

УДК 621.391.15

## **Перспективные способы модуляции в широкополосных радионавигационных системах**

**В.Н. Бондаренко<sup>а</sup>,**

**А.Г. Клевлин<sup>а\*</sup>, Р.Г. Галеев<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Сибирский федеральный университет,  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

<sup>б</sup> *ФГУП «НПП «Радиосвязь»  
Россия 660021, Красноярск, ул. Декабристов, 19<sup>1</sup>*

Received 4.02.2011, received in revised form 11.02.2011, accepted 18.02.2011

*Статья посвящена сравнительному анализу перспективных способов модуляции в широкополосных радионавигационных системах. Сравнение способов модуляции проводилось с использованием обобщенного критерия спектральной эффективности. Представлены результаты анализа спектральной эффективности шумоподобных сигналов с фазовой и частотной модуляцией. Рассмотрены варианты перспективных шумоподобных сигналов, обеспечивающих значительные преимущества по точности измерения задержки по сравнению с традиционными сигналами с фазовой и частотной манипуляцией. Даны рекомендации по применению сигналов для глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и наземных широкополосных систем.*

*Ключевые слова: широкополосная система, шумоподобный сигнал, ВОС-модуляция, задержка дальномерного кода, спектральный ресурс, эффективная ширина спектра, автокорреляционная функция.*

### **Введение**

Проводимая в настоящее время модернизация глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS, а также создание и развёртывание ГНСС Galileo базируются на использовании новых навигационных сигналов, в частности сигналов с модуляцией ВОС (binary offset carrier modulated signals) и различных её версий (AltВос, DuoВос, MixВос) [1, 2]. Данные способы широкополосной модуляции предполагается применять в модернизированной системе GPS при формировании сигналов М-кода (Military code) и L1С-сигналов для гражданских пользователей, а также L1ОS-сигналов ГНСС Galileo при оказании услуги «открытого сервиса» и сигнала L1SC с санкционированным доступом модернизированной системы ГЛОНАСС [3, 4]. Новые виды шумоподобных сигналов (ШПС) предполагается использовать и в наземных широкополосных радионавигационных системах (РНС), например в РНС «Спрут» [5].

\* Corresponding author E-mail address: AKlevlin@sfu-kras.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

Высокие тактические показатели ГНСС и наземных широкополосных (*spread spectrum*) систем средневолнового и длинноволнового диапазонов в первую очередь определяются широким спектром используемых шумоподобных сигналов. Полоса частот, выделенная любой системе, является весьма дорогостоящим и дефицитным ресурсом. Поэтому сопоставление характеристик новых навигационных сигналов необходимо проводить при фиксированном спектральном ресурсе.

В статье рассматриваются перспективные способы модуляции в широкополосных радионавигационных системах с учетом влияния ограничения спектра ШПС на точность слежения за задержкой. Рассмотрены варианты ШПС как с традиционными видами широкополосной кодовой модуляции BPSK (binary phase shift keying) и MSK (minimum shift keying), так и с комбинированными способами модуляции: BPSK-BOC и MSK-QBOC .<sup>1</sup>

### Метод анализа

Сравнительный анализ ШПС в работе проводится на основе обобщенного критерия спектральной эффективности  $\eta = F_3/F_c$ , где  $F_c$  – ширина спектра сигнала, определяемая из условия обеспечения заданной внутрисполосной мощности  $P_c(F_c) = \alpha P_c$ ,  $\alpha = 0,9; 0,99; 0,999$ ;  $P_c$  – мощность сигнала при  $F_c \rightarrow \infty$ ;  $F_3$  – эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра, определяемая как [6]

$$F_3 = \left[ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 G_0(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} G_0(f) df} \right]^{1/2} = \frac{1}{2\pi} [-R_0''(0)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $G_0(f)$  и  $R_0(\tau)$  – энергетический спектр и нормированная автокорреляционная функция (АКФ) элемента комплексной огибающей сигнала;  $R_0''(0)$  – значение второй производной АКФ при  $\tau \rightarrow 0$ . Формула (1) записана в предположении, что  $F_c \rightarrow \infty$ .

