

УДК 621.395.721

Уривський Л. А., докт. техн. наук, проф. (Тел.: +380 97 317 17 58. ORCID 0000-0002-4073-9681)

Осипчук С. А., аспірант (Тел.: +380 44 454 98 10. E-mail : leonid_uic@ukr.net)

(Національний технічний університет України «КПІ», ІТС)

СИНТЕЗ СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ OFDM В КАНАЛЕ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Уривський Л. О., Осипчук С. О. Синтез сигнально-кодowych конструкцій для OFDM в каналі з постійними параметрами. Представлено метод синтезу сигнально-кодowych конструкцій для технології OFDM з метою досягнення необхідної ймовірності бітрової помилки на приймальній стороні в каналі з постійними параметрами. Метод запропонований для випадку використання технології OFDM як альтернативи одночастотної передачі.

Ключові слова: OFDM, QPSK, LDPC, сигнально-кодова конструкція, SCS, SNR, BER

Уривский Л. А., Осипчук С. А. Синтез сигнально-кодowych конструкцій для OFDM в каналі с постійними параметрами. Представлен метод синтеза сигнально-кодowych конструкцій для технологии OFDM с целью достижения требуемой вероятности битовой ошибки на приемной стороне в канале с постоянными параметрами. Метод предложен для случая использования технологии OFDM как альтернатива одночастотной передаче.

Ключевые слова: OFDM, QPSK, LDPC, сигнально-кодочая конструкция, SCS, SNR, BER

Uryvskyy L. O., Osypchuk S. O. Synthesis of signal-code sequence for OFDM in the channel with permanent parameters. The signal-code sequence (SCS) synthesis method for OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) subcarriers is presented for achievement the required bit error rate (BER) on the receiver side in the channel with permanent parameters. The method is proposed as an alternative against the single carrier (SC) transmission and for achievement the required BER.

Keywords: OFDM, QPSK, LDPC, signal-code sequence, SCS, SNR, BER

Введение. OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, ортогональное частотное мультиплексирование) – широко используемый способ формирования сигналов в современных телекоммуникационных системах [1]. OFDM имеет принципиальные отличия в формировании сигналов по сравнению с одночастотной передачей. В OFDM последовательно реализуются: разделение входного потока бит от источника на N субпотоків с равной скоростью, где каждый субпоток имеет скорость в N раз меньше, чем входной поток; манипуляция каждого субпотоків заданным видом манипуляции; формирования из субпотоків суммарного потока со скоростью входящего потока; передача суммарного сигнала в линию связи.

В OFDM разбиение высокоскоростного потока на низкоскоростные потоки приводит к таким свойствам технологии OFDM, как высокий ПИК-фактор, а также в N раз меньшая энергетика каждой поднесущей OFDM, что показывает неэффективное использование энергетического ресурса [2]. OFDM всегда дает проигрыш по достоверности и эффективности использования энергетического ресурса сравнительно с передачей на одной частоте. В [2] показано, что усиление уровня OFDM сигнала с некоторым оптимальным коэффициентом усиления в передатчике OFDM позволяет улучшать эффективность использования энергетического ресурса канала связи и повышать достоверность передачи информации в точке приема. В то же самое время, повышение достоверности передачи в случае применения этого приема все еще не обеспечивает того уровня достоверности передачи, который обеспечивается при одночастотной передаче при использовании таких же ресурсов канала связи.

Для улучшения достоверности передачи информации при использовании OFDM можно использовать и другие альтернативные методы повышения достоверности, например, избыточное помехоустойчивое кодирование в сочетании с многократной манипуляцией. Сигнально-кодочой конструкцией (СКК) называют комбинацию некоторой многократной манипуляции и помехоустойчивого кодирования с определенными параметрами, которые обеспечивают наилучшее использование энергетического и частотного ресурсов канала связи,

т.е. приближают использование этих ресурсов на грани теоретически возможных границ использования [3]. СКК является инструментом, с помощью которого можно обеспечить в канале высокую скорость передачи за счет многократной манипуляции, и обеспечить требуемую достоверность передачи информации за счет помехоустойчивого кодирования.

