

УДК 621.391.037.3

Ю. Т. Загидуллин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
М. С. Мерзлякова, магистрант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕАМБУЛЬНЫХ СИМВОЛОВ В СИГНАЛАХ OFDM

Рассмотрен способ обнаружения преамбульных символов по двухпороговой схеме. Проведено имитационное моделирование, предложены условия наилучшего обнаружения и определены пороги обнаружения для канала с АБГШ.

Ключевые слова: обнаружение сигналов, критерий Неймана – Пирсона, преамбула, OFDM.

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов построения надежных и высокоскоростных систем связи является использование сигналов OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing – ортогональное частотное разделение подканалов). Сигналы OFDM широко используются при передаче данных в условиях многолучевого распространения (СВЧ-, ВЧ-диапазоны), поскольку позволяют решить проблему межсимвольной интерференции (МСИ). При этом эффективно используется выделенная полоса частот канала и сохраняется высокая скорость передачи информации [3].

Качество приема сигнала OFDM, а значит, и приема данных, зависит от множества факторов, таких как тип модуляции поднесущих, тип помехоустойчивого кодирования, а также методы обнаружения и синхронизации сигнала. Алгоритмам обнаружения сигнала требуется уделить особое внимание, так как в случае пропуска сигнала сразу теряются все данные.

Обнаружение сигнала осуществляется по преамбуле – части сигнала, формируемой непосредственно перед передачей данных (рис. 1). Преамбула также используется для начальной синхронизации всей системы связи.

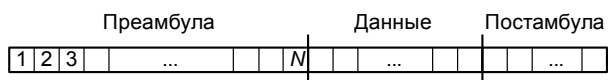


Рис. 1. Структура передаваемого сигнала OFDM

В общем случае преамбула состоит из N символов OFDM. Тогда решение задачи обнаружения сигнала OFDM по преамбуле можно разделить на два этапа:

1. Обнаружение преамбульных символов. При этом требуется определить условия (пороги), при которых вероятность ложного обнаружения $P_{\text{лж}}$

и вероятность пропуска $P_{\text{пр}}$ символа преамбулы будут наименьшими.

2. Обнаружение сигнала по преамбуле в целом. При этом требуется построить схему принятия решения по нескольким символам OFDM с учетом вероятностей $P_{\text{лж}}$ и $P_{\text{пр}}$, чтобы исключить либо минимизировать ложные обнаружения сигнала.

От качества реализации первого этапа зависит качество реализации второго этапа, т. е. качество обнаружения сигнала OFDM в целом. Поэтому разработка методов обнаружения символов преамбулы является актуальной задачей.

Решаемая задача относится к бинарной задаче обнаружения сигналов с неизвестными параметрами на фоне шума [1, 2]. Такая задача может быть решена с использованием критерия Неймана – Пирсона. К неизвестным параметрам относятся временной и частотный сдвиги сигнала, а также отношение «сигнал / шум» (ОСШ).

Принцип обнаружения символов преамбулы

Последовательность обработки сигнала OFDM в режиме поиска преамбулы изображена на рис. 2. В приемнике хранятся два символа OFDM – предыдущий и текущий. Через каждый фиксированный момент времени, равный длительности символа OFDM, происходит сдвиг в буфере хранения, т. е. текущий символ OFDM записывается вместо предыдущего, а на место текущего символа записывается новый символ (рис. 2, а).

Для устранения неопределенности по временному сдвигу будем сдвигать скользящее окно с определенным шагом Δt . Скользящее окно – это временной буфер, в который загружается определенное количество отсчетов сигнала для дальнейшей однотипной обработки (рис. 2, б).

В блоке анализа спектра сигнала вычисляется мощность сигнала на каждой поднесущей и определяется относительное отклонение энергии на каждом преамбульном тоне r_i по формуле

$$r_i = \frac{W_i^{\text{ПРМ}} - W_{\text{ш}}}{W_i^{\text{ПРМ}}} = 1 - \frac{W_{\text{ш}}}{W_i^{\text{ПРМ}}}, \quad (1)$$

где $W_i^{\text{ПРМ}}$ – энергия на i -й преамбульной частоте; $W_{\text{ш}}$ – средняя энергия шума (энергия на непреамбульных тонах), $i = 1 \dots M$, M – количество преамбульных тонов. Это отношение примем в качестве критерия обнаружения преамбульных символов.

Будем считать, что отношение принимает значения $0 < r_i \leq 1$, так как при $r_i \leq 0$ средняя энергия

шума будет совпадать либо превышать энергию на преамбульном тоне, что соответствует случаю абсолютного необнаружения.