Потенциальная точность измерения времени  $\tau$  запаздывания сигнала характеризуется известной формулой для дисперсии ошибки [6]

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{(2\pi F_3)^2 q^2}, \quad q \gg 1, \quad (2)$$

где  $q^2 = 2E/N_0 = (A^2/N_0)T_n$  – отношение сигнал/шум при оптимальной обработке с помощью коррелятора или согласованного фильтра;  $E = A^2 T_n$  – энергия сигнала на интервале измерения  $T_n^2$ ;  $N_0/2$  – спектральная плотность мощности белого шума.

При заданной полосе  $F_c$  и внутрисполосной мощности  $P_c(F_c)$  показатель  $\eta$  характеризует реальную точность измерения задержки с учетом ограничения спектра сигнала.

В табл. 1 приведены энергетические спектры, а также нормированные автокорреляционные функции элемента комплексной огибающей некоторых из рассмотренных ШПС в предположении, что амплитуда  $A = 1$  В (ради упрощения для длительности элемента ШПС используется обозначение  $T$ , общее для всех сигналов).

Таблица 1. Энергетические спектры и автокорреляционные функции перспективных ШПС

Вид модуляции	Энергетический спектр, $G_0(f)$	Автокорреляционная функция, $R_0(\tau)$
BPSK	$\frac{1}{f_\tau} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_\tau}\right)}{\frac{\pi f}{f_\tau}} \right]^2$	$1 - \frac{ \tau }{T}, \quad  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T.$
BPSK-BOC(1)	$\frac{1}{f_\tau} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_\tau}\right)}{\frac{\pi f}{f_\tau}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f}{2f_\tau}\right) \right]^2$	$1 - 3\frac{ \tau }{T}, \quad  \tau  \leq \frac{T}{2},$ $\frac{ \tau }{T} - 1, \quad \frac{T}{2} <  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T,$
BPSK-BOC(1,5)	$\frac{1}{f_\tau} \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi f}{f_\tau}\right)}{\frac{\pi f}{f_\tau}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f}{3f_\tau}\right) \right]^2$	$1 - 5\frac{ \tau }{T}, \quad  \tau  \leq \frac{T}{3},$ $\frac{3 \tau }{T} - \frac{5}{3}, \quad \frac{T}{3} <  \tau  \leq \frac{2T}{3},$ $1 - \frac{ \tau }{T}, \quad \frac{2T}{3} <  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T,$
MSK	$\frac{1}{f_\tau} \left[ \frac{4 \cos\left(\frac{2\pi f}{f_\tau}\right)}{\pi \left(1 - 16\left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2\right)} \right]^2$	$\left(1 - \frac{ \tau }{T}\right) \cos\left(\frac{\pi}{T} \tau\right) + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{T}  \tau \right),  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T.$
MSK-BOC (1)	$\frac{2}{\pi^2 f_\tau} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_\tau}\right)}{1 - \left(\frac{f}{f_\tau}\right)^2} \right]^2$	$\left(1 - \frac{ \tau }{T}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau\right) + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T}  \tau \right),  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T.$
MSK-BOC (1,5)	$\frac{8}{9\pi^2 f_\tau} \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi f}{f_\tau}\right)}{1 - \left(\frac{2}{3} \frac{f}{f_\tau}\right)^2} \right]^2$	$\left(1 - \frac{ \tau }{T}\right) \cos\left(\frac{3\pi}{T} \tau\right) + \frac{1}{3\pi} \sin\left(\frac{3\pi}{T}  \tau \right),  \tau  \leq T,$ $0, \quad  \tau  > T.$

### Энергетические спектры и автокорреляционные функции ШПС

Графики нормированных энергетических спектров  $G_0(f)/G_0(0)$  приведены на рис. 1: для сигналов BPSK-BOC(1), BPSK-BOC(1,5) – рис. 1а; для сигналов MSK-QBOC (1), MSK-QBOC (1,5) – рис. 1б.<sup>3</sup>

Как видно из рисунка, при дополнительной BOC-модуляции сигнал MSK сохраняет свои преимущества по спектральной эффективности по сравнению с сигналом BPSK: скорость убывания боковых лепестков пропорциональна  $1/f^2$  и  $1/f$  соответственно.

