него расположен радиоастрономический диапазон (РАД) 1610,6–1613,8 МГц, в котором требуется обеспечивать уровень спектральной плотности потока мощности не более 194 дБВт/(м² · 20 кГц) [2]. Слева находится диапазон сигналов систем GPS и Galileo, в котором невозможно расположение спектра сигналов ГЛОНАСС. Возможным вариантом передачи сигналов ГЛОНАСС с расширенным спектром в диапазоне L1 является вынесение их спектра вправо в область более высоких частот за пределы РАД при обеспечении низкого уровня излучения в РАД до диапазона 1626,5–1660 МГц, который согласно [3] выделен для подвижной спутниковой связи в направлении «Земля–космос».

«Для решения данной проблемы предлагается расширить полосу навигационных сигналов путем

использования особенностей меандровой поднесущей модуляции.

Наиболее известным вариантом этой модуляции является ВОС (**binary offset carrier**). Первые упоминания в литературе использования ВОС-сигналов для спутниковых радионавигационных систем появилось в 1999 г. [4]. В русскоязычной литературе описание и характеристики ВОС-сигналов приводятся в работах [5, 6]. В обозначении ВОС(*m, n*) для данных сигналов вводятся соответственно коэффициенты отношения поднесущей частоты и частоты кода к частоте кода C/A системы GPS [7]. Например, в сигнале ВОС(2, 1) частота кода соответствует 1,023 МГц, а частота меандра соответствует 2,046 МГц.

Отличие ВОС-сигналов от традиционных шумоподобных сигналов заключается в использовании при формировании сигнала меандровой последовательности поднесущей частоты. При этом сигнал гармонического несущего колебания манипулируется по фазе результатом перемножения псевдослучайной последовательности (ПСП) и поднесущего колебания.

ВОС сигнал в математическом виде записывается следующим образом:

$$S_{\text{ВОС}}(t) = A \times d(t) \times \Pi(t) \times Sc(t) \times \cos(\omega \cdot t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где A — амплитуда сигнала, $d(t)$ — двоичные символы информации $\mu = \pm 1$, $\Pi(t)$ — псевдослучайная последовательность (ПСП), $Sc(t)$ — аппроксимация поднесущей частоты, ω — несущая частота сигнала, $\varphi(t)$ — фаза несущего колебания.

Наиболее широко известны два основных вида аппроксимации гармонического колебания $Sc(t)$ для использования в качестве поднесущей частоты [8]: sinВОС и cosВОС.

В случае sinВОС функцию $Sc(t)$ представляют в виде

$$Sc(t) = \text{sign} [\sin(\omega_{sc} \cdot t)], \quad (2)$$

где функция

$$\text{sign}[x] = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0, \end{cases} \quad (3)$$

$\omega_{sc} = 2 \cdot \pi \cdot f_{sc}$ — частота поднесущего колебания» [9].

В случае cosВОС функцию $Sc(t)$ представляют в виде

$$Sc(t) = \text{sign} [\cos(\omega_{sc} \cdot t)]. \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрены следующие варианты использования для этого сигналов с модуляциями cosВОС(10, 2.5) и sinВОС(10, 2.5)

(рис. 1, 2), cosВОС(12.5, 2.5) и sinВОС(12.5, 2.5) (рис. 3, 4), cosВОС(15, 2.5) и sinВОС(15, 2.5) (рис. 5, 6), cosВОС(10, 1) и sinВОС(10, 1) (рис. 7, 8). Данные виды модуляции позволяют расположить сигналы ГЛОНАСС с расширенным спектром при минимизации уровня внеполосного излучения и излучения в РАД.

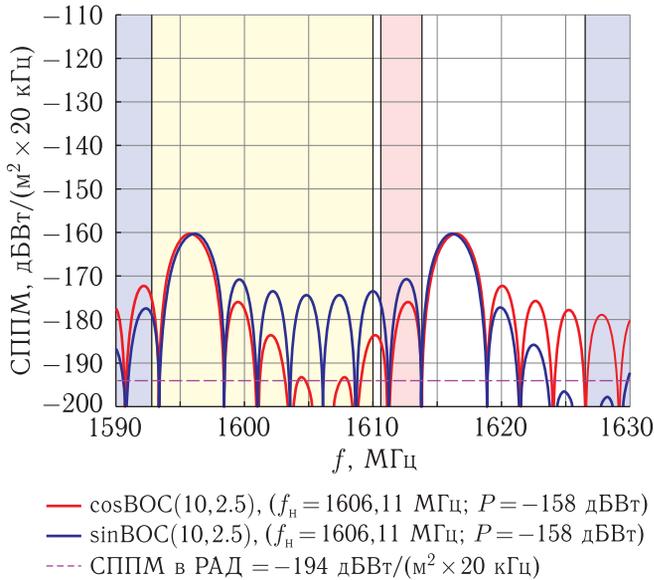


Рис. 1. Расположение спектров сигналов с модуляцией cosВОС(10, 2.5) и sinВОС(10, 2.5)