В работе предлагается метод синтеза сигнально-кодовых конструкций для технологии OFDM в канале с постоянными параметрами с целью достижения такой же достоверности, как и в случае одночастотной передачи.

Постановка задачи. Объектом исследования является передача информации по беспроводному каналу с использованием технологии OFDM. Предметом исследования является синтез СКК для поднесущих OFDM. Целью исследования является разработка метода синтеза СКК для поднесущих OFDM в канале с постоянными параметрами и достижение требуемой достоверности информации на приемной стороне.

Входными данными являются параметры: отношение сигнала к шуму в точке приема и требуемая вероятность битовой ошибки на приемной стороне $p_{\text{бит}}$.

В результате требуется получить параметры синтезированной СКК для поднесущих OFDM с параметрами: тип манипуляции, оптимальный коэффициент усиления (КУ) поднесущих OFDM сигнала, параметры помехоустойчивого (ПУ) кода (n, k) , где n – длина кодового слова, k – число информационных бит в кодовом слове.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- определение сигнальной конструкции, т.е. метода манипуляции;
- определение оптимального КУ уровня поднесущих OFDM сигнала;
- определение параметров ПУ кода, который обеспечит компенсацию потерь достоверности OFDM при передаче информации до требуемого.

Использование физических ресурсов канала связи технологией OFDM. Пусть осуществляется одночастотная передача сигнала по беспроводному каналу с белым шумом и спектральной мощностью N_0 . Пусть в точке приема мощность сигнала составляет $P_{\text{пр}}$ и длительность символа равна T_0 . Тогда отношение сигнал/шум в точке приема $h_{\text{пр}}^2$ можно представить выражением [4]:

$$h_{\text{пр}}^2 = \frac{P_{\text{пр}} T_0}{N_0}.$$

При передаче сигнала с использованием технологии OFDM, на i -ю поднесущую OFDM приходится часть напряжения U_i :

$$U_i = \frac{U_0}{N}.$$

Мощность пропорциональна квадрату напряжения $P \propto U^2$. Отсюда вытекает, что на i -ю поднесущую OFDM приходится часть мощности, в N^2 раз меньшая мощности передатчика:

$$P_i \propto U_i^2 = \left(\frac{U_0}{N}\right)^2 = \frac{P_0}{N^2}.$$

Поэтому суммарная мощность P_{Σ} , выделяемая поднесущим OFDM, в N раз меньше мощности передатчика P_0 , что показывает неэффективное использование энергетического ресурса:

$$P_{\Sigma} = P_i \cdot N = \frac{P_0}{N} \ll P_0.$$

Длительность i -го символа OFDM равна:

$$T_i = T_0 \cdot N.$$

Скорость передачи в i -м канале OFDM составляет:

$$V_i = \frac{V_0}{N}.$$

Таким образом, отношение сигнал/шум для каждой поднесущей $h_{\text{ПР}i}^2$ в точке приема равняется:

$$h_{\text{ПР}i}^2 = \frac{P_i T_i}{N_0} = \frac{h_{\text{ПР}}^2}{N},$$

что в N раз хуже, чем в случае одночастотной передачи.

В связи с низким отношением сигнал/шум на каждой поднесущей OFDM сигнала $h_{\text{ПР}i}^2$, на каждой поднесущей OFDM сигнала достигается достоверность приема информации $P_{\text{бум_OFDM}_i}$, значительно ниже требуемой и достигаемой достоверности при одночастотной передаче $p_{\text{бум}} = p_{\text{треб}} = 10^{-6}$:

$$P_{\text{бум_OFDM}_i} \ll P_{\text{треб}}.$$

Этот разрыв тем больше, чем больше число поднесущих OFDM N . В связи с этим, необходимым является использование дополнительных методов повышения достоверности для OFDM сигналов, как, например, использование оптимального КУ поднесущих OFDM $K_{U_опт}$ [2] и помехоустойчивого кодирования [6, 7].