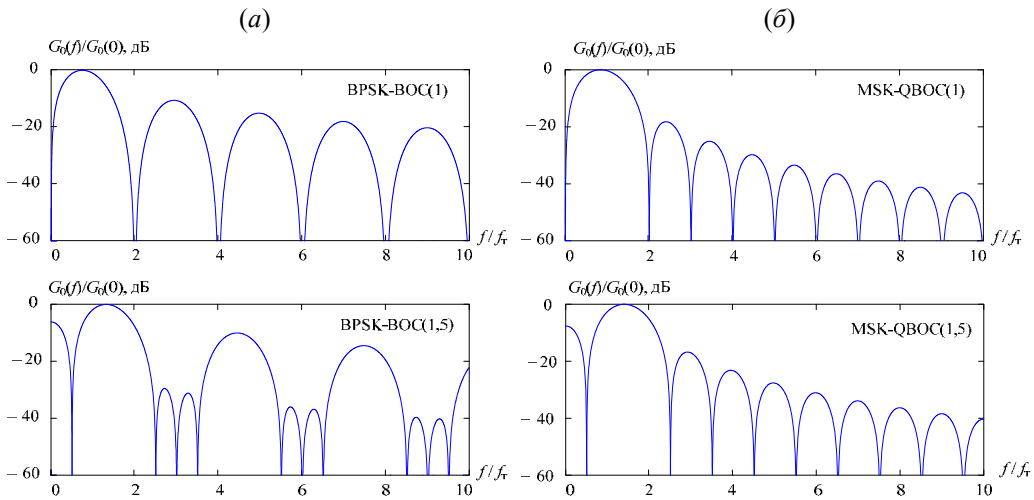


Рис. 1. Нормированные энергетические спектры ШПС

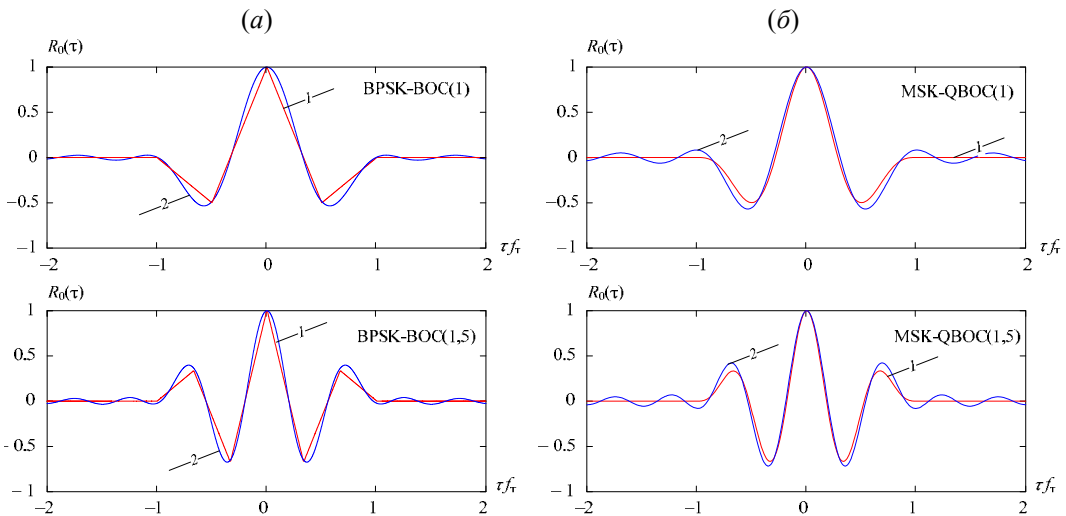


Рис. 2. Нормированные автокорреляционные функции ШПС

Графики АКФ рассмотренных сигналов приведены на рис. 2: BPSK-BOC(1), BPSK-BOC(1,5) – рис. 2а; MSK-QBOC(1), MSK-QBOC(1,5) – рис. 2б. Кривые 1 на рис. 2 соответствуют гипотетическому случаю без ограничения спектра ШПС (рассчитаны по формулам для АКФ, приведенным в табл. 1), а кривые 2 – случаю ограничения спектра сигнала полосой, в которой сосредоточено 90 % мощности ШПС.

### Результаты анализа

Из рассмотренных сигналов с дополнительной ВОС-модуляцией наивысшую потенциальную точность измерения задержки при ограничении полосы по критерию 99,9 % мощности  $P_c$  обеспечивает сигнал BPSK-BOC(1,5) с эффективной шириной спектра  $F_3 \approx 15,4f_r$  (табл. 2). При

Таблица 2. Сводная таблица результатов исследования

Вид модуляции	Внутриполосная мощность $P_c(F_c)/P_c$	Ширина спектра $F_c/f_T$	Эффективная ширина спектра $F_{\Sigma}/f_T$	Обобщенный показатель эффективности $F_{\Sigma}/F_c$
BPSK	0,9	1,697	0,332	0,196
	0,99	20,571	1,018	0,049
	0,999	196,481	3,229	0,016
QBPSC (OQBPSK)	0,9	0,849	0,166	0,196
	0,99	10,286	0,509	0,049
	0,999	98,24	1,62	0,016
MSK	0,9	0,777	0,19	0,245
	0,99	1,182	0,228	0,193
	0,999	2,735	0,24	0,088
GMSK (BT=0,25)	0,9	0,57	0,139	0,242
	0,99	0,86	0,168	0,192
	0,999	1,09	0,174	0,159
SinMSK	0,9	0,871	0,213	0,244
	0,99	1,414	0,257	0,182
	0,999	2,566	0,274	0,107
