

**УРОВЕНЬ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С СОВМЕЩЕННЫМ КАНАЛОМ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

В.Н. Бондаренко

*доктор технических наук, профессор
профессор каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: vbondarenko@sfu-kras.ru*

Т.В. Краснов

*кандидат технических наук
доцент каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: krasnovtv@ya.ru*

В.Ф. Гарифуллин

*ст. преп. каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: vadimgar@mail.ru*

П.В. Штро

*асс. каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: faust_256@mail.ru*

А.С. Дранишников

*студент Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: alexandr15000@mail.ru*

Корреляционные свойства шумоподобных сигналов во многом определяют основные показатели качества широкополосной РНС (точность, разрешающую способность, помехозащищённость и пр.). В работе показано увеличение уровня взаимных помех при дополнительной модуляции навигационных *MSK* и *MSK-BOC* сигналов цифровой информацией при кодовом разделении каналов в широкополосной радионавигационной системе. Как свидетельствуют результаты анализа, негативное влияние модуляции данными на корреляционные свойства шумоподобного *MSK*-сигнала в наименьшей степени сказывается для ансамбля из

циклических сдвигов M -последовательности, общей для всех каналов. Показано, что частичное частотное разделение каналов в допустимых пределах в средневолновом диапазоне менее эффективно. На уровень взаимных помех при этом не влияет структура кода и форма видеочастотных компонент сигнала.

Ключевые слова: *взаимная корреляционная функция, шумоподобный сигнал, кодовое разделение, взаимные помехи, помехоустойчивость*

Correlation properties of noise-like signals commonly determine base parameters of wideband navigation system (accuracy, resolution capability, interference immunity). This paper shows mutual interference level increasing in code division multiple access wideband navigation system. As analysis result shows, the negative impact of additional data modulation on correlation properties of MSK-signals are expressed in the least when using the ensemble of cyclic shift of a maximum length sequence, that is common for all channels. It's also shown, that partial frequency division of channels within acceptable limits in the middle-wave band has lower efficiency. In this case the structure of coding sequence and the form of quadrature videoband components has no influence.

Keywords: *mutual correlation function, noise-like signal, code division, mutual interference, interference immunity*

В широкополосных системах с кодовым разделением сигналов, занимающих общую полосу частот, взаимные помехи (ВП) образуются в результате неидеальной ортогональности сигналов. В широкополосных системах с частотным разделением сигналов ВП обусловлены частичным перекрытием спектров сигналов.

Для надёжного выделения сигналов на фоне совокупных взаимных помех 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 $\dot{S}_k(t) = \dot{S}_l(t) = \dot{S}(t)$ [1]. При этом совокупное требование к корреляционным свойствам ансамбля кодовых последовательностей выражается минимаксным критерием качества [1]

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

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, обладающие минимальным значением 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 ВП, характеризуемый максимальным R_{\max} и эффективным $R_{\text{э}}$ значениями ДВКФ ансамбля сигналов, определяется, прежде всего, длиной N псевдослучайных модулирующих последовательностей, используемых при формировании ШПС [3]. Структура кода при $N \gg 1$ слабо влияет на указанные показатели уровня ВП (особенно в доплеровской полосе частотных сдвигов). Ещё в меньшей степени на уровень ВП 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 использовались 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*, использована аббревиатура *MSK-BOC*(m, n), где m и n – целые числа, определяющие кратность частоты меандровой последовательности и тактовой частоты дальномерного кода некоторой опорной частоте: $m = f_M / f_{\text{оп}}$, $n = f_T / f_{\text{оп}}$ [4].

Как видно из таблицы, уровень ВП указанных сигналов примерно одинаков и составляет около -27 dB и -39 dB по значениям R_{\max} и $R_{\text{э}}$ в доплеровской полосе ± 5 kHz.

Таблица 1

Вид модуляции	ДАКФ				ДВКФ			
	R_{\max} , dB		$R_{\text{э}}$, dB		R_{\max} , dB		$R_{\text{э}}$, 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 широкополосных РНС средневолнового диапазона максимальное абсолютное значение доплеровского частотного сдвига $F_{\max} = 0.2$ Hz [2]. В связи с этим уровень ВП достаточно

характеризовать максимальным R_{\max} и эффективным R_3 значениями ПАКФ и ПВКФ ансамбля сигналов (формулы (1), (2) при $k=l$).