Определение сигнальной конструкции. Метод синтеза СКК предусматривает выбор вида манипуляции для передачи на одной несущей частоте по критерию обеспечения требуемой достоверности передачи на приемной стороне при известном отношении сигнал/шум $h_{\text{ПР}}^2$ в точке приема. В описанном методе синтеза СКК использован вид манипуляции поднесущей QPSK для демонстрации работы метода.

Таким образом, при известном отношении сигнал/шум, например, $h_{\text{ПР}}^2 = 13,6$ дБ и заданной требуемой достоверности передачи информации на приемной стороне $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$, из Рис. 1 видно, что при указанных параметрах канала наилучшую достоверность обеспечивает манипуляция QPSK из набора {QPSK, QAM-16, QAM-64} на уровне $p_{\text{бум}} = 10^{-6}$, что удовлетворяет требованиям достоверности $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$.

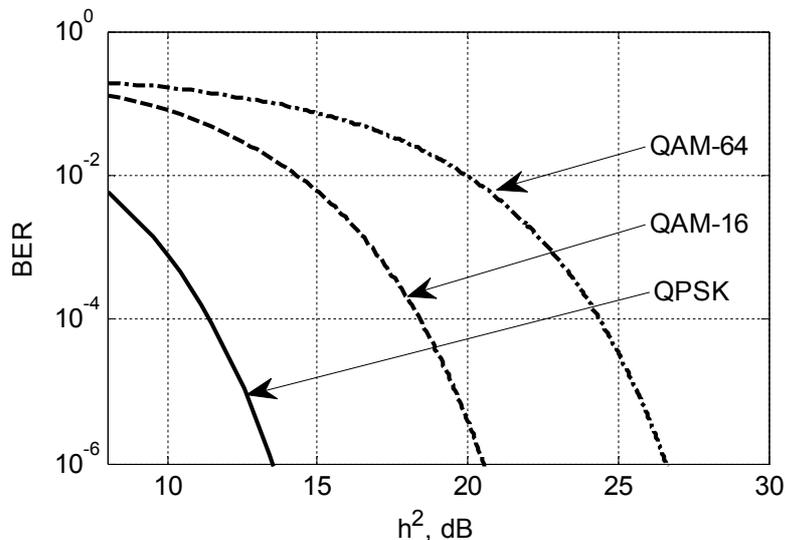


Рис. 1. Зависимость битовой ошибки от отношения сигнал/шум при одночастотной передаче

Поэтому при одночастотной передаче в данном случае нет необходимости прибегать к дополнительным методам повышения достоверности передачи информации. Выбранная сигнальная конструкция QPSK будет использована для манипуляции поднесущих OFDM сигнала с числом поднесущих частот $N_{\text{OFDM}} = 16$ последующим применением соответствующих методов для повышения достоверности передачи информации на каждой поднесущей OFDM.

Определение оптимального коэффициента усиления OFDM сигнала. В работе [2] показано, что OFDM сигнал можно усиливать с оптимальным КУ поднесущих OFDM на передающей стороне с очень малой вероятностью появления нелинейных искажений p_{NL_dist} в усилителе передатчика. За критерий оптимальности принято условие равенства появления вероятности символьной ошибки при многократной манипуляции $p_{\text{сymb}_i}$ и нелинейных искажений в усилителе передатчика p_{NL_dist} :

$$P_{\text{сymb}_i} = P_{NL_dist}.$$

Как показано на Рис. 2, усиление сигнала с оптимальным КУ возможно благодаря нормальному закону распределения амплитуд OFDM сигнала [2, 5]. В точке $h_{\text{ПР}}^2 = 13,6$ дБ при переходе от режима одночастотной передачи с QPSK, который обеспечивал $p_{\text{бум}} = 10^{-6}$, в режим OFDM с $N_{\text{OFDM}} = 16$ и манипуляции каждой поднесущей QPSK, достигается достоверность передачи $p_{\text{бит_OFDM}_i} = 1,2 \cdot 10^{-1}$.

