

Potsykaylo Alexandr Anatolievich

E-mail: alex_shp_arm@mail.ru.

f. 1A, 22, Chehova street, Taganrog, 347922, Russia.

The Department of Radio Receivers and Television; Postgraduate Student; Master of Techniques and Technologies in Radio Engineering.

Krasnobayev Dmitry Anatolievich

E-mail: fcb-seth@inbox.ru.

f. 12, 22, Chehova Street, Taganrog, 347922, Russia.

The Department of Radio Receivers and Television; Postgraduate Student; Master of Techniques and Technologies in Radio Engineering.

УДК 621.376.9

Л.Г. Стаценко, Е.И. Железняков, А.А. Ковылин

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ В СЛУЧАЕ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Рассмотрен метод снижения пик-фактора многочастотного сигнала с помощью применения дополнительной частотной (фазовой) модуляции. Рассмотрена помехоустойчивость метода в условиях аддитивного белого гауссовского шума, в условиях быстрых релейских замираний. Определены теоретическая и практическая вероятности ошибки для разных индексов частотной (фазовой) модуляции. Предложен метод некогерентного детектирования с использованием квадратурной схемы демодуляции. Произведено моделирование системы передачи данных в программной среде Matlab Simulink для случая разного количества несущих, введения защитного интервала, использования помехоустойчивого кодирования и разных значений частоты доплеровского сдвига.

Ортогональное частотное уплотнение OFDM; пик-фактор; помехоустойчивость; некогерентный прием; аддитивный белый гауссовский шум.

L.G. Stacenko, E.I. Zheleznyukov, A.A. Kovy'lin

FREQUENCY AND PHASE MODULATION USING FOR MULTIFREQUENCY COMMUNICATION IN CASE MULTIPATH PROPAGATION

The article peak-factor reducing method of multifrequency signal with adding frequency (phase) modulation is considered. Noise resistance in additive white gaussian noise, fast fading Relay channels with frequency offset are considered. Theoretical and practical bit error rate for different frequency (phase) modulation index is defined and difference (benefits and drawback) of proposed method is shown. Noncoherent detection method have been proposed that use quadrature demodulation scheme. Proposed system simulation was performed in program Matlab Simulink for case of different carrier quantities, inserting guarding interval, using noise resisting coding, different values of the frequency Doppler shift.

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); peak-factor; noise resistance; noncoherent reception; additive white Gaussian noise.

Одной из основных проблем передачи данных является качественный прием в условиях многолучевого распространения волн. Многолучевым распространением называется процесс передачи данных, при котором прием сигналов происходит от единого источника излучения по различным трассам, (лучам) ограниченным в пространстве границами раздела, отделяющими среды с различными параметрами распространения (скорости звука, коэффициентами отражения и т.д.). Принимаемый при многолучевом распространении сигнал является результатом интерференции

излученных источником волн, претерпевших отражение от граничных поверхностей. Интерференция приводит к образованию локализованных протяженных областей усиления энергии волн вследствие суммирования чередующихся с областями их взаимного гашения, в результате чего величина принимаемого сигнала при многолучевом распространении существенно зависит от места размещения приемника в пространстве. Для типичного канала принятый сигнал обычно состоит из нескольких дискретных многолучевых компонентов, приводящих к замиранию сигнала. Отдельные частотные компоненты сигнала могут суммироваться в разных фазах, вызывая тем самым усиление либо ослабление сигнала на определенной частоте.

Объектом исследования стал метод многочастотной модуляции OFDM, хорошо работающий в условиях многолучевости физических сред, энергетическая эффективность метода и его устойчивость в условиях быстрых релейских замираний. Существующие стандарты, применяющие OFDM в радиоканале, такие как DVB-T, 802.16 имеют низкую энергетическую эффективность и работают только в квазистационарных каналах. Также возможны ошибки модуляции сигнала, ввиду высоких значений пиковой мощности. Для мобильных устройств это означает значительное сокращение времени работы. Нестационарные, быстрые релейские каналы оказывают сильное влияние на многочастотные сигналы, нарушается ортогональность компонент сигнала и как следствие страдает помехоустойчивость системы.

