Ахупова Д.А.
Akhupova D.A.

аспирант кафедры
«Телекоммуникационные системы»,
Уфимский государственный авиационный
технический университет,
г. Уфа,
Российская Федерация

Султанов А.Х.
Sultanov A.Kh.

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Телекоммуникационные системы»,
Уфимский государственный авиационный
технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Мешков И.К.
Meshkov I.K.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Телекоммуникационные системы»,
Уфимский государственный авиационный
технический университет,
г. Уфа,
Российская Федерация

Грахова Е.П.
Grakhova E.P.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Телекоммуникационные системы»,
Уфимский государственный авиационный
технический университет,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 004.378

DOI:

ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

В настоящее время во всем мире идут активные работы по внедрению и расширению областей применения систем беспроводной передачи данных, радиосвязи, радиовещания и телевидения, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Использование данной технологии позволяет эффективно использовать отведенную полосу частот и бороться с помехами, возникающими при передаче полезной информации по радиоканалу при сохранении высоких

скоростей передачи. В качестве областей применения данной технологии можно выделить: в беспроводных каналах связи технология OFDM используется в следующих стандартах цифрового наземного телерадиовещания: DVB-T, DVB-T2, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2lite, T-DMB, ISDB-T, MediaFLO, Eureka-147,

DAB, DAB+, DRM, DRM+, отечественной системе РАВИС; в проводных каналах связи используется в стандарте кабельного цифрового телевизионного вещания DVB-C2 и передачи данных ADSL и VDSL, а также для передачи данных по линиям электропередач на основе стандарта PLC. Активно OFDM используется в стандартах передачи данных IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16d/e, IEEE 802.16m, LTE и LTE-A и будущих сетей поколения 5G. Еще одним из перспективных и интересных применений OFDM является ее использование в сверхширокополосных сетях передачи данных на основе стандарта IEEE 802.15.3a (Ultra-Wideband Technology, UWB) и последующих разработок. Активно OFDM начинает внедряться в спутниковых и радиорелейных системах связи.

В работе предлагается найти оптимальную ширину полосы канала для сверхширокополосных систем связи, чтобы максимально эффективно использовать отведенную полосу частот для заполнения спектральной маски ГКРЧ. Предложен план распределения СШП-OFDM. Проведено имитационное моделирование СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с разной шириной полосы. Представлены результаты расчёта максимальной скорости передачи, длительности символов, ширины полосы поднесущей для СШП-OFDM. Практическая новизна работы состоит в том, что предложен способ заполнения СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ.

Ключевые слова: СШП, OFDM, ГКРЧ, QPSK, спектральная маска, эффективная изотропная излучаемая мощность, многоканальная система связи, спектральная эффективность, широкополосный доступ, электромагнитная совместимость.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF ULTRA-WIDE-BAND COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON TECHNOLOGY OF ORTHOGONAL FREQUENCY MULTIPLEXING

Currently, worldwide, active work is underway to introduce and expand the areas of application of wireless data transmission systems, radio communications, radio broadcasting and television using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology. The use of this technology allows you to effectively use the allotted frequency band and to deal with interference arising from the transmission of useful information over the air while maintaining high transmission rates. As applications of this technology can be identified: in wireless communication channels OFDM technology is used in the following standards of digital terrestrial broadcasting: DVB-T, DVB-T2, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2lite, T-DMB, ISDB-T, MediaFLO, Eureka-147, DAB, DAB+, DRM, DRM+, domestic system RAVIS; in wired communication channels it is used in the DVB-C2 cable digital television broadcasting standard and ADSL and VDSL data transmission standards, as well as for transmission of data via power lines based on the PLC standard. OFDM is actively used in IEEE 802.11a / g / n / ac data transmission standards, IEEE 802.16d / e, IEEE 802.16m, LTE and LTE-A and future 5G generation networks. Another promising and interesting OFDM application is its use in ultra-wideband data networks based on the IEEE 802.15.3a standard (Ultra-Wideband Technology, UWB) and subsequent developments. OFDM actively begins to be implemented in satellite and radio relay communication systems.

The paper proposes to find the optimal bandwidth in order to make the most appropriate use of the presented frequency band for filling the spectral mask of the GRFC. A distribution plan for UWB-OFDM is proposed. The resulting simulation modeling of UWB-OFDM in the frequency range of the GRFC with different bandwidths was carried out. The results of the calculation of the maximum transmission rate, the duration of the characters, the width of the subcarrier band for

UWB-OFDM are presented. The practical novelty of the work lies in the fact that a method has been proposed for filling UWB-OFDM in the frequency range of the GKRCH.