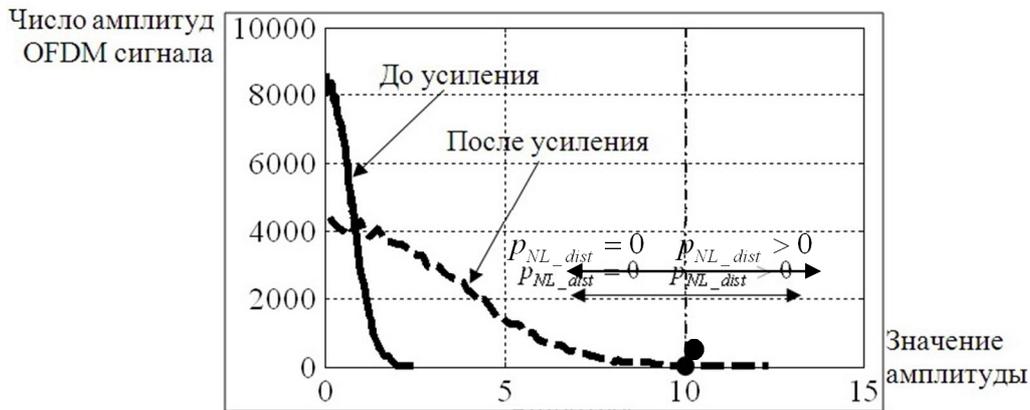


Рис. 2. Функции распределения амплитуд OFDM сигнала до усиления и после усиления

Использование оптимального КУ поднесущих OFDM для повышения отношения сигнал/шум в точке приема $h_{\text{ПР}}^2 = 13,6$ дБ позволяет значительно улучшить исходную достоверность в точке приема на каждой поднесущей $p_{\text{бум_OFDM}_i} = 1,2 \cdot 10^{-1}$ до $p_{\text{бум_OFDM}_i + K_{\text{У_ОПТ}}} = 4 \cdot 10^{-2}$, но эта достоверность все еще хуже требуемой достоверности $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$:

$$P_{\text{бит_OFDM}_i} > P_{\text{бит_OFDM}_i + K_{\text{У_ОПТ}}} \gg P_{\text{треб}}.$$

Недостающие потери достоверности до $p_{\text{треб}}$ можно компенсировать применением ПУ кодирования.

Определение параметров ПУ кода. В современных ТК системах популярностью пользуются такие ПУ коды, как LDPC (low-density parity check codes, коды с низкой плотностью проверок на четность) [6]. Это блочные разделимые коды со сравнительно простыми методами кодирования и декодирования, длина блока n которых может достигать десятки тысяч бит, что является очень весомым преимуществом данных кодов. В работе [7] приведены результаты исследования и сравнения исправляющих способностей LDPC кодов и БЧХ кодов, которые показали, что LDPC коды по исправляющим способностям по меньшей мере не хуже БЧХ кодов, а то и лучше, в то время как БЧХ коды считаются едва ли не наилучшими ПУ кодами. Таким образом, LDPC код выбран в качестве ПУ кода для поднесущих OFDM как код с хорошей исправляющей способностью.