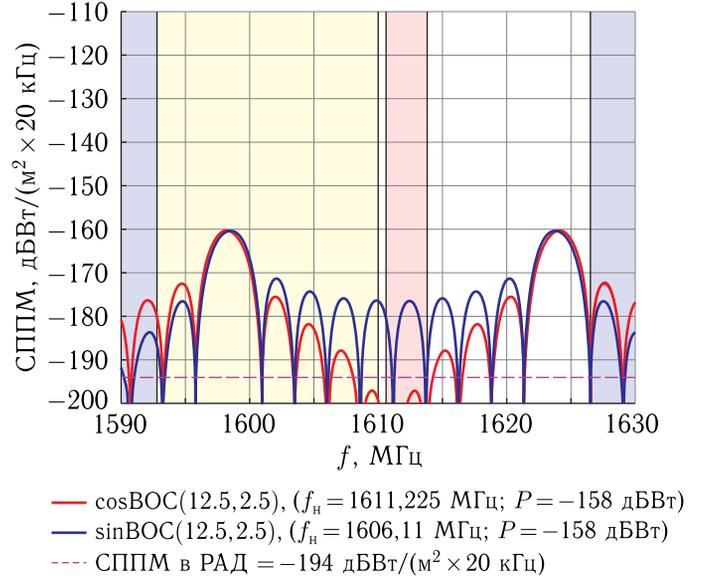


Рис. 3. Расположение спектров сигналов с модуляцией cosВОС(12.5, 2.5) и sinВОС(12.5, 2.5)

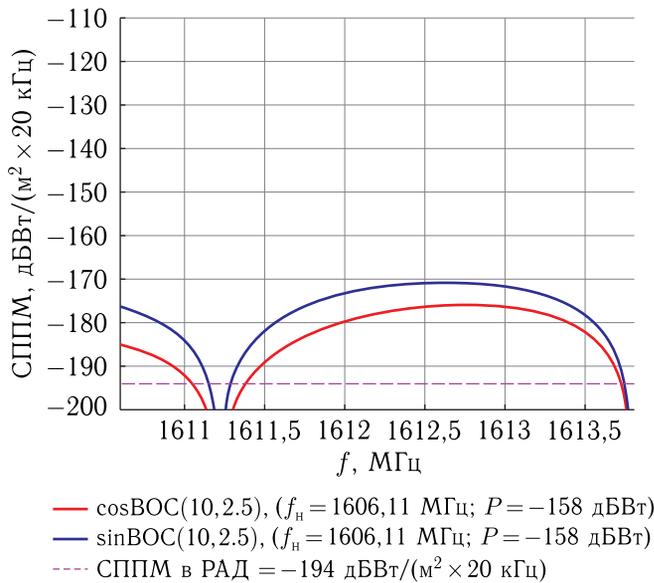


Рис. 2. Расположение спектров сигналов с модуляцией cosВОС(10, 2.5) и sinВОС(10, 2.5) в РАД

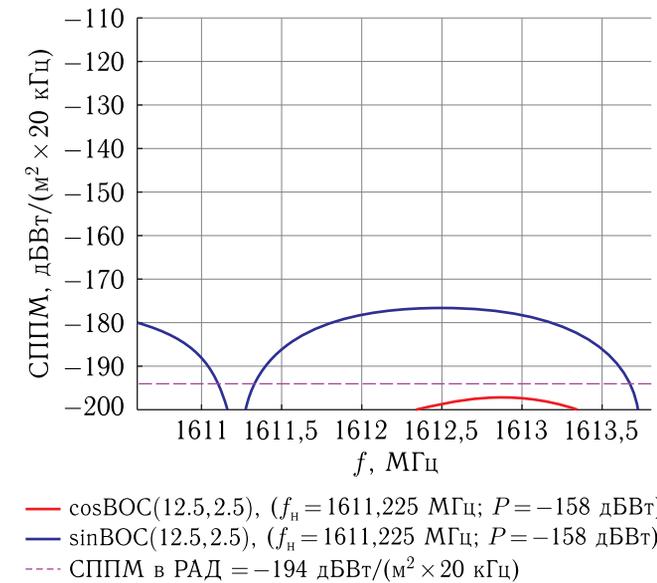


Рис. 4. Расположение спектров сигналов с модуляцией cosВОС(12.5, 2.5) и sinВОС(12.5, 2.5) в РАД