Во избежание ошибки при вычислении отношения r_i , обусловленной частотным сдвигом, энергию $W_i^{\text{ПРМ}}$ необходимо вычислять как сумму энергий на i -й преамбульной частоте f_i и соседними с ней частотами [3], т. е.

$$W_i^{\text{ПРМ}} = W(f_i) + W(f_{i-1}) + W(f_{i+1}). \quad (2)$$

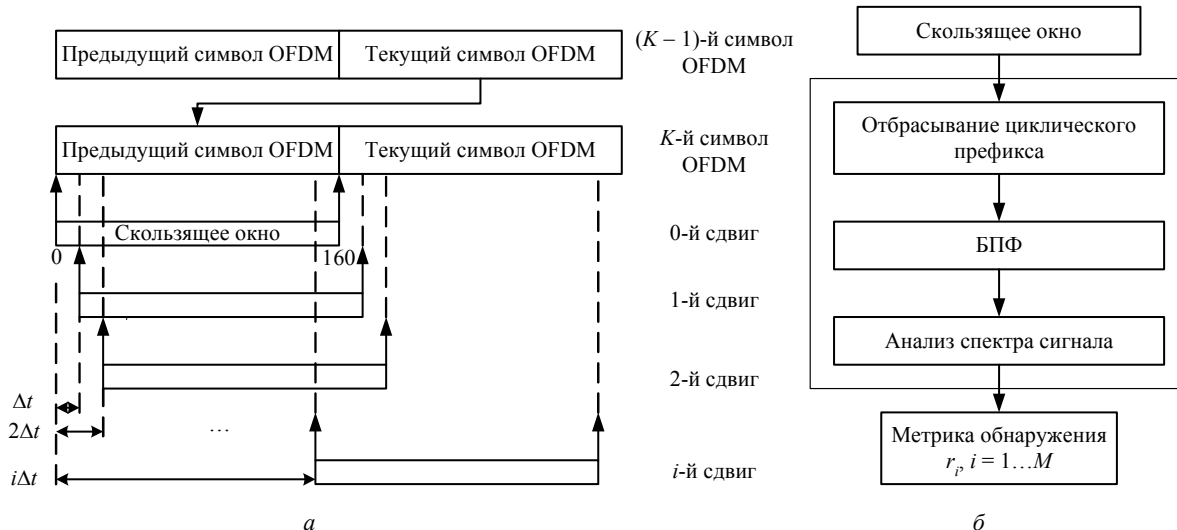


Рис. 2. Последовательность обработки сигнала OFDM при обнаружении сигнала

Для вынесения окончательного решения об обнаружении преамбульного символа будем использовать двухпороговую схему.

Первый порог: введем флаг обнаружения i -й преамбульной частоты F_i , который принимает два значения – 0 или 1. Тогда будем считать, что i -я преамбульная частота обнаружена или флаг $F_i = 1$, если значение ее метрики r_i больше некоторого заданного первого порога A :

$$\begin{cases} F_i = 1, & \text{если } r_i \geq A, \\ F_i = 0, & \text{если } r_i < A. \end{cases} \quad (3)$$

Второй порог: введем флаг обнаружения преамбульного символа PS , который принимает два значения – 0 или 1. Тогда будем считать, что преамбульный символ обнаружен или флаг $PS = 1$, если количество обнаруженных преамбульных частот больше некоторого заданного второго порога B :

$$\begin{cases} PS = 1, & \text{если } \sum_{i=1}^M F_i \geq B, \\ PS = 0, & \text{если } \sum_{i=1}^M F_i < B. \end{cases} \quad (4)$$

Значения обоих порогов A и B определяется по результатам имитационного моделирования. После определения порогов оценивается качество обнару-

жения преамбульных символов путем вычисления вероятности $P_{\text{ло}}$ и $P_{\text{пс}}$.

При проведении имитационного моделирования использовался сигнал OFDM со следующими параметрами:

- длительность символа OFDM $T_{\text{OFDM}} = 20$ мс, или 160 отсчетов;
- длительность циклического префикса $T_{\text{CP}} = 4$ мс, или 32 отсчета;
- частота дискретизации 8 кГц;
- полоса сигнала 3,1 кГц;
- количество тонов преамбулы $M = 6$.

Моделирование проводилось в программной среде MatLab для канала с АБГШ.

Анализ результатов моделирования проводился при различных временных сдвигах и фиксированном ОСШ. Шаг сдвига скользящего окна Δt был выбран равным 4 отчета (или 1 мс), а ОСШ –5 дБ и +5 дБ. Влияние частотного сдвига на значение отношения (1) не учитывалось.

Результаты моделирования представлены на рис. 3. Анализ графиков показывает, что значение отношения (1) при отсутствии преамбулы в канале с АБГШ мало зависит от значения сдвига скользящего окна и величины ОСШ. Значение этого отношения варьируется от 0 до 0,98, его среднее значение составляет 0,55.

