

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО ИНТЕРВАЛА В СИСТЕМАХ OFDM ДЛЯ БОРЬБЫ С РАСПРОСТРАНЕНИЕМ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЗАДЕРЖКИ В КАНАЛАХ С ПАМЯТЬЮ

Семенов Е.С.

Волгоградский государственный университет, Волгоград, РФ

E-mail: semenov.evgeniy@volsu.ru

В статье рассматриваются подходы к формированию защитных интервалов в системах OFDM (ортогональное частотное мультиплексирование), которые вставляются между блоками передаваемых символов в OFDM системах для предотвращения межсимвольной интерференции. Зачастую используются два способа, с помощью которых защитный интервал может быть вставлен в конце передаваемого символа системы OFDM. Один из них – это нулевое заполнение, который заполняет защитный интервал нулями, а другой – так называемый циклический префикс, который является циклическим расширением символа OFDM, а в дальнейшем защитный интервал удаляется на приемной стороне в обоих случаях. В данном исследовании приведены результаты компьютерного моделирования для оценки импульсной характеристики многолучевых каналов с памятью, при использовании различных схем формирования защитного интервала.

Ключевые слова: защитный префикс, каналы с памятью, обработка сигналов OFDM в каналах с памятью, оценивание импульсной характеристики методом регуляризации, межсимвольная интерференция, циклический префикс

Введение

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) системы получили широкое применение, так как в них реализованы спектрально эффективные методы широкополосной беспроводной связи при высоких скоростях передачи данных по каналам с памятью.

OFDM системы, благодаря использованию дискретного преобразования Фурье, завоевали свою популярность благодаря простоте устранения эффекта межсимвольной интерференции (МСИ) в канале с рассеиванием вследствие расширения интервала обработки каждого циклического префикса (ЦП) на его величину. OFDM символа, так как на полученном расширенном интервале восстанавливается ортогональность поднесущих колебаний и демодуляция сводится к корреляционной обработке при условии, что параметры канала на интервале обработки OFDM символа известны в месте приема [1].

За счет вставки защитного интервала в структуру OFDM сигнала получается система, инвариантная по отношению к многолучевому распространению сигнала. При этом длительность ЦП должна быть не меньше временного интервала рассеивания энергии сигнала, что позволяет при обработке игнорировать неизбежно возникающую межсимвольную интерференцию (МСИ).

Модели защитных интервалов

Существуют способы, с помощью которых защитный интервал может быть вставлен в конце передатчика системы OFDM. Один из них – нулевое заполнение (НЗ), который заполняет защитный интервал нулями, а другой – ЦП, который представляет собой циклическое расширение символа OFDM, где в обоих методах защитный интервал удаляется на приемной стороне.

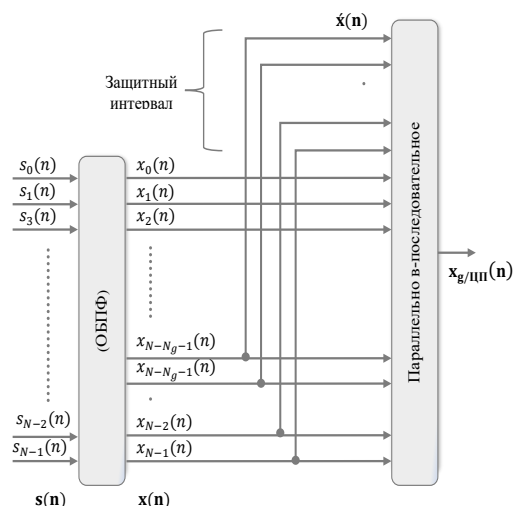


Рисунок 1. Вставка циклического префикса

Циклический префикс добавляется таким образом, что каждому символу OFDM предшествует ко-

пия конечной части этого же символа (рисунок 1).

Для канала с импульсной характеристикой $\mathbf{h} = [h_0, \dots, h_L]^T$, представленной $(L+1)$ отсчетами $h_i, i=0, \dots, L$ во временной области, принятый сигнал с защитным интервалом $\mathbf{r}_{g/цп}(n)$ может быть записан в виде [2]:

$$\mathbf{r}_{g/цп}(n) = \mathbf{H}_{\text{ISI}} \mathbf{x}_{g/цп}(n) + \mathbf{H}_{\text{ISI}} \mathbf{x}_{g/цп}(n-1),$$

