

УДК 621.391.037.3

М. А. Бояршинов, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Ю. Т. Загидуллин, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Д. В. Колотов, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

А. В. Савельев, доктор технических наук, профессор, ОАО «Сарапульский радиозавод»

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ OFDM В РАДИОСТАНЦИЯХ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА *

Приводится обзор достижений по разработке модемов OFDM-сигналов применительно к коротковолновому диапазону частот. Предлагаются пути дальнейшего совершенствования тактико-технических характеристик радиоприемных устройств.

Ключевые слова: КВ-канал, OFDM, коды Рида – Соломона, сигнально-кодовые конструкции, обработка сигналов.

В настоящее время одним из наиболее эффективных способов передачи информации в каналах с многолучевым распространением сигналов (например, коротковолновом (КВ) канале) является использование OFDM-систем. Применение в системах передачи цифровой информации сигналов OFDM позволяет решить проблему межсимвольной интерференции (МСИ) за счет разделения высокоскоростного потока данных на несколько десятков (сотен, тысяч) низкоскоростных потоков и введения циклического префикса. Величина частотного интервала между поднесущими Δf выбирается минимальной и равной $1/T$. Наличие многих несущих с минимальным частотным разносом приводит к тому, что форма спектра результирующего сигнала становится близкой к прямоугольной. Таким образом, эффективно используется выделенная полоса частот канала и сохраняется высокая скорость передачи полезной информации.

Для модуляции OFDM результирующий спектр представляет собой суперпозицию спектров отдельных несущих:

$$|S(F)|^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{0,i} T_{OFDM}}{N} \right)^2 \left[\frac{\sin(\pi(F + f_{0,i})T_{OFDM})}{\pi(F + f_{0,i})T_{OFDM}} \right]^2, \quad (1)$$

где T_{OFDM} – длительность символа при модуляции OFDM (при той же суммарной скорости передачи $T_{OFDM} = NT$); $A_{0,i}$ – амплитуда i -й несущей (в общем случае они могут быть различными);

$f_{0,i} = \left(i - \frac{N+1}{2} \right) \frac{1}{T_{OFDM} - \tau_3}$ – центральная частота i -й

несущей (относительно центральной частоты диапазона), $i = 1, 2, \dots, N$, где N – число несущих.

Сравним OFDM с модулированным сигналом на одной несущей. При использовании модемов с одной несущей необходимо с интервалом, равным интервалу стационарности характеристик КВ-канала (в условиях сильных помех – гораздо чаще), излучать

в эфир тестовую сигнальную последовательность, по которой будет проводиться адаптация канального эквалайзера. При этом по тестовой сигнальной последовательности может производиться оценка фазы сигнала, что позволяет использовать когерентные методы приема и скомпенсировать потери, связанные с необходимостью излучать тестовую сигнальную последовательность [1].

Здесь необходимо отметить следующий негативный фактор применения модемов с одной несущей, в частности ФМ-8. Для передачи данных со скоростью 2400 бит/с необходимо обеспечить техническую скорость передачи, по крайней мере равную 4000 бит/с, если скорость кода равна 0,6. При использовании ФМ-8 один символ переносит 3 бита, т. е. длительность символьного интервала составит: 3 бита / (4000 бит/с) = 0,75 мс. Уже на односкачковых трассах (300–1000 км) возникает задержка между лучами 2 мс, а на двух- или трехскачковых (1000–3000 км) трассах максимальная задержка между лучами достигает 5 мс. Следовательно, при использовании ФМ-8 на дальних трассах модем на одной несущей будет работать в условиях большой межсимвольной интерференции. Для точной оценки фазы при таких условиях необходимо использовать сложные в вычислительном отношении алгоритмы, например, алгоритм Кловского – Николаева.

В модемах с OFDM информация передается по каналу параллельно на нескольких десятках поднесущих колебаний с относительно невысокой скоростью. Такой тип модуляции применяется как для построения относительно низкоскоростных модемов (2400–4800 бит/с), работающих в ВЧ-диапазоне, так и для высокоскоростной передачи данных в системах СВЧ-диапазона. При правильном выборе частот поднесущих колебаний для расфилтровки может быть использован алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), что существенно экономит ресурсы сигнального процессора.

