Разработка метода оценки эффективности приема многочастотных сигналов в условиях многолучевого распространения

А. И. Семенова, С. В. Завьялов, Е. Н. Смирнова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого semenova.aigor@gmail.com, zavyalov_sv@spbstu.ru, katerina.shishina@yandex.ru

Annomauus. This paper presents a study of multi-frequency spectrally efficient frequency division multiplexed (SEFDM) signals in a multipath channel. This article discusses the study of the effectiveness of the use of SEFDM signals in multipath propagation in comparison with OFDM signals. To simulate a multipath channel, two multipath channels are used: Rayleigh and Rice. As a result of the simulation, noise immunity curves were received for the reception of SEFDM and OFDM signals in the conditions of a multipath propagation channel and verification was performed on real scenarios.

Ключевые слова: SEFDM; multipath propagation; Rayleigh channel; Rician channe

I. Введение

На физическом уровне многих современных систем связи используются методы передачи с множеством несущих, поскольку они обеспечивают высокую скорость передачи данных В частотно-избирательных И многолучевых каналах. В стремлении более эффективно использовать полосу частот в 2003 году была предложена новая неортогональная схема, называемая спектральномультиплексированием частотным эффективным с разделением каналов (SEFDM). SEFDM - это метод, улучшенную обеспечивает который спектральную эффективность за счет более плотного расположения поднесущих, в отличии от OFDM [1-3]. Для системы с N поднесущими SEFDM сигнал выглядит следующим образом:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} s_{i,n} e^{\left(\frac{j2\pi n\alpha(t-iT)}{T}\right)},$$

где $\alpha = \Delta fT$ – коэффициент уплотнения, Δf – интервал между поднесущими, T – длительность одного символа SEFDM. N – количество поднесущих частот, а $s_{i,n}$ – комплексный символ, модулированный на n-й поднесущей в *i*-м SEFDM символе.

При распространении сигнала в условиях городской застройки возникает эффект многолучевого распространения, вызванный переотражением лучей, сигала от поверхности зданий, автомобилей и других объектов городской инфраструктуры. Из-за этого на приёмник приходит множество копий одного и того же сигнала с разными уровнями мощности и задержками по времени [4-7].

В работах [8–11] исследуются методы для компенсации межсимвольной интерференции, методы уменьшения уровня внеполосных излучений и пик-фактора при увеличении спектральной эффективности SEFDM сигналов. Актуальным направлением исследований являются методы приёма многочастотных сигналов при присутствии межсимвольной интерференции [6].

Для моделирования многолучевого канала были выбраны две модели:

- канал Райса;
- канал Релея.

Рассмотрим каждый из каналов более подробно.

Канал Райса соответствует случаю, когда присутствует прямая видимость и есть отраженные сигналы, схематично это показано на рис. 1.



— Прямое распространение сигнала

••••••• Отражённый сигнал

- Отражающая поверхность

Рис. 1. Описание канала Райса

Распределение Райса определяется следующей формой [15]:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I\left[\frac{rs}{\sigma^2}\right],$$
 (1)

где r – это независимая случайная величина, имеющая нормальное распределение, σ^2 – дисперсия, s – мат. ожидание. I – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Канал Релея соответствует случаю, когда нет прямой видимости и приём осуществляется только отраженных сигналов, схематично это показано на рис. 2.



Прямое распространение сигнала

----- Отражённый сигнал

—— Отражающая поверхность

Рис. 2. Описание канала Релея

Распределение Релея определяется следующим образом [15]:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (2)$$

где r — это независимая случайная величина, имеющая нормальное распределение, $\sigma 2$ — дисперсия, s — мат. ожидание.

Целью работы является разработка метода оценки эффективности приёма многочастотных спектрально эффективных SEFDM сигналов в условиях многолучевого распространения. Для имитации многолучевого канала используются два типа каналов: Рэлея и Райса.

II. ОПИСАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКА И ПРИЁМНИКА SEFDM СИГНАЛОВ

Рассмотрим алгоритм работы передатчика SEFDM сигналов, который представлен на рис. 3 и описан в работе [10, 12, 16].



Рис. 3. Формирователь SEFDM сигналов

Структура преамбулы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Вид преамбулы в частотной области

Преамбула формируется на основе пилотных поднесущих, используемых в SEFDM символах. Для повышения помехоустойчивости в преамбуле модулируется каждая вторая поднесущая, она обладает автокорреляционными хорошими свойствами BO временной области [16].