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 модуляции (*MSK*) форма основного лепестка ПАКФ определяется 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 [2]

$$R(mT) = R_a(m), \quad R_a(m) = D_1 R_{a1}(m) + D_2 R_{a2}(m), \quad (3)$$

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

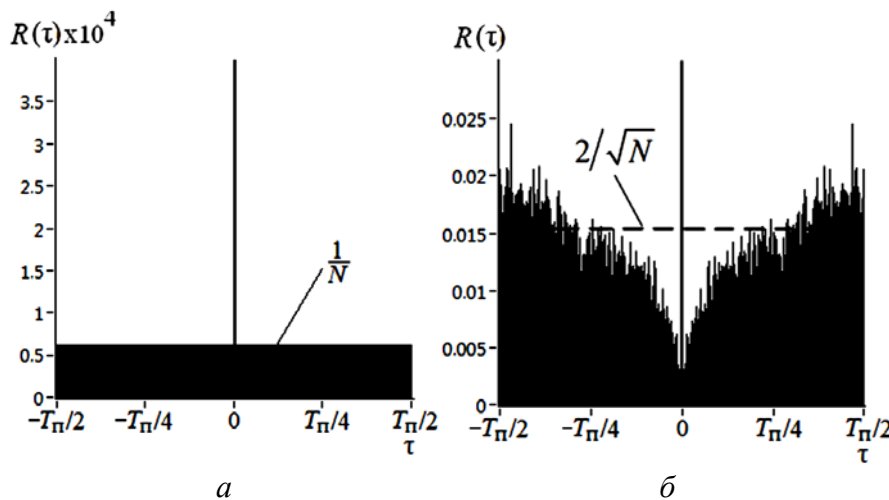


Рис. 1. Модуль ПАКФ: а – при совпадении информационных символов; б – при противоположных символах

Как видно из рисунка, при модуляции данными значение максимального бокового лепестка ПАКФ $R_{\max} \approx 3/\sqrt{N} \approx 0.024$ (-32.2) dB. При этом эффективное значение $R_3 \approx -42.1$ 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 [14, 13, 12, 2] и [14, 10, 6, 1] длины $N = 16383$ для случая $D_2 = D_1$ (рис.2а) и $D_2 = -D_1$ (рис. 2б).

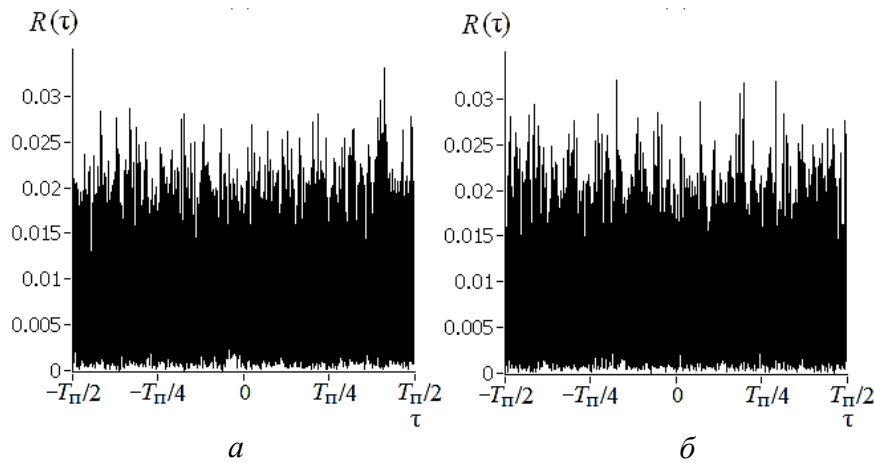


Рис. 2. Модуль ПВКФ: *a* – при совпадении информационных символов; *б* – при противоположных символах

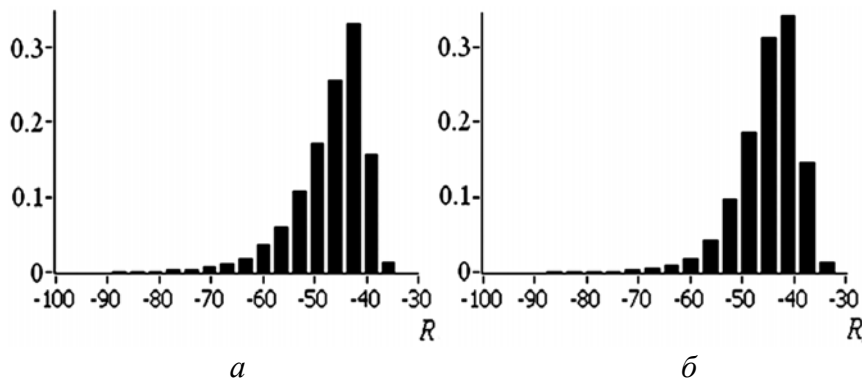


Рис. 3. Гистограммы значений ПВКФ

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

Таблица 2

Ансамбль кодовых последовательностей	ПВКФ (без модуляции)		ПВКФ (с модуляцией)	
	R_{\max} , dB	R_{ε} , dB	R_{\max} , dB	R_{ε} , 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