где $\mathbf{H}_{\text{ISI}}$ представляет межсимвольную помеху, генерируемую внутри блока OFDM в момент времени n :

$$\mathbf{H}_{\text{ISI}} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ h_1 & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ h_{L-1} & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h_{L-1} & \dots & h_1 & h_0 \end{bmatrix}_{N_t \times N_t}.$$

$\mathbf{H}_{\text{ISI}}$ соответствует межблочной помехе между двумя последовательными передачами блока OFDM в момент времени n и имеет вид:

$$\mathbf{H}_{\text{ISI}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & h_{L-1} & \dots & h_2 & h_1 \\ \vdots & \ddots & & & h_2 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & h_{L-1} & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}_{N_t \times N_t}.$$

Защитный интервал $N_{\text{НЗ}}$ заполняется нулями в конце каждого блока вместо вставки циклического префикса, как показано на рисунке 2, где $\mathbf{s}(n)$ – входные данные блока обратного преобразования Фурье, соответствующие переданным символам поднесущими, а $\mathbf{x}(n)$ – выходные Данные блока обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ).

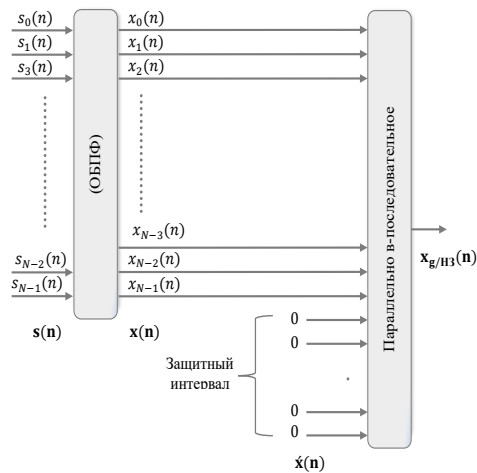


Рисунок 2. Вставка защитного интервала НЗ

В этом случае принятый сигнал с защитным интервалом записывается в виде:

$$\mathbf{r}_{g/цп}(n) = \mathbf{H}_{\text{ISI}} \mathbf{x}_{g/цп}(n) + \mathbf{H}_{\text{ISI}} \mathbf{x}_{g/цп}(n-1).$$

Модель системы НЗ

Предлагаемая система OFDM с защитным интервалом с НЗ показана на рисунке 3.

На передаче каждая последовательность $\mathbf{d}_i$ модулирует соответствующие поднесущие и на выходе блока ОБПФ формируются отсчеты комплексной огибающей OFDM символа. В конец каждого блока вставляется последовательность нулей (НЗ) длиной L . После добавления нулей формируется сигнальный вектор $\mathbf{s}_i$, который в последовательном режиме передается по каналу связи [2].

Матричное представление принятого сигнала $\mathbf{y}_i$, с учетом линейности канала связи, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H} \mathbf{F}_N^H + \mathbf{v}_i,$$

где $\mathbf{y}_i$ имеет длину $N + L$, $\mathbf{v}_i = [v_{i,0}, \dots, v_{i,N+L-1}]^T$ и является аддитивным белым гауссовым шумом, $\mathbf{H}$ – матрица, характеризующая свойства канала, размером $(N + L) \times N$ записывается как:

$$\mathbf{H}_{\text{ISI}} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & h_1 & \ddots & \ddots \\ h_L & \vdots & \ddots & h_0 \\ 0 & h_L & \ddots & h_1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & \dots & h_L \end{bmatrix}.$$

Матрица $\mathbf{F}_N^H$ – $N \times N$ – матрица ОБПФ, которая является эрмитово-сопряженной матрице $(\mathbf{F}_N)$ и имеет вид:

$$\mathbf{F}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi \frac{1}{N}} & \dots & e^{-j2\pi \frac{N-1}{N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-j2\pi \frac{N-1}{N}} & \dots & e^{-j2\pi \frac{(N-1)^2}{N}} \end{bmatrix}.$$

Вычислительным преимуществом использования НЗ является то, что приемнику не требуются дополнительные ресурсы для удаления части НЗ из структуры символа OFDM, как это требуется в системах с циклическим префиксом [3].

Для реализации оптимальных и субоптимальных алгоритмов демодуляции сигналов OFDM в условиях действия рассеяния и аддитивных помех требуется знание импульсной характеристики (ИХ) канала связи [4]. Для оценки импульсной характеристики канала связи в структуре группового сигнала предусматриваются пилот-символы OFDM, информационное содержание которых известно в месте приема [5].

