

**ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION**

УДК 621.391.8

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-6

Белов С.П.¹
Маторин С.И.¹
Белов А.С.²
Рачинский С.А.²
Нетеса В.В.¹

**ОБ ОЦЕНКЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ОДНОГО КЛАССА
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ С ЛЧМ**

¹) Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а,
г. Белгород, 308023, Россия

²) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,
г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: belovssergei@gmail.com, matorin@bsu.edu.ru, belov_as@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Аннотация

В настоящее время в условиях непрерывного увеличения информационного обмена между территориально распределенными абонентами возникает необходимость увеличения эффективности использования частотно-временных ресурсов существующих каналов связи различной физической природы. Однако при использовании в качестве переносчиков информации узкополосных сигналов, особенно в спутниковых системах связи, использующих в качестве ретрансляторов спутники, находящиеся на высокоэллиптической орбите, эффективность использования выделенных частотно – временных ресурсов канала связи значительно снижается из-за большой неопределенности частоты, вызванной эффектом Доплера, и изменений времени прихода принимаемых сигналов. В связи с этим в статье рассматриваются частотные свойства одного класса широкополосных шумоподобных сигналов с ЛЧМ, инвариантного к доплеровскому рассогласованию по частоте, в реальных пределах его изменения. Применение этого сигнала в качестве переносчика информации в указанных системах, позволяет минимизировать затраты частотно-временных ресурсов спутниковых каналов связи за счет эффективного использования выделенной частотной полосы.

Ключевые слова: минимизация затрат частотно-временных ресурсов спутниковых каналов связи; широкополосные шумоподобные сигналы с ЛЧМ; эффект Доплера.

UDC 621.391.8

Belov S.P.¹
Matorin S.I.¹
Belov A.S.²
Rachinsky S.A.²
Netesa V.V.¹

**ON ESTIMATION OF FREQUENCY PROPERTIES
OF ONE CLASS OF BROADBAND NOISE-LIKE SIGNALS WITH LFM**

¹) Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

²) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: belovssergei@gmail.com, matorin@bsu.edu.ru, belov_as@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Abstract

Now, in the conditions of a continuous increase in information exchange between territorially distributed subscribers, there is a need to increase the efficiency of using the time-frequency

resources of existing communication channels of various physical nature. However, when using narrowband signals in satellite communication systems using satellites in a highly elliptical orbit as carriers, the efficiency of using the allocated frequency-time resources of the communication channel is significantly reduced due to the large frequency uncertainty caused by the Doppler Effect and the time variations arrival of received signals. In this connection, the frequency properties of a class of broadband noise-like signals with LFM (BB NL with LFM), invariant to the Doppler mismatch in frequency, are considered in the real range of its variation. The use of this signal as an information carrier in these systems allows minimizing the cost of time-frequency resources of satellite communication channels due to the efficient use of the dedicated frequency band.

Keywords: minimization of costs of time-frequency resources of satellite communication channels, broadband noise-like signals with LFM, Doppler Effect.

ВВЕДЕНИЕ

Классические методы узкополосной модуляции разработаны с целью достижения максимальной спектральной эффективности, т. е. передачи информации с возможно большей скоростью в возможно более узкой полосе частот с одновременным уменьшением уровня интерференционных помех [3].

Однако проблема заключается в том, что с увеличением числа пользователей число каналов, выделенных для информационного обмена, должно возрастать. В то же время, очевидно, что, с одной стороны, общий частотный ресурс является ограниченной величиной, а, с другой стороны, невозможно бесконечно уменьшать полосу частот, в которой осуществляется передача информации. В системах спутниковой связи с узкополосными сигналами, использующих в качестве ретрансляторов спутники, находящиеся на высокоэллиптической орбите, эффективность использования выделенного для передачи частотного ресурса дополнительно снижается за счет того, что при большой неопределенности частоты, вызванной эффектом Доплера и изменениях времени прихода принимаемых сигналов для снижения взаимных помех приходится вводить защитные интервалы по частоте.