Подводя итог, отметим ряд особенностей модемов с одной несущей, которые характеризуются:

сложностью программного построения и более существенными затратами ресурсов сигнального процессора на реализацию алгоритма адаптации канального эквалайзера; высокой чувствительностью адаптивного канального эквалайзера к сильным узкополосным помехам.

Достоинства сигналов со многими несущими по сравнению с сигналами с одной несущей: имеют лучшую защищенность от узкополосных помех; позволяют бороться с межсимвольной интерференцией; менее критичны к временному рассеянию; справляются с помехами, вызванными многолучевостью распространения. К недостаткам можно отнести чувствительность: к частотному сдвигу; к фазовому шуму; к расстройке частоты дискретизации [2].

Рассмотрим далее систему OFDM, которая работает в режиме передачи данных в полосе стандартного телефонного канала (СТК), т. е. 3100 Гц, поэтому количество поднесущих ограничивается небольшим (несколько десятков) значением. Высокую скорость передачи данных можно получить, увеличивая количество точек сигнального созвездия. Однако увеличение количества точек сигнального созвездия неизбежно приведет к ухудшению помехоустойчивости.

Для синтеза OFDM-системы необходимо определить величину символа OFDM. Длительность символа OFDM T_{OFDM} складывается из длительности полезной части символического интервала T и длительности циклического префикса τ_3 . Длительность циклического префикса τ_3 должна быть больше максимальной задержки t_3 между лучами основного и эхо-сигнала. Максимальная задержка между лучами на одноканальных трассах КВ-канала составляет $t_3 = 2-3$ мс; выберем $\tau_3 = 2,75$ мс. Длительность полезной части символического интервала должна быть по крайней мере в 3 раза больше максимальной задержки между лучами, т. е. больше 9 мс. Обычно для КВ-канала длительность полезной части выбирается 16–20 мс. Выберем $T = 16$ мс. Таким образом, T_{OFDM} составит 18,75 мс. При этом для передачи данных со скоростью 4800 бит/с необходимо передавать ровно 90 бит/символ OFDM. Частота дискретизации сигнала, передаваемого в полосе СТК, обычно выбирается 8000 Гц. Максимальное количество поднесущих сигнала OFDM для стандартного телефонного канала определяется равенством

$$M_{MAX} = \Delta f_{СТК} / \Delta f = \Delta f_{СТК} \cdot T = 3100 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \approx 49,$$

где $\Delta f = 1/T$ – величина частотного интервала между поднесущими (ширина подканала). Поэтому количество поднесущих $M_{П}$ выбираем из условия $M_{П} < M_{MAX}$, т. е. $M_{П} < 49$.

Так как при многолучевом распространении в КВ-канале, как правило, ошибки группируются, то в качестве помехоустойчивого кода следует взять код, способный исправлять пакеты ошибок. Одним из широко применяемых кодов такого типа является код Рида – Соломона. Коды Рида – Соломона явля-

ются оптимальными в смысле границы Синглтона. При фиксированных n и k не существует кода, у которого минимальное расстояние больше, чем у кода Рида-Соломона. В тоже время коды Рида – Соломона всегда оказываются короче всех других циклических кодов над тем же алфавитом.

В зависимости от состояния ионосферы и дальности связи КВ-канал можно описать тремя типами каналов:

- канал с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ);
- многолучевой канал с медленными замираниями и АБГШ;
- многолучевой канал с быстрыми замираниями и АБГШ.

На основании исследования [3] можно сказать, что явным превосходством в многолучевом канале с медленными замираниями и АБГШ обладает передача данных с помощью офсетной ОФМ-4. Остальные типы модуляции требуют когерентной обработки, т. е. использования эквалайзера в OFDM-системе.

В многолучевом канале с быстрыми замираниями и АБГШ оптимальными кодовыми комбинациями также являются комбинации с длинными кодовыми словами. Наилучшим вариантом передачи данных является передача данных с помощью КАМ-4.

