

3. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M. Simple method of protection against UWB pulses based on a turn of meander microstrip line. *Proc. of 16-th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Novosibirsk, Russian Federation, 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/EDM.2015.7184519.
4. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.
5. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Orlov P.E. Rasprostranenie impul'sa v meandrovoj linii s neodnorodnym dijelektricheskim zapolnieniem bez iskazhenij ego formy perekrestnymi navodkami [Signal propagation in the meander line with nonhomogeneous dielectric filling without distortions of its waveform by crosstalk]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2014, no. 4, pp. 36–40.
6. Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Liniya zaderzhki, neiskazhayushhaya impul's* [Non-jamming delay line]. Patent RF, no. 2556438, 2013.
7. Surovtsev R.S. *Vychislitel'nye algoritmy, metodiki i rekomendacii dlja proektirovanija bortovoj radiojelektronnoj apparatury kosmicheskogo apparata s uchetom jelektromagnitnoj sovmestimosti*. Dis. kand. techn. nauk [Numerical algorithms, methods and recommendations for the designing of on-board electronics of the spacecraft based on electromagnetic compatibility. PhD of Engineer. sci. diss.]. Tomsk, 2016. 248 p.
8. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. *Proc. of X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines»*, Omsk, Russian Federation, 2016, pp. 151–154. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819093.
9. Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Jeksperimental'noe podtverzhdenie vozmozhnosti zashhity radiojelektronnoj apparatury ot sverhkorotkogo impul'sa za schet ego razlozhenija v S-sekcii s licevoj svjaz'ju [Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2016, no. 3, pp. 47–50.
10. Kuksenko S.P., Zabolotsky A.M., Melkozzerov A.O., Gazizov T.R. Novye vozmozhnosti sistemy modelirovanija jelektromagnitnoj sovmestimosti TALGAT [New features of electromagnetic compatibility in TALGAT simulation software]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravlenija i radioelektroniki*, 2015, no. 2, pp. 45–50.
11. Proizvodstvo pechatnyh plat. Montazh pechatnyh plat. ООО «MAZhtrans» [PCB production. PCB Assembly. LLC «MAZhtrans»] Available at: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru>, (accessed 01.03.2017).

Received 10.03.2017

УДК 621.391.03

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ OFDM В СЕТЯХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ

Султанов А.Х., Меишков И.К., Меишкова А.Г., Иванов В.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ

E-mail: mik.ivan@bk.ru

Рассматривается способ обработки цифровой информации, позволяющий снизить уровень внеполосного излучения относительно отведенной спектральной маски частот, ширину спектральной плотности мощности группового сигнала в пределах маски и снизить уровень межсимвольных искажений за счет плавного перехода между защитным интервалом и полезной частью символа, выражающийся в искажении спектральных составляющих группового сигнала, вызванном переходным процессом. Показана эффективность предложенных методов и проведена оценка на основе предложенных критериев, сделаны выводы. Полученные результаты можно использовать в сетях цифрового телерадиовещания для повышения эффективности функционирования.

Ключевые слова: ортогональное частотное мультиплексирование, оконная функция, коэффициент скругления спектра, коэффициент формы, цифровое телерадиовещание, внеполосное излучение, спектральная эффективность

Введение

Технология ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex) привлекла обширный объем исследований и технических решений и, как следствие, была использована в различных системах передачи данных и цифрового телерадиовещания (IEEE 802.11ac, DVB, DRM, DAB, DAB+, DMB, HD Radio, РАВИС и др.). Основным преимуществом OFDM является его способность противостоять эффектам многолучевого замирания. При этом достигается улучшенная спектральная эффективность.

Однако используемые в OFDM ортогональные поднесущие с прямоугольной формой модулирующего импульса или «приподнятого косинуса» не позволяют бороться в достаточной степени с такими негативными эффектами, как межсимвольная и межканальная интерференция, интерференция по соседнему каналу, временное смещение символов и смещение поднесущих частот, внеполосное излучение. Для компенсации этих явлений используются различные типы защитных интервалов и виртуальные поднесущие, а также увеличение количества поднесущих частот, снижающие полезную скорость передачи данных и производительность сети.

Однако существуют методы, позволяющие без повышения вычислительной сложности алгоритмов приема и передачи дополнительно снизить негативные факторы, ухудшающие работу системы OFDM. На передающей стороне дополнительно вводятся блоки обработки цифровых данных на основе оконных функций, позволяющих произвести спектральный анализ на ограниченном интервале времени, повысить эффективность работы и получить технологический запас на реализацию более сложной системы в целом. В связи с этим разработка методов повышения эффективности использования технологии OFDM, которые не добавляют вычислительной сложности в алгоритмы обработки сигналов на передающей стороне при сохранении ортогональности поднесущих частот, является актуальной научно-технической задачей.

