



УДК 621.391.8

DOI: 10.18413/2411-3808-2018-45-2-394-403

О СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**ON COMPARATIVE EVALUATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF VARIOUS CLASSES OF WIDE-BAND CHANNEL SIGNALS****С.П. Белов¹, И.И. Олейник², С.А. Рачинский³
S.P. Belov¹, I.I. Oleinik², S.A. Rachinsky³**¹⁾ Белгородский университет кооперации, экономики и права,
Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, 116а²⁾ Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие
«Энергетические и информационные технологии» БелГУ»,
Россия, 308023, г. Белгород, ул. Промышленная, 4к.³⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85¹⁾ Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia²⁾ Limited Liability Company «Scientific and Production Enterprise» Power and Information
Technologies «BelSU», 4k Industrial St, Belgorod, 308023, Russia³⁾ Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia

E-mail: belovssergei@gmail.com, oleinik_i@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Аннотация

В статье рассматриваются частотные характеристики широкополосных канальных сигналов, применение которых в качестве переносчиков информации в телекоммуникационных системах при наличии различного вида помех в существующих каналах связи позволяет повысить их помехоустойчивость. Предложен новый класс широкополосных канальных сигналов, построенный на основе применения собственных векторов субполосных матриц. Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию частотных характеристик указанных сигналов написана программа в пакете Mat Lab. Приводится оценка ширины полосы частот каждого из исследуемых сигналов. Делается вывод о целесообразности применения нового класса широкополосных канальных сигналов в телекоммуникационных системах для передачи информации в условиях различного вида помех, существующих в каналах связи, так как они обладают наибольшей шириной полосы частот, что позволяет минимизировать вероятность ошибки при их восстановлении на приемной стороне.

Abstract

The frequency characteristics of broadband channel signals are considered in the article, their use as carriers of information in telecommunication systems in the presence of various types of interference in existing communication channels makes it possible to increase their noise immunity. A new class of broadband channel signals based on the application of eigenvectors of subband matrices is proposed. To carry out computational experiments to study the frequency characteristics of these signals, a program is written in the package Mat Lab. An estimate of the bandwidth of each of the signals studied is given. The conclusion is made about the advisability of using a new class of broadband channel signals in telecommunication systems for transmitting information in the conditions of various types of interference existing in the communication channels, since they have the largest bandwidth, thus minimizing the probability of error in their recovery on the receiving side.

Ключевые слова: телекоммуникационные системы, широкополосные канальные сигналы, база сигнала, помехи, ширина полосы частот сигнала.



Keywords: telecommunication systems, broadband channel signals, signal base, interference, signal bandwidth.

Введение

Непрерывное увеличение объемов передаваемой информации по существующим каналам связи с применением большого количества разнообразных телекоммуникационных систем приводит к появлению различного вида помех, включая внутрисистемные, что вызывает необходимость применения в указанных системах канальных сигналов, обеспечивающих меньшую вероятность приема информации в условиях, указанных выше, по сравнению с узкополосными сигналами. Для повышения достоверности приема информации в условиях различного вида помех, как известно, необходимо осуществлять реализацию информационного обмена с применением канальных сигналов с большой базой, которая в первую очередь зависит от ширины полосы частот, которую он занимает. В связи с этим в статье представлены результаты сравнительной оценки частотных характеристик ряда современных классов широкополосных канальных сигналов, включая новый класс широкополосных канальных сигналов, построенный на основе применения собственных векторов субполосных матриц и, сделаны выводы об эффективности их применения в телекоммуникационных системах для передачи информации в условиях различного вида помех.

Основная часть

Анализ существующих подходов к формированию широкополосных канальных сигналов (ШПКС) [Борисов, 2003; Тузов, 1977; Тузов, 1985; Варакин, 1978; Варакин, 1985; Диксон, 1979; Кук, Бернфельд, 1971; Пестряков, 1973; Белов, 2015] показал, что в настоящее время для этих целей используются следующие методы.

Метод прямого расширения спектра

Сущность этого метода заключается в следующем. Каждому элементу информационной последовательности («1» и «0») ставится в соответствие отличающиеся друг от друга псевдослучайные последовательности (ПСП), которые затем модулируют по фазе высокочастотное колебание для получения ШПКС. Такие классы сигналы получили в литературе название ФМ ПСП сигналы. В математическом виде ФМ ПСП сигналы могут быть представлены следующим образом:

$$S(t) = S_0 \cdot \sum_{l=1}^N v_l \cdot \text{rect} \left[\frac{t - (l-1) \cdot \tau_3 - \frac{T - \tau_3}{2}}{\tau_3} \right] \quad (1)$$

где τ_3 – длительность элемента ПСП; N – количество элементов в ПСП; v_l – коэффициент, характеризующий состояние ПСП, принимает значения $+1$ или -1 , $\text{rect}(x) = 1$, при $|x| \leq \frac{1}{2}$; $\text{rect}(x) = 0$, при $|x| > \frac{1}{2}$ – прямоугольная «срезающая» функция,

Вид ПСП с количеством элементов $N=31$, получаемой на выходе регистра с обратными связью, которые рассчитываются по специальному алгоритму при помощи ЭВМ, представлен на рис. 1.