Key words: UWB, OFDM, SCR, QPSK, spectral mask, effective isotropic radiated power, multi-channel communication system, spectral efficiency, broadband access, electromagnetic compatibility.

Переполнение радиочастотного спектра в настоящее время является глобальной проблемой всего информационного мира. В данном контексте расширение «нелицензируемой» части спектра, использование которой не требует получения лицензии, видится выходом из грядущего «кризиса пропускной способности» каналов связи. К системам связи, работающим на безлицензионной основе, относятся сверхширокополосные (СШП) системы связи, предусматривающие использование частот в диапазоне 2,85 – 10,6 ГГц. В конце 2009 года Российская Федерация присоединилась к странам, регулирующим работу СШП систем связи: был принят документ, определяющий предельно допустимые значения излучаемой мощности СШП передающих устройств [1].

Методы формирования СШП сигнала, удовлетворяющего установленным ограничениям, можно разделить на две группы: методы с использованием и без использования несущей частоты [2]. К первой группе относится MB-OFDM (Multiband orthogonal frequency-division multiplexing) – технология формирования СШП сигнала с мультиплексированием по многим ортогональным поднесущим; ко второй – метод формирования

СШП сигнала на основе применения ультракоротких импульсов сложной формы.

Технология MB-OFDM представляется более перспективной, в сравнении с ультракороткими радиоимпульсами, так как не требует использования высокоскоростных генераторов высокой точности. К тому же, благодаря использованию множества поднесущих частот, MB-OFDM позволяет создать многоканальную систему связи и тем самым повысить спектральную эффективность, существенно увеличив процент использования выделенного спектра.

Так, стандарт [3], разработанный для СШП систем связи, работающих в условиях ограничения Федеральной комиссии по связи (FCC, Federal Communications Commission), предусматривает разделение разрешенного диапазона 3,1 – 10,6 ГГц на 14 каналов шириной 528 МГц (рис. 1). Каждый канал в свою очередь делится на 128 поднесущих с шагом 4,125 МГц. Из них используются 122 поднесущие: 100 поднесущих – для модуляции данных, 12 поднесущих – пилотные, применяются для синхронизации, 10 поднесущих – защитные.

Рисунок 1. Структура MB-OFDM сигнала

Каждая поднесущая модулируется посредством четырехпозиционной фазовой модуляции (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying). Для защиты от помех используется кодирование с прямым исправлением ошибок (свер-

точное кодирование) со скоростью 11/32, 1/2, 5/8 и 3/4.

Математическая модель СШП сигнала на основе технологии OFDM (СШП-OFDM)

может быть описана как сумма сигналов основной полосы частот:

$$r_{RF}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} r_k(t - kT_{SYM}) \exp(j2\pi f_k t) \right\} \quad (1)$$

где $\operatorname{Re}(\cdot)$ – действительная часть комплексной переменной, $r_k(t - kT_{SYM})$ – сигнал основной полосы частот k -го символа OFDM, который не равен нулю в интервале от 0 до T_{SYM} , N – количество символов OFDM, T_{SYM} – символный интервал, f_k – центральная частота для k -й полосы. Точная структура k -го символа OFDM зависит от его местоположения в пакете:

$$r_k(t) = \begin{cases} r_{\text{преамбула},k}(t), & 0 \leq k < N_{\text{преамбула}} \\ r_{\text{заголовок},k-N_{\text{преамбула}}}(t), & N_{\text{преамбула}} \leq k < N_{\text{заголовок}} \\ r_{\text{данные},k-N_{\text{преамбула}}}(t), & N_{\text{заголовок}} \leq k < N_{\text{данные}} \end{cases} \quad (2)$$

где $N_{\text{преамбула}}$ – количество символов в преамбуле, $N_{\text{заголовок}}$ – количество символов в заголовке, $N_{\text{данные}}$ – количество символов данных.