Обзор и анализ существующих методов повышения энергетической эффективности OFDM сигнала показал, что проблема не может быть решена кардинально существующими способами [1,2].

Актуальным решением проблемы многолучевости явился метод кодирования многочастотного сигнала OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональное частотное разделение каналов). На практике этот метод модуляции применяется в комбинации с помехоустойчивым кодированием.

Главной идеей многочастотной системы модуляции OFDM является разделение последовательного цифрового потока данных на большое число низкоскоростных потоков, передаваемых на отдельных ортогональных поднесущих. В результате достигается главное – на передачу одного символа на каждой отдельной несущей может быть отведено большее время. Это позволяет сделать передачу каждого символа независимой от наличия отраженных сигналов, обусловленных многолучевым распространением сигнала. Сумма поднесущих, переносящих компоненты цифрового потока, называется символом OFDM, равным T . Сигнал OFDM является комплексным, так как каждая поднесущая состоит из синфазной и квадратурной компоненты

$$\dot{s}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{d}_k \cdot e^{2\pi jk\Delta f t}, \quad (1)$$

где $\Delta f = 1/T$ – частотный разнос между соседними поднесущими, Гц;

d_k – k -й комплексный модулирующий символ, длительностью T ;

N – количество ортогональных поднесущих частот.

Главный вопрос в построении системы OFDM – выбор основных параметров: числа поднесущих, их частотного разноса, значений защитного интервала, метода модуляции несущих, метода синхронизации. Все параметры взаимосвязаны и выбираются путем компромисса.

Одно из главных достоинств OFDM сигнала – это высокая эффективность использования полосы частот. Это достигается за счет ортогонального уплотнения поднесущих частот – компоненты плотно располагаются в спектре, а также за счет

особенностей OFDM сигнала – аналитический сигнал на частоте занимает точно такую же полосу, как и в основной полосе частот.

Здесь, проводя аналогию с обычными методами аналоговой модуляции, можно использовать частотную модуляцию (FM) и фазовую модуляцию (PM) на несущей частоте ω_0 многочастотным сигналом $s(t)$.

$$g_{FM}(t) = \cos \left(\omega_0 t + \Delta\omega \cdot C_{opt} \int_0^t \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^{N-1} \dot{d}_k \cdot e^{2\pi jk\Delta f t} \right] dt \right). \quad (2)$$

$$g_{PM}(t) = \cos \left(\omega_0 t + 2\pi k \cdot C_{opt} \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^{N-1} \dot{d}_k \cdot e^{2\pi jk\Delta f t} \right] \right), \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ – круговая девиация частоты, $C_{opt} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2}{N}}$ – оптимальный нормировочный коэффициент [3, 4].

На рис. 1 представлены графики формы действительной части сигнала OFDM, OFDM на несущей частоте, OFDM-FM, OFDM-PM соответственно. Из них видно, что дополнительная частотная модуляция приводит к тому, что сигнал получает постоянную огибающую. Главное преимущество угловой модуляции – это постоянство огибающей, и соответственно минимально возможный пикфактор в 3 дБ. Применение сигналов с постоянной огибающей позволяет применять высокоэффективные нелинейные усилители мощности в выходных каскадах передатчиков с резонансной нагрузкой с максимальным теоретическим КПД равным 78,5 %. Трансформация в области амплитуда-частота позволяет получить энергетический выигрыш и упростить схемы передающих каскадов.

При использовании угловой модуляции происходит расширение спектра при переносе низкочастотного сигнала на несущую частоту, что, безусловно, приводит к снижению спектральной эффективности, а значит скорости передачи данных. При использовании аналоговой модуляции вводится индекс модуляции, значением которого можно варьировать и тем самым получить необходимую помехоустойчивость при заданной спектральной эффективности и полосе частот сигнала (а, следовательно, скорости передачи данных).