При наличии преамбулы в канале с АБГШ это отношение существенно зависит от значения сдвига скользящего окна и величины ОСШ. Для обоих ОСШ существует выраженная область ($\Delta t = 128 \dots 160$), в которой среднее значение отношения является мак-

симальным, а ширина доверительного интервала – минимальной. Длина этой области численно совпадает с величиной циклического префикса символа OFDM, а ее появление обусловлено отсутствием влияния межсимвольной интерференции.

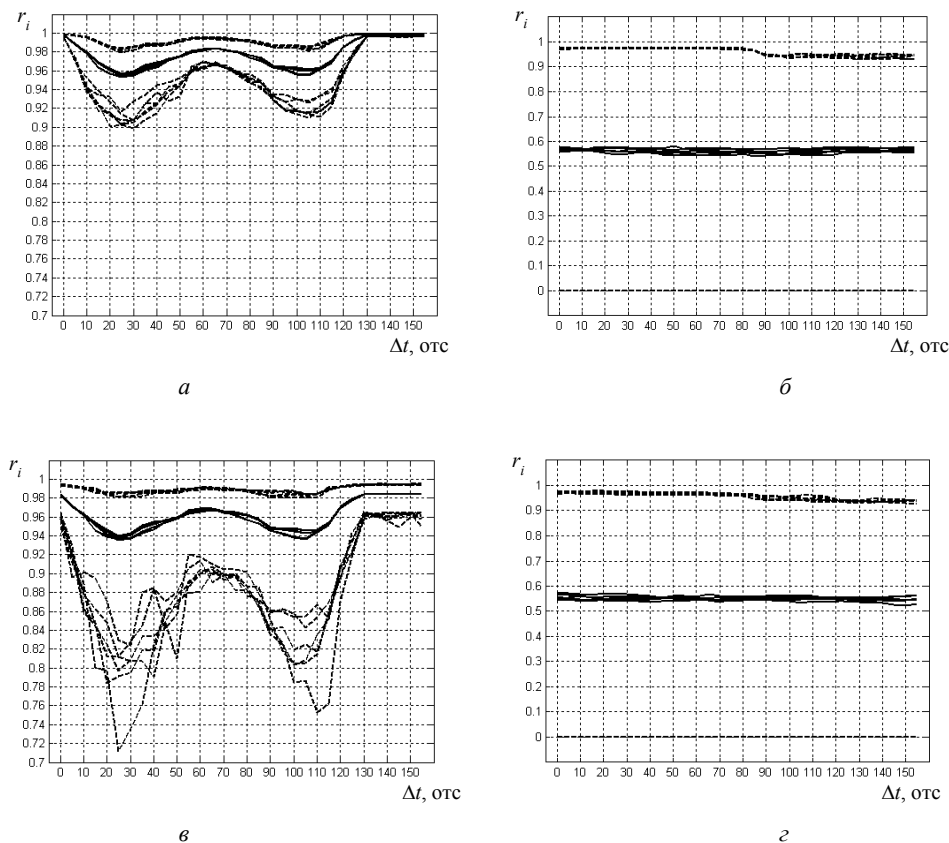


Рис. 3. Среднее значение отношения r_i в зависимости от сдвига скользящего окна Δt (в отсчетах): а – преамбула присутствует, ОСШ = +5 дБ; б – преамбула отсутствует, ОСШ = +5 дБ; в – преамбула присутствует, ОСШ = –5 дБ; г – преамбула отсутствует, ОСШ = –5 дБ (* пунктирной линией выделены максимальные и минимальные значения r_i)

При ОСШ = 5 дБ значение отношения в этой области варьируется от 0,998 до 1, а его среднее значение составляет 0,999. При ОСШ = –5 дБ значение отношения в области варьируется от 0,96 до 0,995, а среднее значение отношения составляет 0,98.

Исходя из формулы (3) первый порог рекомендуется выбирать между минимальным значением отношения при наличии преамбулы и максимальным его значением при наличии шума. Очевидно, что наиболее рациональным будет рассмотрение области стабильного поведения отношения. Поскольку в этой области минимальное его значение при наличии преамбулы является максимальным, то будем ее называть областью наилучшего обнаружения. Для того чтобы попасть в область наилучшего обнаружения, необходимо многократно сдвигать скользящее окно. Минимальное количество сдвигов может быть вычислено по формуле $x = T_{OFDM} / T_{CP}$. Например, при указанных параметрах сигнала $T_{OFDM} = 20$ мс и $T_{CP} = 4$ мс скользящее окно нужно сдвигать по крайней мере 5 раз.