Все символы $r_k(t)$ могут быть описаны с использованием обратного преобразования Фурье с определенным набором коэффициентов C_n , где коэффициенты определяются как данные, пилот-сигналы или защитные символы:

$$r_k(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, T_{CP}] \\ \sum_{n=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_n \exp(j2\pi n \Delta f) \cdot (t - T_{CP}), & t \in [T_{CP}, T_{CP} + T_{FFT}] \\ 0, & t \in [T_{CP} + T_{FFT}, T_{CP} + T_{FFT} + T_{GI}] \end{cases} \quad (3)$$

где Δf – заданная частота поднесущей, N_{ST} – общее количество используемых поднесущих, T_{CP} – длительность циклического префикса, T_{GI} – это длительность защитного интервала, T_{FFT} – период IFFT / FFT (Inverse Fast Fourier transform (Обратное преобразование Фурье)/Fast Fourier transform (Быстрое преобразование Фурье)) [2].

Важным фактором при формировании СШП-сигналов является низкий уровень разрешенных значений эффективной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ), который позволяет СШП системам связи работать практически на уровне шума, не создавая помех другим радиослужбам, осуществляя принцип вторичного использования спектра.

На рисунке 2 показана спектральная маска, описывающая распределение ЭИИМ по рабочему диапазону частот для СШП устройств, работающих внутри помещений на территории РФ, определенная Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) [1].

Рисунок 2. Маска максимальной спектральной плотности мощности, утвержденная ГКРЧ РФ

Особенностью ГКРЧ маски является наличие сильных провалов спектральной плотности мощности (СПМ) на некоторых частотах, образующих три «окна», где ЭИИМ максимальна: 3,95–4,425 ГГц – I «окно», 6–8,1 ГГц – II «окно» и 8,625–10,6 ГГц – III «окно». Различаются также и диапазоны частот, выделенные для СШП систем связи: для ГКРЧ он соответствует 2,85–10,6 ГГц, а для маски FCC составляет 3,1 – 10,6 ГГц.

Наличие спектральных «окон» в маске ГКРЧ существенно усложняет задачу формирования СШП сигнала, удовлетворяющего ее ограничениям. Так, в работах [4, 5] были представлены радиоимпульсы сложной спек-

тральной формы, отличающиеся невысокой степенью заполнения спектрального пространства под маской. Использование технологии МВ-OFDM должно существенно повысить данный показатель.

В данном случае необходимо определить оптимальную полосу канала СШП-OFDM системы связи, позволяющую максимизировать скорость передачи информации, а также процент использования выделенного диапазона частот. В ходе поиска были разработаны три варианта заполнения спектральной маски КРЧ, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Предлагаемый частотный план распределения СШП-OFDM, для заполнения спектральной маски ГКРЧ

№	Полоса частот, МГц	Ширина канала, МГц	№ канала	F_n , МГц	$F_{ц}$, МГц	F_b , МГц
1	3950-5470	986	1	4425	4918	5411
			2	6000	6493	6986
	6000-8100	986	3	6986	7499	7972
			4	8625	9118	9611
			5	9611	10104	10597
2	3950-5470	658	1	3950	4279	4608
			2	4608	4937	5266
	6000-8100	658	3	6000	6329	6658
			4	6658	6987	7316
			5	7316	7645	7974
	8625-10600	658	6	8625	8954	9283
			7	9283	9612	9941
			8	9941	10270	10599
3	2850-3375	520	1	2850	3110	3370
	3375-3950	520	2	3370	3630	3890
	3950-5470	520	3	4425	4685	4945
			4	4945	5205	5465
	6000-8100	520	5	6000	6260	6520
			6	6520	6780	7040
			7	7040	7300	7560
			8	7560	7820	8080
	8625-10600	520	9	8625	8885	9145
			10	9150	9410	9670
			11	9670	9930	10 190

При использовании полосы частот шириной 986 МГц можно расположить три полосы частот в трех «окнах», где ЭИИМ макси-

мальна. В данном случае неиспользованными остаются 190 МГц (рис. 3).

Рисунок 3. Результаты имитационного моделирования СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с шириной полосы 986 МГц

При использовании полосы частот шириной 658 МГц можно расположить восемь

полос частот. В данном случае неиспользованными остаются 331 МГц (рис. 4).

Рисунок 4. Результаты имитационного моделирования СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГКРЧ с шириной полосы 658 МГц

При использовании полосы частот шириной 520 МГц можно расположить десять полос частот. В данном случае неиспользованными остаются 975 МГц (рис. 5).