$\operatorname{Re}(s(t))$

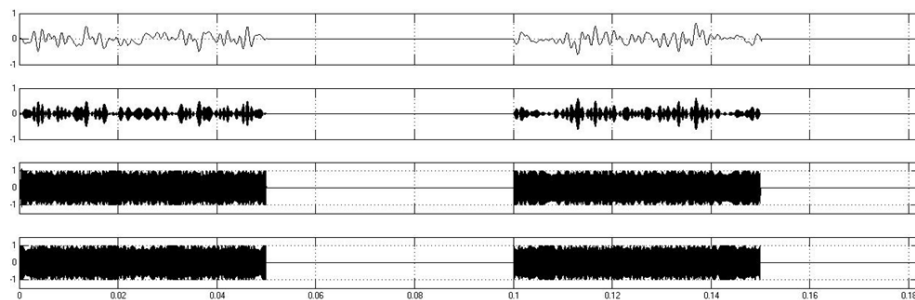


Рис. 1. Действительная часть сигнала OFDM, OFDM на несущей частоте, OFDM-FM, OFDM-PM соответственно

На рис. 2 представлены спектральные плотности сигналов OFDM (а), OFDM-FM (б), OFDM-PM (в). Можно сделать вывод, что лучшей спектральной эффективностью обладает сигнал OFDM; для случая с частотной модуляцией происходит расширение полосы частот сигнала, что приводит к снижению спектральной эффективности; для случая с фазовой модуляцией не происходит заметного искажения спектра, но только лишь выделяется несущая частота за счет квадратурной модуляции сигнала.

Рассмотрим выражение (2) как сумму двух квадратурных компонент:

$$g(t) = \cos(\omega_0 t) \cos\left(\Delta\omega \int_0^t s_{omn}(t) dt\right) - \sin(\omega_0 t) \sin\left(\Delta\omega \int_0^t s_{omn}(t) dt\right), \quad (4)$$

т.е. частотную модуляцию (фазовую модуляцию) можно сформировать путем квадратурной модуляции с несущей частотой ω_0 и предварительным формированием двух квадратурных низкочастотных сигналов I и Q.

Демодуляцию удобно выполнить с помощью квадратурной обработки. При этом входной FM сигнал (4) умножается на два опорных колебания $\sin(\omega_0 t)$ и $\cos(\omega_0 t)$, с последующим интегрированием сигналов в квадратурных каналах I и Q.

В результате получим следующее выражение:

$$s_{OFDM}(t) = \frac{dx_I}{dt} x_Q(t) - \frac{dx_Q}{dt} x_I(t). \quad (5)$$

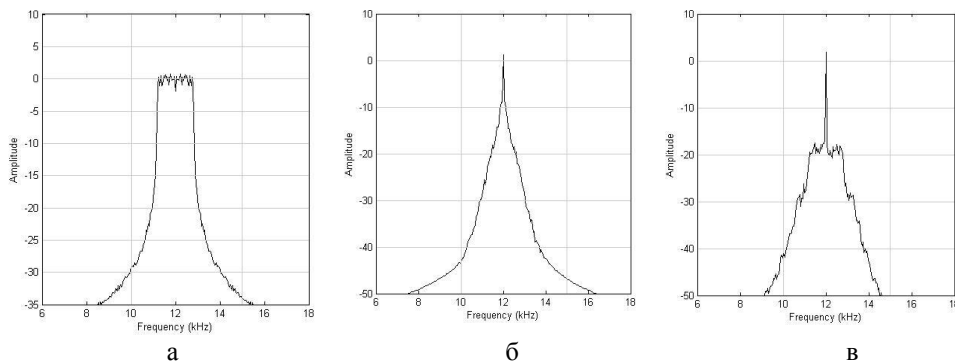


Рис. 2. Спектральная плотность сигнала: а – OFDM; б – OFDM с дополнительной частотной модуляцией; в – OFDM с дополнительной фазовой модуляцией

Более подробно математический аппарат представлен в [4].

