

УДК 621.391.1

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ С OFDM В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ДИАПАЗОНА ОВЧ

А.Л. ХОМИНИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 3 ноября 2020*

Аннотация. Рассматривается возможность использования радиосигналов с множественными несущими с ортогональным уплотнением (OFDM) в тактических системах связи диапазонов очень высоких (ОВЧ) и частично ультравысоких (УВЧ), т.е. от 30 МГц до 512 МГц. Анализируются перспективы развития систем связи с точки зрения увеличения пропускной способности и сопутствующие этому проблемы.

Ключевые слова: пропускная способность, символьная скорость, несущая, межсимвольная интерференция, многолучевое распространение.

Введение

Практически свершившийся полный переход на цифровые методы обработки и передачи речи, изображений и данных оказывает влияние и на использование тактических систем связи, большинство из которых работают в диапазоне частот от 30 до 512 МГц. Долгое время эти системы использовались только для передачи речи, с преимущественным использованием частотной модуляции (ЧМ) и узкополосных, с шириной полосы частот 25, 12,5 или 8,33 кГц, каналов связи. В конце XX века эти системы получили возможность передачи данных со скоростями в пределах от 1,2 до 19,2 кбит/с и в практически неизменном с тех пор виде выпускаются как отечественными, так и зарубежными предприятиями [1–6].

В настоящее время требования к тактическим системам связи, в том числе и системам боевого управления существенно меняются [7]. Они должны обеспечивать не только передачу речи в цифровом виде, но и данных, а желательно еще и видеоинформацию. При этом для передачи речи, в зависимости от требований к качеству и типа кодека, достаточной будет скорость передачи в пределах от 1 до 10 кбит/с, средняя скорость передачи данных может быть невысокой (единицы, максимум десятки кбит/с), но эти данные следуют, как правило, в пакетном режиме и для достижения минимальной задержки их передачи пиковая скорость должна быть достаточно высокой (сотни кбит/с, а в ряде случаев и выше). Если же ставить задачу передачи видео, то здесь потребуются средняя пропускная способность в сотни кбит/с на один канал.

Использование узкополосных каналов с полосами 5/8,3/12,5/25 кГц не позволяет добиться перечисленных скоростей передачи даже при использовании многопозиционных видов модуляции, к тому же существенно снижающих помехоустойчивость. Поэтому очевиден переход к широкополосным системам или за счет объединения нескольких каналов, или за счет использования иной сетки частот, при этом и методы формирования радиосигналов также становятся иными [8, 9]. Подобные решения уже существуют и количество их растет [10–15], прежде всего осваивается диапазон частот от 225 до 450 МГц, при этом может использоваться сетка частот с шагом 125 или 625 кГц и полосой частот радиосигнала 660 кГц или 4 МГц соответственно. В немалой степени этому способствует использование концепции программно определяемого радио (SDR), позволяющей в пределах заданной полосы частот гибко варьировать параметры модуляции и помехоустойчивого кодирования, адаптируя систему к конкретным условиям использования.

В тоже время переход к широкополосным системам порождает проблемы, которые были мало актуальны ранее, одной из наиболее важных которых является влияние на качество связи многолучевого распространения радиоволн (РРВ). Один из способов ее решения и рассматривается далее.

Анализ использования сигналов с OFDM в системах связи диапазона ОВЧ

Известно, что реальная пиковая скорость передачи данных в радиоканале определяется выражением

$$B = \frac{\log_2(M) R \Delta F}{1 + \alpha} = \log_2(M) B_{\text{СИМВ}},$$

где M – размерность сигнального созвездия; R – относительная скорость помехоустойчивого кодирования; ΔF – ширина полосы частот радиоканала; α – коэффициент расширения полосы частот радиосигнала по сравнению с теоретическим пределом (пределом Найквиста), обычно выбирается в пределах $0,1 \dots 0,35$; $B_{\text{СИМВ}}$ – символьная скорость.

Средняя скорость при этом будет несколько ниже, поскольку при ее вычислении учитываются интервалы времени на передачу синхронизирующих и служебных сигналов, пилот-сигналов и защитных интервалов (при наличии), а также процент времени активной работы станции.

В дальнейшем, для упрощения рассуждений будем руководствоваться параметрами символьной скорости, поскольку именно она напрямую определяет длительность символа, важную при анализе межсимвольной интерференции из-за многолучевого РРВ.

Рассмотрим потенциальные проблемы в каналах связи с полосой от 125 кГц до 4 МГц, что соответствует увеличению в $5 \dots 160$ раз по сравнению с используемой в настоящее время полосой 25 кГц. В дальнейшем результаты могут быть экстраполированы и на другие полосы частот. Принимая $\alpha = 0,25$, получим соответствующие значения символьной скорости от 0,1 до 3,2 Мсимв/с.