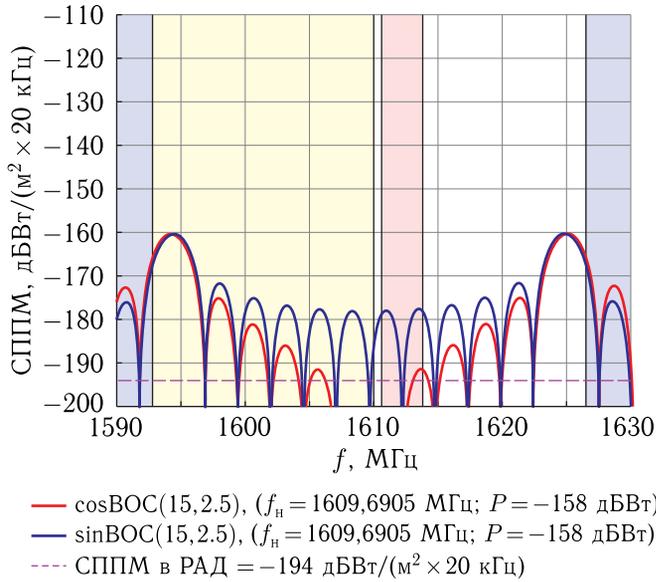


Рис. 5. Расположение спектров сигналов с модуляцией $\cos\text{BOC}(15, 2.5)$ и $\sin\text{BOC}(15, 2.5)$

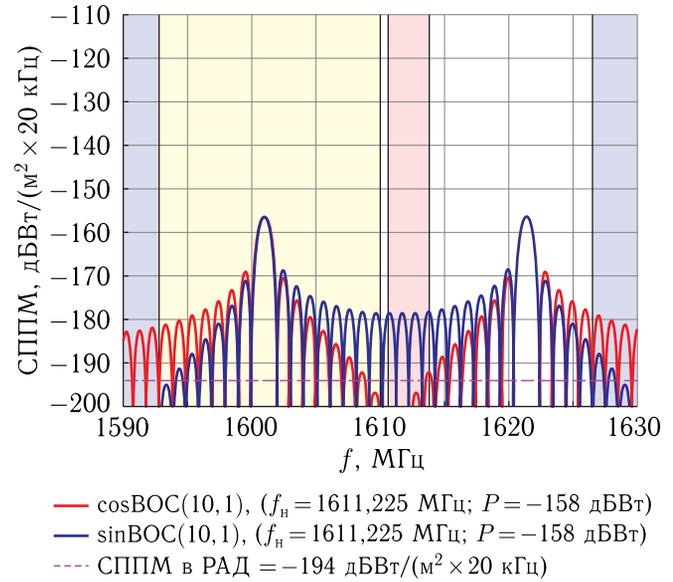


Рис. 7. Расположение спектров сигналов с модуляцией $\cos\text{BOC}(10, 1)$ и $\sin\text{BOC}(10, 1)$

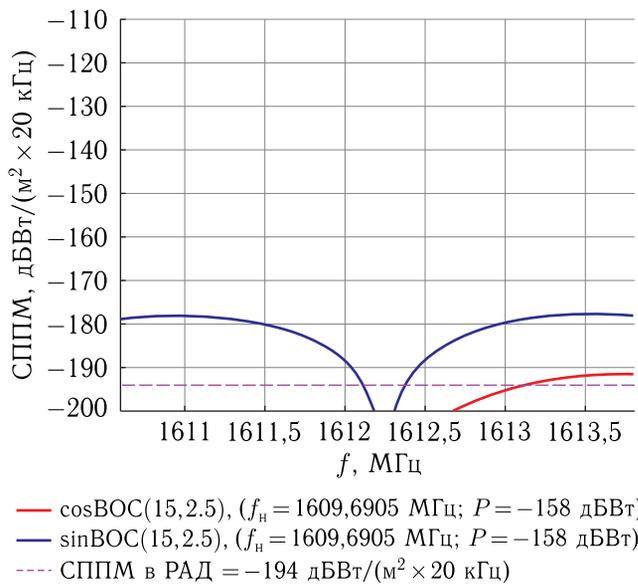


Рис. 6. Расположение спектров сигналов с модуляцией $\cos\text{BOC}(15, 2.5)$ и $\sin\text{BOC}(15, 2.5)$ в РАД

