

УДК 621.396

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
С МНОГОПОЗИЦИОННЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ
СИГНАЛОМ**

А.И. Семенко, Н.И. Бокла, Е.А. Домрачева

Государственный университет телекоммуникаций

В статье рассмотрена телекоммуникационная система с многопозиционным фазоманипулированным сигналом. Приведена типовая схема телекоммуникационной системы, в радиоканал которой поступает широкополосная заградительная помеха. Отмечается, что при воздействии широкополосной помехи, ширина спектра которой превышает практическую ширину полосы сигнала и соответственно полосы пропускания радиоканала, в системах с многопозиционным сигналом уменьшается полоса пропускания радиоканала и соответственно улучшается отношение сигнал / шум по сравнению с двухпозиционной системой. Произведена оценка улучшения помехозащищенности системы при воздействии широкополосной помехи с увеличением количества позиций сигнала за счет улучшения фильтрации помехи вследствие сужения полосы пропускания радиоканала при увеличении количества позиций сигнала. Получена формула для определения коэффициента изменения помехозащищенности в многопозиционной системе с учетом потерь из-за использования многопозиционного сигнала, а также улучшения фильтрации помехи вследствие сужения полосы пропускания радиоканала при увеличении количества позиций сигнала. Показано, что улучшение общей помехозащищенности системы имеет место только при PSK-4 и PSK-8, когда выигрыш от улучшения фильтрации сигнала за счет сужения полосы пропускания радиоканала превышает величину естественных потерь помехозащищенности за счет применения многопозиционного сигнала. При больших количествах позиций общая помехозащищенность ухудшается, так как потери отношения сигнал/шум за счет применения многопозиционного сигнала превышают выигрыш от улучшения фильтрации помехи при уменьшении полосы пропускания радиоканала.

Ключевые слова: телекоммуникационная система, фазоманипулированный сигнал, широкополосная помеха, многопозиционный сигнал.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-97-106

Введение

Многопозиционный сигнал широко используется для повышения спектральной эффективности телекоммуникационных систем – ТКС (рис. 1) вследствие уменьшения требуемой полосы пропускания радиоканала при передаче многопозиционного сигнала [1]

$$S = \frac{C}{\Delta f} = \log M = n \Delta f \quad [\text{бит}/(\text{с} \cdot \text{Гц})],$$

где Δf – полоса пропускания радиоканала; M – количество позиций сигнала,

$$M = 2^n,$$

где n – количество разрядов двоичного сигнала.

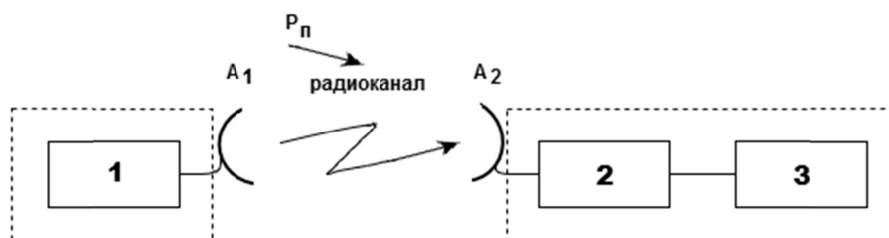


Рис. 1 – Структурная схема ТКС

Fig. 1 – TCS structure scheme

На рис. 1: 1 – передатчик с устройством формирования многопозиционного сигнала; 2 – приемник с демодулятором и декодером многопозиционного сигнала; 3 – решающее устройство; A_1 , A_2 – передающая и приемная антенны; P_{Π} – мощность источника помехи.

Определение помехозащищенности системы

Помехоустойчивость телекоммуникационных систем, как известно, определяется количеством ошибок приема сигнала, которая зависит от отношения сигнал / шум на входе решающего устройства. Причем в ТКС с многопозиционным сигналом при увеличении количества позиций сигнала ухудшается помехоустойчивость системы [2].

