

УДК 621.396.933

Multiple Access Interferences in Wideband Radionavigation Systems with Spectrum-Effective Pseudonoise Signals

Valery N. Bondarenko^a, Vadim F. Garifullin^a,
Timur V. Krasnov^{a*} and Rinat G. Galeev^b

^a Siberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^bJSC “NPP “Radiosvyaz”

19 Dekabristov Str., Krasnoyarsk, 660021, Russia

Received 21.11.2014, received in revised form 26.12.2014, accepted 18.01.2015

Additional information modulation influence on adjacent-channel interference level is considered in case of medium-wave wideband navigation system with MSK-signals. The lowest correlation sidelobe level is being achieved when signals are generated with cyclic shifts of its general MLS. The frequency channel leads to higher sidelobe levels, code structure doesn't significantly affect.

Keywords: minimum shift keying, navigation system interference immunity, correlation receiver.

Помехи множественного доступа в широкополосных системах радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами

В.Н. Бондаренко^a, В.Ф. Гарифуллин^a,
Т.В. Краснов^a, Р.Г. Галеев^b

^aСибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

^bАО «НПП «Радиосвязь»

Россия, 660021, Красноярск, ул. Декабристов, 19

В работе изучено влияние дополнительной модуляции навигационных сигналов данными на уровень помех множественного доступа в широкополосных радионавигационных системах с MSK-сигналами при кодовом разделении каналов системы. Наименьший уровень боковых

лепестков ПВКФ сигналов опорных станций достигается при использовании циклических сдвигов M -последовательности, общей для всех каналов. При частотном разнесении каналов системы средневолнового диапазона в допустимых пределах уровень боковых лепестков возрастает намного больше и структура кода не оказывает заметного влияния.

Ключевые слова: минимальная частотная манипуляция, помехоустойчивость радионавигационных систем, корреляционный прием.

Введение

В современных широкополосных радионавигационных системах (РНС) для формирования шумоподобных сигналов (ШПС) используется преимущественно фазовая манипуляция несущего колебания двоичной кодовой последовательностью (ФМ, или *BPSK* в англоязычной аббревиатуре). Примером являются спутниковые радионавигационные системы ГЛОНАСС, *GPS*, *GALILEO*, а также наземные РНС *SILEDIS*, *SPOT* и др. [1]. Широкое использование ФМ как способа формирования ШПС объясняется в первую очередь стремлением максимально упростить формирование и обработку сигналов.

Однако с точки зрения спектральной эффективности более перспективна минимальная частотная модуляция (МЧМ), или *MSK* (*minimum shift keying*).

Корреляционные свойства шумоподобных *MSK*-сигналов в отсутствие модуляции данными

В широкополосных системах с кодовым разделением сигналов, занимающих общую полосу частот, помехи *множественного доступа* (ПМД), называемые также *структурными* (*сигналоподобными*), образуются в результате неидеальной ортогональности сигналов. В широкополосных системах с частотным разделением сигналов ПМД обусловлены частичным перекрытием спектров сигналов.

Для надёжного выделения сигналов на фоне совокупных помех множественного доступа необходимо, чтобы модуль нормированной *двумерной взаимной корреляционной функции* (ДВКФ)

$$R_{kl}(\tau, F) = \left| \frac{1}{2E} \int_0^{T_n} \dot{S}_k(t) \dot{S}_l(t - \tau) \exp(-j2\pi Ft) dt \right|, \quad k, l = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

имел малый уровень при любых взаимных сдвигах по запаздыванию и частоте и любых $k \neq l$, M – объем ансамбля псевдослучайных последовательностей (ПСП); $\dot{S}_k(t)$ и $\dot{S}_l(t - \tau)$ – комплексные огибающие k -го и l -го сигналов, τ и F – временной и частотный сдвиги сигналов.