Следовательно, повышение эффективности использования выделенной для передачи информации в указанных системах частотной полосы можно достичь при использовании в качестве переносчиков информации модулированных сигналов с расширенным спектром, иначе называемых сигналами с шумоподобным спектром или широкополосными шумоподобными сигналами (ШШС) [1, 9-10]. При этом каждому пользователю выделяются свои кодированные сигналы (коды), в связи с чем, этот режим называется кодовым разделением ресурсов канала связи. [1-5,7].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель предлагаемого класса широкополосных шумоподобных сигналов с ЛЧМ (ШШС с ЛЧМ) может быть записана следующим образом:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N}}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \cdot \left(t - l \frac{T}{N} \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} \right)^2}{2} \right) \right) + \\ + S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N} - \tau_0}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right)^2}{2} \right) \right); \\ 0, \text{ при } \left[\frac{N-1}{N} \cdot T + T_0 + (1 - v_N) \cdot \tau_0 \right] < t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

где S_0 – амплитуда огибающей сигнала, в дальнейшем постоянная величина, равная 1; v_{l+1} – коэффициент, характеризующий состояние псевдослучайной последовательности (ПСП) и принимающий значения +1 или 0; ω_0 – средняя частота ЛЧМ радиоимпульса; T – длительность информационной посылки; T_0 – длительность ЛЧМ радиоимпульса; τ_0 – величина задержки между началом ЛЧМ радиоимпульса и началом элемента ПСП, соответствующего нулевым значениям коэффициентов v_{l+1} ;

μ – крутизна модуляционной характеристики ЛЧМ радиоимпульса (скорость изменения частоты), связанная с его девиацией частоты ΔF и длительностью T_0 соотношением $\mu = 2 \cdot \pi \cdot \Delta F / T_0$.

Для исследования частотно-временных характеристик разработанного класса канальных сигналов будем использовать преобразование Фурье [11], которое в математическом виде для этого класса сигналов может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{S}(\omega) = & \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \int_{l \cdot (T/N)}^{l \cdot (T/N) + T_0} \exp [j \cdot (\omega_0 \cdot t - \omega_0 \cdot l \cdot (T/N) + \mu \cdot t^2 / 2 - \right. \\ & \left. - \mu \cdot l \cdot (T/N) \cdot t + \mu \cdot l \cdot (T/N)^2 / 2 - \omega \cdot t)] \cdot dt + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \int_{l \cdot (T/N)}^{l \cdot (T/N) + T_0} \exp [j \cdot (\omega_0 \cdot t - \right. \\ & \left. - \omega_0 \cdot (l \cdot T/N + \tau_0) + \mu \cdot t^2 / 2 - \mu \cdot (l \cdot T/N + \tau_0) \cdot t + \mu \cdot (l \cdot T/N + \tau_0)^2 / 2 - \omega \cdot t)] \cdot dt \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя методику, приведенную в [6-7], после ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} \dot{S}(\omega) = & \sqrt{\pi / \mu} \cdot \exp [-j \cdot (\omega_0 - \omega)^2 / (2 \cdot \mu)] \cdot \{ C(x_2) - C(x_1) + j \cdot [S(x_2) - S(x_1)] \} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \exp [-j \cdot \omega \cdot l \cdot (T/N)] + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \exp (-j \cdot \omega \cdot (l \cdot T/N + \tau_0)) \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_2 = \frac{\omega_0 - \omega + \Delta \omega}{\sqrt{\pi / \mu}}$, $x_1 = \frac{\omega_0 - \omega}{\sqrt{\pi / \mu}}$.

Как и в [8] представим частотную характеристику исследуемого сигнала в виде следующих трех главных компонент:

- амплитудный спектр

$$\begin{aligned}
 |\dot{S}(\omega)| = & \sqrt{\pi/\mu} \cdot \{ \{ [\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Cos}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Cos}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0))] \cdot [C(x_2) - C(x_1)] + \\
 & + [\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Sin}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Sin}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0))] \cdot [S(x_2) - S(x_1)] \}^2 + \\
 & + \{ [\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Cos}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Cos}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0))] \cdot [S(x_2) - S(x_1)] - \\
 & - [\sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Sin}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Sin}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0))] \cdot [C(x_2) - C(x_1)] \}^2 \}^{1/2}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $C(x), S(x)$ – косинус и синус интеграла Френеля, соответственно.