Как свидетельствуют результаты анализа, негативное влияние модуляции данными на корреляционные свойства шумоподобного *MSK* сигнала в наименьшей степени сказывается

для ансамбля из циклических сдвигов общей M -последовательности (в отсутствие модуляции значение -84.3 dB определяет уровень боковых лепестков ПАКФ). Наименьший уровень ВП 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 ВП 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 поддержке РФФИ (проект № 16-38-00171)

Литература

1. Литинская Е.А. Фар с механоэлектрическим сканированием / Литинская Е.А., Панько В.С., Поленга С.В., Саломатов Ю.П. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 24–27.
2. Бондаренко В.Н. Помехоустойчивость приема спектрально-эффективных шумоподобных сигналов // Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 160 с.
3. Peuyeti T.C. Interference cancellation in wideband receivers using compressed sensing : Master Theses 1896 / Tejaswi C. Peuyeti // University of Massachusetts – Amherst, 2013. – 43 pp.
4. Штро П. В. Анализ эффективности применения сигнала ВОС(1,1) и сигнала ГНСС ГЛОНАСС стандартной точности / П. В. Штро, Т. В. Краснов // Сб. труд. 67-й научн.-техн. конф., посв. Дню Радио – СПбНТОРЭС, 2012.

MUTUAL INTERFERENCE LEVEL IN WIDEBAND NAVIGATION SYSTEMS WITH COMBINED DATA CHANNEL

V.N. Bondarenko

PhD, Prof.

*Professor, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074*

E-mail: vbondarenko@sfu-kras.ru

T.V. Krasnov

PhD

*docent of "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074*

E-mail: krasnovtv@ya.ru

V.F. Garifullin

*Post-graduate student, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074*

E-mail: vadimgar@mail.ru

P.V. Shtro

*Post-graduate student, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074*

E-mail: faust_256@mail.ru

A.S. Dranishnikov

*Student of Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074*

E-mail: alexandr15000@mail.ru

Correlation properties of noise-like signals commonly determine base parameters of wideband navigation system (accuracy, resolution capability, interference immunity). This paper shows mutual interference level increasing in code division multiple access wideband navigation system.

Mutual interferences level, characterized by a maximum and effective values of 2-dimension cross-correlation function of signals ensemble is determined, primarily by length of modulating pseudorandom sequence, used for noise-like signal generation. Code structure within length $N \gg 1$ poorly influences on these level indicators (especially in the strip of Doppler frequency shifts). Even less at the level of VP is affected by the noise-like signal modulation (the form of quadrature videoband components). In the preferred method of broadband modulation (*MSK*) the shape of the main lobe of autocorrelation function is determined exclusively by clock frequency f_1 , and the side-lobe level of the module of the normalized autocorrelation function without additional data modulation equals $1/N$ (when using M-sequences and other optimal codes).

The effect of modulation of data on the correlation properties of the MSK signals is evaluated using normalized mutual correlation function. The results of calculation of normalized cross-correlation function of noise-like MSK signals with modulation data for codes of length $N = 16383$: 1) cyclic shifts of common maximum length sequence (consider a shift to $m = 4096$ elements); 2) common maximum length sequence with frequency shifts, a multiple of the element resolution frequency (consider a shift on 40 elements resolution frequency $\Delta F = 1/T_n$); 3) different maximum length sequences; 4) Kasami sequences.

As analysis result shows, the negative impact of additional data modulation on correlation properties of MSK-signals are expressed in the least when using the ensemble of cyclic shift of a maximum length sequence, that is common for all channels. It's also shown, that partial frequency division of channels within acceptable limits in the middle-wave band has lower efficiency. In this case the structure of coding sequence and the form of quadrature videoband components has no influence. Two other ensembles (common maximum length sequence with frequency shifts and Kasami sequences) almost equivalent to the figure R_s : about -42 dB. This is because the level of cross-correlation function of noise signals is determined primarily by the correlation properties of the codes used (which is equal to the length N differ little).

References

1. Litinskaya Ye.A. Phased array antenna with mechanical and electronic beam steering nication / Litinskaya Ye.A., Panko V.S., Polenga S.V., Salomatov Yu.P. // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. – 2015. – № 1. – pp. 24–27.
2. Bondarenko V.N. The noise immunity of the reception of spectral-efficient noise-like signals // Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015. – 160 pp.
3. Peyyeti T.C. Interference cancellation in wideband receivers using compressed sensing : Master Theses 1896 / Tejaswi C. Peyyeti // University of Massachusetts – Amherst, 2013. – 43 pp.
4. Shtro P. V. Analysis of efficiency of application of a signal of BOC(1,1) signal and GLONASS standardized precision / P. V. Shtro, T. V. Krasnov// SB. work. 67th scientific.-tech. Conf. dedicated. Radio Day – SPbNTORES, 2012.