Для ослабления влияния помех из-за многолучёвости и снижения риска ложной кодовой синхронизации при поиске требование малого уровня ДВКФ необходимо дополнить требованием малого уровня боковых лепестков *двумерной автокорреляционной функции* (ДАКФ) каждого из сигналов, определяемой формулой (1) при $\dot{S}_k(t) = \dot{S}_l(t) = \dot{S}(t)$. При этом совокупное требование к корреляционным свойствам ансамбля кодовых последовательностей выражается минимаксным критерием качества [3]

$$R_{\max} = \max_{\tau, F} R_{kl}(\tau, F), \quad (2)$$

Таблица 1

Вид модуляции	ДАКФ				ДВКФ			
	R_{\max} , dB		R_3 , dB		R_{\max} , dB		R_3 , dB	
	0	± 5 kHz	0	± 5 kHz	0	± 5 kHz	0	± 5 kHz
<i>MSK</i> (1)	-27.1	-27.2	-31.9	-31.9	-27.3	-27.2	-30.2	-30.1
<i>MSK-BOC</i> (1,1)	-26.5	-26.5	-38.4	-38.4	-27.2	-27.3	-35.2	-35.3
<i>MSK-BOC</i> (5,2.5)	-27.2	-26.5	-42.6	-42.6	-27.5	-27.5	-39.5	-39.6

в соответствии с которым максимум определяется по всем $\tau \in [0, T_n]$, если $k \neq l$, и $|\tau| > T$, если $k = l$ и $|F| < F_{\max}$ (F_{\max} – максимальное абсолютное значение доплеровского частотного сдвига). Кодовые последовательности, имеющие минимальное значение показателя R_{\max} для ДВКФ, являются оптимальными. Среди двоичных кодов такими свойствами обладают последовательности *Касами* и ряд других кодов, для которых $R_{\max} \approx 1/\sqrt{N}$ [2].

Уровень ПМД, характеризуемый максимальным R_{\max} и эффективным R_3 значениями ДВКФ ансамбля сигналов, определяется, прежде всего, длиной N псевдослучайных модулирующих последовательностей, используемых при формировании ШПС. Структура кода при $N \gg 1$ слабо влияет на указанные показатели уровня ПМД (особенно в доплеровской полосе частотных сдвигов). Ещё в меньшей степени на уровень ПМД влияет вид модуляции ШПС (форма чипа).

В табл. 1 приведены результаты расчёта с использованием формул (1), (2) для сигналов *MSK* (1), *MSK-BOC* (1, 1) и *MSK-BOC* (5, 2.5) с опорной частотой $f_{\text{оп}} = 1.023$ МГц. В качестве псевдослучайных последовательностей при расчётах ДАКФ и ДВКФ использовали коды *Голда* длины $N = 1023$. Следуя общепринятым обозначениям, для комбинированного способа модуляции, основанного на применении дополнительной *BOC* модуляции (*binary offset carrier*) в сочетании с традиционным видом широкополосной кодовой модуляции *MSK*, применена аббревиатура *MSK-BOC*(m, n), где m и n – целые числа, определяющие кратность частоты меандровой последовательности и тактовой частоты дальномерного кода некоторой опорной частоте: $m = f_m/f_{\text{оп}}$, $n = f_n/f_{\text{оп}}$.

Как видно из табл. 1, уровень ПМД указанных сигналов примерно одинаков и составляет около -27 dB и -39 dB по значениям R_{\max} и R_3 в доплеровской полосе ± 5 kHz.

В широкополосных РНС средневолнового диапазона максимальное абсолютное значение доплеровского частотного сдвига $F_{\max} = 0.2$ Hz [1]. В связи с этим уровень ПМД достаточно характеризовать максимальным R_{\max} и эффективным R_3 значениями ПАКФ и ПВКФ ансамбля сигналов (формулы (1), (2) при $k=l$).

Корреляционные свойства шумоподобных *MSK*-сигналов при модуляции данными

Корреляционные свойства ШПС (вид ПАКФ и ПВКФ ансамбля сигналов) во многом определяют основные показатели качества широкополосной РНС (точность, разрешающую способность, помехозащищённость и пр.). При выбранном способе широкополосной моду-

ляции (*MSK*) форма основного лепестка ПАКФ устанавливается исключительно тактовой частотой f_T , а уровень боковых лепестков модуля нормированной ПАКФ в отсутствие дополнительной цифровой модуляции равен $1/N$ (при использовании M -последовательностей и других оптимальных кодов).

Оценим влияние модуляции данными на корреляционные свойства *MSK*-сигналов, используя нормированную взаимную корреляционную функцию (1).