Решение поставленной задачи

Для решения поставленной задачи была разработана схема, выполняющая оконную обработку сигнала. Данная схема представлена на рис. 1. На передающей части символ OFDM после ОБПФ циклически расширяется, и затем применяется оконная функция таким образом, чтобы она затрагивала только защитную часть

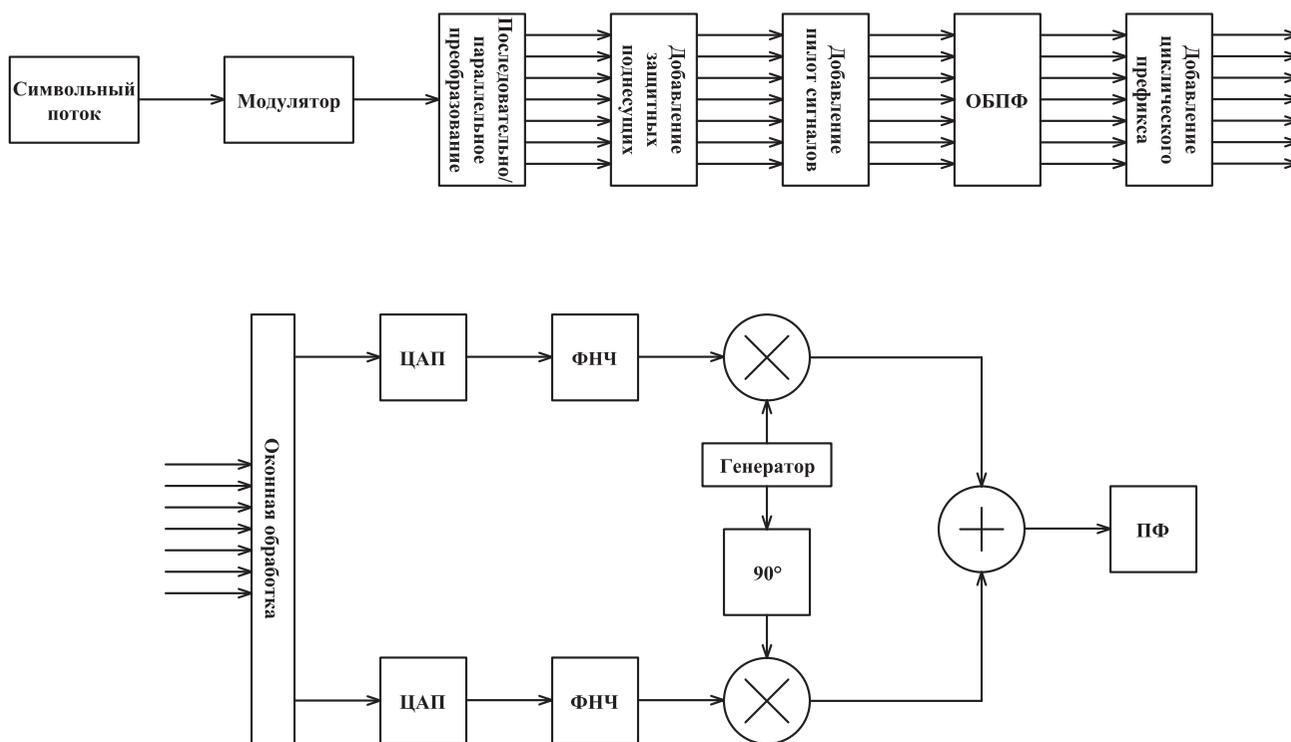


Рис.1. Структурная схема передатчика OFDM

символа – защитный интервал (CP), а оригинальная часть остается неизменной.

Основная цель оконной функции в передатчике в том, чтобы сделать спектр резко идущим вниз. Оконная функция делает амплитуду символа OFDM плавно переходящей к нулю на границах символа. С другой стороны, если оконная функция не используется, то спектр внеполосных сигналов уменьшается довольно медленно из-за резкого фазового перехода на границах символа, что может приводить к внеполосному излучению на смежных полосах частот, которое приводит к нарушению электромагнитной совместимости с другими системами передачи и возникновению интерференции по соседнему каналу (ACI – Adjacent Channel Interference).

Увеличение крутизны спада (спектральной плотности мощности (СПМ) может привести к увеличению символьной скорости системы за счет более крутого спада спектральных составляющих на границе, а также сглаживанию временных переходов между активным интервалом предыдущего символа и защитным интервалом последующего символа. При этом возникают разрывы функций, которые в ограниченном по полосе пропускания канале преобразуются в переходные процессы, искажающие сигналы

защитных интервалов, что приведет к уменьшению межсимвольной интерференции (ISI) и повысит крутизну спектра группового сигнала, и к более эффективному использованию отведенной маски частот. Это уменьшит также влияние межканальной интерференции (ICI) за счет локализации отсчетов FFT. Функция оконного косинуса была применена в IEEE 802.11 WLAN и IEEE 802.16 WMAN [1].