Метод формирования ШПКС с использованием вейвлет-функций

Одним из перспективных направлений [Смоленцев, 2005; Черноусов, 2014; Кузовников, 2014], обеспечивающих формирование ШПКС с величиной ширины полосы частот, значительно превосходящей ширину полосы, которую обеспечивает применение метода прямого расширения спектра, является использование вейвлет-функций в качестве элементов, осу-



ществляющих модуляцию высокочастотного колебания. Анализ достаточно большого количества вейвлет-функций, приведенного в [Смоленцев, 2005] показал, что наиболее эффективными для формирования ШПКС являются вейвлет-функции Морлета и Шеннона.

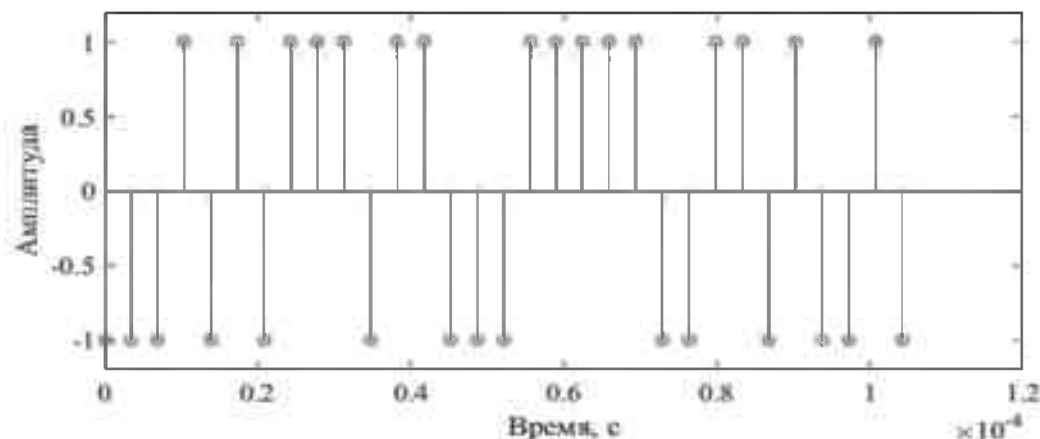


Рис. 1. Вид псевдослучайной последовательности (М-последовательности) N=31
Fig. 1. Type of pseudo-random sequence (M-sequence) N = 31

Вейвлет Морлета является симметричным вейвлетом и может быть в математическом виде представлен следующим образом:

$$\varphi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \cdot \cos(5x) \quad (2)$$

где x – значения текущих отсчетов.

Вид ШПКС, полученный с использованием вейвлет Морлета, представлен на рис. 2.

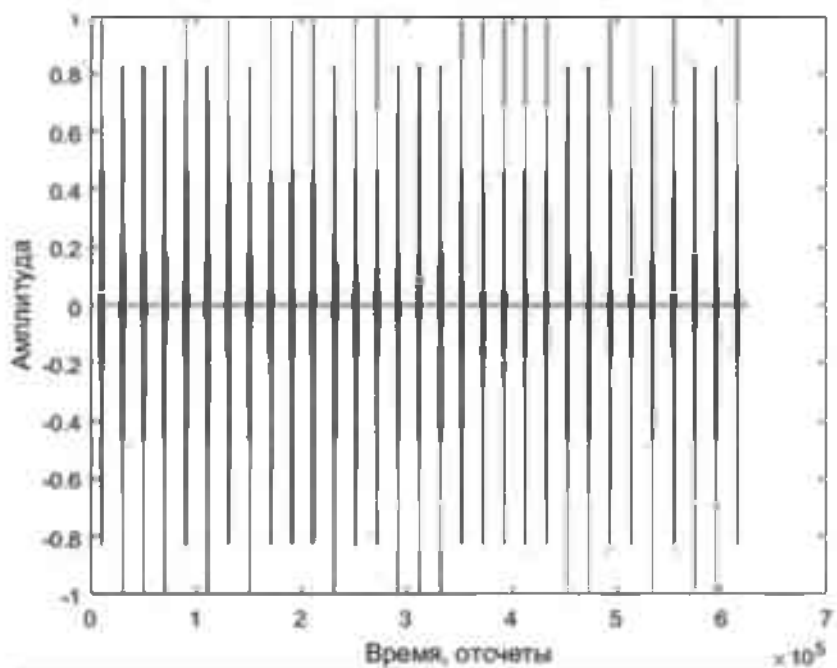


Рис. 2. Вид ШПКС, полученный с использованием вейвлет Морлета
Fig. 2. The type of SHPCS obtained using the Morletta wavelet

Необходимо отметить, что вейвлет Морлета может быть представлен в комплексном виде с использованием следующей формулы [Смоленцев, 2005]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot B}} \cdot \exp(j2\pi \cdot C \cdot x) \cdot \exp(-x^2 / B) \quad (3)$$

где B – переменная величина, определяющая ширину полосы частот, а C – переменная, определяющая центральную частоту.



Вид ШПКС, полученный с использованием комплексного вейвлет Морлета, представлен на рис. 3.