Для данного метода частотной демодуляции не требуется когерентное умножение, что существенно важно в каналах с мультипликативными помехами [4]. Но для фазовой демодуляции требуется применение когерентного детектирования (т.е. необходимо использовать контуры фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ).

На рис. 3 представлена структурная схема для общего случая угловой модуляции (FM или PM), для случая OFDM блок углового модулятора и углового демодулятора необходимо заменить на обычный модулятор-демодулятор.

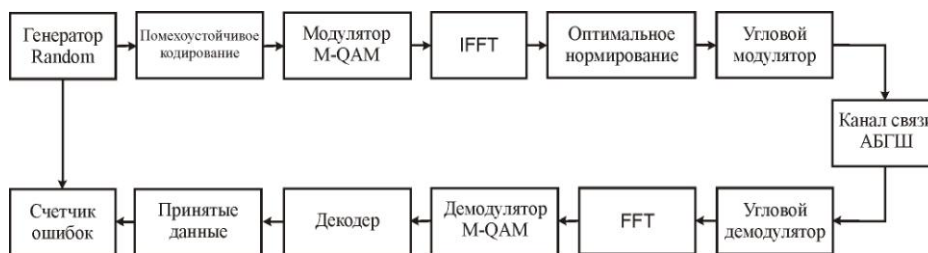


Рис. 3. Структурная схема системы связи с OFDM с дополнительной угловой модуляцией при АБГШ

В результате моделирования системы связи OFDM с дополнительной частотной модуляцией и фазовой модуляцией в программной среде Matlab Simulink использовались следующие значения параметров системы связи (табл. 1).

Таблица 1

Обозначение	Параметр	Значение	Единицы
N	Число поднесущих	40 (85)	-
Δf	Частотный разнос	20	Гц
T	Длительность символа	0,05	с
$T_{защ}$	Защитный интервал	0,05	с
F	Ширина полосы частот	1600	Гц
M	Модуляция поднесущих (BPSK)	2	-
C	Скорость передачи	400 (800)	бит/с
$F_{нес}$	Несущая частота	12	кГц
F_{Δ}	Частота дискретизации	48	кГц
$m_{чм}$	Индекс частотной модуляции	[0.1...1]	
$m_{фм}$	Индекс фазовой модуляции	[0.1...1]	

Моделирование в программной среде MatLab в условиях аддитивного гауссовского шума с использованием помехоустойчивого кодирования Рида-Соломона показывает, что при разных индексах частотной модуляции можно получить разную помехоустойчивость. Вероятность появления ошибок при передаче данных можно уменьшить за счет помехоустойчивого кодирования. Введение помехоустойчивого кодирования в общем случае снижает полезную скорость передачи данных, но позволяет произвести безошибочный прием информации.

На рис. 4 представлены зависимости появления ошибки от отношения сигнал/шум для случая частотной модуляции. Моделирование в программной среде MatLab проводилось с изменением уровня аддитивного белого гауссовского шума

с последующим определением вероятности ошибки принятия искаженного бита. По оси ординат отложен десятичный логарифм \lg от вероятности ошибки, а по оси абсцисс отношение сигнал/шум. Можно сделать вывод, что при изменении индекса частотной модуляции можно получить разную помехоустойчивость системы, в ущерб скорости передачи данных (следовательно, снижению спектральной эффективности). Вероятность ошибки применительно для сигнала OFDM-FM определяется следующим образом [3,4]:

$$P_{e\text{ OFDM-FM}} \approx \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2 \sqrt{M}} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{9 \cdot \rho_{\text{вх}} \cdot m_{\text{чм}}^3}{8(M-1)}} \right],$$

где M – индекс модуляции поднесущих (для BPSK $M = 2$), $Q(x)$ – интеграл гауссовских ошибок, $\rho_{\text{вх}}$ – отношение сигнал/шум на входе приемника, $m_{\text{чм}}$ – индекс частотной модуляции.