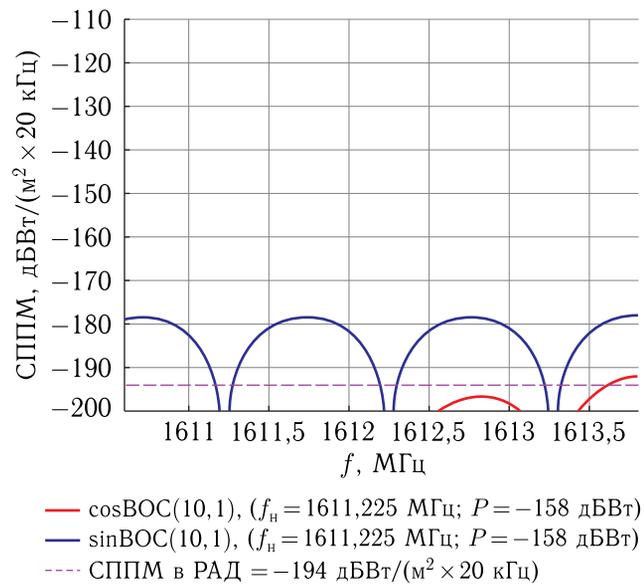


Рис. 8. Расположение спектров сигналов с модуляцией $\cos\text{BOC}(10, 1)$ и $\sin\text{BOC}(10, 1)$ в РАД

Из графиков, представленных на рис. 1–8, можно сделать вывод, что сигналы с модуляцией $\cos\text{BOC}$ обладают более глубоким провалом между главными лепестками спектра по сравнению с сигналами $\sin\text{BOC}$. То есть сигналы с модуляцией $\cos\text{BOC}$ лучше обеспечивают выполнение требований, предъявляемых к уровню излучения радионавигационных систем в РАД. Однако, спад спектра

за пределами главных лепестков у сигналов с модуляцией $\cos\text{BOC}$ более медленный, чем у сигналов с модуляцией $\sin\text{BOC}$, что создает трудности с уровнем излучения в соседних диапазонах.

Проведем сравнение потенциальной точности предлагаемых и существующих навигационных сигналов ГЛОНАСС в диапазоне L1. При сравнении сигналов практический интерес представляют

не абсолютные, а относительные значения потенциальной точности. Поэтому найдем отношение дисперсии ошибки сигнала с С/А-кодом GPS (модуляция BPSK(1)) и сравниваемых сигналов. Такой выбор обусловлен тем, что в настоящее время при сравнении новых сигналов в качестве базового часто используют характеристики сигнала с С/А-кодом GPS. Кроме того, коэффициенты ВОС-модуляции также определяются относительно параметров С/А-кода GPS. Для сравнения сигналов воспользуемся разработанной в [10] методикой, позволяющей оценивать потенциально достижимые значения дисперсии ошибок для навигационных сигналов с ВОС-модуляцией, которая является частным случаем ФКМ. Будем рассматривать применение перспективных приемников, которые используют широкие полосы, что обеспечивает повышение точности и помогает алгоритмам борьбы с многолучевостью. С расширением полосы дисперсия ошибок уменьшается, но медленнее, чем уменьшается длительность фронтов сигнала на выходе фильтров. Поэтому дисперсия ошибки начинает выходить за пределы длительности фронтов. Таким образом нарушаются условия применения границы Рао–Крамера и основанных на ней традиционных методов для оценки значения дисперсии ошибки.

Согласно [10] дисперсия ошибок принимаемого сигнала

$$D_t = \frac{13/8}{Q^2}. \quad (5)$$

При этом с учетом широкополосности приемника и использования предложенной в [10] эквивалентной спектральной плотности шума в случае сигнала с несколькими фронтами

$$Q = \frac{A^2 N_\Phi}{N_0}, \quad (6)$$

где A — амплитуда сигнала, N_0 — спектральная плотность шума, N_Φ — количество фронтов в сигнале.