- квадратичный фазовый член

$$\Phi_1(\omega) = (\omega_0 - \omega)^2 / (2 \cdot \mu) \tag{5}$$

- остаточный фазовый член

$$\Phi_2(\omega) = -\text{arctg} \left\{ \frac{A \cdot [S(x_2) - S(x_1)] - B \cdot [C(x_2) - C(x_1)]}{A \cdot [C(x_2) - C(x_1)] + B \cdot [S(x_2) - S(x_1)]} \right\} \tag{6}$$

где

$$\begin{aligned}
 A = & \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Cos}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Cos}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)), \\
 B = & \sum_{l=0}^{N-1} v_{l+1} \cdot \text{Sin}(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - v_{l+1}) \cdot \text{Sin}(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)).
 \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из уравнений (4-6) видно, что временная манипуляция (по задержке) ЛЧМ радиоимпульсов по закону кодирующей последовательности проявляется в изменениях амплитудного спектра и остаточного фазового члена. Интересно отметить, что при $\tau_0 = 0$, выражение (3) отображает частотную характеристику группы из N ЛЧМ радиоимпульсов и преобразуется к виду:

$$\dot{S}(\omega) = \dot{S}_1(\omega) \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \exp(-j \cdot \omega \cdot l \cdot T / N), \tag{7}$$

где $S_1(\omega)$ – комплексная частотная характеристика одиночного радиоимпульса.

Из представленных на рисунках 1–2 результатов экспериментальных исследований частотных характеристик исследуемого сигнала при различных значениях базы сигнала ($B = \Delta F \cdot T$) видно, что в результате временной манипуляции (по задержке) ЛЧМ радиоимпульсов по закону ПСП частотная характеристика исходного ЛЧМ радиоимпульса искажается.

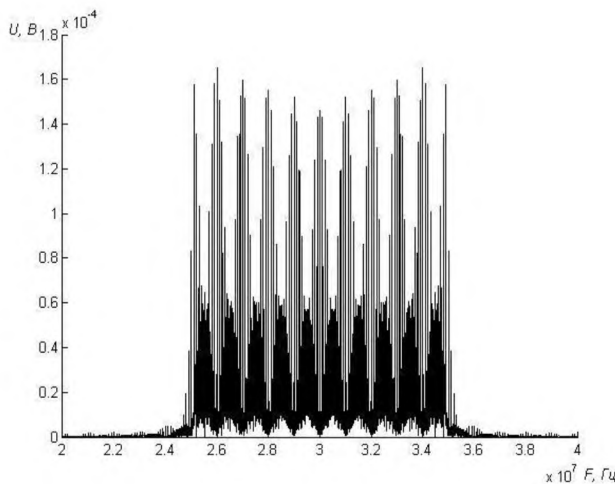


Рис. 1. Амплитудный спектр ШШС с ЛЧМ сигнала, $B=100$

Fig. 1. Amplitude Spectrum of BB NL signal a with LFM, $B = 100$

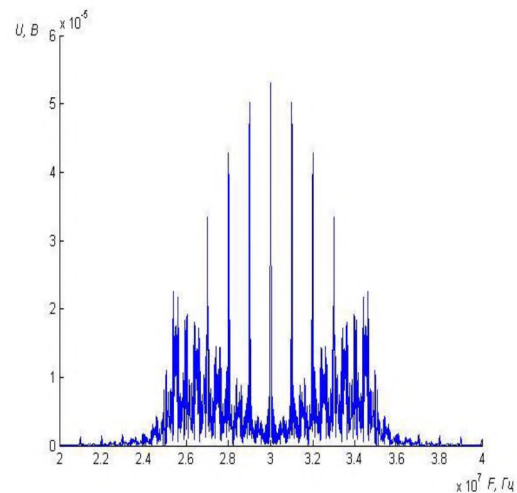


Рис. 2. Амплитудный спектр ШШС с ЛЧМ сигнала, $B=20$

Fig. 2. Amplitude Spectrum of BB NL of signal with LFM, $B = 20$

В частности, амплитудный спектр приобретает изрезанный вид и в нем просматриваются «выбросы», возникающие в результате синфазного сложения спектральных составляющих различных ЛЧМ радиоимпульсов. Между главными «выбросами», обусловленными сложением частотных составляющих различных ЛЧМ радиоимпульсов со сдвигом фаз, кратных 2π , находятся второстепенные «выбросы», определяемые суммой значений составляющих отдельных ЛЧМ радиоимпульсов с произвольными фазами. Причем, при увеличении числа элементов кодовой последовательности и постоянном отношении $(\Delta F * T) / N$ общий уровень частотных составляющих увеличивается. Целесообразно отметить, что интенсивные частотные составляющие амплитудного спектра результирующего сигнала располагаются в полосе частот, примерно равной полосе частот исходного ЛЧМ радиоимпульса, кроме того, ширина этого спектра не зависит от величин $(\Delta F * T) / N$ и τ_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что применение разработанного класса ШШС с ЛЧМ позволяет минимизировать затраты частотно-временных ресурсов спутниковых систем связи за счет эффективного использования выделенной частотной полосы.