Важнейшим и необходимым для функции формирования импульса условием является то, что преобразование Фурье импульса $p(t)$ должно иметь спектральные нули на частотах $\pm 1/T_{sub}, \pm 2/T_{sub}, \dots$ для обеспечения ортогональности поднесущих. Импульсные формы, которые полностью соответствуют этим требованиям, называются импульсами Найквиста [2-5]. Большинство данных оконных функций использовались на приемной стороне для подавления ICI.

В качестве дальнейшего развития и для получения новых результатов на передающей стороне предлагается оптимизировать оконную функцию ВТРС – ОБТРС и МВН, где используются дополнительные параметры для управления формой спектра. Импульсную характеристику ОБТРС можно выразить как

$$p_{OBTRC}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\alpha)}{2}; \\ \frac{1}{T} \exp\left(\gamma_n \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)^n\right), & \frac{T(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T}{2}; \\ \frac{1}{T} \left\{ 1 - \exp\left(\gamma_n \left(\frac{T(1+\alpha)}{2} - |t|\right)^n\right) \right\}, & \frac{T}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\alpha)}{2}; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (1)$$

где α – коэффициент скругления спектра, n – порядок рекурсивного фильтра, который определяет различные типы импульсов, а γ_n постоянная, определяемая как

$$\gamma_n = -2^n \ln 2 / (\alpha T)^n \quad (2)$$

Далее предлагается решить эту же задачу на основе другой оконной функции – МВН. Для применения этой формы импульса в системе OFDM семейство оконной функции должно быть дополнено условием и иметь вид:

$$p_{MBH}(t, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\alpha)}{2}; \\ \beta - \left(\frac{4\beta-2}{2\alpha T}\right) \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right) + (1-\beta) \cos\left(\frac{\pi}{\alpha T} \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)\right), & \frac{T(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\alpha)}{2}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

Преобразование Фурье окна предлагаемого семейства при $T = 1$ выражается как

$$P_{MBH}(f) = \text{Sinc}(f) \times \left\{ \left(\frac{2(1-\beta)\cos(\alpha\pi f)}{1-4f^2\alpha^2} \right) - \left(\frac{(1-2\beta)\sin(\alpha\pi f)}{\alpha\pi f} \right) \right\}. \quad (4)$$

Параметры β и α , которые являются параметром формы окна и коэффициентом скругления, определяют форму окна и его производительность в системе OFDM. Для оценки предложенного метода повышения эффективности использования спектра проведено имитационное моделирование в пакете MATLAB режима работы OFDM для стандарта DVB-T2 и DRM+. Для этого из [6-7] были выбраны параметры системы, представленные в таблице 1 и задающие режим передачи OFDM.

Таблица 1. Технические характеристики режимов вещания DVB-T2 и DRM+

Технические характеристики системы телерадиовещания	DRM+ Режим E	DVB-T2 Режим 1K
Полоса частот	95 кГц	7,61 МГц
Число поднесущих	213	853
Частотный разнос поднесущих	444,44 Гц	8929 Гц
Длительность символа OFDM	2,25 мс	112 мкс
Длительность защитного интервала	0,25 мс	28 мкс
Общая длительность символа OFDM	2,5 мс	140 мкс

Для оценки работоспособности разработанного метода выбираются и описываются критерии эффективности. Основным критерием для оценки, связанным с формированием сигнала в системах OFDM, является мощность передачи вне полосы (ООВ) на передатчике. Для оценки эффективности предлагается использовать три критерия:

- уровень внеполосного излучения, относительно отведенной маски частот;
- ширина СПМ группового сигнала по маске на уровне первого перегиба и, как следствие, оценка эффективности использования спектра;
- снижение уровня межсимвольных искажений за счет плавного перехода между защитным интервалом и полезной частью символа, выражающегося в искажении спектральных составляющих группового сигнала, вызванного переходным процессом.

Для получения численных показателей используются Рекомендации МСЭ [8-9]. Для оценки по первому критерию проведено сравнение излучения за пределами необходимой ширины полосы. В имитационной модели проводится сравнение уровней внеполосного излучения в области ООВ СПМ группового сигнала для оптимизируемых форм импульса с СПМ группового сигнала, обработанных прямоугольным окном. Для оценки по второму критерию проведено сравнение коэффициента эффективности использования спектра на основе относительной спектральной эффективности (RSE), которая служит для сравнения спектральной эффективности двух подобных типов радиосистем, обеспечивающих одну и ту же службу. В работе проводится сравнение занимаемой полосы для оптимизируемых форм импульсов. В качестве стандартной взята система, использующая преобразование прямоугольным окном. Кроме того, проводится сравнение крутизны спада СПМ группового сигнала для оптимизированных форм импульса со стандартным. Результат приводится в процентном соотношении для каждого сравнения.