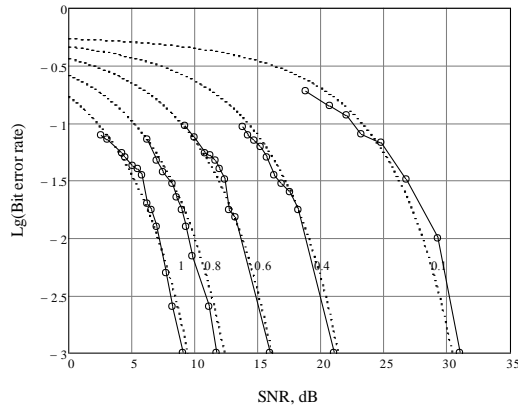


Рис. 4. Зависимость вероятности появления ошибки от отношения сигнал/шум для случая 40 несущих при модуляции поднесущих BPSK при разных индексах модуляции

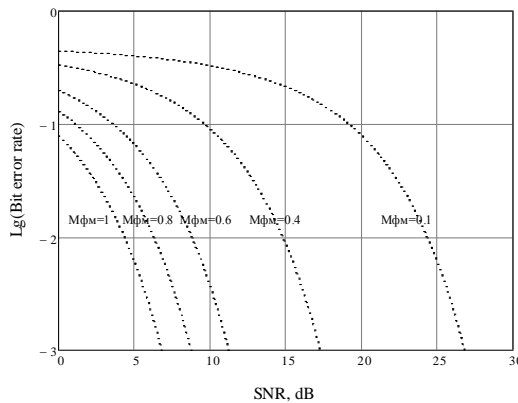


Рис. 5. Зависимость вероятности появления ошибки от отношения сигнал/шум для OFDM-PM

При использовании фазовой модуляции можно получить выигрыш в среднем на 2–3 дБ больше, чем при использовании частотной модуляции. Но при этом необходимо использовать контуры фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для определения фазы принимаемого сигнала (т.е. применять когерентный прием). График зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум представлен на рис. 5 и для разных индексов модуляции определяется следующей формулой [1]:

$$P_{e\text{ OFDM-PM}} \approx 2 \left(\frac{M-1}{M \log_2 M} \right) Q \left(2\pi k \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{M^2 - 1}} \cdot \rho_{\text{ex}} \right),$$

где k – индекс фазовой модуляции.

В случае взаимного перемещения передатчика и приемника будет присутствовать доплеровский сдвиг частоты. Поэтому рассмотрим помехоустойчивость OFDM-FM в условиях релейских замираний и аддитивного белого гауссовского шума. Введем коэффициент α , показывающий отношение полосы канала одной поднесущей частоты Δf к максимальной частоте доплеровского сдвига f_D в канале $\alpha = \Delta f / f_D$. При малых значениях α характеристика вероятности ошибки любой цифровой системы передачи информации выходит в «насыщение» и увеличение соотношения сигнал/шум не приводит к снижению количества ошибок (рис. 6). Полученные характеристики вероятности ошибки отображают помехоустойчивость системы COFDM-FM в комплексе, при одновременном наличии на входе демодулятора аддитивного гауссовского шума и мультипликативной функции релейских замираний. Лучшим способом задания требований для избежания быстрого замирания было бы условие $\Delta f \gg f_D$ ($\alpha \gg 1$). Если это условие не удовлетворено, то случайная частотная модуляция, вызванная переменными доплеровскими сдвигами, будет существенно ухудшать характеристики системы.