В работах [3; 6; 7] рассматривались и предлагались различные подходы к решению задачи оценки импульсной характеристики канала связи. Наиболее эффективным (по критерию минимума среднеквадратической ошибки) можно считать подход, связанный с решением «обратной задачи», когда импульсная характеристика оценивается по наблюдаемому сигналу при известной модулирующей дискретной последовательности $\mathbf{d}_i$ [8]. Как показано в [9], наилучшие характеристики качества оценки импульсной характеристики по используемому критерию реализуются с помощью алгоритма регуляризации решения обратной задачи по методу А.Н. Тихонова.

Ниже, при сравнении результатов моделиро-

вания двух структур формирования защитного интервала символов OFDM с целью получения оценок отсчетов импульсной характеристики использовался именно метод регуляризации решения обратной задачи, при этом предполагалось, что значение периода вставки пилот-символов в структуре группового сигнала при изменении свойств канала во времени позволяло использовать оценки импульсной характеристики канала по первому пилот-символу рассматриваемого интервала.

Компьютерное моделирование

В соответствии с результатами работы [3], где описан алгоритм формирования защитного интервала на основе формирования циклического префикса, проведено компьютерное моделирование системы, содержащей 16 поднесущих (QAM-16 - OFDM).

Методы оценки импульсной характеристики канала, рассмотренные в [1; 7], позволили оценить качество оценки ИХ при использовании ЦП и НЗ в качестве защитного интервала с использованием нормализованной (нормированной) минимальной среднеквадратической ошибки оценки (NMSE), определяемой как [5]:

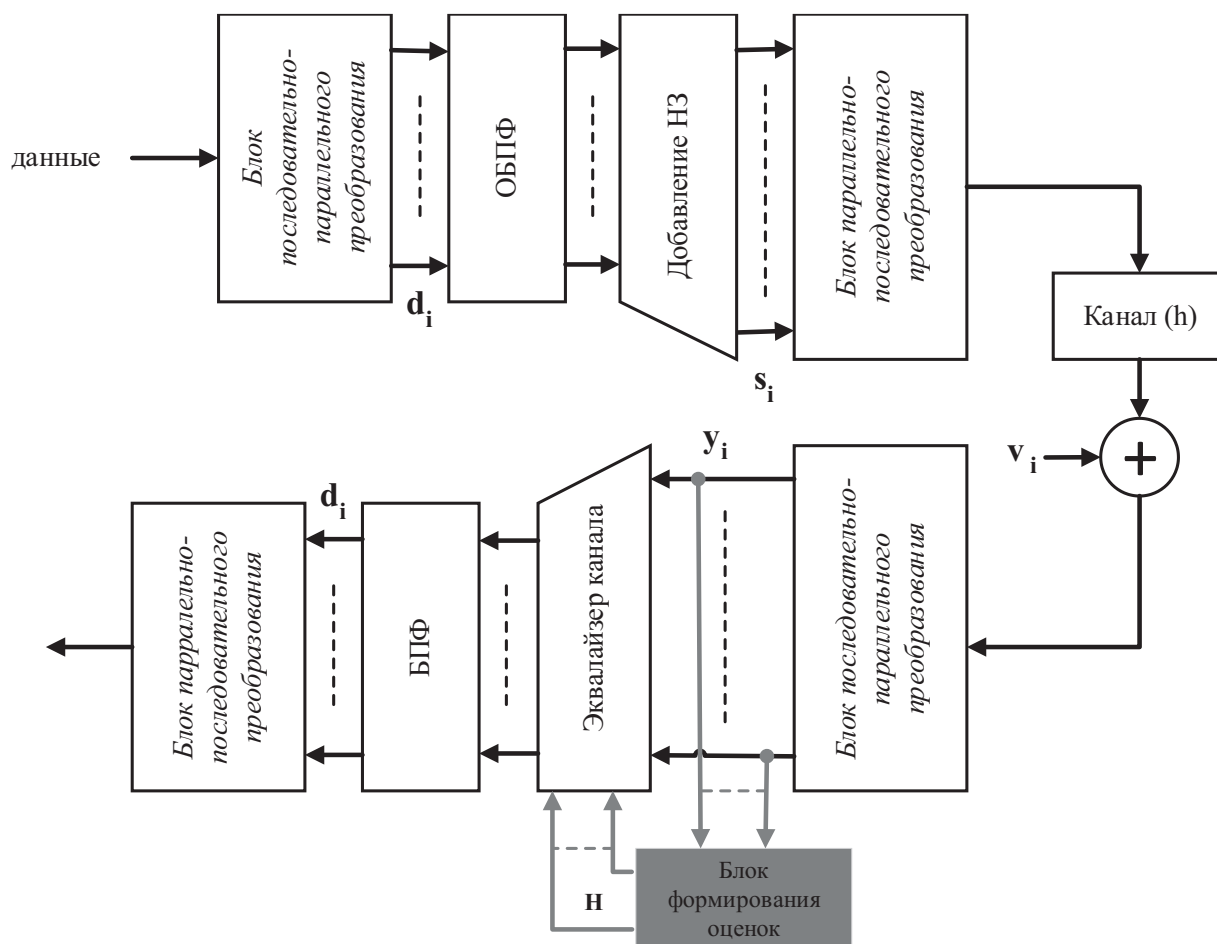


Рисунок 3. Структурная схема OFDM

$$NMSE = \frac{1}{M_1 M_2} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{M_2} |h_i(k) - \hat{h}_{i,j}(k)|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |h_i(k)|^2},$$

где M_1 – число отсчетов сигнала в сеансе моделирования;

M_2 – число сеансов моделирования.

Канал моделировался КИХ-фильтром (фильтр с конечной импульсной характеристикой) с тремя отводами, коэффициенты усиления в которых выбирались случайным образом из гауссовской последовательности с независимыми отсчетами с дисперсией σ_k^2 , где $k=1,2,3$ – номер отвода фильтра. Выход фильтра задавал отсчеты импульсной характеристики канала h_0, h_1, h_2 .

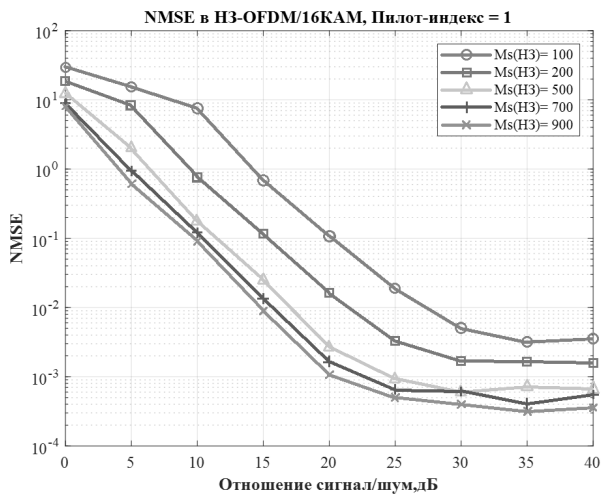


Рисунок 4. NMSE модели с префиксом НЗ

Результаты оценки канала модели с префиксом НЗ представлены на рисунке 4 при различном количестве передаваемых символов OFDM. На графиках точки кривых MS получены при вычислении нормализованной минимальной среднеквадратической ошибки оценки для соответствующего уровня соотношения «сигнал/шум» при количестве переданных OFDM символов от 100 до 900. На данном этапе моделирования использовался один пилот символ (Пилот индекс=1 – обозначение на графике).

Анализ графиков нормализованных среднеквадратических ошибок показал, что при увеличении количества переданных символов OFDM оценки нормализованной минимальной среднеквадратической ошибки случались реже. До достижения определенного значения отношения «сигнал/шум» (ОСШ), параметр NMSE снижался.

Результаты NMSE для модели с префиксом ЦП представлены на рисунке 5. Из сравнения результатов моделирования можно прийти к выводу о том, что модель с префиксом НЗ обеспечивает преимущество почти на целый порядок значений NMSE на уровне отношения «сигнал/шум» (ОСШ) 25 дБ.

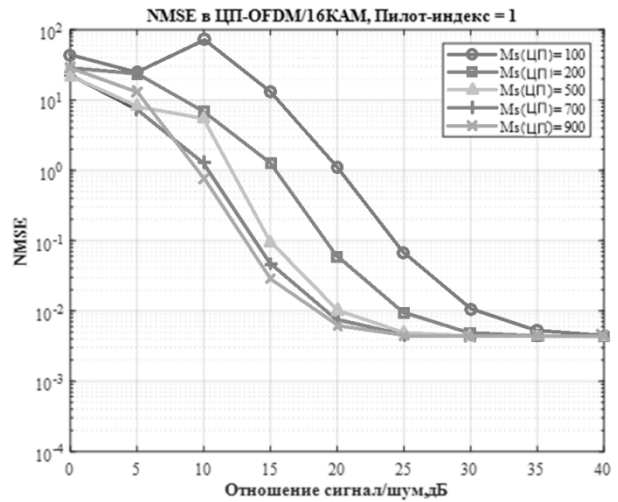


Рисунок 5. NMSE модели с префиксом ЦП

В OFDM системах передаваемый поток данных разделяется на несколько низкоскоростных потоков, которые передаются на различных поднесущих. Оценка характеристик канала на приемной стороне выполняется с помощью пилот-символов, распределенных в частотно-временной области [10]. Как указано выше, качество оценки канала в значительной степени определяется структурой пилот-сигнала (числом пилот-символов и их расположением в частотно-временной области) и является ключевым фактором обеспечения эффективной работы OFDM системы.