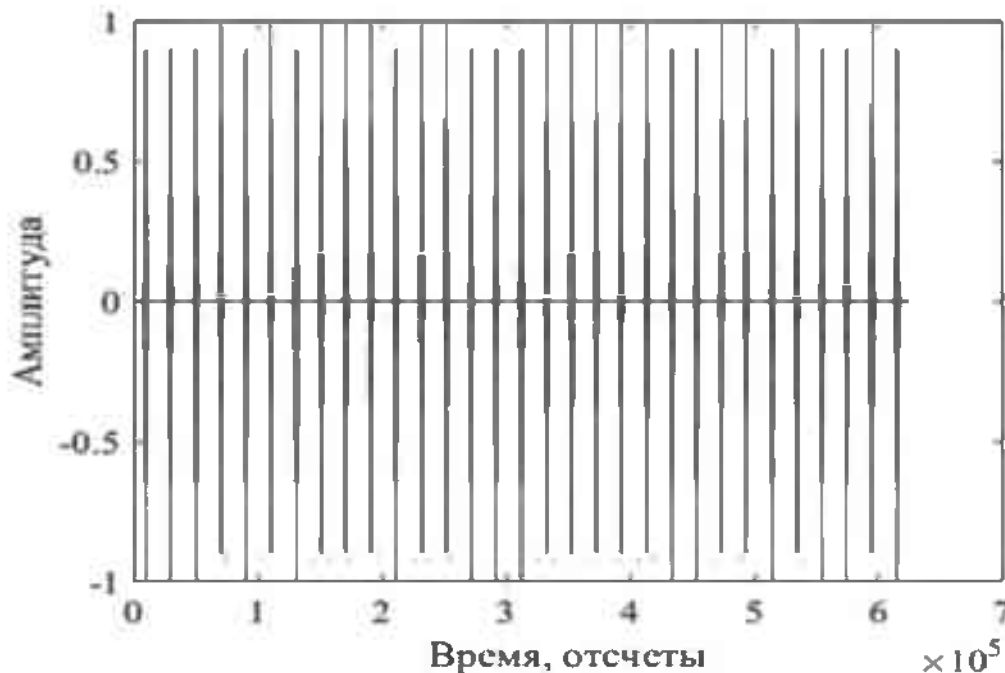


Рис. 3. Вид ШПКС, полученный с использованием комплексного вейвлет Морлета
 Fig. 3. The type of SHPCS obtained using the complex Morletta wavelet

Комплексный вейвлет Шеннона в математическом виде может быть представлен следующим образом:

$$\varphi(x) = (\sqrt{F_b}) \cdot [\text{Sins}(F_b) \cdot \exp(2j\pi F_c x)] \tag{4}$$

где F_b – значение полосы частот вейвлет-функции, F_c – значение центральной частоты вейвлет-функции, x – значения текущих отсчетов, при этом $F_c \leq F_b / 2$.

Вид ШПКС, полученный с использованием вейвлет Шеннона, представлен на рис. 4.

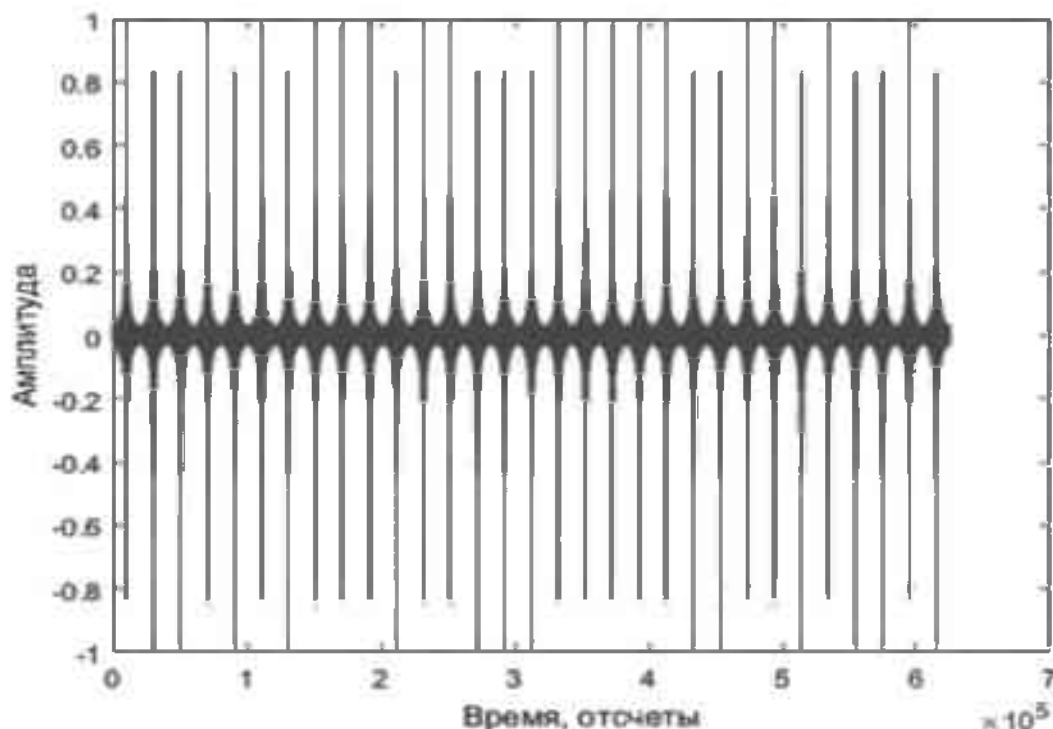


Рис. 4. Вид ШПКС, полученного с использованием вейвлет Шеннона
 Fig. 4. The type of SHPCS obtained using the Shannon wavelet