Для оценки по третьему критерию проведено имитационное моделирование с целью обработки группы символов OFDM оконной функцией, состоящей из защитного интервала и полезной части. Часть защитного интервала символов сглажена оконными функциями. Далее проводится сравнение частотных характеристик, исследуемых поднесущих.

Оценка полученных результатов

В первую очередь оценивается уровень внеполосного излучения для предложенных оконных функций. По первому критерию оценка будет производиться следующим образом: для оценки уровня внеполосного излучения проводится интегрирование СПМ в частотной области, за пределами выделенной маски частот для стандартной системы и системы с оконным преобразованием MBH и OBTRC. Сравнимые области ООВ для режима DVB-T2 1K и DRM+ проиллюстрированы на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

Далее приводится оценка эффективности использования спектра для предложенных оконных функций. Оценка эффективности использования спектра приводится на основе сравнения ширины полосы частот стандартной системы и системы с оконным преобразованием. Сравнение происходит на уровне первой

точке перегиба для систем DVB-T2 и DRM+. Сравнимые участки проиллюстрированы на рис. 2-3.

По полученным данным производится анализ и строятся зависимости, приведенные на рис. 4-7. На основе данного анализа сделаны выводы о рациональности использования предложенного метода в качестве технического решения для повышения спектральной эффективности и уменьшения уровня внеполосных

составляющих. Из анализа сделаны выводы об оптимальных соотношениях коэффициента скругления и дополнительных свободных параметров (коэффициент формы и степень формы).

На рис. 3 показана зависимость уровня внеполосных спектральных составляющих (в процентах) от коэффициента формы (оконная функция МВН) для режима вещания DVB-T2 и DRM+.

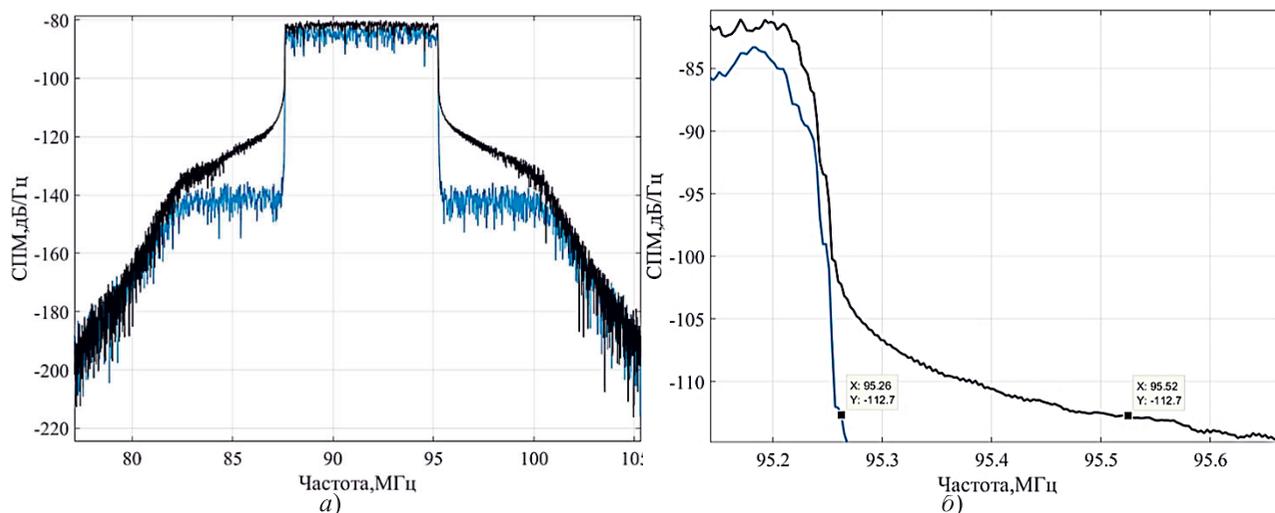


Рис. 2. Сравнение: а) общей СПМ и б) уровня первой точки перегиба спектральной маски в системах DVB-T2 1К