Рисунок 5. Результаты имитационного моделирования СПП-OFDM в диапазоне рабочих частот ГРПЧ с шириной полосы 520 МГц

Передаваемый сигнал должен быть организован в виде последовательности кадров. Кадр имеет длительность T_F , OFDM-символ имеет длительность T_{SYM} и состоит из защитного интервала длительностью T_{GP} , длительности результирующего сигнала T_{FFT} , T_{CP} :

$$T_{SYM} = T_{FFT} + T_{GI} + T_{CP} \quad (4)$$

$$T_{CP} = \frac{32}{DF}, \quad (5)$$

$$T_{GI} = \frac{5}{DF},$$

где DF – предлагаемая ширина полосы.

OFDM-символы содержат полезную информацию (о данных) и опорную информацию (пилотные и нулевые поднесущие). При предлагаемом распределении количество несущих частот будет равно:

$$N_{ST} = N_{SD} + N_{SDP} + N_{SG}, \quad (6)$$

где N_{SD} – 100 частот для модуляции данных, N_{SDP} – 12 поднесущих пилотных, для синхронизации, N_{SG} – 10 частот защитные или нулевые поднесущие.

При этом максимальная скорость передачи в канале будет равна:

$$R_b = \frac{DF}{1+a} mCR \frac{T_{FFT}}{T_{FFT} + T_{GI}} \quad (7)$$

где R_b – максимальная скорость передачи, m – число битов информации, передаваемых на одной несущей, CR – скорость сверточного кода, a – коэффициент скругления спектра.

Рассчитанные параметры передачи сигнала для предлагаемых полос канала отображены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры передачи сигнала для выбранных полос канала

DF , МГц	N_{ST}	T_{GI} , нс	T_{FFT} , нс	T_{CP} , нс	T_{SYM} , нс	Df_p , МГц	CR	R_b , Мбит/с
520	122	9,615	246,15	61,538	317,323	4,0625	11/32	378,466
658	122	7,599	194,529	48,632	250,76	5,141	11/32	478,904
986	122	5,071	129,817	32,454	167,342	7,703	11/32	717,629

Таким образом, в данной работе было предложено несколько методов распределения СШП-OFDM в диапазоне рабочих частот, где ЭИИМ максимальна. Было проведено

имитационное моделирование, получен план распределения полос частот и параметры OFDM сигнала для используемого режима вещания.

Список литературы

1. Приложение к решению ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г. Выписка из решения Государственной комиссии по радиочастотам от 24 мая 2013 г. № 13-18-03 – М., 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70302998/> (дата обращения: 19.09.2017).
2. Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. Видеоинформационные технологии систем связи // Спутник+, 2011. – 295 с.
3. IEEE P802.15.3a Wireless Personal Area Networks – Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a — Anuj Batra et al., Texas Instruments, USA: IEEE, 2003.
4. Grakhova, E.P., Sultanov, A.K., Vinogradova, I.L. et al. Experimental demonstration of high-speed data transmission based on Gaussian pulses for IR-UWB radio-over-fiber systems // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Volume 10342, 2017, 1034209.
5. Grakhova E.P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A.K., Olmos J.J.V., Monroy I.T. Pulse shaping for high capacity impulse radio ultra-wideband wireless links under the Russian spectral emission mask // IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2016. - № 7794774.

References

1. Prilozhenije k resheniju GKRCCh №09-05-02 ot 15 dekabrja 2009 g. Vypiska iz reshenija Gosudarstvennoj komissii po radiochastotam ot 24 maja 2013 g. № 13-18-03/ – Moskva: 2013. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70302998/> (data obrashhenija: 19.09.2017).
2. Zubarev Ju.B., Sagdullaev Ju.S., Sagdullaev T.Ju. Videoinformacionnyje tehnologii sistem svjazi. – Sputnik+, 2011. – 295 s.
3. IEEE P802.15.3a Wireless Personal Area Networks – Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a — Anuj Batra et al., Texas Instruments, USA: IEEE, 2003.
4. Grakhova E.P., Sultanov A.K., Vinogradova I.L. et al. Experimental demonstration of high-speed data transmission based on Gaussian pulses for IR-UWB radio-over-fiber systems // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 10342, 2017, 1034209.
5. Grakhova E.P., Rommel S., Jurado-Navas A., Sultanov A.K., Olmos J.J.V., Monroy I.T. Pulse shaping for high capacity impulse radio ultra-wideband wireless links under the Russian spectral emission mask // IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2016. - № 7794774.