

References

1. Visloguzov V. *Kommersant*. 2012. № 217 (5002).
2. Senashov S. I., Juferova N. Ju., Groshak E. V. *Modelirovanie stoimosti zhil'ja v Krasnojarske* (Modeling the cost of housing in the city of Krasnoyarsk). SibGTU. 2007, 204 p.
3. Senashov S. I., Juferova N. Ju., Surnina E. V. *Vestnik SibGAU*. 2009, № 4 (25), pp. 219–223.
4. Malginov G. N., Sternik G. M. *Rossijskaja jekonomika v 2009 godu. Tendencii i perspektivy*. Moscow, JePP, 2010, vol. 31.
5. Sternik G. M. *Rossijskij rynek zhil'ja v 2011 godu: zatjamvsheesja ozhivlenie* (Russian Housing Market in 2011: a prolonged recovery). Available at: <http://realtymarket.ru/analiti-eskie-materiali/>.

© Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., 2013

УДК 621.391.8

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ OFDM В ТРОПОСФЕРНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ, СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

А. Ю. Строкова¹, А. Н. Фролов¹, А. М. Алешечкин²

¹ОАО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»

Россия, 660021, Красноярск, ул. Декабристов, 19. E-mail:Strokovaaloyna@mail.ru

²Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail:AAleshechkin@sfu-kras.ru

В настоящее время метод OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) набирает все большую популярность. Это основной из возможных методов для использования в будущих беспроводных сотовых системах, подобных 4G, а также данный метод стал популярен в использовании в современном цифровом радио- и телевидении. В связи с этим в настоящей работе рассмотрена целесообразность и эффективность использования OFDM в системах тропосферной связи, а также рассмотрены способы повышения помехоустойчивости таких систем. Показано, что в результате применения метода OFDM и псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), что ранее не было использовано в тропосферных станциях связи (TPC), можно добиться уменьшения влияния быстрых замираний, увеличить показатели качества помехоустойчивости и скорость передачи информации.

Ключевые слова: связь, модуляция, разделение каналов, помехоустойчивость, качество, каналы связи.

EFFICIENCY OF USE OFDM IN THE TROPOSCATTER COMMUNICATION CHANNEL, WAYS OF NOISE STABILITY RISE

A. Yu. Strokova¹, A. N. Frolov¹, A. M. Aleshechkin²

¹JSC “Scientific production enterprise “Radiosvaz”

19 Dekabristov st. Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: Strokovaaloyna@mail.ru

²Siberian Federal University

79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru

Today the OFDM method (orthogonal frequency-division multiplexing) gains the increasing popularity. It is basic of possible methods for use in the future wireless cellular systems similar 4G. Also the given method became popular in use in modern digital radio – and telecasting. In this case, in the present work the expediency and efficiency of use OFDM in the troposcatter communication systems are observed, and also ways of noise stability rise of such systems. It is shown that as a result of application OFDM – method and pseudo – casual operating frequency readjustment (PROF), that has not been used earlier in the troposcatter communication stations (TCS), it is possible to achieve decrease influence of short-term fading, to increase the quality indices of noise stability and speed of information transfer.

Keywords: communication, modulation, frequency division, a noise stability, quality, communication channels.

Впервые метод модуляции на нескольких несущих был использован в военных высокочастотных радио-приемниках в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия. Начиная с 90-х годов, модуляция на нескольких несущих стала использоваться во множестве различных проводных и беспроводных систем связи,

включая цифровое радио- и телевидение в Европе, цифровые абонентские линии DSL (digital subscriber line) с использованием дискретных многочастотных сигналов и в самом последнем поколении беспроводных локальных сетей [1].

К основным достоинствам OFDM относятся:

- устойчивость к многолучевым замираниям;
- противостояние межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими;
- высокая спектральная эффективность;
- возможность увеличения пропускной способности;
- возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации (повышению и анализу помехоустойчивости при передаче и приеме OFDM сигнала посвящено много работ, например, такие как [2–4]).

Благодаря вышеперечисленным положительным характеристикам, OFDM нашло свое применение в широко известных стандартах связи таких как LTE (Long-Term Evolution) – стандарт нового поколения беспроводной сотовой связи и DVB – стандарт цифрового телевидения (DVB – это набор спецификаций, охватывающий кабельное DVB-C (cable), спутниковое DVB-S (satellite) и наземное DVB-T (terrestrial) вещание). Известны работы, посвященные использованию OFDM в системах Wi-MAX, Wi-Fi, LTE и др. [5–8].