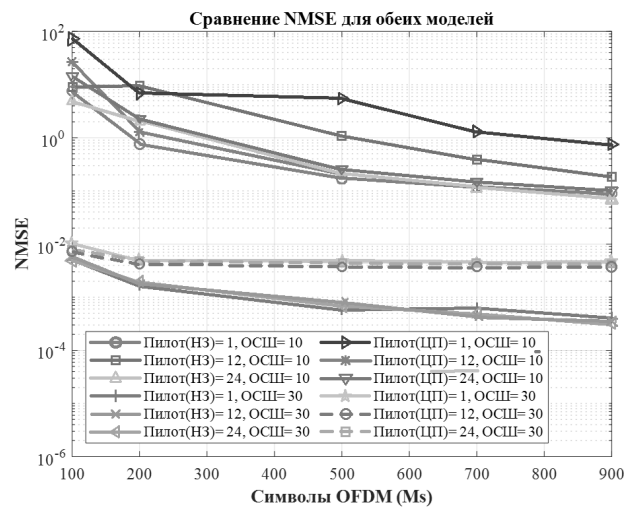


Рисунок 6. Сравнение NMSE при различном числе пилот сигналов

На рисунке 6 представлены графики, которые показывают значения NMSE при отношении «сигнал/шум» в 10 дБ и 30 дБ для двух моделей защитных префиксов с разным количеством пилот-символов.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что в «плохих каналах» (ОСШ 10 дБ) лучше проявил себя алгоритм защитного интервала с

использованием ЦП. Однако такие каналы редко используются в современных системах связи.

Если же рассматривать каналы ОСШ от 25 дБ и выше, то в ходе статистического моделирования лучшие показатели продемонстрировал алгоритм защитного префикса с использованием НЗ.

Заключение

В работе исследована система мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) при двух вариантах формирования защитных интервалов, традиционно используемых в структуре OFDM символа для защиты от межсимвольной интерференции в каналах с временным рассеиванием сигналов.

Результаты статистического моделирования по оцениванию ИХ канала связи в системе с формированием защитного интервала показали, что защитный интервал с нулевым заполнением дает меньшее значение среднеквадратической ошибки при оценке импульсной характеристики, если изменение отношения «сигнал/шум» на входе приемного устройства оказывается в довольно широких пределах, а также в случае изменения количества используемых для оценивания импульсной характеристики пилот-символов.

Литература

1. Карташевский В.Г., Семенов Е.С., Гаиб У.А.К.Д. Оценка частотно-селективных каналов связи в системах OFDM // Радиолокация, навигация, связь: материалы XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. Т. 2. С. 81–95.
2. Технология OFDM: учебное пособие для вузов / М.Г. Бакулин [и др.]. М.: Горячая Линия – Телеком, 2018. 352 с.
3. Gao F., Nallanathan A.A. Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems via nonredundant linear precoding // IEEE Transactions on Signal Processing. 2007. Vol. 55, no. 2. P. 784–789.
4. Оценивание импульсной характеристики канала с памятью для системы OFDM / В.Г. Карташевский [и др.] // Цифровая обработка сигналов и ее применение: материалы 20-й Международной конференции. М., 2018. P. 122–125.
5. Bariah L., Al-Dweik A., Muhaidat S. Blind channel estimation technique for OFDM systems over time varying channels // 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Porto, 2018. P. 1-18. DOI: 10.1109/VTCSpring.2018.8417804
6. New precoding blind channel estimation and channel order estimation algorithm in OFDM systems with cyclic prefix / O. Al-Qadh [et al.] // E3S Web Conferences: V International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES 2023). Almaty, 2023. Vol. 419. P. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202341902022
7. Карташевский В.Г., Семенов Е.С. Слепое оценивание параметров частотно-селективных каналов в системах OFDM // Электросвязь. 2023. № 10. С. 64–70.
8. Карташевский В.Г. Обработка пространственно-временных сигналов в каналах с памятью. М.: Радио и связь, 2000. 271 с.
9. Карташевский В.Г., Бельский К.А., Слипенчук К.С. Прием сигналов OFDM в каналах с рассеянием // Радиотехника. 2015. № 2. С. 62–68.
10. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Манаенко С.С. Статистические характеристики помехоустойчивых радиолоний с управлением частотным ресурсом // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 1. С. 35–40.

