

УДК 517.4:621.396

В.И. Слюсар¹, К.А. Васильев²¹Центральный НИИ вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, Киев²Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУУ «КПИ», Полтава

МЕТОД НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ НЕСУЩИХ

В статье рассмотрен метод неортогональной частотной дискретной модуляции на основе преобразования Хартли с квадратурной амплитудной модуляцией частотных несущих. Применение вещественного ядра функций Хартли обеспечивает вычисления без использования комплексных чисел и, как следствие, позволяет снизить вычислительные затраты, упростить аппаратную реализацию метода N-OFDM. Модулирование отдельных частотных несущих сигналов N-OFDM использованием QAM модуляции повышает пропускную способность каналов связи.

неортогональная частотная дискретная модуляция, преобразование Хартли, чётная и нечётная функции Хартли, амплитудно-импульсная модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, метод наименьших квадратов

Введение

Одним из перспективных методов цифровой обработки сигналов является метод неортогональной частотной дискретной модуляции (N-OFDM) [1, 2], основанный на уплотнении частотных каналов за счёт передачи несущих на неортогональных частотах. Применение данного метода позволяет повысить пропускную способность каналов связи без расширения общей полосы частот сигнала. Поскольку преимущества метода N-OFDM проявляются при большом числе частотных каналов, его реализация с использованием классических преобразований Фурье (ПФ) сталкивается с рядом трудностей, среди которых следует отметить вычислительную сложность с учётом комплексного представления чисел. Несимметричность ПФ относительно мнимой единицы компенсируется выполнением операции перестановки исходных данных [3], требующей дополнительных вычислительных затрат. Применение преобразования Хартли (ПХ) [4] позволяет отказаться от комплексной записи чисел и, как следствие, снизить вычислительные затраты, упростить аппаратную реализацию метода N-OFDM.

Метод N-OFDM на основе преобразования Хартли с QAM модуляцией частотных несущих

Основная идея метода N-OFDM на основе преобразования Хартли была изложена авторами ранее в [5, 6]. Существенным недостатком предложенного ранее метода является то, что отдельные частотные несущие сигналов N-OFDM модулировались с использованием амплитудно-импульсной модуляции (PAM, Pulse Amplitude Modulation) [7]. Последнее существенно ограничивает применение метода

N-OFDM на основе ПХ в технике радиосвязи вследствие невысокой пропускной способности и низкой помехоустойчивости сигналов PAM. Переход к более эффективному методу модуляции – квадратурной амплитудной модуляции (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) [7] требует усовершенствования предложенного ранее метода N-OFDM на основе ПХ.

Целью статьи является рассмотрение метода неортогональной частотной дискретной модуляции на основе преобразования Хартли с квадратурной амплитудной модуляцией частотных несущих.

Как и в [5, 6] выбор частот несущих сигналов N-OFDM выбирается с интервалом меньшим за интервал между ближайшими ортогональными частотами, который равен:

$$\Delta F = \frac{1}{T \cdot \tau}, \quad (1)$$

где T – количество отсчётов цифроаналогового преобразователя (ЦАП); τ – период дискретизации ЦАП.

С учётом уплотнения относительно ортогональных частот интервал между ближайшими неортогональными несущими будет определяться выражением:

$$\Delta f = \xi \cdot \frac{1}{T \cdot \tau}, \quad (2)$$

где $\xi = \Delta f / \Delta F$ – величина частотного уплотнения сигналов N-OFDM, выраженная в долях от интервала между ортогональными несущими.

Отличительной особенностью предлагаемого метода от метода, описанного в [5, 6] является передача двух вещественных квадратурных составляющих на каждой несущей частоте сигнала N-OFDM.

Запишем выражение для сигналов QAM в классическом представлении [7]:

$$U(t) = a^c \cdot \cos(\omega t) + a^s \cdot \sin(\omega t), \quad (3)$$

где a^c, a^s – амплитуды чётной и нечётной квадратурных составляющих, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота сигнала.

Выражение (3) можно переписать в виде дискретных отсчётов ЦАП:

$$U_s = a^c \cdot \cos(\omega \cdot \tau \cdot s) + a^s \cdot \sin(\omega \cdot \tau \cdot s) \quad (4)$$

или

$$U_s = a \cdot \sin(\omega \cdot \tau \cdot s + \varphi), \quad (5)$$

где s – порядковый номер отсчётов ЦАП;

$$a = \sqrt{(a^c)^2 + (a^s)^2} \text{ – амплитуда сигнала;}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-a^s}{a^c}\right) \text{ – начальная фаза сигнала.}$$

Функция Хартли имеет вид [4]:

$$\text{cas}(\theta) = \cos(\theta) + \sin(\theta). \quad (6)$$

Для перехода от классической записи QAM к записи в базе функций Хартли введём понятие чётной и нечётной функций Хартли:

$$\text{cas}(\theta) = \cos(\theta) + \sin(\theta); \quad \text{cas}(-\theta) = \cos(\theta) - \sin(\theta). \quad (7)$$