Вероятность ошибки при оптимальном когерентном приеме двоичных сигналов и действии аддитивного гауссова шума с равномерным энергетическим спектром зависит от расстояния между сигналами d и односторонней спектральной плотности мощности помехи N_0 и имеет вид [3]

$$N_0 = Q\left(\sqrt{d^2/2N_0}\right),$$

где $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибки, который рассчитывается как

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

Расстояния между сигналами d являются отсчетной величиной, с которой сравнивается расстояние между вариантами сигнала в различных многопозиционных системах.

При многоуровневых сигналах помехоустойчивые свойства кодов определяют минимальные евклидовы расстояния между сигнальными точками, получающиеся при различных способах кодирования и различных схемах модуляции.

В общем случае минимальное расстояние между сигналами не является характеристикой, что однозначно определяет помехоустойчивость. Для заданной конфигурации сигнальных точек вероятность погрешностей является монотонно убывающей функцией минимального размера.

Увеличение количества позиций M при PSK приводит к увеличению пропускной способности каналов и одновременно к уменьшению помехоустойчивости систем за счет уменьшения значений минимальных расстояний между сигнальными точками при соответствующем увеличении их количества [2].

В системе с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK) расстояние между сигналами $d = 2\sqrt{E_b}$ и вероятность ошибки будет

$$P(0/1) = P(1/0) = P(x > \sqrt{E_b}) = Q\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sigma}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right) = Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right).$$

Для DPSK (некогерентного детектирования) вероятность ошибки выражается формулой

$$P_{DPSKn} = \frac{1}{2} e^{-E_b/N_0},$$

а для DPSK (когерентное детектирование) вероятность ошибки – формулой

$$P_{DPSKk} = 2Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right) \left[1 - Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)\right].$$

В случае фазовой манипуляции (PSK) вероятность ошибки определяется выбором одной из двух сигнальных точек, примыкающих к передаваемой сигнальной точке. Для $M > 2$ с когерентным обнаружением вероятность ошибки для больших отношений $\frac{E_b}{N_0}$ можно выразить формулой [3]

$$P_{MPSK} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right), \quad (1)$$

где E_s – энергия, приходящаяся на символ

$$E_s = E_b (\log_2 M).$$

Для дифференциальной фазовой манипуляции (DMPSK) при некогерентном детектировании используется формула [3]

$$P_{DMPSK} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{\sqrt{2}M}\right). \quad (2)$$

На рис. 2 приведены графики сравнения помехозащищенности приема MPSK и DMPSK согласно уравнениям (1) и (2).

По графикам рис. 3 можно определить отношение сигнал/шум для битовых ошибок $P_b = 10^{-6}$ и степень ухудшения помехозащищенности ТКС $\Delta\gamma$ для PSK при увеличении количества позиций сигнала по сравнению с BPSK (см. таблицу) [2].

На рис.4 приведена гистограмма уменьшения отношения сигнал/шум для многопозиционного сигнала в сравнении с BPSK.

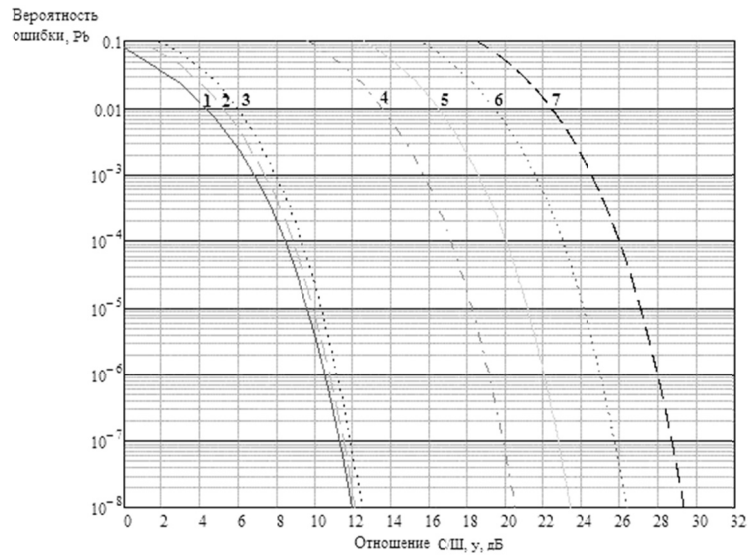


Рис. 2 – Сравнение помехозащищенности приема MPSK и DMPSK:

1 – BPSK; 2 – DPSK при некогерентном детектировании; 3 – DPSK при когерентном детектировании; 4 – PSK-8; 5 – DPSK-8; 6 – PSK-16; 7 – DPSK-16

Fig. 2 – Comparison of the noise immunity of TCS at MPSK and DMPSK signals reception:

1 – BPSK; 2 – DPSK for non-coherent detection; 3 – DPSK for coherent detection; 4 – PSK-8; 5 – DPSK-8; 6 – PSK-16; 7 – DPSK-16

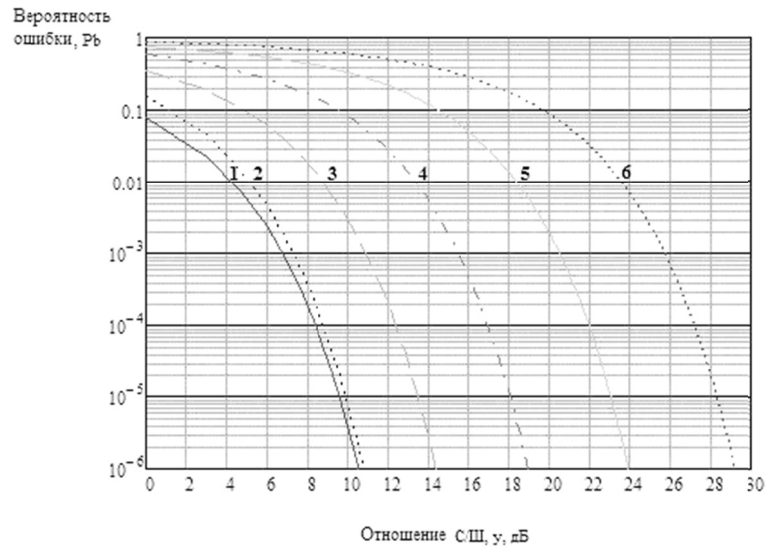


Рис. 3 – Графики помехозащищенности ТКС в зависимости от количества позиций сигнала:

1 – BPSK; 2 – PSK-4; 3 – PSK-8; 4 – PSK-16; 5 – PSK-32; 6 – PSK-64

Fig. 3 – Graphics of the telecommunication systems noise immunity depending on number of signal positions:

1 – BPSK; 2 – PSK-4; 3 – PSK-8; 4 – PSK-16; 5 – PSK-32; 6 – PSK-64

Результаты расчета отношения сигнал/шум γ и $\Delta\gamma$ для PSK при частоте битовых ошибок $P_b = 10^{-6}$

The results of signal/noise ratio γ and $\Delta\gamma$ calculations for PSK manipulated signal at the bit errors probability $P_b = 10^{-6}$

γ	Вид модуляции					
	BPSK ($n = 1$)	PSK-4 ($n = 2$)	PSK-8 ($n = 3$)	PSK-16 ($n = 4$)	PSK-32 ($n = 5$)	PSK-64 ($n = 6$)
γ , дБ	10,53	10,779	14,351	18,953	23,963	29,181
γ , раз	11,298	11,964	27,232	78,586	249,060	828,202
$\Delta\gamma$, дБ	—	1,024	1,363	1,8	2,276	2,771