На рис. 1 представлены графики модуля нормированной ПАКФ кодовых последовательностей (M -последовательности длины $N = 16383$) для случая $D_2 = D_1$ (рис. 1а) и $D_2 = -D_1$ (рис. 1б), рассчитанные по формулам [3]

$$R(mT) = R_a(m), \quad R_a(m) = D_1 R_{a1}(m) + D_2 R_{a2}(m),$$

$$R_{a1}(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1-m} a_k a_{k+m}, \quad R_{a2}(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=N-m}^{N-1} a_k a_{k+m}. \quad (3)$$

Как видно на рис. 1, при модуляции данными значение максимального бокового лепестка ПАКФ $R_{\max} \approx 3 / \sqrt{N} \approx 0.024$ (-32.2 dB). При этом эффективное значение $R_e \approx -42.1$ dB однопроцентный квантиль распределения (порог, вероятность превышения которого выбросом ВКФ равна 0.01) $R_{0.01} \approx -35.6$ dB (рис. 3а).

На рис. 2 представлены графики модуля нормированной ПВКФ M -последовательностей структуры [3] и [1] длины $N = 16383$ для случая $D_2 = D_1$ (рис. 2а) и $D_2 = -D_1$ (рис. 2б). Как видно из рисунков, уровень ПВКФ практически одинаков как при равных, так и при противоположных символах D_1 и D_2 : максимальное значение ВКФ $R_{\max} \approx -29.8$ dB, эффективное значение $R_e \approx -40.4$ dB, однопроцентный квантиль распределения $R_{0.01} \approx -33.6$ dB (рис. 3б).

В табл. 2 приведены результаты расчёта нормированной ПВКФ шумоподобных *MSK*-сигналов при модуляции данными с использованием формул (1), (2) для кодов длины $N = 16383$: 1) циклические сдвиги общей M -последовательности (рассматривался вариант сдвига на $m = 4096$ элементов); 2) общая M -последовательность с частотными сдвигами, кратными эле-

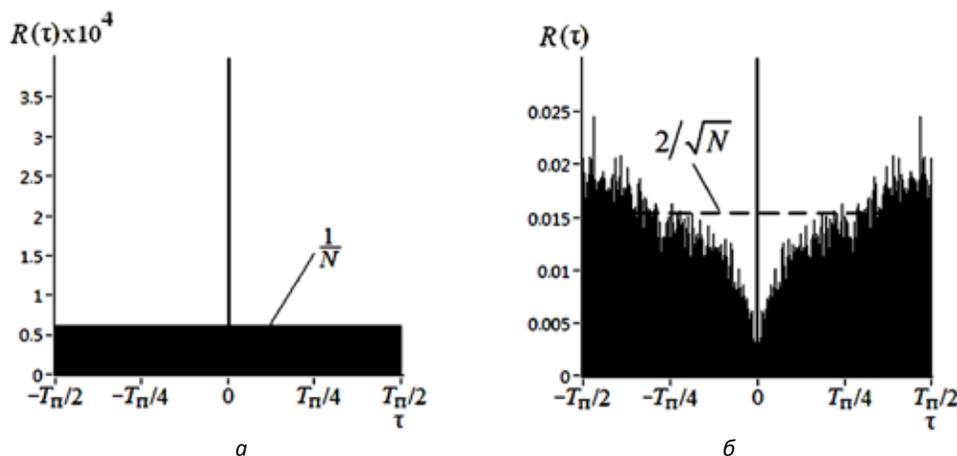


Рис. 1. Модуль ПАКФ: а – при совпадении информационных символов; б – при противоположных символах