Тогда для сигналов QAM в базе функций Хартли перепишем выражение (4) с учётом (7):

$$U_s = a^c \cdot \text{cas}(\omega \cdot \tau \cdot s) + a^s \cdot \text{cas}(-\omega \cdot \tau \cdot s). \quad (8)$$

Для двухчастотного сигнала N-OFDM в базе функций Хартли с использованием QAM модуляции отдельных несущих запишем:

$$U_s = a_1^c \cdot \text{cas}[\omega_1 \tau (s - z_1)] + a_1^s \cdot \text{cas}[-\omega_1 \tau (s - z_1)] + a_2^c \cdot \text{cas}[\omega_2 \tau (s - z_2)] + a_2^s \cdot \text{cas}[-\omega_2 \tau (s - z_2)], \quad (9)$$

где $a_{1,2}^c, a_{1,2}^s$ – амплитуды квадратурных составляющих на 1-й и 2-й частоте, z_1, z_2 – смещение начала формируемой выборки относительно точки нулевой фазы 1-й и 2-й несущих частот.

По аналогии с [5] перепишем (9) в матричной форме. При этом для удобства записи введём

$$\text{cas}_{TM}^c = \text{cas}[\omega_M \tau (s_T - z_M)],$$

$$\text{cas}_{TM}^s = \text{cas}[-\omega_M \tau (s_T - z_M)],$$

где M обозначает номер несущей частоты. Вектор временных отсчётов напряжений двухчастотного сигнала N-OFDM, подлежащий передаче будет равен:

$$W_{dv} = P_{dv} \cdot A_{dv}^{c,s} = \begin{bmatrix} \text{cas}_{11}^c & \text{cas}_{11}^s & \text{cas}_{12}^c & \text{cas}_{12}^s \\ \text{cas}_{21}^c & \text{cas}_{21}^s & \text{cas}_{22}^c & \text{cas}_{22}^s \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{cas}_{T1}^c & \text{cas}_{T1}^s & \text{cas}_{T2}^c & \text{cas}_{T2}^s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1^c \\ a_1^s \\ a_2^c \\ a_2^s \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Обобщим на случай многочастотного сигнала. Для M -частотного сигнала N-OFDM в базе функций Хартли с использованием QAM модуляции отдельных несущих выражение для вектора временных отсчетов напряжений будет иметь вид:

$$W = P_{QAM} \cdot A^{c,s}, \quad (11)$$

где

$$P_{QAM} = \begin{bmatrix} \text{cas}_{11}^c & \text{cas}_{11}^s & \text{cas}_{12}^c & \text{cas}_{12}^s & \dots & \text{cas}_{1M}^c & \text{cas}_{1M}^s \\ \text{cas}_{21}^c & \text{cas}_{21}^s & \text{cas}_{22}^c & \text{cas}_{22}^s & \dots & \text{cas}_{2M}^c & \text{cas}_{2M}^s \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{cas}_{T1}^c & \text{cas}_{T1}^s & \text{cas}_{T2}^c & \text{cas}_{T2}^s & \dots & \text{cas}_{TM}^c & \text{cas}_{TM}^s \end{bmatrix} \text{ –}$$

сигнальная матрица сигнала N-OFDM в базе функций Хартли с использованием QAM модуляции отдельных несущих;

$A^{c,s} = [a_1^c \ a_1^s \ a_2^c \ a_2^s \ \dots \ a_M^c \ a_M^s]^T$ – вектор амплитуд квадратурных составляющих.

Матрица P_{QAM} представляет собой чередующиеся выборки чётных и нечётных составляющих функций Хартли на несущих частотах. Данная матрица не содержит информации, поскольку её значения определяются расстановкой несущих частот и заранее известны. Передаваемая информация заложена в векторе амплитуд квадратурных составляющих $A^{c,s}$.

Демодуляцию сигналов N-OFDM на основе ПХ, сформированных по вышеописанному алгоритму (11) будем рассматривать с ограничением, что сигнал передаётся в канале связи с аддитивным шумом, распределённым по нормальному закону [8]. Математическое ожидание шума стремится к нулю, среднеквадратическое отклонение к единице. Тогда, на выходе приемного устройства прошедшая среду распространения многочастотная сигнальная смесь может быть представлена матричной записью, отличающейся от (11) учетом воздействия аддитивного шума:

$$\tilde{U} = P_{QAM} \cdot A^{c,s} + N, \quad (12)$$

где $N = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_T]^T$ – вектор отсчетов напряжений шума.