BPSK-BOC(1)	0,9	6,096	0,975	0,16
	0,99	61,501	3,04	0,049
	0,999	613,499	9,618	0,016
BPSK-BOC(1,5)	0,9	9,411	1,623	0,172
	0,99	99,781	5,066	0,051
	0,999	933,997	15,382	0,016
MSK-QBOC(1)	0,9	2,713	0,823	0,303
	0,99	4,394	0,94	0,214
	0,999	8,623	0,974	0,113
MSK-QBOC(1,5)	0,9	3,785	1,287	0,34
	0,99	5,84	1,431	0,245
	0,999	10,736	1,471	0,137
SinMSK-QBOC(1)	0,9	2,858	0,904	0,316
	0,99	5,696	1,022	0,179
	0,999	10,402	1,096	0,105
SinMSK-QBOC(1,5)	0,9	3,912	1,389	0,355
	0,99	8,668	1,53	0,176
	0,999	15,531	1,644	0,106

энергопотенциале  $A^2/N_0 = 30$  дБГц и времени интегрирования  $T_{\text{и}} = 10$  мс среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибки  $\sigma_{\tau} \approx 3 \cdot 10^{-3} T$ . Для сигнала с модуляцией MSK-QBOC(1,5) эффективная ширина спектра  $F_3 \approx 1,5f_{\text{т}}$  и при тех же условиях СКО ошибки на порядок выше при равных тактовых частотах.

Представленные в табл. 2 результаты расчетов с использованием формул (1), (2) свидетельствуют о том, что реальная точность измерения задержки сигналов BPSK-BOC может быть существенно ниже потенциальной. Так, при ограничении спектра указанных ШПС полосой по критерию 90 % мощности  $P_c$  форма АКФ элемента в окрестности точки  $\tau = 0$  заметно отличается от треугольной (кривые 2 на рис. 2а). Эффективная ширина спектра сигнала BPSK-BOC(1,5) в этом случае  $F_3 \approx 1,6f_{\text{т}}$ , т.е. почти в 10 раз меньше значения соответствующего ограничению полосы по критерию 99,9 % мощности  $P_c$ .