Использование полученных основных соотношений для вычисления спектральных характеристик разработанных ШШС с ЛЧМ позволит в зависимости от требований, предъявляемых к их свойствам, обоснованно выбрать произведение длительности сигнала и ширину занимаемой частотной полосы.

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

Список литературы

1. Бархота, В.А., Горшков В.В., Журавлев В.И. Системы связи с расширением спектра сигналов // Итоги науки и техники, Связь. – М.: Сов. Радио, 1973. 424 с.
2. Волков, Л.Н., Немировский, М.С., Шинаков, Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
3. Галкин, В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 432 с.

4. Дятлов, А.П., Дятлов, П.А. Анализ помехоустойчивости обнаружителей связных ЛЧМ сигналов // Специальная техника, 2009. №2. С. 15-22.
5. Зюко, А.Г., Коробов, Ю.Ф. Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1972. – 282 с.
6. Кочемасов, В.Н., Белов, Л.А., Оконешников, В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. 192 с.
7. Кочемасов, В.Н., Кряжев, В.П., Оконешников, В.С. ЛЧМ сигналы с внутримпульсной фазовой манипуляцией // Радиотехника, 1980. т. 35. №2. С. 57-60.
8. Кук, Ч., Бернфельд, М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио. – 1971. 568с.
9. Прокис, Джон. Цифровая связь / Пер. с англ. под. ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
10. Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: издательский дом «Вильямс», 2003. 1104с.
11. Харкевич, А.А. Спектр и анализ. – М.: ГИТТЛ. 1952. – 192 с.

References

1. Barhota, V.A., Gorshkov V.V., ZHuravlev V.I. Communication systems with spreading of signals spectrum // Itogi Nauki i Tekhniki, Svyaz. – М.: Sov. Radio, 1973. 424 p.
2. Volkov, L.N., Nemirovskij, M.S., SHinakov, YU.S. Digital radio communication systems: basic methods and characteristics. – М.: ЕНко-Trendz, 2005. 392. p.
3. Galkin, V.A. Digital mobile radio communication. – М.: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. 432 p.
4. Dyatlov, A.P., Dyatlov, P.A. An analysis of noise immunity of detectors of connected chirp signals // Special'naya tekhnika, 2009. №2. pp. 15-22.
5. Zyuko, A.G., Korobov, YU.F. Theory of signal transmission. – М.: Svyaz', 1972. – 282 p.
6. Kochemasov, V.N., Belov, L.A., Okoneshnikov, V.S. Formation of signals with linear frequency modulation. – М.: Radio i svyaz', 1983. 192 p.
7. Kochemasov, V.N., Kryazhev, V.P., Okoneshnikov, V.S. Chirp signals with intrapulse phase manipulation // Radiotekhnika, 1980. Vol. 35. №2. pp. 57-60.
8. Cook, C., Bernfeld, M. Radar signals. М.: Sov. radio. – 1971. 568p.
9. Prokis, Dzhon. Digital Communication. with English. under. Ed. D.D. Klovskiy. – М.: Radio i svyaz', 2000. 800 p.
10. Sklyar, Bernard. Digital communication. Theoretical bases and practical application. – М.: izdatel'skij dom «Vil'yams», 2003. 1104p.
11. Harkevich, A.A. Spectrum and analysis. – М.: GITTL. 1952. – 192 p.

Белов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и технологии защиты информации

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Белов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Рачинский Сергей Андреевич, аспирант кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Нетеса Вячеслав Владимирович, аспирант кафедры организации и технологии защиты информации

Belov Sergey Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies

Belov Alexander Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

Rachinsky Sergey Andreevich, post-graduate student of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

Netesa Vyacheslav Vladimirovich, postgraduate student of the Department of Organization and Technology of Information Protection