В работе [8] предложен метод выбора ПУ кода блочного типа при заданных исходных условиях: длина кодового слова n , требуемая достоверность передачи информации $p_{\text{треб}}$, а также метод манипуляции несущей. Суть метода выбора ПУ кода по методике [8] заключается в том, что в результате определяется скорость кодирования блочного кода R при изначально заданной длине кодового слова n . Код с найденной скоростью R будет исправлять соответствующее число ошибок в кодовом слове для достижения требуемой вероятности битовой ошибки $p_{\text{треб}}$ при заданном методе манипуляции. Данный метод поиска ПУ кода использован в текущей работе для нахождения параметров LDPC кода с изначально предопределенной длиной кодового слова n . Так, например, если требуемая вероятность битовой ошибки на приемной стороне составляет $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$, а параметр $h^2 = 11$ дБ (Рис. 1), выбрана длина кодового слова $n = 200$ и метод манипуляции QPSK, то для обеспечения требуемой достоверности скорость кодирования должна быть равна $R = 0,86$.

На Рис. 3 представлена зависимость скорости кода R и отношения кодового расстояния ПУ кода к удвоенной длине блока: $R = f(d/2n)$. На Рис. 3, 4 обозначены точки LDPC кода: А – LDPC $n=200, R=0.86, t=3$; В – LDPC $n=200, R=0.80, t=6$; С – LDPC $n=200, R=0.68, t=10$. Линии: 1 – граница Варшавова-Гильберта (ВГ); 2 – граница Плоткина; 3 – граница Шеннона.

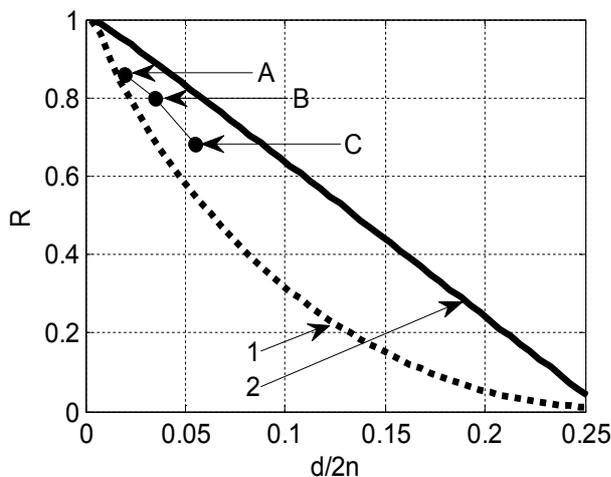


Рис. 3. LDPC код (А, В, С) в координатах $R = f(d/2n)$

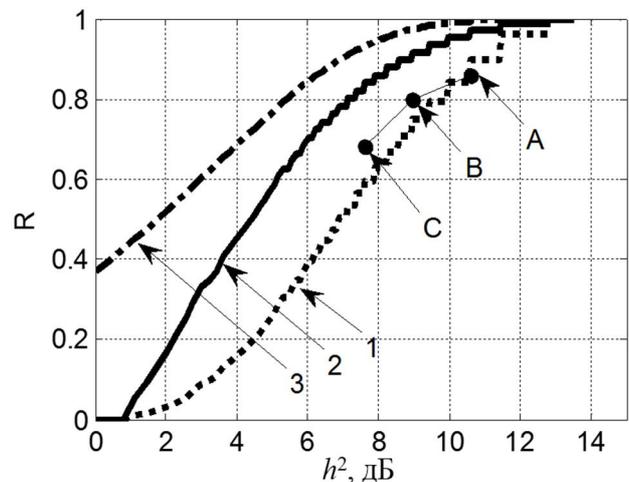


Рис. 4. LDPC код (А, В, С) в координатах $R = f(h^2)$

Линии ВГ и Плоткина определяют границы существования блочных ПУ кодов. граница ВГ показывает, что существует ПУ код, лежащий на данной линии, а может быть и выше. В то же время граница Плоткина показывает, что выше данной линии код не существует. Таким образом, положение кода между границами ВГ и Плоткина говорит о том, что код хороший, и чем ближе код к границе Плоткина, тем лучше его исправляющая способность и/или скорость.