Выбор первого порога зависит от величины ОСШ в канале. Так, для ОСШ = 5 дБ наилучшее значение первого порога $A = 0,99$, а для ОСШ = –5 дБ $A = 0,96$. Однако при приеме сигнала заведомо не известен уровень шума в канале, поэтому вторым шагом проанализируем как выбор того или иного значения первого порога влияет на качество обнаружения преамбульных символов при различных ОСШ в канале.

Второй порог был выбран равным $B = 3$. Учитывая, что общее количество преамбульных тонов равно 6, это означает, что преамбульный символ обнаружен, если зафиксировано наличие хотя бы половины преамбульных частот. Выбор данного порога основан на теоретических доводах. Экспериментальные исследования, подтверждающие правильность выбора второго порога, не проводились.

На основании имитационного моделирования получены зависимости вероятности пропуска сигнала $P_{пс}$ и вероятности ложного обнаружения $P_{лж}$, представленные на рис. 4. Моделирование проводилось

для канала с АБГШ. Объем выборки составил 10^5 преамбульных символов.

Из рис. 6 видно, что вероятность ложного обнаружения определяется только выбором порогов: чем меньше первый порог обнаружения, тем больше

$P_{\text{лю}}$. Вероятность пропуска зависит как от ОСШ в канале, так и от выбора порогов. $P_{\text{пс}}$ возрастает с уменьшением ОСШ и падает с уменьшением первого порога.

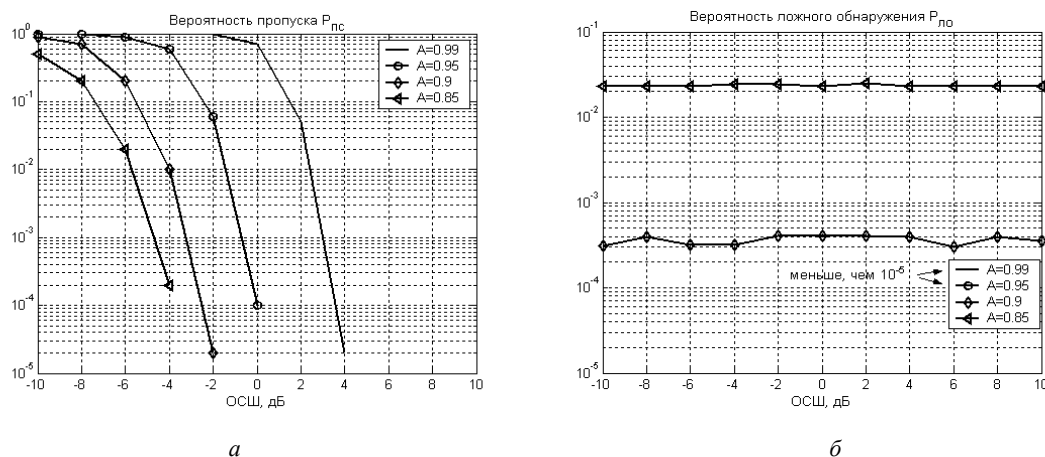


Рис. 4. Вероятности пропуска сигнала $P_{\text{пс}}$ (а) и ложного обнаружения $P_{\text{лю}}$ (б) в канале с АБГШ при различных значениях первого порога A и значении второго порога $B = 3$

Заключение

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Предложена двухпороговая схема обнаружения преамбульных символов, в которой в качестве критерия обнаружения используется относительное отклонение энергии преамбульных тонов. Критерии для каждого из тонов обрабатываются независимо, что делает схему обнаружения более гибкой.

2. Определены условия наилучшего обнаружения преамбульных символов, при которых частотный и временной сдвиги оказывают наименьшее влияние на качество обнаружения.

3. Вероятность ложного обнаружения определяется только выбором порогов и не зависит от ОСШ

в канале. Вероятность пропуска сигнала зависит как от выбора порогов, так и от ОСШ в канале.

Библиографические ссылки

1. Липкин И. А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. – М. : Вузовская книга, 2002.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989.
3. Загидуллин Ю. Т., Казанцев А. А. Исследование блока обнаружения преамбулы в системе связи с модуляцией со многими несущими // Информационные технологии в радиотехнике и связи : Третья науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – С. 341–347.

Yu. T. Zagidullin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

M. S. Merzlyakova, Master's degree student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. V. Khvorenkov, DSc, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. N. Kopysov, PhD, Assistant Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Research of Detection Quality for Preamble Symbols in OFDM Signals

The method of preamble symbols detection according to a double-threshold scheme is considered. Simulation is executed, conditions of the best detection are proposed and detection thresholds for AWGN channel are determined.

Key words: signal location, Neyman-Pearson criterion, preamble, OFDM.