Необходимость в использовании метода OFDM в тропосферном канале связи, обусловлена особенностями распространения сигнала при его прохождении через слои тропосферы. К таким особенностям можно отнести замирания сигнала, обусловленные интерференцией нескольких волн, пришедших в точку приема с разным временем задержки.

Известно устройство модуляции-демодуляции тропосферной станции [9], в котором описан способ увеличения скорости передачи дискретной информации за счет выполнения блоков модулятора и демодулятора устройства многоканальными и обеспечения уплотнения линии с последующим объединением каналов в единый групповой поток. Однако данное устройство не обеспечивает борьбы с быстрыми замираниями [10] в тропосферном канале связи, которые могут существенно снизить качество передаваемой информации, вплоть до полной потери связи. Следовательно, цель данной работы – анализ эффективности использования OFDM в тропосферном канале связи и возможности повышения качества помехоустойчивости.

Основная идея, лежащая в основе метода модуляции OFDM – это разбиение цифрового потока с большей скоростью передачи информации R на несколько цифровых потоков (поднесущих) с меньшей скоростью R/n . Поднесущие между собой ортогональны, каждая поднесущая передается в своем частотном канале (на своей несущей частоте). Эта особенность определяет многие положительные качества технологии OFDM, указанные выше. Для наглядного представления на рис. 1, а изображен спектр одной поднесущей OFDM-сигнала, на рис. 1, б изображен спектр OFDM-сигнала в целом. Следовательно, спектральная плотность одного OFDM-символа есть сумма спектров всех поднесущих колебаний, например, на рис. 2 изображена спектральная плотность мощности OFDM-сигнала при 16 поднесущих колебаниях.

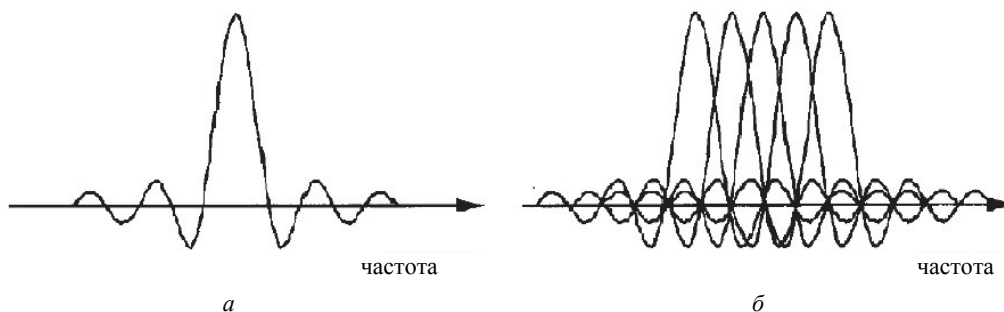


Рис. 1. Спектр одной поднесущей OFDM сигнала (а) и спектр OFDM сигнала (б)

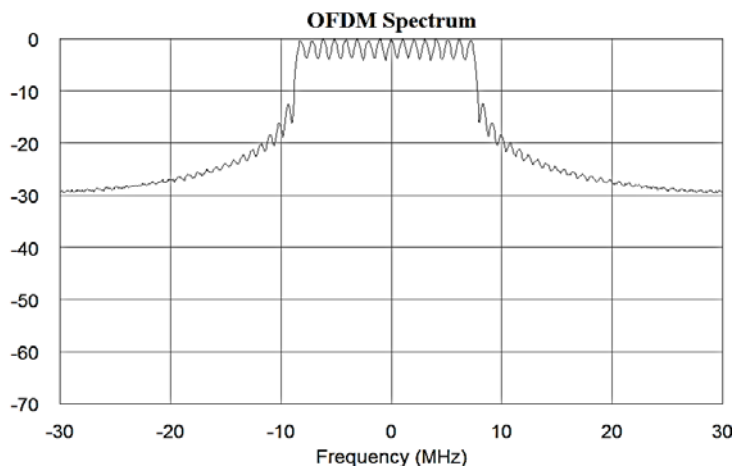


Рис. 2. Спектральная плотность мощности OFDM-сигнала при 16 поднесущих колебаний

Ортогональность цифровых потоков обеспечивается благодаря использованию циклического префикса (защитного интервала), являющегося копией окончания сигнала, размещенного впереди, что помогает избежать межсимвольной интерференции.

Важным путем достижения требуемой помехозащищенности тропосферных линий связи при воздействии преднамеренных помех является использование сигналов с ППРЧ.

Интенсивное развитие метода ППРЧ и его применение началось с 1941 г., что подробно описано в [11].