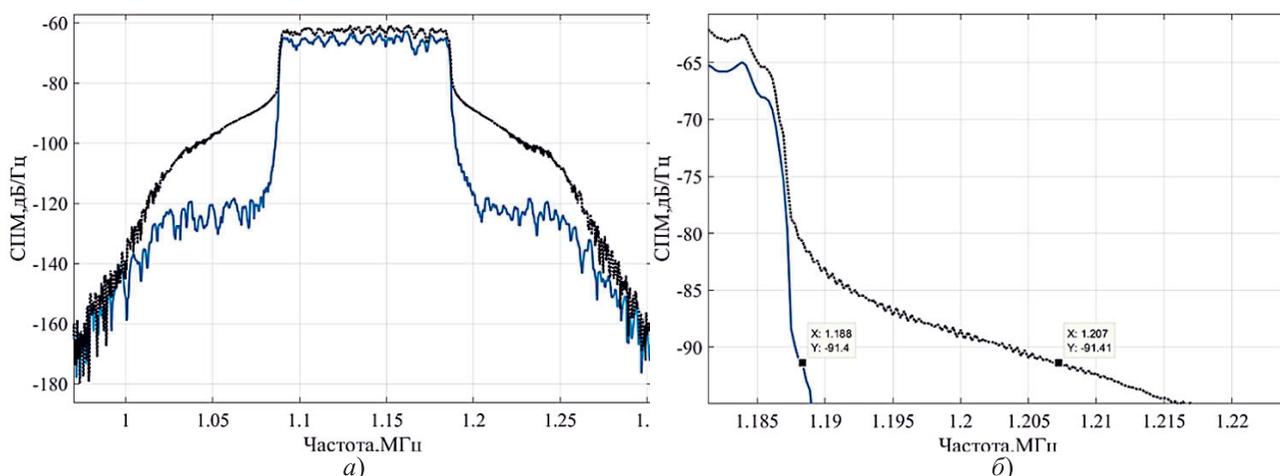


Рис. 3. Сравнение: а) общей СПМ и б) уровня первой точки перегиба спектральной маски в системах DRM+

Из данных рис. 4 следуют выводы: для подавления внеполосных спектральных составляющих при использовании оконной функции семейства МВН оптимальное значение коэффициента формы равно 1. С увеличением коэффициента скругления уровень внеполосной мощности понижается непропорционально (так как высокие значения α ограничивают производительность системы, логично использовать значения до

0,25). По мере увеличения соотношения количества поднесущих на частотную полосу эффективность метода уменьшается.

На рис. 5 показана зависимость RSE (в процентах) от коэффициента формы (оконная функция МВН) для режимов вещания DVB-T2 и DRM+ соответственно. Из приведенных данных сделаны следующие выводы: для увеличения относительной спектральной эффективности

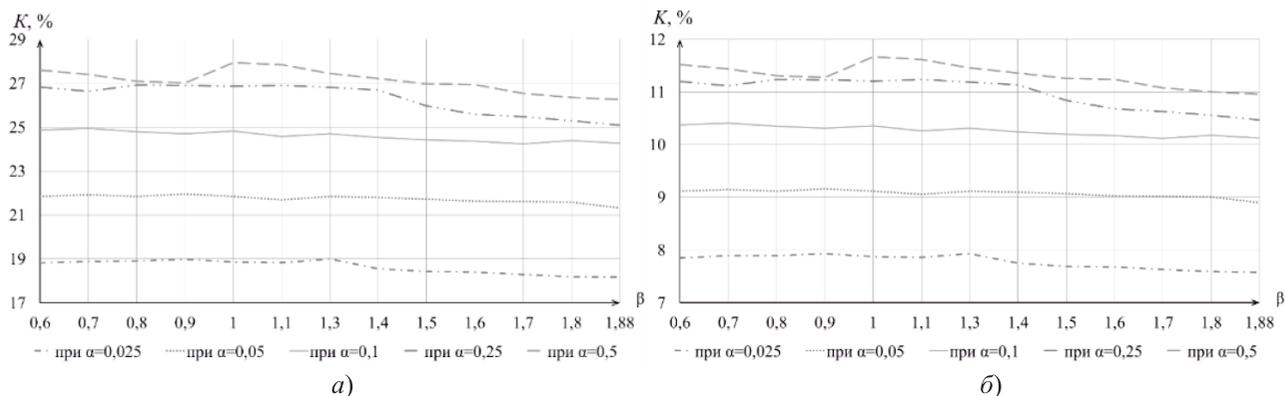


Рис. 4. Зависимость уровня внеполосных спектральных составляющих от коэффициента формы при фиксированном коэффициенте скругления: а) DVB-T2 1К; б) DRM+