Метод формирования ШПКС с использованием собственных векторов субполосных матриц

Метод формирования ШПКС с использованием собственных векторов субполосных матриц [Жиляков и др., 2009; Жиляков и др., 2011; Жиляков и др., 2016] заключается в использовании для передачи информационных элементов («1» и «0»), передаваемых сообщений различных ПСП, при этом каждый элемент этих последовательностей (1 и -1) предлагается передавать противоположными собственными векторами со значениями собственных чисел, близких к единице, которые выбираются из набора собственных векторов субполосной матрицы с элементами вида:

$$A_{i,j} = \begin{cases} \frac{\sin(v(i-j))}{\pi(i-j)} & i \neq j \\ v/\pi & i = j \end{cases} \quad (5)$$

где индексы i и j принимают значения с шагом 1 от 0 до L (размерность матрицы, т. е. количество отсчетов собственного вектора), а v – коэффициент, определяющий ширину полосы частот формируемого собственного вектора [Патент РФ].

Вид ШПКС, полученный с использованием собственных векторов субполосных матриц, представлен на рис. 5.

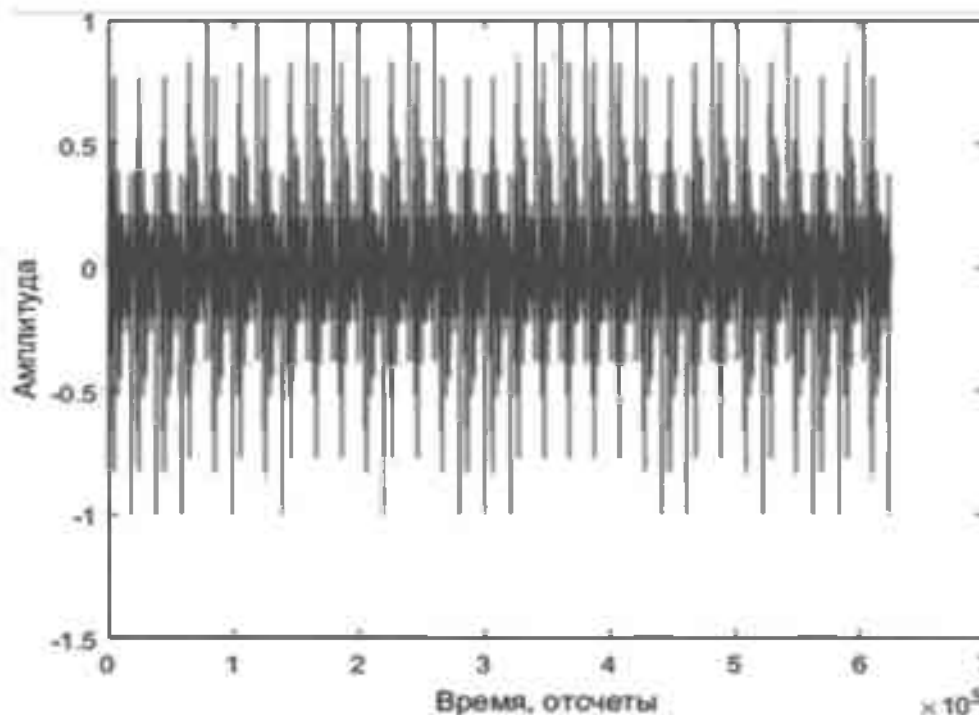


Рис. 5. Вид ШПКС, полученный с использованием собственных векторов субполосных матриц
Fig. 5. The form of the SHSCS obtained using the eigenvectors of the subband matrices

Для проведения сравнительного анализа ширины полосы частот, которые занимают каждый из исследуемых сигналов, при проведении вычислительных экспериментов были использованы следующие параметры [Кузовников, 2014]:

- скорость передачи информации $v=9.6 \cdot 10^3$ кБит/сек;
- частота дискретизации $F_d=6$ ГГц;
- несущая частота $f=1.646$ ГГц;
- длительность информационной последовательности $T=10^{-4}$ сек.

Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 6–10, а также сведены в таблицу 1.