Таким образом, согласно рассматриваемому примеру синтеза СКК, точка LDPC кода А с параметрами $n=200$, $R=0.4$ (рис. 3, 4) обеспечит компенсацию потерь достоверности с $p_{\text{оум_OFDM}_{i+K_{\text{У_ОПТ}}}} = 4 \cdot 10^{-2}$ до $p_{\text{оум_OFDM}_{i+K_{\text{У_ОПТ}}+LDPC}} = 10^{-6}$ при использовании OFDM с $N_{\text{OFDM}} = 16$ поднесущими и оптимального коэффициента усиления поднесущих $K_{\text{У_ОПТ}} = 2,2$ в точке $h^2=5,02$ дБ.

Синтез сигнально-кодовой конструкции для OFDM сигнала. Описанные выше шаги синтеза СКК можно представить схематически в следующем виде (Рис. 5):

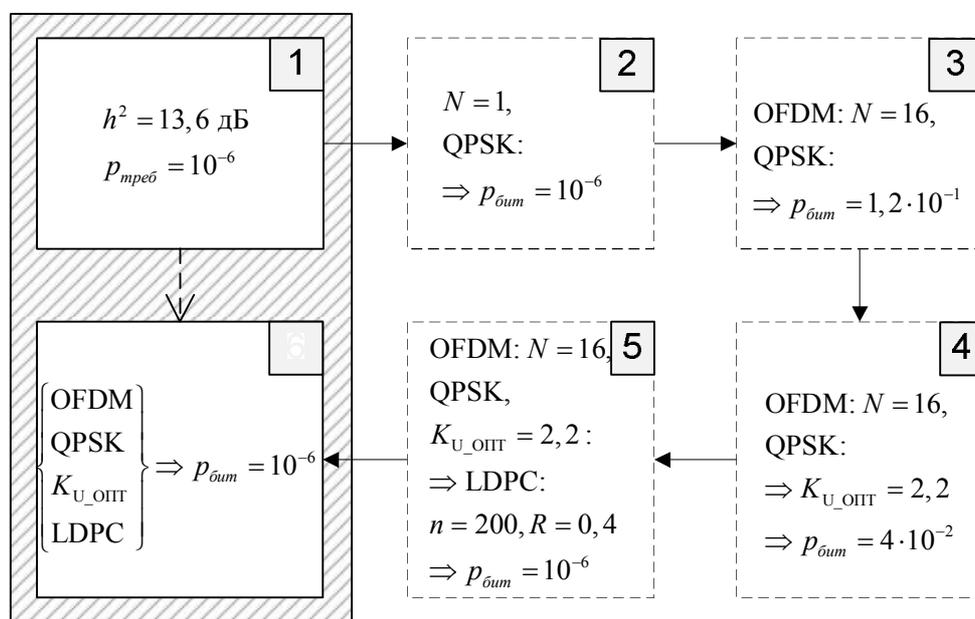


Рис. 5. Алгоритм синтеза СКК для поднесущих OFDM сигнала

Алгоритм синтеза СКК учитывает следующие параметры и включает шаги:

1. Исходными данными являются параметры канала $h_{\text{ПР}}^2$ и требование к достоверности принимаемой информации $p_{\text{треб}}$.
2. Определяется сигнальная конструкция, которая обеспечивает требуемую достоверность $p_{\text{треб}}$ при известных характеристиках канала: $h_{\text{ПР}}^2$.
3. Определяется вероятность ошибки $p_{\text{оум}}$ для одной поднесущей OFDM с числом поднесущих частот N . Такое же значение битовой ошибки обеспечивает суммарный OFDM сигнал.
4. Определяется оптимальный коэффициент усиления поднесущих OFDM сигнала $K_{\text{У_ОПТ}}$. Достоверность принимаемой информации $p_{\text{оум}}$ при этом улучшается, но значение достоверности все же еще хуже требуемой достоверности $p_{\text{треб}}$.