Для каналов связи ДКМ диапазона с точки зрения расстояний можно выделить ближнюю зону, в которой распространение осуществляется земной волной, «мертвую» зону, где устойчивая связь практически невозможна, трассы до 500 Км и трассы от 500 до нескольких тысяч километров.

Наиболее устойчивая связь наблюдается при работе земной волной. Протяженность этих трасс зависит от мощности передатчика, условий и местности, где осуществляется связь. Можно считать, что это трассы протяженностью до 50–70 км. Однако 10-ваттные радиостанции, которые могут находиться у абонентов зоновой сети, обеспечат связь земной волной только на расстояниях до 15–30 км.

В «мертвой» зоне, от 60 до 100–120 км, устойчивая связь, как земной, так и ионосферной волной, отсутствует. Проблему «мертвой» зоны следует решать за счет организации сети, в частности реализацией метода «вынесенного ретранслятора», в качестве которого должен выступать узел другой зоны.

Так как набор используемых сигналов и кодов должен быть ограничен, то из вышесказанного следует, что при выборе СКК в первую очередь должны учитываться условия на трассах от 100 до 300–500 км.

Опыт работы на таких трассах показывает, что на них часто наблюдаются периодические селективные замирания. Даже в стандартном телефонном канале (СТК) 3,1 КГц, то есть в узкой полосе, регулярно наблюдается подавление части частот. Опыт реализации модемов в КВ-канале показывает, что передача данных в СТК на скоростях до 2400 бит/с является относительно стабильной при любых типах канала (по ITU-R F.1487) и ОСШ от 3–5 дБ. Передача данных на скоростях 4800 и 9600 бит/с возможна только

в условиях прямой видимости, либо в КВ-канале с «хорошими» условиями по ITU-R F.1487.

Проработанный вариант OFDM-модема обеспечивает передачу данных на 8 скоростях. Отличительной особенностью является возможность автоматического определения скорости при приеме данных по 6-частотной преамбуле, передаваемой перед каждым окном данных.

Сигнал OFDM состоит из нескольких периодов элементарного сигнала, т. е. из нескольких символов OFDM. Структура сигнала OFDM следующая:



Рис. 1. Структура сигнала OFDM: ПРМБ – преамбула; ОС – опорный символ; СВ – синхровставка; Д – данные; ПСТМ – постамбула

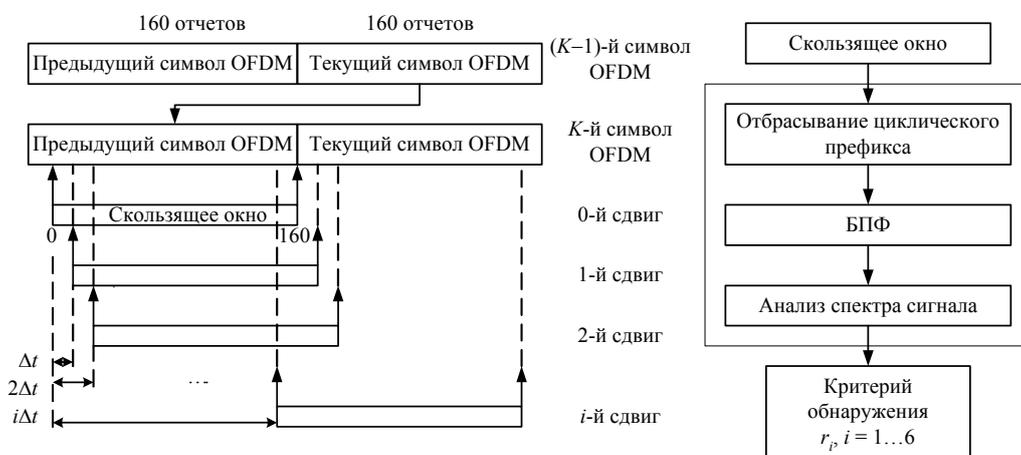


Рис. 2. Структурная схема работы приемника в режиме поиска преамбулы

Постамбула предназначена для обозначения конца передачи данных. Структура постамбулы схожа со структурой преамбулы. Синхровставки необходимы для подстройки сигнала по времени. Опорный символ необходим при передаче данных с использованием модуляции ОФМ.