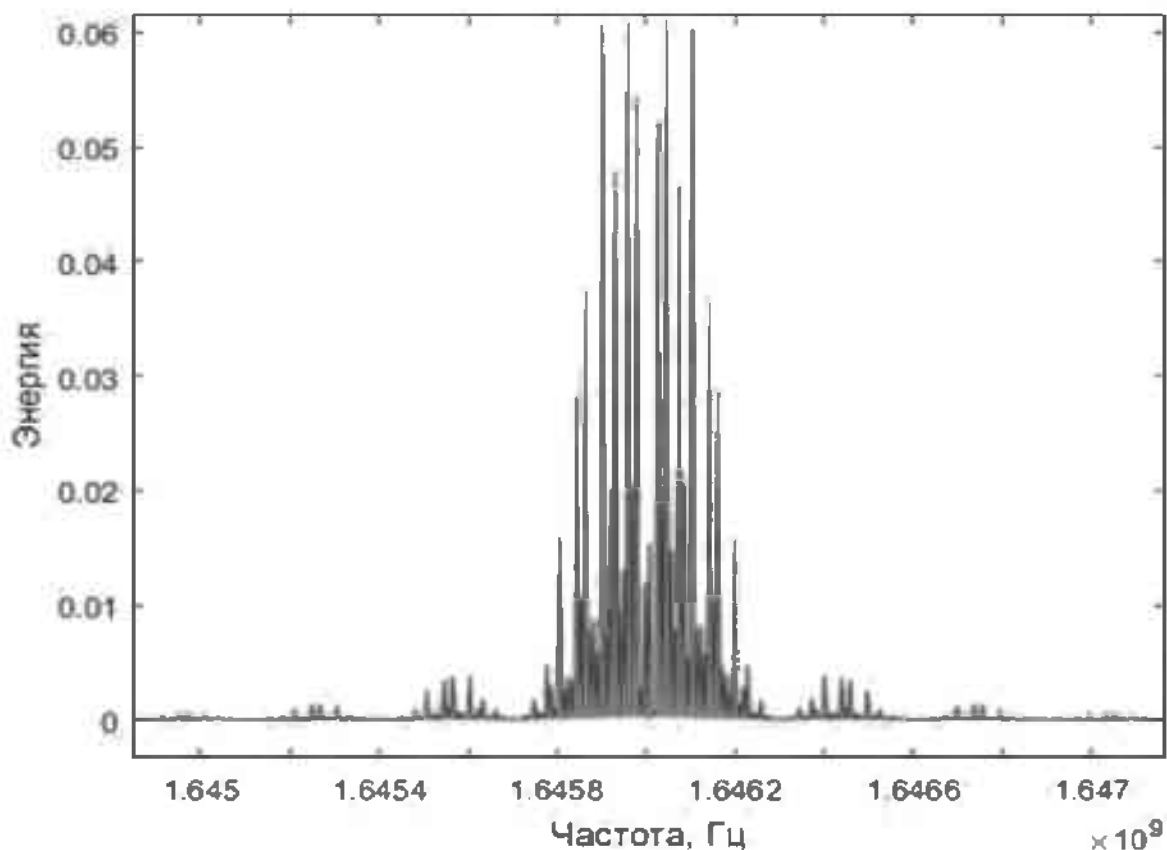


Рис. 6. Частотная характеристика ФМ ПСП сигнала при длине ПСП N=31
 Fig. 6. Frequency response of the FM PSP signal with the length of PSP N=31

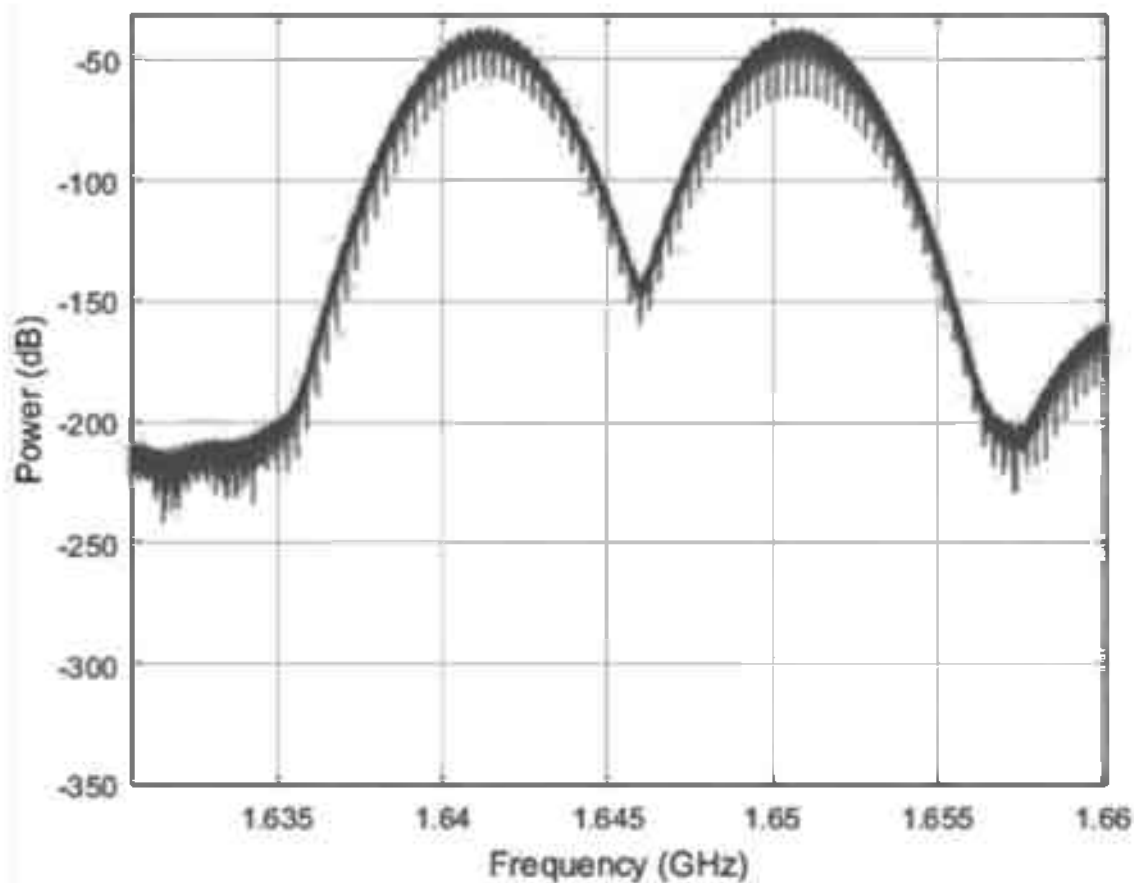


Рис. 7. Частотная характеристика ШПКС, полученного с использованием вейвлет Морлета
 Fig. 7. Frequency response of the SHPCS obtained using the Morlett wavelet