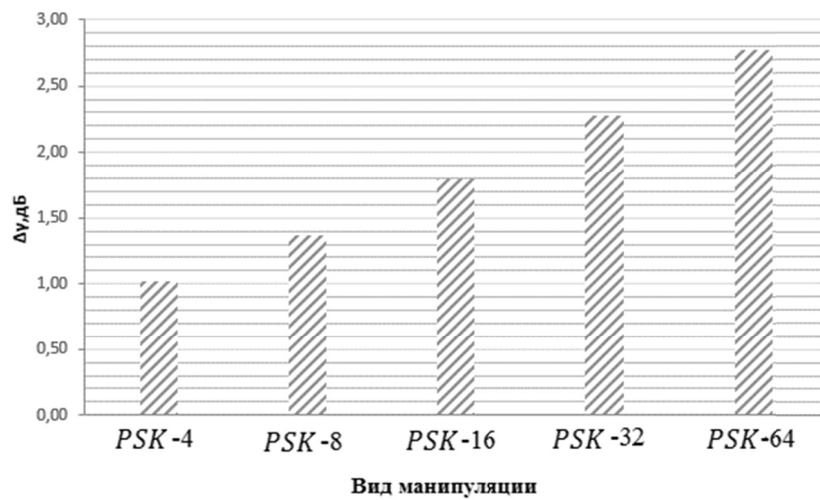


Рис. 4 – Гистограмма уменьшения отношения сигнал/шум для многопозиционного сигнала в сравнении с BPSK

Fig. 4 – Histogram of the signal/noise ratio reduction for multiposition signals comparing to BPSK manipulated signal

На вход решающего устройства будут поступать шумы, вызванные собственными шумами передатчика, помехами, которые действуют на радиоканал, и собственными шумами приемника.

Рассмотрим ТКС с полосой пропускания радиоканала Δf , на которую действует широкополосная помеха с шириной спектра $\Delta f_n > \Delta f$. Такая помеха создаст спектральную плотность

$$N_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{\Delta f}.$$

Спектральную плотность собственных шумов передатчика определим как

$$N_1 = \frac{P_{\text{ш1}}}{\Delta f_1},$$

где $P_{\text{ш1}}$ – мощность собственных шумов передатчика; Δf_1 – полоса пропускания канала передатчика.

Спектральную плотность собственных шумов приемника определим как

$$N_{2ш2} = kT,$$

где k – постоянная Больцмана; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Вт / (Град · Гц); T – приведенная к входу эффективная шумовая температура, К.

Во многих случаях может возникнуть ситуация, когда на систему действует помеха, ширина спектра которой превышает практическую ширину спектра сигнала, равную полосе пропускания радиоканала. Такая помеха может быть преднамеренной для ухудшения характеристик системы (рис. 5).

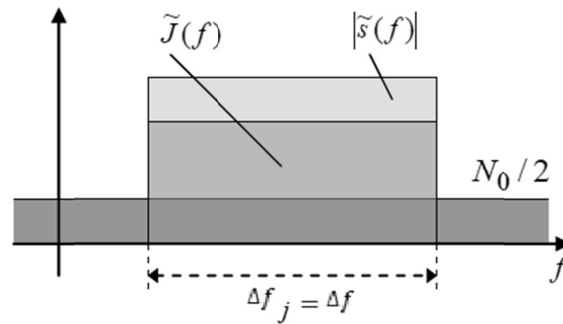


Рис 5. – Спектр сигнала, заградительной помехи и АБГШ

Fig. 5. – Spectrums of the signal, interference barrier, AWGN

На рис. 5 в виде прямоугольников представлены амплитудный спектр $|\tilde{S}(f)|$ полезного сигнала и спектральная плотность мощности помехи $\tilde{J}(f)$ на фоне равномерной спектральной плотности мощности $N_0/2$ АБГШ) [5].

Полосы пропускания телекоммуникационной системы определяются продолжительностью найквистовых импульсов, передача которых осуществляется без межсимвольной интерференции [1]

$$\Delta f_1 = \frac{1}{\tau_1},$$

$$\Delta f_2 = \frac{1}{\tau_2},$$

где τ_1 – продолжительность найквистового импульса на выходе передатчика; τ_2 – продолжительность найквистового импульса в сигнале приемника.

При использовании двухпозиционного сигнала, когда $\tau_1 = \tau_2$ и $\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f$, на систему действует помеха с максимальной мощностью.