Таким образом отношение дисперсий ошибок сравниваемых сигналов полностью определяется отношением квадратов числа фронтов импульсов внутри этих сигналов:

$$D_{t2}/D_{t1} = N_{\Phi 1}^2/N_{\Phi 2}^2. \quad (7)$$

Количество фронтов в сигналах с модуляцией BPSK(n)

$$N_{\text{BPSK}(n)} = n \cdot \frac{N_{\text{ПСП}}}{2}, \quad (8)$$

где $N_{\text{ПСП}}$ — количество символов на периоде псевдослучайной последовательности, используемой в сигнале.

Количество фронтов в сигналах с модуляциями sinBOC(m, n) и cosBOC(m, n) соответственно:

$$N_{\text{sinBOC}(m,n)} = n \cdot \left[\frac{N_{\text{ПСП}}}{2} + N_{\text{ПСП}} \cdot \left(\frac{2m}{n} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

$$N_{\text{cosBOC}(m,n)} = n \cdot \left[\frac{N_{\text{ПСП}}}{2} + N_{\text{ПСП}} \cdot \left(\frac{2m}{n} \right) \right]. \quad (10)$$

Для корректности сравнения будем считать НПСП одинаковым для всех сигналов. В таблице приведены параметры существующих и предлагаемых навигационных сигналов.

Т а б л и ц а. Параметры навигационных сигналов

Модуляция	$D_{C/A/D}$ (округлено до целого)	Излучение в РАД, дБВт/(м ² · 20 кГц)
Существующие сигналы		
BPSK(0,5) L1OF	0,25	–177
BPSK(1) L1OCd	1	–182
BOC(1,1) L1OCp	9	–177
Предлагаемые сигналы		
sinBOC(10,2,5)	1406	–170
cosBOC(10,2,5)	1806	–176
sinBOC(12,5,2,5)	2256	–176
cosBOC(12,5,2,5)	2756	–196
sinBOC(15,2,5)	3306	–177
cosBOC(15,2,5)	3906	–192
sinBOC(10,1)	1521	–178
cosBOC(10,1)	1681	–196

При практическом применении для выполнения требований по внеполосным излучениям боковые лепестки спектра сигналов придется обрезать

фильтрами, поэтому реальные значения потенциальной точности предлагаемых сигналов будут отличаться от оценочных. Тем не менее можно заключить, что применение предлагаемых сигналов с ВОС модуляцией позволит обеспечить высокую потенциальную точность и хорошую совместимость с другими ГНСС. Из предлагаемых сигналов наиболее перспективным является $\cos\text{ВОС}(15, 2.5)$. Он обладает наибольшей потенциальной точностью (отношение $D_{C/A}/D = 3906$) и при этом уровень его излучения в РАД составляет -192 дБВт/($\text{м}^2 \cdot 20$ кГц), чем лишь незначительно уступает сигналам $\cos\text{ВОС}(12.5, 2.5)$ и $\cos\text{ВОС}(10, 1)$, у которых данная величина составляет -196 дБВт/($\text{м}^2 \cdot 20$ кГц).

Список литературы

1. *Simsky A., Mertens D., Sleewaegen J.-M., Hollreiser M., Crisci M.* Experimental Results for the Multipath Performance of Galileo Signals Transmitted by GIOVE-A Satellite // International Journal of Navigation and Observation, vol. 2008, Article ID 416380. 13 p.
2. Международный частотный циркуляр ИФИС № 2417 от 18.04.2000 г.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2011 г. № 1049-34 «Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации».
4. *Betz J. W.* The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization // Proceeding of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION — NTM99), January 1999. P. 639.
5. *Ярлыков М. С.* Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) в новых спутниковых радионавигационных системах // Радиотехника, 2007, № 8. С. 3.
6. *Ярлыков М. С.* Характеристики меандровых сигналов (ВОС-сигналов) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения // Радиотехника, 2008, № 8. С. 61.
7. Understanding GPS, Elliott Kaplan, 2nd ed., ARTECH HOUSE, 2006.
8. *Вейцель А. В.* Новый класс меандровых шумоподобных радиосигналов для радионавигационных систем // Вестник МАИ, 2009, т. 16, № 7.
9. *Ткачев А. Б.* Расширение полосы навигационных сигналов ГЛОНАСС с помощью меандровой поднесущей модуляции // Успехи современной науки, 2016, № 12. С. 47–51.
10. *Ефименко В. С., Харисов В. Н.* Потенциальная точность оценки задержки ФКМ-сигналов // Радиотехника, 2011, № 1. С. 30.