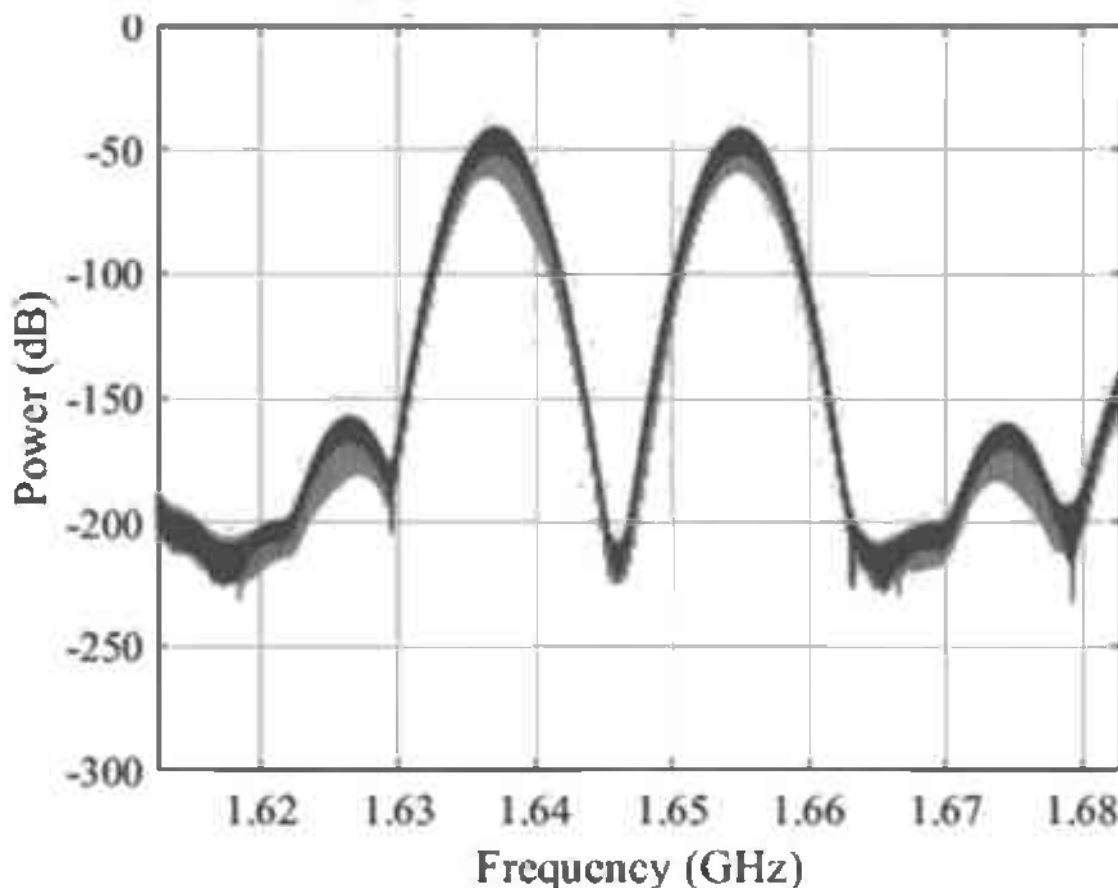


Рис. 8. Частотная характеристика ШПКС, полученного с использованием комплексного вейвлет Морлета