Алгоритм работы приёмника SEFDM сигналов представлен на рис. 5, подробное описание представлено в работе [13].



Рис. 5. Схема приёмника SEFDM сигналов

Для имитационной модели приёмопередатчика SEFDM сигналов были выбраны следующие параметры для реализации [14], которые описаны в [16]: количество поднесущих частот – 256, количество используемых поднесущих частот – 192, размер циклического префикса – 64, значение коэффициента уплотнения $\alpha = 0.8...1$, модуляция – BPSK. При расчёте вероятности ошибки на каждую точку по отношению сигнал-шум передавалось не менее 10^7 информационных бит.

III. Описание имитационной модели

Моделирование многолучевого распространения проводилось в среде Matlab. В качестве параметров канала была выбрана стандартная модель EPA (Extended Pedestrian A model (EPA)) [17], соответствующая случаю движения пешехода. EPA является расширенной моделью пешехода. Эта модель используется для формирования многолучевого канала в беспроводных системах связи. Эта модель основана на модели пешехода А (Международного союза электросвязи (ITU)). Модель канала имеет более широкую полосу пропускания 20 МГц. Скорость движения объекта составляет 3 км / час.

Модель ЕРА применяется для моделирования многолучевого распространения в сетях стандарта 4G и может быть обобщена на стандарт 5G [19].

Параметры модели: 5 лучей, параметры лучей приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ МНОГОЛУЧЕВОГО КАНАЛА.

Время задержки, нс	Относительная мощность, дБ
0	0.0
30	-1.0
70	-2.0
90	-3.0
110	-8.0

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

6 И 7 представлены Ha рисунке кривые помехоустойчивости SEFDM сигнала для разных значений коэффициента уплотнения для однолучевого канала с АБГШ. Вследствие уменьшения коэффициента уплотнения ухудшается помехоустойчивость приёма, которое вызвано влиянием соседних поднесущих друг на друга. В работе использовался линейный эквалайзер по пилотным поднесущим.

При уменьшении частотного разноса между поднесущими до значения 0,9 возникает энергетический проигрыш равный 0,5 дБ. Дальнейшее уменьшение частотного разноса приводит к интерференции. Помехоустойчивость приёма SEFDM сигнала при наличии эквалайзера ухудшается, поскольку в однолучевом канале передачи эквалайзер вносит ошибку, поэтому его следует применять в многолучевом канале.

Результаты моделирования для канала Рэлея приведены на рис. 8.



Рис. 6. Зависимость вероятности ошибочного приёма от отношения сигнал-шум для SEFDM при разных значениях коэффициента уплотнения в канале с АБГШ (без эквалайзера)



Рис. 7. Зависимость вероятности ошибочного приёма от отношения сигнал-шум для SEFDM при разных значениях коэффициента уплотнения в канале с АБГШ (с эквалайзером)



Рис. 8. Зависимость вероятности ошибочного приёма от отношения сигнал-шум для SEFDM для разных значений коэффициента уплотнения в многолучевом канале Рэлея

Результаты моделирования для канала Райса приведены на рис. 9.



Рис. 9. Зависимость вероятности ошибочного приёма от отношения сигнал-шум для SEFDM для разных значений коэффициента уплотнения в многолучевом канале Райса

Результаты имитационного моделирования показали, что линейный эквалайзер улучшает помехоустойчивость приёма SEFDM сигнала в канале с многолучевым распространением сигнала, как это видно на рис. 8 и 9. Без эквалайзера возникает неубывающая ошибка при росте ОСШ (кривые помехоустойчивости выглядят как горизонтальные прямые) [18].

V. Выводы

проведены в работе исследования влияния многолучевого канала распространения на приём SEFDM сигналов. Разработана имитационная модель приёмникапередатчика SEFDM сигналов в условиях многолучевого канала распространения сигнала. Была предложена методика оценки эффективности приема многочастотных сигналов в канале с замираниями. Показано, что при добавлении канала с замираниями необходимо применять эквалайзер. Дальнейшие исследования будут посвящены применению симулятора многолучевого распространения, представленного в работе [14]. Так как использование симулятора многолучевого позволит применить разработанную модель для широкого спектра сценариев при различном расположении приёмного и передающего что может быть важным для вопросов модуля. определения оптимального расположения антенн на промышленных объектах, для вопросов расчёта пропускной способности телекоммуникационной системы в сложной помеховой обстановке.