При использовании многопозиционного сигнала в передатчике сигнал с длительностью импульса $\tau'_1 = n\tau_1$ уменьшается требуемая полоса пропускания радиоканала, которая составляет

$$\Delta f_k = \frac{\Delta f}{n}.$$

Очевидно, что уменьшение требуемой полосы пропускания радиоканала позволяет уменьшить в n раз мощность помехи на входе приемника, исходя из сохранения спектральной плотности помехи

$$P'_\Pi = \frac{P_\Pi}{n}.$$

При этом на входе приемника будет действовать суммарная мощность шумов

$$P_{\Sigma} = P_{\Pi} + P'_\Pi + P'_{\Pi 1},$$

где P_{Π} – мощность собственных шумов приемника; $P'_{\Pi 1}$ – мощность шумов передатчика на входе приемника.

При интенсивной помехе, которая будет действовать в радиоканале, мощность шума помехи на входе приемника будет значительно превышать мощность шумов передатчика и собственных шумов приемника, которыми можно пренебречь.

При этом отношение сигнал/шум на входе решающего устройства будет

$$\gamma = \frac{P_c}{P'_\Pi} = \frac{nP_c}{P_\Pi}.$$

В табл. 2 приведены коэффициент ухудшения S и коэффициент изменения помехозащищенности системы Z с многопозиционным сигналом.

Таблица 2 / Table 2

**Коэффициент ухудшения S и коэффициент изменения
помехозащищенности системы Z**
The coefficients of system's noise immunity change

Частота битовых ошибок P_b	Вид манипуляции									
	PSK-4 ($n = 2$)		PSK-8 ($n = 3$)		PSK-16 ($n = 4$)		PSK-32 ($n = 5$)		PSK-64 ($n = 6$)	
	S	Z	S	Z	S	Z	S	Z	S	Z
10^{-3}	1,134	1,764	2,581	1,162	7,448	0,537	23,603	0,212	78,489	0,076
10^{-4}	1,094	1,828	2,491	1,204	7,189	0,556	22,782	0,219	75,759	0,079
10^{-5}	1,073	1,869	2,442	1,229	7,046	0,568	22,331	0,224	74,256	0,081
10^{-6}	1,059	1,889	2,41	1,245	6,956	0,575	22,046	0,227	73,308	0,082
10^{-7}	1,05	1,905	2,389	1,256	6,894	0,58	21,85	0,229	72,658	0,083

Значения величины S , а также коэффициента изменения помехозащищенности системы в зависимости от ее изменения в результате использования многопозиционного сигнала и уменьшения влияния помехи можно выразить коэффициентом

$$Z = \frac{n}{S},$$

где S – коэффициент ухудшения помехоустойчивости в результате использования многопозиционных сигналов.

На рис. 6 приведена гистограмма повышения помехозащищенности ТКС с многопозиционным сигналом при увеличении количества позиций с учетом потерь при создании многопозиционного сигнала для битовой ошибки $P_b = 10^{-6}$.

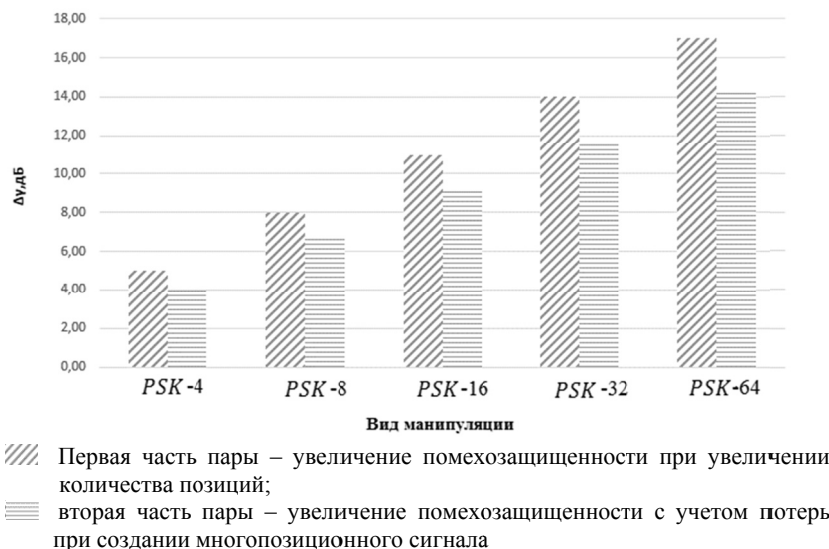


Рис. 6 – Гистограмма повышения помехозащищенности телекоммуникационной системы

Fig. 6 – Shows the histogram of telecommunication systems noise immunity improvement when multiposition signals is being used

Заключение

Использование многопозиционного сигнала приводит к ухудшению помехоустойчивости системы по мере увеличения количества позиций сигнала.