Для более эффективной борьбы с быстрыми замираниями сигнала и увеличения показателя качества помехоустойчивости предлагается использовать псевдослучайную перестройку рабочей OFDM-полосы.

Суть данного метода состоит в расширении спектра, при котором сигнал занимает полосу частот более широкую по сравнению с полосой, минимально необходимой для передачи информации. Расширение спектра обеспечивается путем скачкообразного изменения несущих частот в выделенном для работы диапазоне. Под скачкообразным изменением частот следует понимать периодическую перестройку нескольких частот, используемых для передачи сигнала [11]. Число перестраиваемых частот и порядок их чередования определяется алгоритмом перестройки, который известен приемнику и передатчику.

Минимальный шаг перестройки частот должен выбираться исходя из условия обеспечения отсутствия взаимной корреляции между сигналами соседних частот [12]. Для достижения максимального эффекта от псевдослучайной перестройки рабочей OFDM-полосы, скорость перестройки должна на порядок превышать частоту быстрых замираний, частота быстрых замираний описана в [13].

Использование режима ППРЧ позволяет увеличить помехоустойчивость связи. Если помехой поражена часть имеющегося диапазона, действие помехи будет только в течение того времени, когда сигнал по закону псевдослучайной перестройки попадает в пораженную полосу частот. Также для борьбы со случайными битовыми ошибками используется помехоустойчивое канальное кодирование, основанное на внесении дополнительной избыточности в передаваемый цифровой поток на стороне кодера с последующей коррекцией возникших в канале ошибок на стороне декодера. Для более эффективной защиты от возникновения ошибок при передаче символов на передающей стороне осуществляется так называемое перемежение, при котором каждый символ кодового пакета передается по отдельному частотному каналу. Перемежение превращает сигнал во временной области в бесструктурную форму, что позволяет бороться с быстрыми замираниями, а также затрудняет создание оптимальных помех. С целью восстановления исходного порядка символов на приемной стороне требуется операция деперемежения символов. Следовательно, применение кодирования и декодирования, перемежения и деперемежения символов как с медленной, так и быстрой перестройкой частоты

позволяет корректировать пакеты ошибок, вызываемых импульсными помехами на отдельных участках диапазона частот тропосферной радиосвязи.

Величина выигрыша в отношении сигнал/помеха G , при воздействии, например гармонической помехи, определяется коэффициентом расширения спектра используемого сигнала, определяемого как отношение полосы частот, используемых ТРС ΔF к информационной полосе частот сигнала $\Delta f_{\text{инф}}$ [14; 15]:

$$G = \Delta F / \Delta f_{\text{инф}}.$$

Например, при значениях полосы частот ТРС $\Delta F = 600$ МГц и скорости передачи сообщений 2 048 кбит/с ($\Delta f_{\text{инф}} = 2,048$ МГц), коэффициент расширения спектра составляет $600/2,048 = 292$, или около 23 дБ. Следовательно, выигрыш в отношении сигнал/помеха будет составлять 23 дБ.

Использование OFDM и ППРЧ в тропосферной связи более эффективно в условиях быстрых замираний по сравнению с классическими методами обработки сигналов (кратность принимаемых копий сигнала за счет частотного, пространственного и других способов разнесения сигнала) благодаря хорошему противостоянию межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими, а также благодаря обеспечению необходимой степени помехоустойчивости, при этом происходит уменьшение влияния задержки сигналов при прохождении через тропосферный канал связи, что позволяет обеспечить максимальную скорость передачи информации.

Внедрение предложенных методов обработки и формирования сигналов позволит создать тропосферные станции связи качественно нового уровня.

Библиографические ссылки

1. Голдсмит А. Мир радиоэлектроники. Беспроводные коммуникации / пер. с англ. Н. Л. Бирюкова, Н. Р. Триски; под ред. В. А. Березовского. М.: Техносфера, 2011.
2. RU 2336651, C2, МПК Н 04 L 27/26, опубл. 20.10.2008.
3. Повышение помехоустойчивости при передаче информации по OFDM-каналу в сложной помеховой обстановке / Андрианов М. Н. и др. // Электросвязь. 2010. № 7. С. 38–41.
4. Адаптивный разнесенный прием сигналов OFDM / Фалько А. И. и др. // Радиотехника. 2011. № 11. С. 13–19.
5. Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX путь к 4G. М.: Техносфера, 2009.
6. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский и др. М.: Техносфера, 2005.
7. Вишневский В. М., Красилов А., Шахнович И. В. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Электроника: Н.Т.Б. 2009. № 1. С. 62–72.
8. Hermann Rohling. OFDM. Concepts for Future Communication Systems. Berlin : Springer, 2011. P. 268.