5. При заданних исходных параметрах: длина блока ПУ кода n , метод манипуляции, и требуемая достоверность передачи информации $p_{\text{треб}}$, определяется скорость ПУ кода; при этом достигается $p_{\text{бит}} = p_{\text{треб}}$ на каждой поднесущей OFDM и, соответственно, OFDM в целом.

6. Набор $\{N_{\text{OFDM}}, K_{\text{U_ОПТ}}, \text{СКК}\}$ позволяет осуществлять передачу на основе технологии OFDM с требуемой достоверностью.

На Рис. 6 описанная методика изображена схематически для случая $N_{\text{OFDM}} = 16$, QPSK и $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$.

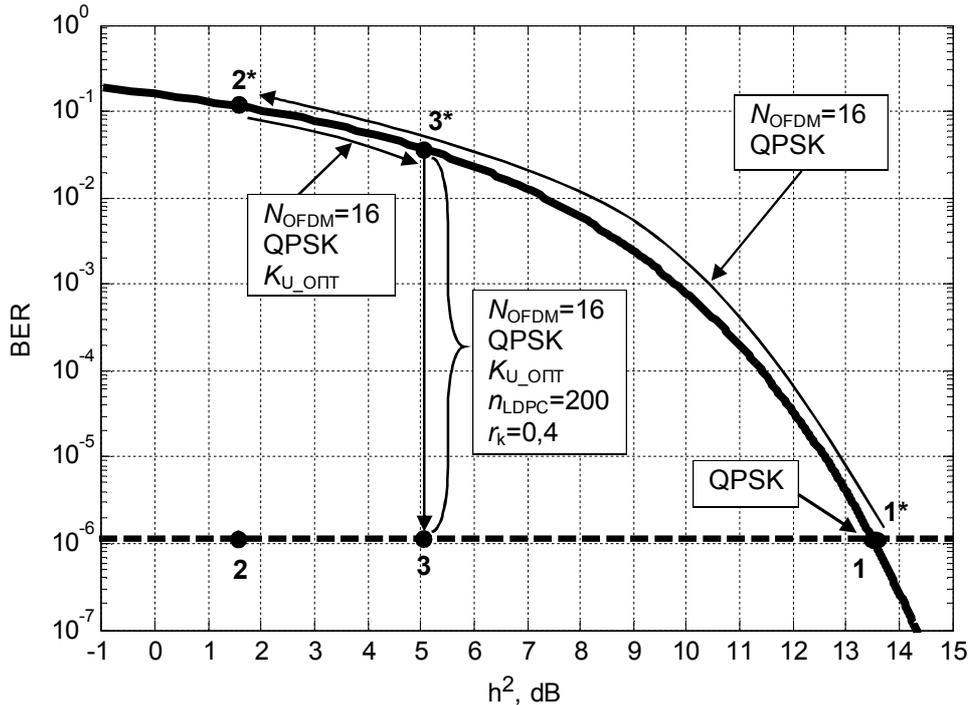


Рис. 6. Графическое изображение метода синтеза СКК

На Рис. 6 отображен случай, когда исходным является версия передачи некоторого потока на одной частоте с манипуляцией QPSK. Тогда в месте приема $h^2 = 13,6$ дБ (точка 1 на рис. 6), при этом достигаемая вероятность битовой ошибки при манипуляции QPSK $p_{\text{бит}} = 10^{-6}$ (точка 1*).

При обращении к режиму OFDM с числом поднесущих $N=16$ и манипуляции QPSK:

$$h_i^2 = h^2/N = 13,6 \text{ дБ} - 12 \text{ дБ} = 1,6 \text{ дБ (точка 2)}.$$

Достоверность приема каждой поднесущей OFDM ухудшается ($p_{\text{бит}} = 1,2 \cdot 10^{-1}$ – точка 2*) в связи с ухудшением $h_i^2 = 1,6$ дБ для каждой поднесущей (траектории 1 – 2 и 1* – 2* на Рис. 6).