При воздействии интенсивной широкополосной помехи на систему ее помехоустойчивость улучшается при увеличении количества позиций сигнала за счет уменьшения требуемой полосы пропускания радиоканала.

Для систем с фазоманипулированным сигналом для количества позиций сигнала 4 и 8 помехоустойчивость систем улучшается с учетом особенностей многопозиционных сигналов и влияния широкополосной помехи на систему ($Z > 1$). Для других многопозиционных сигналов общая помехозащищенность системы ухудшается ($Z < 1$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
2. Многоканальные модемы / Л.Н. Беркман, И.С. Щербина, А.И. Чумак, Л.В. Рудык. – М.: Связь, 2006. – 151 с.
3. Домрачева К.А. Общая сравнительная оценка помехоустойчивости телекоммуникационных систем // Научные записки Украинского научно-исследовательского института связи. – 2016. – № 3 (43). – С. 83–89.
4. Семенко А.И., Бокла Н.И. Эффективность телекоммуникационных систем с использованием модифицированных псевдослучайных последовательностей Голда // Электро-связь. – 2014. – № 3. – С. 37–39.
5. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. – М.: Техно-сфера, 2007. – 488 с.
6. Semenکو A., Domracheva C., Zaika V. Using of Amplitude Manipulated signal to increase capacity of MIMO telecommunication system // XIIIth 2016 International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science". – Lviv-Slavsk, 2016. – P. 882.

7. Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Козелков С.В. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізничевої модуляції високого порядку // Зв'язок. – 2016. – № 4. – С. 3.
8. Методи прийому багатопозиційних сигналів у мобільних мережах LTE на базі визначення нелінійних передатних функцій / С.В. Козелков, Л.Н. Беркман, А.С. Дишук, О.С. Панкратова // Зв'язок. – 2016. – № 5. – С. 8.

ANALYSIS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS INTERFERENCE WITH A MULTIPOSITION PHASE-SHIFT SIGNAL

Semenko A.I., Bokla N.I., Domracheva K.O.

State University of Telecommunications, Kiev, Ukraine

The Authors investigate a telecommunication system with a multi-position phase-shifted signal. Calculations of the system noise immunity at different signal positions are performed. An estimation of the system noise immunity is evaluated under the influence of broadband interference with an increase in the number of signal positions. It is shown that when using a multi-position phase-shift signal, the noise immunity of the system is improved under the influence of broadband interference.

Multiposition signals are commonly used in order to improve the spectral efficiency of telecommunication systems (TCS), by reducing the required channel bandwidth, which is needed for transmitting a multiposition radio signal.

The immunity of the telecommunication system is determined by the number of errors during signal reception, which depends on a signal/noise ratio at the input of the decision device. Moreover, noise immunity of TCS with multiposition signals decreases with increasing the number of signal positions.

The use of a multiposition signal makes it possible not only to improve the efficiency of frequency spectrum use and thus to minimize an occupied frequency band but also to improve noise immunity of the telecommunication systems when the broadband interference signal width exceeds the bandwidth, in n times.