9. RU 2368062, C1, МПК Н 03 С 1/50, опубл. 20.09.2009.

10. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. 2-е изд., испр. и доп. М. : Сов. радио, 1970.

11. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов и др. М. : Радио и связь, 2000.

12. Давыденко Ю. И. Дальняя тропосферная связь. М. : Военное изд-во М-ва обороны СССР, 1968.

13. Дальняя тропосферная радиосвязь / И.А. Гусятинский и др. М. : Связь, 1968.

14. Диксон Р. К. Широкополосные системы. Выигрыш при обработке и запас помехоустойчивости / пер. с англ. под ред. В. И. Журавлева. М. : Связь, 1979. Гл. 1. С. 13–16.

15. Nard G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radiopositioning system. France : Sercel, 1984. P. 18.

References

1. Goldsmith A. *Besprovodnie kommunikatsii* (Wireless communications). Moscow, Tehnosfera, 2011. 904 p.

2. RU 2336651, C2, IPC Н 04 L 27/26, published 20.10.2008.

3. Andrianov M. N. et al. *Elektrosviaz*, 2010, № 7, pp. 38–41.

4. Falko A. I. et al. *Radiotekhnika*, 2011, № 11, pp. 13–19.

5. Vishnevskiy V. M., Portnoy S. L., Shahnovich I. V. *Entsiclopedia WiMAX put k 4G*. Moscow, Tehnosfera, 2009, 472 p.

6. Vishnevskiy V. M. et al. *Shirikopolosnie besprovodnie seti peredachi danih*. Moscow, Tehnosfera, 2005, 591 p.

7. Vishnevskiy V. M., Krasilov A., Shahnovich I. V. *Tehnologiya sotovoy svyazi LTE – pochti 4G*. Elektronika, N.T.B, 2009, № 1, pp. 62–72.

8. Hermann Rohling. OFDM. Concepts for Future Communication Systems. Berlin, Springer, 2011. 268 p.

9. RU 2368062, C1, IPC Н 03 С 1/50, published 20.09.2009.

10. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnih soobcheniy*. Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.

11. Borisov V. I. et al. *Pomehozashishennost system radiosvazi s rashireniem spectra signalov metodom psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoti*. Moscow, Radio i sviaz, 2000, 384 p.

12. Davidenko Yu. I. *Dalniaya troposfernaya sviaz*. Moscow, Voennoe izdatelstvo Ministerstva Oboroni SSSR, 1968, 212 p.

13. Gusiatskiy I. A. et al. *Dalniaya troposfernaya sviaz*. Moscow, Sviaz, 1968, 248 p.

14. Dikson R. K. *Shirokopolosnie sistemi. Vygrish pri obrabotke i zapas pomehoustoychivosti*. Moscow, Sviaz, 1979, pp. 13–16.

15. Nard, G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radiopositioning system. France, Sercel, 1984, 18 p.

© Строкова А. Ю., Фролов А. Н., Алешечкин А. М., 2013

УДК 62-97/-98

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*

А. А. Ступина¹, А. А. Шигина², А. О. Шигин²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: saa55@rambler.ru

²Сибирский федеральный университет
Россия, 660025, Красноярск, пер. Вузовский, 3. E-mail: shigina_a@mail.ru, shigin27@rambler.ru.

Для оценки эффективности функционирования бурового станка необходимо рассматривать множество структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих разнотипных систем. В данных условиях сложная система образована при взаимодействии всех систем бурового станка, предназначенных для бурения, и горной породы. Со стороны бурового станка особое влияние на процесс оказывают усилие подачи и частота вращения рабочего органа, а также устройство и свойства материалов бурового инструмента. Со стороны горной породы наиболее важное значение имеют прочностные характеристики, которые могут выражаться через показатель буримости, а также структура массива горной породы. Разработана методика определения стойкости шарошечного долота и скорости бурения в зависимости от прочностных характеристик и структуры массива горной породы. Представленная методика позволяет проанализировать соотношение производительности бурового станка шарошечного бурения и ресурса бурового долота при бурении пород, характеризующихся различными показателями буримости, количеством и размером трещин и слоями породы с различными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: эффективность функционирования, буровой станок, горная порода, прочностные характеристики, структура массива, стойкость долот, скорость бурения.

*НИР выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., грант 14.B37.21.0625.