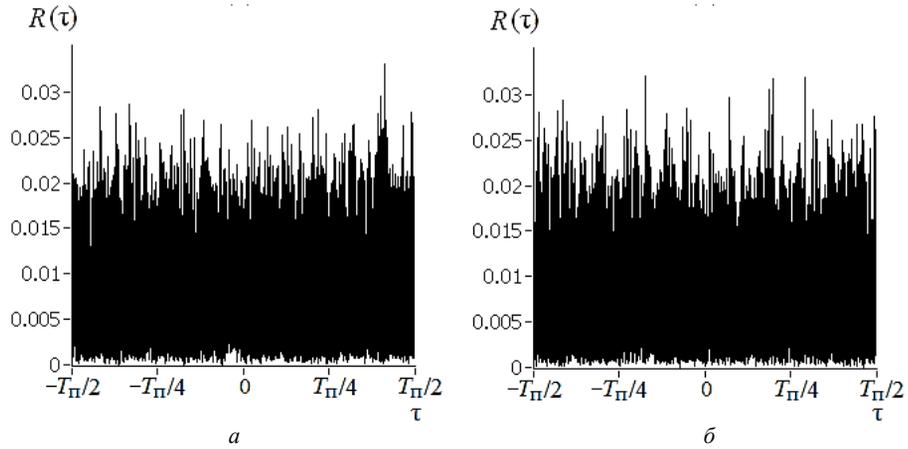


Рис. 2. Модуль ПВКФ: *a* – при совпадении информационных символов; *б* – при противоположных символах

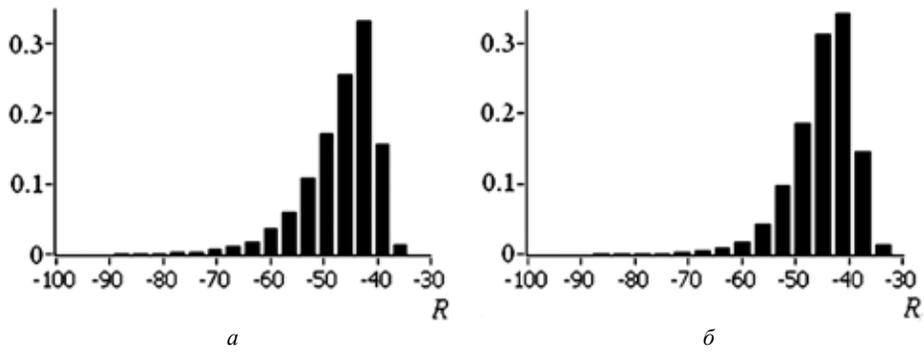


Рис. 3. Гистограммы значений ПВКФ

Таблица 2

Ансамбль кодовых последовательностей	ПВКФ (без модуляции)		ПВКФ (с модуляцией)	
	R_{\max} , dB	R_s , dB	R_{\max} , dB	R_s , dB
Циклические сдвиги M -последовательности	-84,28	-84,28	-34,37	-43,93
M -последовательность с частотными сдвигами	-42,14	-42,14	-34,66	-42,11
M -последовательности	-29,81	-40,43	-29,81	-40,43
Последовательности <i>Касами</i>	-42,07	-42,17	-31,72	-42,23

менту разрешения по частоте (рассматривался вариант сдвига на 40 элементов разрешения по частоте $\Delta F = 1/T_n$); 3) разные M -последовательности; 4) последовательности *Касами*.

Заключение

Как свидетельствуют результаты анализа, негативное влияние модуляции данными на корреляционные свойства шумоподобного *MSK*-сигнала в максимальной степени сказывается для ансамбля из циклических сдвигов общей M -последовательности (в отсутствие модуляции значение -84.3 dB определяет уровень боковых лепестков ПАКФ). Наименьший уровень ПМД обеспечивает ансамбль из циклических сдвигов общей M -последовательности: -34.4 dB и -43.9 dB по значениям R_{\max} и R_3 соответственно. Наибольший уровень ПМД обеспечивает ансамбль из разных M -последовательностей: -29.8 dB и -40.4 dB по значениям R_{\max} и R_3 соответственно. Два других ансамбля (M -последовательности с частотными сдвигами и последовательности *Касами*) практически равноценны по показателю R_3 : около -42 dB. Это объясняется тем, что уровень ПВКФ шумоподобных сигналов определяется главным образом корреляционными свойствами используемых кодов (которые при равной длине N мало отличаются).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в Сибирском федеральном университете (Договор № 02.G25.31.0041)

Список литературы

- [1] *Бондаренко В.Н., Кокорин В.И.* Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами. Новосибирск: Наука, 2011. 260 с.
- [2] *Ипатов В.П.* Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
- [3] *Бондаренко В.Н., Клевлин А.Г.* // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2. С. 10.