

УДК 621.372

## ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ С OFDM

К. т. н. А. Б. Коханов, С. В. Кан

Одесский национальный политехнический университет  
Украина, г. Одесса  
skoh@mail.ru, sergik-199022@mail.ru

*В докладе рассмотрен способ использования быстрого преобразования Хартли вместо быстрого преобразования Фурье для формирования сигнала с OFDM, что позволяет более чем в два раза уменьшить число арифметических операций при осуществлении OFDM-модуляции. Полученное сигнальное созвездие подтверждает наличие QAM-модуляции в каждом частотном канале OFDM-сигнала.*

*Ключевые слова: QAM, OFDM, биссектрисы сигнального созвездия, быстрое преобразование Хартли.*

Ортогональная частотная цифровая модуляция (OFDM, Orthogonal Frequency Digital Modulation) [1] является методом модуляции множества несущих с хорошей спектральной эффективностью, который соответствует требованию современной беспроводной модемной связи (Wi-Fi, Wi-Max) в компьютерных и других сетях. Он основан на концепции частотного разделения каналов, где каждая из поднесущих в каждом частотном канале является ортогональной по отношению к другим поднесущим в других частотных каналах [1]. В передатчике модуляция осуществляется с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Для таких вычислений требуется большое количество комплексных умножений, причем каждое из них выполняется с использованием четырех действительных умножений и двух действительных сложений. Очевидно, что сложность выполнения OFDM в модеме будет снижена, если соответствующий модулятор/демодулятор будет реализован с использованием действительных преобразований, в то время как быстрые алгоритмы с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) выполняются с использованием комплексной арифметики.

Целью данной работы является разработка алгоритма и аппаратных средств модулятора и демодулятора для использования в модемах первичного доступа в компьютерной сети или системах связи. Для устранения указанного ранее недостатка предложено использовать быстрое преобразование Хартли (БПХ) для формирования множества ортогональных частотных каналов. Преобразование Хартли (ПХ) имеет одинаковый вид для прямого и для обратного преобразований. Для массива входных данных (символов)  $a_n$  ПХ может быть записано в следующем виде [2]:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \operatorname{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad k=0,1,2,\dots,N-1, \quad (1)$$

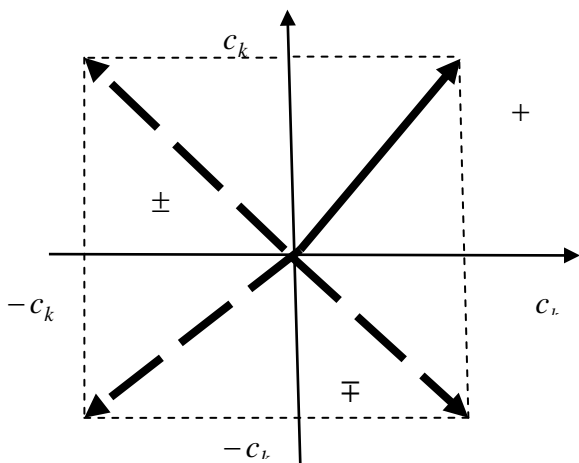
где  $\operatorname{cas}(z) = \cos(z) + \sin(z)$ . В силу свойств ПХ для действительного массива значений символов  $a_n$  будет также действительным массивом выходного потока модулятора  $x(k)$ . Таким образом, для передачи сигнала будет использоваться не комплексное ядро преобразования Фурье (комплексная экспонента), а ядро преобразования Хартли (функция  $\operatorname{cas}$ ), которое является действительной функцией. Исходя из фильтрующего свойства преобразования Фурье, можно сказать, что таким же свойством обладает и преобразование Хартли, которое является частным случаем преобразования Фурье. Для  $k$ -го частотного канала в этом случае можно записать выражение для одного символьного интервала

$$C_k \operatorname{cas}(2\pi k / N) = C_k \cos(2\pi k / N) + C_k \sin(2\pi k / N). \quad (2)$$

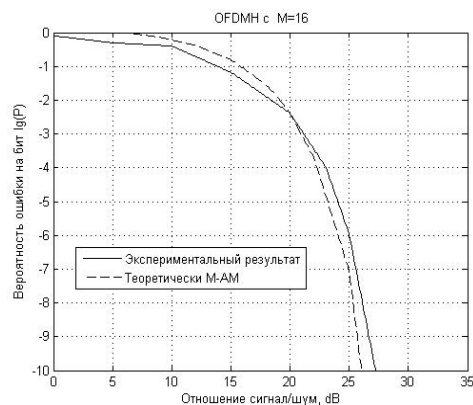
Из (2) видно, что в синфазной и квадратурной частях  $k$ -го частотного канала осуществляется квадратурная модуляция (QAM) символа с амплитудой  $C_k$ . Из этого также видно, что амплитуда в синфазном и квадратурном каналах одинакова. В этом случае амплитуда и фаза вектора QAM-сигнала будет определяться как [2]

$$C_k = \sqrt{C_k^2 + C_k^2} = C_k \sqrt{2}, \quad \varphi = \arctg \frac{C_k}{C_k} = \arctg 1 = \frac{\pi}{4}. \quad (3)$$

Так как  $C_k$  могут принимать значения  $\pm$ , что зависит от значений синуса и косинуса в (1), то сигнальное созвездие будет иметь вид, приведенный на рисунке. Значения  $C_k$  в каждом частотном канале будут располагаться на биссектрисах одного из четырех квадрантов и никогда не будут появляться вне биссектрис.



а)



б)

Биссектрисы сигнального созвездия  $k$ -го частотного канала OFDM-сигнала с использованием ДПХ (а) и вероятность появления ошибки неправильно принятого бита (порядок) в зависимости от отношения сигнал/шум для 16-уровневого сигнала (эквивалент QAM-16) (б)

На рисунке также показана зависимость вероятности появления ошибки неправильно принятого бита в зависимости от отношения сигнал/шум в радиоканале, что показывает возможность применения БПХ (эквивалент QAM-16) для формирования OFDM-сигналов.

Применение БПХ обеспечивает экономию операций умножения в два раза и более чем в три раза – числа сложений, что позволяет уменьшить время вычислений (процессорное время) и, как следствие, значительно уменьшить групповую задержку времени на модуляцию и демодуляцию OFDM-сигналов. Хорошее совпадение теоретической и экспериментальной кривых появления ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум позволяет использовать ПХ для модемов с OFDM-модуляцией.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балашов В. А., Воробийченко П. П., Ляховецкий Л. М. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами.— Москва: Эко-трендз, 2012.— 228 с.
2. Коханов А. Б., Захаров В. В. Модифицированный алгоритм обработки с применением преобразования Хартли // Радиотехника и электроника.— 2005.— Т. 50 — № 12.— С. 1—5.

О. В. Kokhanov, S. V. Kan

#### Applying orthogonal Hartley transform in OFDM systems.

The paper considers the method of application of fast Hartley transform for OFDM transfer systems. The method allows transferring data in subscriber line using orthogonal frequency digital modulation without complex arithmetic (using only real arithmetic). This allows increase of speed of OFDM signal calculation.

*Keying words:* SSB QAM, SSB OFDM, modulator, demodulator, fast Hartley transform.