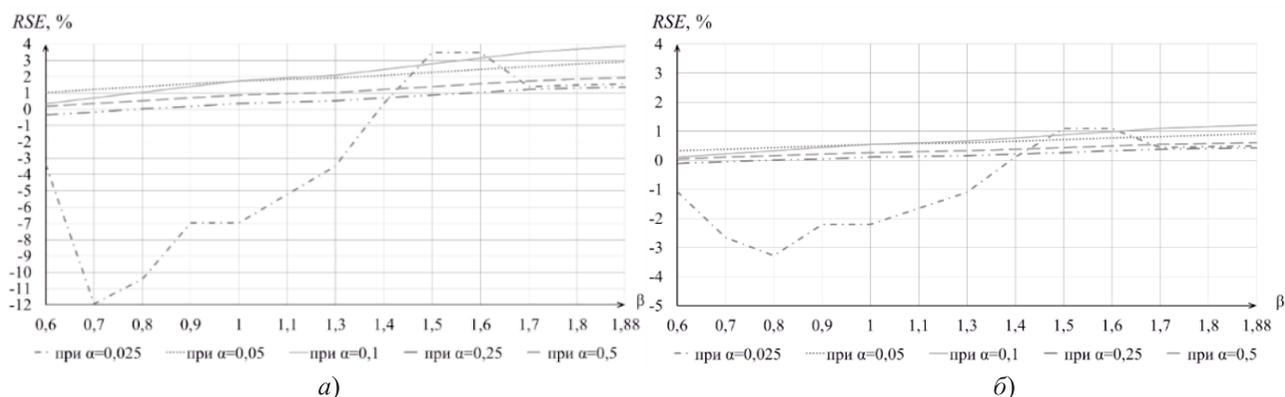


Рис. 5. Зависимость RSE от коэффициента формы при фиксированном коэффициенте скругления а) DVB-T2 1К; б) DRM+

при использовании оконной функции семейства МВН оптимальное значение коэффициента формы является 1,88. С увеличением коэффициента скругления относительная спектральная эффективность изменяется пропорционально. По мере увеличения соотношения количества поднесущих на частотную полосу эффективность метода уменьшается.

Обработка оконной функцией защитного интервала части OFDM символа показано на рис. 6.

Частотные характеристики поднесущих, сглаженных оконной функцией МВН при различных параметрах α , показаны на рис. 7.

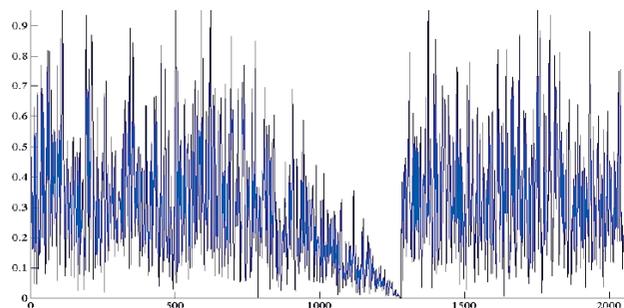


Рис. 6. Обработка оконной функцией защитного интервала для DVB-T2 1К (по вертикали – нормированная амплитуда; по горизонтали – время, сек)

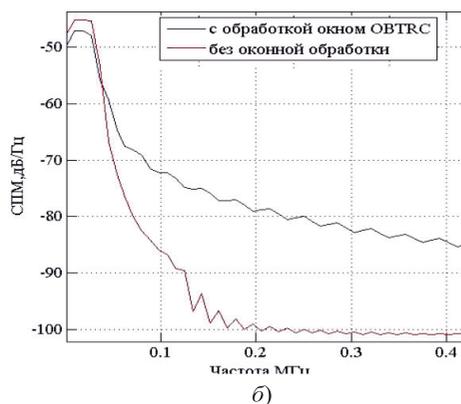
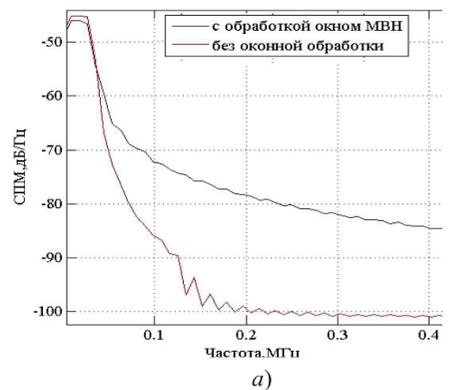


Рис. 7. Частотные характеристики поднесущих, сглаженных оконной функцией: а) МВН $\alpha = 0,25$; б) ОБТРС $\alpha = 0,5$

Заключение

Разработанный метод позволяет уменьшить спад внеполосного излучения в зависимости от выбранного режима БПФ и стандарта вещания, параметров управления формой окна по сравнению с «прямоугольной» формой оконной функции от 5% до 26%, повысить символическую скорость передачи данных до 5% и повысить коэффициент спектральной эффективности [10] до 0,05%.