При заданном энергопотенциале увеличение СКО ошибки в 10 раз может быть скомпенсировано за счет увеличения времени интегрирования в 100 раз. Таким образом, ограничение спектра сигнала BPSK-BOC(1,5) полосой  $F_c \approx 9,4f_{\text{т}}$  (по критерию 90 % мощности  $P_c$ ) приводит к энергетическим потерям в 20 дБ по сравнению со случаем без ограничения ширины спектра.

Сравнение сигналов BPSK-BOC(1) и BPSK-BOC(1,5) свидетельствует о том, что в условиях равных ограничений на энергетический и спектральный ресурсы (по критерию 90 % мощности  $P_c$ ) точность измерения задержки практически одинакова (сигнал BPSK-BOC(1,5) обеспечивает энергетический выигрыш около 0,6 дБ).

Как видно из табл. 2, эффективная ширина спектра сигналов MSK-QBOC (1) и MSK-QBOC (1,5) при ограничении спектра по критерию 90 % мощности  $P_c$ , составляет  $0,82f_{\text{т}}$  и  $1,29f_{\text{т}}$  соответственно. При указанных ограничениях точность измерения задержки в случае сигналов MSK-QBOC (1) и MSK-QBOC (1,5) существенно выше, чем для сигналов BPSK-BOC(1) и BPSK-BOC(1,5): энергетический выигрыш около 5,5 и 6 дБ соответственно. В этих условиях наивысшую точность среди рассмотренных ШПС обеспечивает сигнал SinMSK-QBOC(1,5)<sup>4</sup>: СКО ошибки  $\sigma_{\tau} \approx 3 \cdot 10^{-2} T$  при отношении сигнал/шум  $q^2=10$  дБ. Сигнал MSK-QBOC(1,5) незначительно проигрывает ему (менее 1 дБ), имея преимущества в реализации алгоритмов формирования и обработки ШПС.

Заметим, что известный спектрально эффективный способ модуляции GMSK (гауссовская MSK), широко используемый в телекоммуникационных системах, уступает модуляции MSK-QBOC по показателю  $\eta$  (около 1 дБ): при равных условиях (ограничение полосы по критерию 0,9 $P_c$ ) СКО ошибки измерения задержки больше в 1,1 раза.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что рассмотренные сигналы с дополнительной ВОС-модуляцией обеспечивают значительные преимущества в точности измерения задержки по сравнению с ШПС с традиционным способом модуляции BPSK. В то же время выбор вида модуляции и параметров новых сигналов требует всестороннего анализа различных альтернативных вариантов с учетом как возможностей улучшения точностных и других характеристик широкополосных систем, так и технических ограничений, связанных с реализацией аппаратуры формирования, приема и обработки новых сигналов. В частности, весьма привлекательным видом модуляции для применения в условиях ограниченного спектрального ресурса является спектрально-эффективная модуляция MSK в сочетании с ВОС-модуляцией [7, 8].

## Выводы

- Способы широкополосной модуляции BPSK-BOC и MSK-QBOC обеспечивают значительные преимущества в точности измерения задержки по сравнению с традиционным видом модуляции BPSK (выигрыш по обобщенному критерию спектральной эффективности до 10 раз).
- Без применения дополнительных мер сигналы с BOC-модуляцией с большой кратностью частот  $f_m/f_c$  вследствие многопиковой формы АКФ не обеспечивают однозначного измерения задержки и высокой разрешающей способности.
- Способ модуляции SinMSK-QBOC(1.5) обеспечивает максимальную спектральную эффективность среди рассмотренных способов по обобщенному показателю  $\eta$  ( $\eta=0,355$  при мощности  $P_c(F_c)=0,9 P_c$ ).
- Шумоподобные сигналы BPSK-BOC, MSK-QBOC и SinMSK-QBOC можно рекомендовать для применения в модернизированной ГНСС ГЛОНАСС. Для наземных широкополосных систем средневолнового и длинноволнового диапазонов помимо указанных сигналов с BOC-модуляцией перспективными также являются спектрально эффективные способы модуляции GMSK и SinMSK.