Список литературы

- Ghannam H., Darwazeh I. SEFDM: Spectral Efficiency Upper Bound and Interference Distribution // 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 18-20 July 2018 / Budapest, Hungary, 2018. Pp. 1-6.
- [2] Ghannam H., Darwazeh I. Power Allocation for Detection Performance Enhancement of SEFDM Signals // 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 9-12 Sept. 2018 / Bologna, Italy, 2018. Pp. 584-585.

- [3] Ozan W, Ghannam H., Haigh P.A., Darwazeh I. Experimental implementation of real-time non-orthogonal multi-carrier systems in a realistic fading channel // 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 15-18 Jan. 2018 / Anaheim, CA, USA, 2018. Pp. 121-124.
- [4] Xu T., Darwazeh I. Experimental Validations on Self Interference Cancelled Non-Orthogonal SEFDM Signals // 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 3-6 June 2018 / Porto, Portugal, 2018. Pp. 1-5.
- [5] Gelgor A., Gorlov A., Nguyen V.P. Performance analysis of SEFDM with optimal subcarriers spectrum shapes // 2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 5-8 June 2017 / Istanbul, Turkey, 2017. Pp. 1-5.
- [6] Gorbunov S., Rashich A. BER Performance of SEFDM Signals in LTE Fading Channels // 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 4-6 July 2018 / Athens, Greece, 2018. Pp. 1-4.
- [7] Vasilyev D., Rashich A. SEFDM-signals Euclidean Distance Analysis // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 22-23 Oct. 2018/ St. Petersburg, Russia, 2018. Pp. 75-78.
- [8] Гельгор А.Л., Горлов А.И., Нгуен В.Ф. Повышение спектральной и энергетической эффективности сигналов sefdm путем использования оптимальных импульсов в качестве формы спектров поднесущих. Радиотехника. М.: Изд-во Радиотехника. 2018. С. 49-56.
- [9] Рашич А.В., Горбунов С.В., Урванцев А.С. Помехоустойчивость приема sefdm-сигналов в канале с частотно-селективными рэлеевскими замираниями. Радиотехника. М.: Изд-во Радиотехника. 2018. С. 57-62.
- [10] Рашич А.В., Урванцев А.С. Формирование и прием сигналов с неортогональным частотным уплотнением и гладкими огибающими // DSPA: вопросы применения цифровой обработки сигналов.М.: Изд-во РНТОРЭС им. А.С. Попова. 2018. Т. 8, № 2 –С. 156-161.
- [11] Завьялов С.В., Макаров С.Б., Волвенко С.В., Дун Гэ, Положинцев Б.И. Оценка энергетической эффективности приема многочастотных оптимальных sefdm-сигналов с пониженным значением пик-фактора. Радиотехника. М.: Изд-во Радиотехника. 2018. С. 31-41.
- [12] Смирнова Е.Н., Завьялов С.В. Алгоритм формирования и приёма sefdm-сигналов на основе блоков бпф/обпф для sdr-платформы // 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и её применение" DSPA-2018. М.: Изд-во ИД Манускрипт. С. 193-199.
- [13] Семенова А.И., Михайлов А.С., Смирнова Е.Н. Исследование эффективности применения SEFDM сигналов при многолучевом распространении // 74-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: сб. тр. 74-й науч.-техн. конф., посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 20–28 апреля 2019 г. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. с. 93-96.
- [14] Соломицкий Д.Н., Михайлов А.С., Васильев Д.С., Казюк А.Е., Завьялов С.В., Волвенко С.В., Удодов А.Н. Программный комплекс трёхмерного моделирования многолучевого распространения сигналов систем связи // 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и её применение" DSPA-2018. М.: Изд-во ИД Манускрипт. С. 187-192.
- [15] Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.:Радиотехника, 2003. 400 с.
- [16] Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. Пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 179 с.
- [17] ETSI TR 138 901 V14.0.0(2017-05) Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz
- [18] M. Gupta, R. Nema, R. Shankar and at al. Bit Error Rate Perfomance in OFDM System Using MMSE & MLSE Equalizer Over Rayleigh Fading Channel Through The BPSK,QPSK,4 QAM & 16 QAM Modulation Technique // International Journal of Engineering Research and Applications. 2011. Pp 1005-1011.
- [19] H. Venkataraman, R. Trestian. 5G Radio Access Networks: Centralized RAN, Cloud-RAN and Virtualization of Small Cells. 2017. 295 C.