Fig. 8. Frequency response of a SHPCS obtained using a complex Morlett wavelet

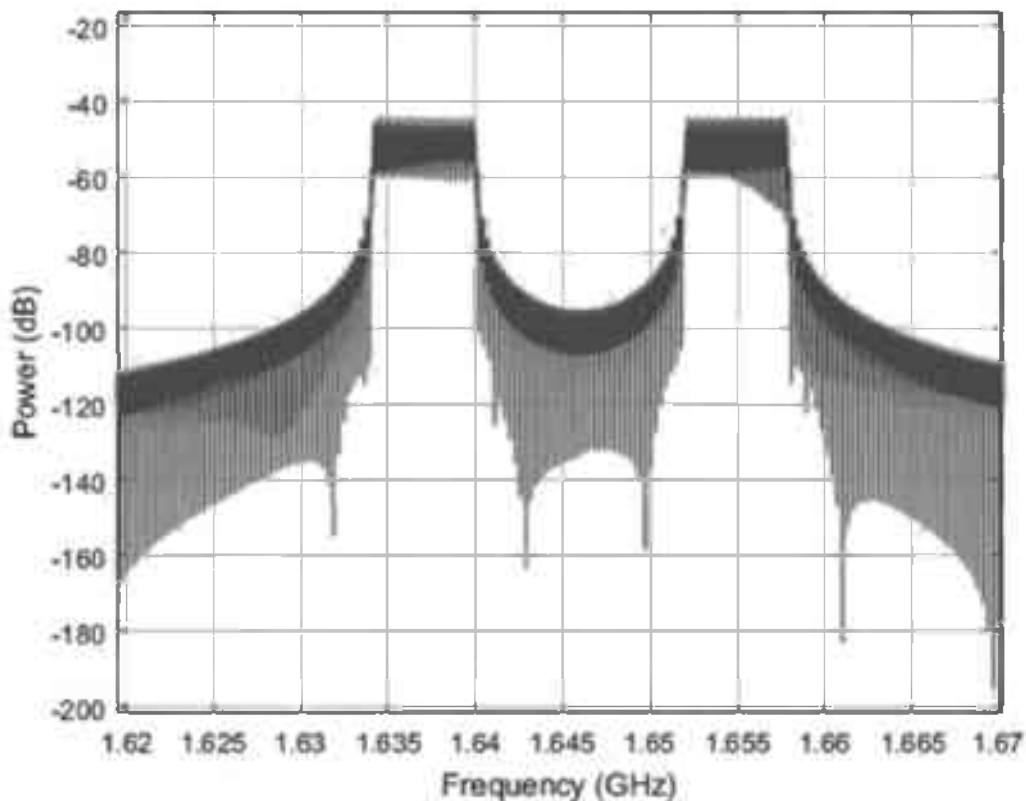


Рис. 9. Частотная характеристика ШПКС, полученного с использованием вейвлет Шеннона

Fig. 9. Frequency response of SHSCS obtained using Shannon wavelet

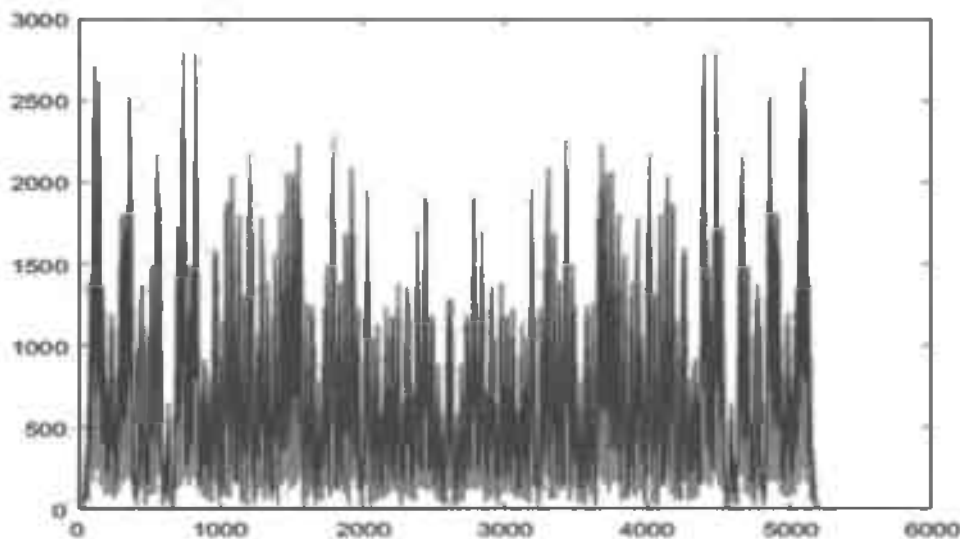


Рис. 10. Частотная характеристика ШПКС, полученного с использованием собственных векторов субполосных матриц

Fig. 10. The frequency response of the SHPCS obtained using the eigenvectors of the subband matrices

Таблица 1
Table 1

Значения ширины полосы частот исследуемых сигналов
The values of the bandwidth of the investigated signals

Тип ШПКС	Длина ПСП, бит					
	31	63	127	511	1023	2047
ФМ ПСП сигналы	0.3	0.6	1.2	4.8	9.6	19.2
ШПКС, полученный с использованием вейвлет Морлета	20	42	84	336	672	1344
ШПКС, полученный с использованием комплексного вейвлет Морлета Fb=1; Fc=1.5.	28	56	112	448	896	1792
ШПКС, полученный с использованием вейвлет Шенона Fb=1; Fc=1.5.	24	48	96	387	768	1559
ШПКС, полученный с использованием собственных векторов субполосных матриц L=1024	48	100	200	800	1600	3200

Выводы

Таким образом, из анализа представленных в Таблице 1 данных видно, что широкополосные каналные сигналы, построенные на основе применения собственных векторов субполосных матриц, имеют существенно превышающую по величине ширину полосы частот, чем другие типы ШПКС, свойства которых были представлены в этой статье. Следовательно, их применение в системах беспроводной связи позволит значительно повысить достоверность информационного обмена, так как вероятность ошибочного приема при использовании ШПКС в телекоммуникационных системах рассчитывается по формуле [Зюко и др., 1980]:

$$P_{ош} = 0,5 \cdot \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \Delta F_c \cdot T_c} \right) \right) \tag{6}$$

где ΔF_c – ширина полосы частот сигнала, T_c – длительность ШПКС, P_c – мощность ШПКС в полосе частот сигнала ΔF_c , $P_{ш}$ – мощность шума в полосе частот сигнала ΔF_c , $\Phi(h)$ – функция Крампа.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00289.