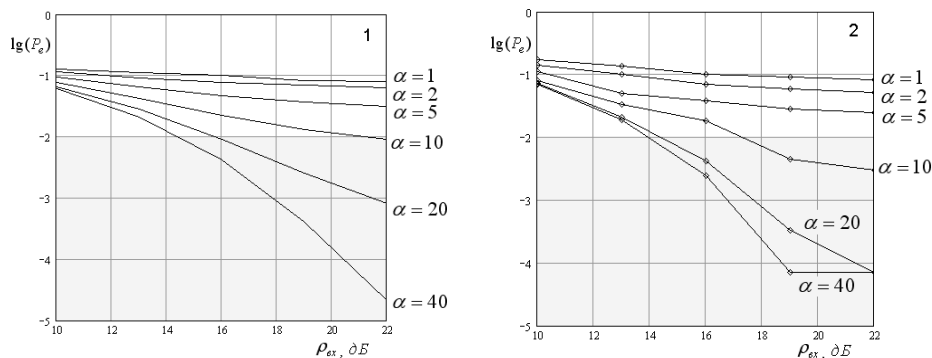


Рис. 6. Вероятность ошибки для OFDM-FM в условиях релейских замираний и доплеровского сдвига: 1 – аналитические кривые; 2 – результаты моделирования

Выводы. Результаты моделирования передачи сигнала по каналу связи показали возможность применения метода OFDM-FM(PM), при котором выбор параметров системы связи может изменяться в зависимости от условий передачи данных, главным из которых являются индекс частотной модуляции и ширина полосы частот сигнала. Параметры вышеприведенной системы полностью будут определяться свойствами канала передачи информации и желаемой пропускной способностью. Защит-

ный интервал позволяет скомпенсировать многолучевые компоненты, либо дисперсионные «хвосты» предыдущих символов и должен выбираться из расчета максимальной задержки сигнала по определенному уровню на трассе распространения. Для повышения энергетической эффективности можно использовать многопозиционную квадратурную амплитудную модуляцию M-QAM, но также за счет снижения помехоустойчивости сигнала. Для повышения скорости полезной информации по отношению к общему количеству передаваемой информации можно использовать более эффективные коды помехоустойчивого кодирования (LDPC).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Thompson S.C., Ahmed A.U., Proakis J.G., Zeidler J.R.* Constant Envelope OFDM Phase Modulation: Spectral Containment, Signal Space Properties and Performance, in Proc. IEEE Milcom, Vol. 2, Monterey, Oct. 2004. – P. 1129-1135.
2. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
3. *Родионов А.Ю.* Многочастотные цифровые системы связи в условиях многолучевого распространения и их энергетическая эффективность // Вестник ДВО РАН. – 2007. – № 1. – С. 69-72.
4. *Стаценко Л.Г., Родионов А.Ю.* Комплексный анализ помехоустойчивости многочастотных сигналов COFDM с частотной модуляцией // Вестник Воронежского университета. Серия: физика, математика. – 2007. – № 1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор В.В. Юдин.

Стаценко Любовь Григорьевна

Дальневосточный государственный технический университет.

E-mail: rts@fentu.ru.

690950, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10.

Тел.: 84232458934.

Кафедра радио, телевидения и связи; заведующая кафедрой; д.ф.-м.н., профессор.

Железняков Евгений Игоревич

E-mail: aquagen_john@mail.ru.

Кафедра радио, телевидения и связи; аспирант.

Ковылин Александр Александрович

E-mail: gamzin@inboxl.ru.

Кафедра радио, телевидения и связи; аспирант.

Statsenko Lubov Grigor'evna

Far Eastern Technical University.

E-mail: rts@fentu.ru.

10, Pushkinskaya Street, 690950, Vladivostok, Russia.

Phone: +74232458934.

The Department of Radio Communication, Radio Broadcasting and Television; Head the Department; Dr. of Phis.-Math. Sc.; Professor.

Zheleznjakov Evgeniy Igorevich

E-mail: aquagen_john@mail.ru.

The Department of Radio Communication, Radio Broadcasting and Television; Postgraduate student.

Kovilin Alexandr Alexandrovich

E-mail: gamzin@inboxl.ru.

The Department of Radio Communication, Radio Broadcasting and Television; Postgraduate student.