В результате анализа частотных характеристик поднесущих можно сделать вывод что наблюдается снижение уровня сигнала на 2-4 дБ по сравнению с необработанным символом, что приводит к минимизации частотных выбросов в переходные моменты времени между защитным интервалом и полезной частью символа.

Литература

1. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). / Specific, IEEE, NY 10016-5997 USA. 29 March 2012. – Pp. 1591-1593.
2. Stylianos D.A. Optimized «Better Than» Raised-Cosine Pulse for Reduced ICI in OFDM Systems /Michail Matthaiou , George K. Karagiannidis, A. Josef Nossek // IEEE Doha, Qatar. 03 June 2010. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTEL.2010.5478748
3. Rajiv Saxena, Performance improvement in an OFDM system with MBH combinational pulse shape. / Saxena Rajiv, Hem Dutt Joshi // Digital Signal Processing Volume 23, Issue 1. January 2013. – Pp. 314-321. doi: 10.1016/j.dsp.2012.09.010.
4. Sutton, P. OFDM Pulse-Shaped Waveforms for Dynamic Spectrum Access Networks. / P. Sutton, B. Ozgul, I. Macaluso, L. Doyle // IEEE Singapore, Singapore. – 03 May 2010. – pp. 1-2. doi: 10.1109/DYSPAN.2010.5457921.
5. Mohd Sharique, Transmitter Pulse Shaping to Reduce OOB Power and ICI in OFDM Systems. / Sharique Mohd, Ajit K. Chaturvedi // Wireless Personal Communications. – July 2015. Volume 83, Issue 2. – Pp. 1567–1578. doi: 10.1007/s11277-015-2464-5
6. Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2. / Report TECH 3348 – EBU, Switzerland, Geneva, May 2011. – Pp. 33-35.
7. ETSI ES 201 980 V4.1.1 Digital Radio Mondiale (DRM) / System Specification, France. – 2014. – pp. 134-142, 145-148.
8. Рекомендация МСЭ-R SM.1541-3 Нежелательные излучения в области внеполосных излучений. / ITU Международный союз электросвязи, Женева, 2011. – С. 40-43, 47-48.
9. Рекомендация МСЭ-R SM.1046-2 Определение использования радиочастотного спектра и эффективности радиосистемы. / ITU Международный союз электросвязи, Женева. – 2011. – С. 1-4.
10. Зубарев Ю.Б. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы. / Ю.Б. Зубарев, М.И. Кривошеев, И.Н. Красносельский // Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. – С. 134.

Получено 05.09.2017

Султанов Альберт Ханович, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой телекоммуникационных систем (ТС) Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). Тел. 8-903-310-00-70. E-mail: tks@ugatu.ac.ru

Мешков Иван Константинович, к.т.н., доцент Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-927-927-92-85. E-mail: mik.ivan@bk.ru

Мешкова Алина Газимьяновна, аспирант, инженер Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-927-335-51-54. E-mail: mik.ivan@bk.ru

Иванов Владислав Викторович, аспирант Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-919-611-88-23. E-mail: tks@ugatu.ac.ru

OFDM SPECTRAL EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR DIGITAL BROADCASTING NETWORKS

Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Meshkova A.G., Ivanov V.V.
Ufa state aviation technical university, Ufa, Russian Federation
E-mail: mik.ivan@bk.ru

This paper is focused on studying orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) efficiency improvement methods that do not increase computational complexity of signal processing algorithms of the transmitter while maintaining subcarriers orthogonality. Proposed method is based on applying a window function to the symbol guard interval while keeping the symbol itself un-changed. This approach leads to out-of-band emission decrease, which depends on Fast Fourier Transform (FFT) method, broadcasting standard, and shaping parameters for window function. The study shows that out-of-band emission decrease for the proposed method varies from 5% to 26% compared to rectangular window function, symbol rate increase is up to 5%, and spectral efficiency increase is up to 0.05%. The analysis of subcarriers frequency characteristics shows the reduction of signal level by 2-4 dB compared to the raw symbol, which minimizes unwanted emissions when transiting from guard interval to the main part of the symbol.

Keywords: orthogonal frequency multiplexing, window function, spectrum roll-off factor, shape factor, digital television and radio broadcasting, out-of-band emission, spectral efficiency

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.3.12

Sultanov Albert Khanovich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; the Head of Department of Telecommunication Systems, Professor, Doctor of Technical Science. Tel. +79033100070. E-mail: tks@ugatu.ac.ru.

Meshkov Ivan Konstantinovich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Telecommunication Systems, PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +79279279285. E-mail: mik.ivan@bk.ru.