Keywords: telecommunication system, phase-shift keyed signal, broadband interference, multiposition signal.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-97-106

REFERENCES

1. Sklar B. *Digital communications: fundamentals and applications*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001 (Russ. ed.: Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz': teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye*. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2003. 1104 p.),
2. Berkman L.N., Shcherbina I.S., Chumak A.I., Rudyk L.V. *Mnogokanal'nye modemy* [Multiposition modems]. Moscow, Svyaz' Publ., 2006. 151 p.
3. Domracheva K.A. Obshchaya sravnitel'naya otsenka pomekhoustoichivosti telekommunikatsionnykh sistem [General comparison of telecommunication systems noise immunity]. *Nauchnye zapiski Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta svyazi – Scientific proceeding of Ukrainian research institute of communication*, 2016, no. 3 (43), pp. 83–89.
4. Semenko A.I., Bokla N.I. Effektivnost' telekommunikatsionnykh sistem s ispol'zovaniem modifitsirovannykh psevdosluchainykh posledovatel'nostei Gol'da [Efficiency of telecommunication systems which are using modified Gold pseudo-random sequences]. *Elektrosvyaz' – Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, no. 3, pp. 37–39. (In Russian).
5. Ipatov V.P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov* [Broadband systems and code division of signals]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 488 p.
6. Semenko A., Domracheva C., Zaika V. Using of Amplitude Manipulated signal to increase capacity of MIMO telecommunication system. *XIIIth 2016 International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science"*. Lviv-Slavsk, 2016, p. 882.
7. Tolubko V.B., Berkman L.N., Kozelkov S.V. Formuvannya bagatopozitsiinogo signalu tekhnologii 5G na bazi fazoriznitsevoi modul'yatsii visokogo poryadku [Multiposition 5G

technologies signal forming on high order phase difference modulation]. *Zv'yazok – Communication*, 2016, no. 4, p. 3.

8. Kozelkov S.V., Berkman L.N., Dishchuk A.S., Pankratova O.S. Metodi priimu bagatopozitsiynikh signaliv u mobil'nykh mrezhakh LTE na bazi viznachennya nelineinykh peredatnykh funktsii [Multipositional signals reception methods in mobile LTE networks on the base of nonlinear transfer functions determination]. *Zv'yazok – Communication*, 2016, no. 5, p. 8.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Семенко Анатолий Илларионович – родился в 1937 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем и сетей Государственного университета телекоммуникаций. Область научных интересов: беспроводные телекоммуникации. Опубликовано 130 научных работ. (Адрес: 03110, Украина, Киев, ул. Соломенская, 7. Email: setel@ukr.net).

Semenko Anatoliy (b. 1937) – Professor, Doctor of Engineering Science, of the department of Telecommunication Systems and Networks of the State University of Telecommunications. His research interests are currently focused on wireless telecommunications. He is author of 130 scientific papers. (Address: 7, Solomenskaya, Kiev, 03110, Ukraine. Email: setel@ukr.net).



Бокла Наталия Ивановна – родилась в 1985 году, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и сетей Государственного университета телекоммуникаций. Область научных интересов: беспроводные телекоммуникации. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 03110, Украина, Киев, ул. Соломенская, 7. Email: nataloshka_77@ukr.net).

Bokla Natalia (b. 1985) – PhD in technical sciences, Associate Professor, of the department of Telecommunication Systems and Networks of the State University of Telecommunications. Her research interests are currently focused on wireless telecommunications. She is author of 15 scientific papers. (Address: 7, Solomenskaya, Kiev, 03110, Ukraine. Email: nataloshka_77@ukr.net).



Домрачева Екатерина Алексеевна – родилась в 1992 году, ассистент кафедры телекоммуникационных систем и сетей Государственного университета телекоммуникаций. Область научных интересов: беспроводные телекоммуникации. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 03110, Украина, Киев, ул. Соломенская, 7. Email: katyscha@ukr.net).

Domracheva Kateryna (b. 1992) – assistant of the department of Telecommunication Systems and Networks of the State University of Telecommunications. Her research interests are currently focused on wireless telecommunications. She is author of 5 scientific papers. (Address: 7, Solomenskaya, Kiev, 03110, Ukraine. Email: katyscha@ukr.net).

Статья поступила 17 июня 2017 г.
Received June 17, 2017

To reference:

Semenko A.I., Bokla N.I., Domracheva E.A. Opredelenie pomekhozashchishchennosti telekommunikatsionnykh sistem s mnogopozitsionnym fazomanipulirovannym signalom [Analysis of telecommunication systems interference with multiposition phased-shift signal]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 2 (35), pp. 97–106. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-97-106