Дата поступления 05.11.2024

Дата принятия 06.12.2024

Семенов Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Волгоградского государственного университета. 400062, Российская Федерация, г. Волгоград, просп. Университетский, 100. Тел. +7 844 246-03-69. E-mail: semenov.evgeniy@volsu.ru

UDC 621.396.42

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.3.10

ANALYSIS OF PROTECTION INTERVAL FORMATION ALGORITHMS IN OFDM SYSTEMS TO COMBAT MULTIPATH DELAY PROPAGATION IN MEMORY CHANNELS

Semenov E.S.

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

E-mail: semenov.evgeniy@volsu.ru

OFDM systems today are used rather widely, as they implement spectrally efficient broadband wireless communication methods at high data transfer rates over memory channels. The study considers approaches to the formation of security intervals in OFDM systems, which are inserted between blocks of transmitted characters in OFDM systems in order to prevent inter-character interference. The article considers two algorithms by which a guard interval in OFDM systems can be inserted at the end of a transmitted character. The first algorithm under consideration is zero padding, which fills the guard interval with zeros, and the other is the so-called cyclic prefix, which is a cyclic extension of the OFDM symbol, and subsequently the guard interval is removed on the receiving side in both cases. The article presents the results of computer simulation to make it possible to evaluate the pulse characteristics of multipath memory channels using various protection interval formation algorithms.

Keywords: *security prefix, memory channels, OFDM signal processing in memory channels, pulse response estimation by regularization method, intersymbol interference, cyclic prefix*

Semenov Evgeniy Sergeevich, Volgograd State University, 100, Universitetsky Prospect, Volgograd, 400062, Russian Federation; Head of Telecommunication Systems Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 844 246-03-69. E-mail: semenov.evgeniy@volsu.ru

References

1. Kartashevsky V.G., Semenov E.S., Gaib O.A.Q.J. Evaluation of frequency-selective communication channels in OFDM systems. *Radiolokaciya, navigaciya, svyaz': materialy XXIX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU*. Voronezh: Voronezhskij Gosudarstvennyj Universitet, 2023, vol. 2, pp. 81–95. (In Russ.)
2. Bakulin M.G. et al. *Technology OFDM: A Great Offer for Universities*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2018, 352 p. (In Russ.)
3. Gao F., Nallanathan A.A. Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems via nonredundant linear precoding. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, vol. 55, no. 2, pp. 784–789.
4. Kartashevsky V.G. et al. Evaluation of the pulse characteristics of a memory channel for an OFDM system. *Cifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye: materialy 20-j Mezhdunarodnoj konferencii*. Moscow, 2018. P. 122–125 (In Russ.)
5. Bariah L., Al-Dweik A., Muhaidat S. Blind channel estimation technique for OFDM systems over time varying channels. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Porto, 2018. P. 1–18. DOI: 10.1109/VTCSpring.2018.8417804
6. Al-Qadh O. et al. New precoding blind channel estimation and channel order estimation algorithm in OFDM systems with cyclic prefix. *E3S Web Conferences: V International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES 2023)*. Almaty, 2023, vol. 419, pp. 02022. DOI: 10.1051/e3sconf/202341902022
7. Kartashevsky V.G., Semenov E.S. Blind estimation of frequency-selective channel parameters in OFDM systems. *Elektrosvyaz'*, 2023, no. 10, pp. 64–70. (In Russ.)
8. Kartashevsky V.G. *Processing of Space-Time Signals in Memory Channels*. Moscow: Radio i svyaz', 2000. 272 p. (In Russ.)
9. Kartashevskiy V.G., Belskiy K.A., Slipenchuk K.S. Receiving OFDM signals in channels with scattering. *Radiotekhnika*, 2015, no. 2, pp. 62–68. (In Russ.)
10. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Manaenko S.S. Statistical characteristics of noise-free radio links with frequency resource management. *Informacionnye tekhnologii*, 2019, vol. 25, pp. 35–40. (In Russ.)

Received 05.11.2024

Accepted 06.12.2024