Meshkova Alina Gazimyanovna, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; PhD student, engineer of the Department of Telecommunication Systems. Tel. +79273355154. E-mail: mik.ivan@bk.ru.

Ivanov Vladislav Viktorovich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; PhD student of the Department of Telecommunication Systems. Tel. +79196118823. E-mail: tks@ugatu.ac.ru.

References

1. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks. Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Specific, IEEE, NY 10016-5997 USA, 29 March 2012. pp. 1591-1593.
2. Stylianos D. Assimonis, Michail Matthaiou, George K. Karagiannidis, Josef A. Nossek. Optimized «Better Than» Raised-Cosine Pulse for Reduced ICI in OFDM Systems. *17th International Conference on Telecommunications IEEE*, Doha, Qatar, 03 June 2010, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTEL.2010.5478748
3. Rajiv Saxena, Saxena Rajiv, Hem Dutt Joshi. Performance improvement in an OFDM system with MBH combinational pulse shape. *Digital Signal Processing*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 314-321. doi: 10.1016/j.dsp.2012.09.010.
4. P. Sutton, B. Ozgul, I. Macaluso, L. Doyle OFDM Pulse-Shaped Waveforms for Dynamic Spectrum Access Networks. *IEEE Singapore*, Singapore, 03 May 2010, pp. 1-2. doi: 10.1109/DYSPAN.2010.5457921.
5. Shariq Mohd, Ajit K. Chaturvedi Transmitter Pulse Shaping to Reduce OOB Power and ICI in OFDM Systems. *Wireless Personal Communications*, 2015, vol. 83, no. 2, pp. 1567–1578. doi: 10.1007/s11277-015-2464-5.

6. Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2. Report TECH 3348 – EBU, Switzerland, Geneva, May 2011. pp. 33-35.
7. ETSI ES 201 980 V4.1.1 Digital Radio Mondiale (DRM). System Specification, France, 2014. pp. 134-142, 145-148.
8. Recommendation ITU-R SM.1541-3 Unwanted emissions in the area of off-frequency emission. International Telecommunication Union, Geneva, 2011. pp. 40-43, 47-48.
9. Recommendation ITU-R SM.1046-2 Determination of the radio-frequency spectrum usage and the radio system efficiency. International Telecommunication Union, Geneva, 2011. pp. 1-4.
10. Yu.B. Zubarev, M.I. Krivosheev, I.N. Krasnoselsky, *Tsifrovoye televizionnoye veshchanie. Osnovy, metody, sistemy* [Digital television broadcasting. Fundamentals, methods, systems]. Moscow, Scientific Research Institute of Radio (NIIR), 2001. 568 p.

Received 05.09.2017

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 681.322

СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЕ ВНЕДРЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕМПЛЫ ЦИФРОВЫХ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Алексеев А.П.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: apa_ivt@rambler.ru

Общепринятым подходом при скрытой передаче информации в мультимедийных контейнерах является использование лишь самых младших разрядов цифровых данных (метод LSB). В работе описывается способ внедрения дополнительной информации в звуковые файлы, при котором используются не только последние (младшие) разряды отсчетов, но и старшие. Приведено экспериментальное обоснование возможности такого внедрения. При этом установлена зависимость слухового восприятия человека от номера использованного разряда отсчета и временного интервала появления информационных семплов. Повышение криптостойкости описанного подхода достигнуто за счет псевдослучайного выбора звукового канала, номера отсчета, номера использованного разряда.

Ключевые слова: отсчеты, формат, последний значащий бит, информационный семпл, маскирующий семпл, старшие разряды, генератор псевдослучайных чисел

Введение

Совершенствование методов защиты информации идет по пути создания большого числа труднопреодолимых барьеров. Эти барьеры включают в себя криптографию, стеганографию, распыление информации в пространстве и времени [1-2]. Совершенствование каждого из перечисленных барьеров идет непрерывно. В данной работе рассматривается новый стеганографический способ скрытой передачи информации в звуковом файле формата WAV. Особенностью рассматриваемого способа является то, что сокрытие осуществляется не только в самом последнем (младшем) разряде цифрового отсчета (семпла), но и в старших разрядах.

Такой подход противоречит классическому способу внедрения данных, который

называется LSB (Least Significant Bit) и согласно которому внедрение дополнительной информации должно производиться лишь в младшие разряды [3]. Возможность незаметного внедрения информации в старших разрядах звукового файла подтверждена экспериментальными исследованиями.

Состояние рассматриваемого вопроса

Существует большое число способов внедрения дополнительной информации в мультимедийные контейнеры. Возможно незаметное размещение скрытой информации на HTML-страницах с помощью непечатаемых знаков, в TCP-пакетах за счет изменения длины пакетов [4], в MIDI-файлах благодаря незначительному изменению громкости и