Список литературы References

1. Zhilyakov E.G., Chemomoretz A.A., Rakov V.I., 2016. Variation Methods of Analysis of Signals Based On the Frequency of Ideas. *International Journal of Control Theory and Applications (IJCTA)*. 9(35): 71–76.
2. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Chemomoretz A.A., Krasilnikov V.V., 2016. Variational methods of synthesis of signals based on the frequency of ideas. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 92(1): 59–63.
3. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ursol D.V., 2014. About the Best Orthogonal Basis for Generation of the Channel Signals. *International Journal of Applied Engineering Research*. 9(22): 12121–12126.
4. Белов С.П., Жилияков Е.Г., Белов А.С., Рачинский С.А., 2015. Об одном способе цикловой синхронизации широкополосных сигналов. *Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика*. 19(216): 187–191.
5. Belov S.P., Zhilyakov E.G., Belov A.S., Rachinskii S.A., 2015. About one way synchronization cycle broadband signals. *Nauchnye vedomosti BelGU. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika. [Belgorod State University Scientific Bulletin. History Political science Economics Information technologies]*. 19(216): 187–191. (in Russian).
6. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., 2003. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляции несущей псевдослучайной последовательностью. М., Радио и связь, 640.
7. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., 2003. Interference immunity of radio communication systems with spreading of the signals of pseudorandom sequence carrier modulation. М., Radio and communication, 640.
8. Варакин Л.Е., 1978. Теория систем сигналов. М., Сов. радио, 303.
9. Varakin L.Ye., 1978. *Theory of Signal Systems*. М., Sov. radio, 303.
10. Варакин Л.Е., 1985. Система связи с широкополосными сигналами. М., Радио и связь, 384.
11. Varakin L.Ye., 1985. *The communication system with broadband signals*. М., Radio and Communication, 384.
12. Диксон Р.К., 1979. Широкополосные системы. Пер. с англ. Под ред. В.И. Журавлева. М., Связь, 304.
13. Dickson R.K., 1979. *Broadband systems. Trans. with English*. Ed. V.I. Zhuravleva. М., Communication, 304.
14. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Туяков С.В., Урсол Д.В., 2011. О наилучшем ортогональном базисе для субполосного анализа и синтеза сигналов. *Информационные системы и технологии*. 2(64): 26–33.
15. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Tuayakov S.V., Ursol D.V., 2011. About the best orthogonal basis for the subband analysis and synthesis of signal. *Information Systems and Technologies*. 2(64): 26–33.
16. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Ушаков Д.И., Старовойт И.А., 2011. Компьютерное моделирование формирования канальных сигналов на основе собственных векторов субполосных матриц. *Вопросы радиоэлектроники. Серия «Электронная вычислительная техника (ЭВТ)»*. 1: 131–141.
17. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ushakov D.I., Starovoit I.A., 2011. Computer modeling of the formation of channel signals on the basis of the eigenvectors of subband matrices. *Questions of radio electronics. Series «Electronic computing (EWT)»*. 1: 131–141.
18. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Ушаков Д.И., Старовойт И.А., 2016. Способ формирования помехоустойчивых широкополосных сигналов. Патент РФ № 2579759. Бюл. 10.
19. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ushakov D.I., Starovoit I.A., 2016. A method for generating noise-proof broadband signals. *Patent of the Russian Federation No. 2579759. Bul. 10.*
20. Жилияков Е.Г., Белов С.П., Урсол Д.В., 2009. Оптимальные канальные сигналы при цифровой передаче с частотным уплотнением. *Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика*. 7(62): 166–172.
21. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Ursol D.V., 2009. Optimal channel signals for digital transmission with frequency multiplexing. *Nauchnye vedomosti BelGU. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika. [Belgorod State University Scientific Bulletin. History Political science Economics Information technologies]*. 7(62): 166–172.



13. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М., 1980. Теория передачи сигналов. М., Связь, 288.
Zyuko A.G., Klovskiy, D.D. Nazarov M.V., Fink L.M., 1980. Theory of signal transmission. M., Communication, 288.
14. Кузовников А.В., 2014. Исследование методов построения помехоустойчивых систем связи с использованием вейвлет-модулированных сигналов. Радиотехника и электроника. 59(1): 67–77.
Kuzovnikov A.V., 2014. Investigation of methods for constructing noise-immune communication systems using wavelet-modulated signals. Radio engineering and electronics. 59(1): 67–77.
15. Кук Ч., Бернфельд М., 1971. Радиолокационные сигналы. Пер. с англ. Под ред. Кельзона. М., Сов. Радио, 568.
Cook K., Bernfeld M., 1971. Radar signals. Trans. with English. Ed. M. Kelzon. M., Sov. Radio, 568.
16. Смоленцев Н.К., 2005. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М., ДМК Пресс, 304.
Smolentsev N.K., 2005. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB. M., DMK Press, 304.
17. Тузов Г.И., 1977. Статистическая теория приема сложных сигналов. М., Сов. радио, 400.
Tuzov G.I., 1977. Statistical theory of reception of complex signals. Moscow, Sov. radio, 400.
18. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И., Урядников Ю.Ф., Дергачев Ю.А., Сулиманов А.А., 1985. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М., Радио и связь, 264.
Tuzov G.I., Sivov V.A., Priktkov V.I., Uryyannikov Yu.F., Dergachev Yu.A., Sulimanov A.A., 1985. Interference immunity of radio systems with complex signals. M., Radio and communication, 264.
19. Черноусов А.В., Кузовников А.В., Сомов В.Г., 2014. Принципы организации адаптивной системы широкополосной связи с использованием вейвлет-модулирующих функций. Электросвязь. 12: 14–17.
Chernousov A.V., Kuzovnikov A.V., Somov V.G., 2014. Principles of the organization of an adaptive broadband communication system using wavelet-modulating functions. Electrosvyaz. 12: 14–17.
20. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации, 1973. Под ред. Проф. В.Б. Пестрякова. М., Сов. Радио, 424.
Noise-like signals in information transmission systems, 1973. Ed. Prof. V.B. Pestryakova. M., Sov. Radio, 424.