При использовании инструмента оптимального усиления OFDM сигнала:

$$K_{\text{U_ОПТ}_{\{\text{QPSK}, N=16\}}} = 2.2 \text{ раза (3,42 дБ)} - \text{точка 3 (траектории 2 – 3 и 2* – 3* на Рис. 6)}.$$

Таким образом, после усиления OFDM сигнала:

$$h_i^2 = 1,6 \text{ дБ} + 3,42 \text{ дБ} = 5,02 \text{ дБ}; (p_{\text{бит}} = 4 \cdot 10^{-2} - \text{точка 3*}; \text{траектории 2 – 3 и 2* – 3*}).$$

Применяя избыточное ПУ кодирование LDPC с $n=200$ бит для достижения требуемой достоверности $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$, получаем параметр кода (скорость кодирования, Рис. 4): $r_k=0,4$ для $h^2=5,02$ дБ (траектория 3* – 3 на Рис. 6).

Итак, при использовании OFDM с числом поднесущих $N=16$ при отношении сигнал шум $h^2=5,02$ дБ, достигаемом за счет оптимального усиления $K_{U_опт}$, можно обеспечить достоверность $p_{\text{треб}} = 10^{-6}$ с помощью помехоустойчивого кодирования, как при одночастотной передаче сигналов QPSK без кодирования и OFDM, но при отношении сигнал шум $h^2=13,6$ дБ. Достижимый энергетический выигрыш уравновешен потерей в скорости передачи символов из-за ПУ кодирования.

Выводы. В работе предложен и проиллюстрирован примером метод синтеза сигнально-кодовых конструкций (СКК) для технологии OFDM в канале с постоянными параметрами с целью достижения такой же достоверности передачи, как и в случае передачи на одной частоте.

При наличии заданных значений частотного, энергетического и временного ресурсов, технология OFDM в непосредственном воспроизведении характеризуется неэффективным использованием энергетического ресурса. Достоверность передачи информации OFDM по сравнению с одночастотной передачей при использовании тех же физических ресурсов значительно хуже и непригодна для использования на практике. В связи с этим поддержание требований к достоверности при использовании OFDM достигается либо за счет использования дополнительного энергетического ресурса, либо же за счет альтернативных методов повышения достоверности, таких, как использование помехоустойчивого кодирования, что и является предметом статьи.

Литература

1. Prasad R. OFDM for wireless communications systems / R. Prasad. – Artech House Universal Personal Communications series, 2004. – 291 p.
2. Uryvskiy L. OFDM signal energy characteristics research in channel with permanent parameters / L. Uryvskiy, S. Osypchuk // Telecommunication Sciences. – 2013. – Vol. 4, No 2. – PP. 22-27.
3. Науменко М. І. Високошвидкісна завадостійка передача інформації в каналах телекомунікаційних систем : монографія / М. І. Науменко. – Київ : Альтерпрес, 2003. – 220 с.
4. Финк Л. М. Терия передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. – Москва : Сов. радио, 1970. – 728 с.
5. Ochiai H. On the Distribution of the Peak to Average Power Ratio in OFDM Signals / H. Ochiai, H. Imai // IEEE Trans. Commun. – Feb. 2001. – Vol. 49, No. 2. – PP. 282-89.
6. Gallager R. Low-Density Parity-Check Codes / R. Gallager. – MIT Press, 1963.
7. Uryvsky L. Comparative analysis of LDPC and BCH codes error-correcting capabilities / L. Uryvsky, S. Osypchuk // Telecommunication Sciences. – 2014. Vol. 5, No. 1. – PP. 5-9.
8. Урывский Л. А. Помехоустойчивые коды с максимальным приближением к границе Шеннона / Л. А. Урывский, Е. А. Прокопенко, А. М. Пешкин. – Telecommunication Sciences. – 2011. – Vol. 2, No.1. – P. 41-46.