В качестве основных параметров модема для различных скоростей передачи были выбраны следующие.

Основные параметры модема для различных скоростей передачи

Скорость, бит/с	Тип модуляции поднесущих	Тип кодирования
9600	КАМ-16	без кодирования
4800	ОФМ-8	(12,6)RS_GF16*
2400	ОФМ-4	(12,6)RS_GF16
1200	ОФМ-2	(12,6)RS_GF16
600	ОФМ-2	(12,4)RS_GF16
300	ОФМ-2	(12,2)RS_GF16
150	ОФМ-2	(6,2)RS_GF16
75	ОФМ-2	(6,2)RS_GF16

* Запись (12,6)RS_GF16 означает код Рида – Соломона (12,6) над полем Галуа 16.

Преамбула необходима для обнаружения сигнала, передающего данные, и начальной синхронизации приемной радиостанции. Она представляет собой 6-частотный сигнал. Введение псевдослучайной последовательности в структуру преамбулы позволяет точно определить момент начала передачи данных без введения дополнительных мер даже при потере части преамбулы.

Обнаружение сигнала по преамбуле осуществляется в несколько этапов:

- обнаружение преамбульных тонов;
- обнаружение преамбульных символов;
- обнаружение преамбулы по нескольким преамбульным символам.

Обнаружения сигнала осуществляется по критерию Неймана – Пирсона. Структурная схема работы приемника в режиме поиска преамбулы изображена ниже.

Во время сеанса связи обеспечение достоверной передачи данных в достаточно узкой полосе КВ-диапазона осложняется особенностями КВ-каналов связи. Для них характерна сложная, быстро изменяющаяся помеховая обстановка. Причем изменение условий связи может происходить в течение сеанса связи. Все это требует применения адаптивных систем. Одним из наиболее эффективных способов адаптации к условиям связи является адаптация по скорости передачи.

Авторами предложено осуществлять автоматическое определение скорости по 6-частотной преамбуле, передаваемой перед каждым окном данных [4]. Чтобы закодировать информацию о скорости, на каждой из 6 частот преамбулы передается одна и та же псевдослучайная последовательность, но циклически сдвинутая на некоторую величину. Для каждой скорости передачи используется свой набор сдвигов, причем подбор их осуществляется таким образом, что определение скорости возможно даже при потере нескольких (до трех) преамбульных частот. В приемнике вычисляются корреляции каждой последовательности, и по взаимному расположению пиков корреляции определяется набор сдвигов и, соответ-

ственно, скорость передачи данных. Длительность преамбулы составляет 1-2 секунды в зависимости от состояния канала.

Библиографические ссылки

1. Казанцев А. А., Хворенков В. В. Исследование модема со многими несущими в условиях нелинейности канала связи // Инфокоммуникационные технологии. – 2005. – Т. 3. – № 4. – С. 12–17.

2. Казанцев А. А., Хворенков В. В. Анализ помехоустойчивости модема со многими несущими при расстройке

между несущими передатчика и приемника // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – Т. 4. – № 1. – С. 39–45.

3. Загидуллин Ю. Т., Казанцев А. А., Хворенков В. В. Исследование способов передачи информации сигналами OFDM в коротковолновом диапазоне // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т. 5. – № 4. – С. 77–80.

4. Бояришинов М. А., Загидуллин Ю. Т. Использование автоматического определения скорости передачи данных в адаптивных системах КВ-связи // Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов»: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2010. – С. 26.

M. A. Boyarshinov, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Yu. T. Zagidullin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

D. V. Kolotov, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. V. Saveliev, DSc in Engineering, Professor, JSC “Sarapul Radioworks”

Processing of OFDM Signals in HF Transceiver

The achievement of OFDM modem design for high frequency channel is reviewed. Variants of further perfection of transceiver performance characteristics are proposed.

Key words: HF channel, Reed-Solomon codes, signal-code sequence, signal processing.