Межсимвольная интерференция начинает оказывать значительное влияние на качество связи при разности задержек распространения лучей $\Delta t_3 \geq 0,25T_{\text{СИМВ}}$, что при принятых выше значениях символьной скорости равно $2 \dots 0,0625$ мкс и соответствует разности хода лучей $r = \Delta t_3 \times c = 800 \dots 25$ м, здесь c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Расстояние между абонентами типовой тактической системы связи может быть от нескольких десятков метров до нескольких десятков километров, поэтому в условиях многолучевого РРВ, характерного для крупного города либо холмистой местности, такие разности путей лучей легко достижимы. В условиях отсутствия прямой радиовидимости, когда вероятен приход нескольких лучей с примерно равной мощностью, их задержка, приближающаяся к длительности символа, приведет к полной потере связи практически при любом отношении сигнал/шум на входе приемника.

Существует два основных пути решения проблемы многолучевого РРВ – расширение спектра передаваемого сигнала и увеличение длительности символа за счет использования передачи на нескольких несущих.

Первый способ заключается в замене передаваемого символа последовательностью, и широко используется в системах связи с кодовым разделением каналов (CDMA). Однако он имеет два недостатка, существенных в рассматриваемом случае. Во-первых, полоса частот радиосигнала и так предполагается достаточно большой (до 4 МГц), реализовать существенное ее расширение, особенно в диапазоне частот до 225 МГц, не представляется возможным. Во-вторых, для реализации кодового разделения требуется, чтобы уровни сигналов, поступающих на вход приемника от разных абонентов, были близки. В условиях, когда расстояния между абонентами сети могут различаться на несколько порядков, такое реализовать крайне сложно. Тем не менее, системы с прямым расширением спектра являются наиболее вероятным кандидатом для работы в условиях, требующих высокой помехоустойчивости, в том числе и радиоэлектронной борьбы. Естественно, это возможно только при наличии необходимого частотного ресурса.

В настоящей работе анализируется второй путь – использование множественных несущих. При этом скорость передачи на каждой несущей будет снижена в N_A раз, а длительность символа во столько же раз увеличится. Здесь и далее N_A – количество активных (используемых) несущих.

Если принять за допустимую задержку распространения $\Delta t_3 = 10 \text{ мкс}$, что соответствует разности хода лучей $r = 3000 \text{ м}$, то длительность символа должна быть порядка $40 \dots 50 \text{ мкс}$. Приняв полезную длительность символа $T_A = 40 \text{ мкс}$ и относительную длительность защитного интервала (ЗИ) $T_{GI} = 1/4$, получим полную длительность OFDM символа $T_{OFDM} = T_A / (1 + T_{GI}) = 50 \text{ мкс}$. Расстояние между несущими при соблюдении условия ортогональности при этом составит $\Delta F = 1/T_A = 25 \text{ кГц}$, что хорошо согласуется с шагом сетки частот, принятой в нижней части ОВЧ-диапазона.

В этом случае при одинаковых с одночастотным методом условиях использования полосы частот, к примеру, в условном 2 МГц канале можно разместить 64 активных несущих, из которых порядка $50 \dots 60$ будут использованы для передачи данных, остальные – как пилот-сигналы. Достижимая символьная скорость при этом составит

$$V_{\text{симв}} = \frac{1}{T_A(1 + T_{GI})N_A} = 1 \dots 1,2 \text{ Мсимв/с.}$$

Это несколько меньше, чем в одночастотном режиме, что обусловлено наличием пилот-сигналов и защитного интервала, однако помехоустойчивость в условиях многолучевого РРВ обещает быть существенно выше. Кроме того, скорость спада спектральной плотности мощности OFDM-сигнала за пределами активной полосы частот существенно выше, чем у QAM-сигнала, поэтому коэффициент запаса α может быть меньше, соответственно символьная скорость приблизится к одночастотному случаю.

Безусловно, проблемы при использовании OFDM-сигналов тоже есть. Это более высокие требования к стабильности частот гетеродинов передатчика и приемника, необходимость обеспечения частотной и временной синхронизации при приеме, соответственно усложненная конструкция. Также недостатком является значительное отношение пиковой мощности радиосигнала к средней (пик-фактор), из-за чего требуется повышенная линейность выходных каскадов передатчика, что увеличивает энергопотребление. Но в целом эти проблемы решаемы, что подтверждается широким распространением OFDM-систем в цифровом теле- и радиовещании, системах широкополосного беспроводного доступа, сотовых системах связи 4-го (LTE) и последующих поколений [16–18].