*Работа публикуется при Поддержке программы развития Сибирского федерального университета. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) грант № 08-08-00849-а.*

<sup>1</sup> Сигнал MSK-QBOC отличается от ШПС со стандартной модуляцией MSK формой элементов квадратурных видеосигналов (имеют вид отрезка гармонического колебания из целого числа  $n>1$  *полувольт косинуса*).

<sup>2</sup> Далее под сигналом понимают комплексную огибающую ШПС.

<sup>3</sup> Цифры в скобках определяют кратность частоты  $f_m$  меандровой последовательности и тактовой частоты  $f_c$ :  $n = 2f_m/f_c$  ( $n$  – число прямоугольных чипов и *полувольт косинуса* в элементах сигналов BPSK-BOC и MSK-QBOC соответственно).

<sup>4</sup> Синусоидальная MSK-QBOC.

## Список литературы

1. Ярлыков М. С. Характеристики меандровых сигналов (BOC-сигналов) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения // Радиотехника. – 2008. № 8.
2. Betz J.W. Binary Offset Carrier Modulations for Radionavigation. – Navigation, Journal of ION, Vol. 48, № 4, Winter 2001 – 2002.
3. Hein G.W., Avila-Rodríguez J.A., Wallner S. et al. MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for Galileo L1OS and GPS L1C. – Proceeding of the Position Location and Navigation Symposium of the Institute of Navigation, April 2006.
4. Progni I. F., Bromberg M. C., Michalson W. R., Wang J. A Theoretical Survey of the Spreading Modulation of the New GPS Signals (L1C, L2C, and L5). – Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION – NTM'2007), January 2007.
5. Бондаренко В.Н. Основные направления разработки радионавигационной аппаратуры в Красноярском государственном техническом университете / В.Н. Бондаренко, А.М. Алёшечкин, В.И. Кокорин // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2007. – № 5. – С. 54–62.
6. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007.

7. Avila–Rodriguez J.A., Won J.H., Wallner S. et al. Architecture for a Future C-band/L-band GNSS Mission. Part 2: Signal Considerations and Related User Terminal Aspects. Inside GNSS, Jul/Aug 2009, pp. 52-63i.

8. Бондаренко В.Н. Сравнительный анализ способов передачи данных в широкополосных радионавигационных системах с частотно-манипулированными шумоподобными сигналами / В.Н. Бондаренко // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2008. – Vol.1. – P. 92–100.

## **Perspective Ways of Modulation in Broadband Radio Navigating Systems**

**Valery N. Bondarenko<sup>a</sup>,  
Alexander G. Klevlin<sup>a</sup> and Rinat G. Galeev<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Siberian Federal University,

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

<sup>b</sup> Research-and-Production Enterprise “Radiocommunication”,  
19 Dekabristov st., Krasnoyarsk, 660021 Russia

---

*Article is devoted the comparative analysis of perspective ways of modulation in broadband radio navigating systems. Comparison of ways of modulation was spent with use of the generalised criterion of spectral efficiency. Results of the analysis of spectral efficiency spread spectrum signals with phase and a frequency modulation are presented. Variants perspective spread spectrum signals providing considerable advantages on a measurement accuracy of a delay in comparison with traditional signals with phase and a frequency shift keying are considered. Recommendations about application of signals for global navigating satellite system GLONASS and terrestrial broadband systems are given.*

*Keywords: Broadband system, spread spectrum signal, BOC modulation, ranging code delay, spectrum resource, effective spectrum bandwidth, autocorrelation function.*

---