Заключение

Проведенный анализ свидетельствует о том, что применение сигналов с OFDM вполне актуально и в системах связи ОВЧ и близких к нему диапазонов с учетом перспектив их развития. Изучение зарубежного опыта показало, что работы в этом направлении ведутся, и достаточно интенсивно [19–21]. Также анализ показывает, что современные тактические системы связи должны быть универсальными, т.е. поддерживать как различные перспективные стандарты связи, так и существующие, вплоть до аналоговых. Концепция SDR вполне позволяет такую реализацию.

Также следует отметить, что в данной статье не ставилась задача привязки к конкретной системе, принятые исходные данные являются типовыми (усредненными), однако при необходимости могут быть уточнены либо экстраполированы на нужный класс систем, либо устройств.

PROSPECTS FOR USE OF OFDM SIGNALS IN VHF RANGE COMMUNICATION SYSTEMS

A.L. KHAMINICH

Abstract. The possibility of using multi-carrier radio signals with orthogonal multiplexing (OFDM) in tactical communication systems of the very high (VHF) and partially ultrahigh (UHF) frequency band, i.e., from 30 MHz to 512 MHz, was considered. The analysis of the development of communication systems in terms of increasing throughput and the accompanying problems was given.

Keywords: throughput, symbol rate, carrier, intersymbol interference, multipath propagation.

Список литературы

1. Портативные радиостанции сети боевого управления [Электронный ресурс] URL: <https://topwar.ru/64725-portativnyue-radiostancii-seti-boevogo-upravleniya.html>.
2. SINCGARS: Семейство радиостанций армии США [Электронный ресурс] URL: <https://trcvr.ru/2016/04/07/sincgars-semejstvo-radiostancij-armii-ssha>.
3. Средства связи и боевая экипировка. Каталог ОАО «Техника связи» [Электронный ресурс]. URL: <https://t-c.by/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-TVN.pdf>.
4. Носимая радиостанция УКВ-диапазона P-188 [Электронный ресурс] URL: <http://www.agat-system.by/upload/iblock/574/574213990e8f7b3c7bf5246d1e60e629.pdf>.
5. Комплекс возимых радиостанций КВ и УКВ диапазонов P-181 [Электронный ресурс]. URL: <https://bte.by/katalog/sredstva-svyazi/kompleks-vozimyx-radiostantsiy-kv-i-ukv-diapazonov-r-181.html>.
6. PR4G F@stnet Product Family [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/radio-communications/land-communications/tactical-radios/pr4g-fstnet>.
7. Joe L. Future army bandwidth needs and capabilities [Электронный ресурс] URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2004/RAND_MG156.pdf.
8. Business Models for new entrants in SDR Tactical Radio Market [Электронный ресурс]. URL: https://www.wirelessinnovation.org/assets/work_products/Reports/winnf-15-p-0064-v1.0.0%20%20sdr%20business%20models.pdf.
9. Blyskun A. [et. al.] //MILCOM 2013 – 2013 IEEE Military Communications Conference, San Diego, CA, 2013, P.396–399.
10. HF XL Concept: the right answer to current crowded HF spectrum [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/radio-communications/land-communications/tactical-radios/hf-wideband>.
11. Wideband vehicular Software Defined Radio (SDR) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/radio-communications/land-communications/tactical-radios/flexnet>.
12. L3HARRIS RF-7880NR. Enhanced High-Capacity Data Radio (EnHCDR) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.harris.com/sites/default/files/downloads/solutions/rf-7880nr-enhcdr-enhanced-high-capacity-data-radio-datasheet.pdf>.
13. L3HARRIS AN/PRC-163. Multi-channel Handheld Radio [Электронный ресурс]. URL: <https://www.harris.com/sites/default/files/an-prc-163-multi-channel-handheld-radio-datasheet.pdf>.
14. TC5 Wideband HF & VHF Modem and ALE Controller Module [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rapidm.com/product/tc5-wideband-hf-vhf-modem-and-ale-controller-module>.
15. The Case for Software-Defined Capabilities [Электронный ресурс]. URL: <https://www.harris.com/perspectives/modernizing-the-battlefield/the-case-for-software-defined-capabilities>.
16. Zhang X., Zhou X. LTE – Advanced Air Interface Technology. CRC Press, 2013.
17. Rumney M. [et al.] LTE and the evolution to 4G wireless: design and measurement challenges. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
18. Hanzo L. [et al.] MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: coherent versus non-coherent and cooperative turbo-transceivers. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
19. Soliman M. [et al.] // International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication. 2018. Vol. 6, Is. 9, P. 70–73.
20. Chang-Ying L. // 2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC), Wuhan, China, 2018, P. 101–110.
21. Puspitaningayu P., Hendranto G. // 2014 6-th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, 2014, P. 1–5.