Демодуляция сигналов N-OFDM сводится к решению системы уравнений (12). Для получения оптимальных оценок следует использовать оценивание амплитуд сигналов по методу наименьших квадратов [8]. При этом задача будет сведена к минимизации функционала:

$$L = \sum_{s=1}^T \left\{ \tilde{U} - \sum_{m=1}^M [a_m^c \text{cas}_{TM}^c + a_m^s \text{cas}_{TM}^s] \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (13)$$

Тогда оценку амплитуд принятого вектора можно получить, решая систему уравнений:

$$\frac{\partial L}{\partial a_M^c} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial a_M^s} = 0. \quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) возможно с использованием правила Крамера [9], как это показано в [2]. Однако такое решение громоздко и неудобно для построения имитационных моделей передачи сигналов N-OFDM. Представить решение системы уравнений (14) можно более компактным способом, если применить метод наименьших квадратов в матричной форме записи по отношению к

(12). Задача определения оптимальных оценок амплитуд будет сведена к минимизации следующего функционала:

$$L = \left\{ \tilde{U} - P_{QAM} \cdot \hat{A} \right\}^T \left\{ \tilde{U} - P_{QAM} \cdot \hat{A} \right\} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Дифференцирование (13) по \hat{A} дает оптимальную оценку вектора [2]:

$$\hat{A} = \left\{ P_{QAM}^T \cdot P_{QAM} \right\}^{-1} \cdot P_{QAM}^T \cdot \tilde{U}. \quad (16)$$

Таким образом, получен метод неортогональной частотной дискретной модуляции на основе преобразования Хартли с квадратурной амплитудной модуляцией частотных несущих. В сравнении с методом N-OFDM с PAM модуляцией частотных несущих [5, 6] полученный метод имеет большую вычислительную сложность, поскольку сигнальная матрица P_{QAM} имеет в два раза больше столбцов.

Тем не менее, это компенсируется увеличением пропускной способности, так как такой подход позволяет за время передачи одного фрагмента сигнала N-OFDM $\tau \cdot T$ передать вдвое больше бит информации, чем при использовании ранее предложенного метода. Кроме этого, поскольку частоты несущих полагаются точно известными, матрица

$$\left\{ P_{QAM}^T \cdot P_{QAM} \right\}^{-1}$$

может быть рассчитана заранее.

Выводы

В работе получен метод неортогональной частотной дискретной модуляции на основе преобразования Хартли с квадратурной амплитудной модуляцией частотных несущих. Такой подход предложен впервые.

Использование вещественного ядра функций Хартли обеспечивает вычисления без использования комплексных чисел.

Модулирование отдельных частотных несущих сигналов N-OFDM по алгоритму QAM позволяет увеличить пропускную способность каналов связи. Полученный метод может быть использован в разработке предложений по модернизации станций радиорелейной, тропосферной и космической связи.

Список литературы

1. Слюсар В.И., Смоляр В.Г. Частотное уплотнение каналов связи на основе сверхрелеевого разрешения сигналов // Радиоэлектроника. – 2003. – № 7. – С. 30-39.
2. Слюсар В.И., Смоляр В.Г. Метод неортогональной дискретной частотной модуляции сигналов для узкополосных каналов связи // Радиоэлектроника. – 2004. – № 4. – С. 53-59.
3. Коханов А.Б., Захаров В.В. Ортогональная много-тоновая модуляция с использованием преобразования Хартли // Радиоэлектроника. – 2004. – № 11. – С. 38-44.
4. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 175 с.
5. Слюсар В.И., Васильев К.А. Метод неортогональной частотной дискретной модуляции сигналов на основе базисных функций Хартли // Сб. материалов 2-ого Международного радиоэлектронного форума. Том 4. – Х.: ХНУРЭ. – 2005. – С. 224-226.
6. Слюсар В.И., Васильев К.А., Уткин Ю.В. Исследование возможностей частотного уплотнения сигналов N-OFDM на основе базисных функций Хартли // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2006. – № 6. – С. 215-218.
7. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1969. – 576 с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 720 с.

Поступила в редколлегию 22.02.2008

Рецензент: канд. техн. наук В.Г. Смоляр, Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУ Украины «КПИ», Полтава.

МЕТОД НЕОРТОГОНАЛЬНОЇ ЧАСТОТНОЇ ДИСКРЕТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ХАРТЛІ З КВАДРАТУРНОЮ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ЧАСТОТНИХ НЕСУЧИХ

Слюсар В.І., Васильєв К.О.

У статті розглянутий метод неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) на основі перетворення Хартлі з квадратурною амплітудною модуляцією (QAM) частотних несучих. Застосування дійсного ядра функцій Хартлі забезпечує обчислення без використання комплексних чисел і, як наслідок, дозволяє знизити обчислювальні витрати, спростити апаратну реалізацію методу N-OFDM. Модулювання окремих частотних несучих сигналів N-OFDM з використанням QAM модуляції підвищує пропускну спроможність каналів зв'язку.

Ключові слова: неортогональна частотна дискретна модуляція, перетворення Хартлі, парна та непарна функції Хартлі, амплітудноімпульсна модуляція, квадратурна амплітудна модуляція, метод найменших квадратів.

THE METHOD OF NON-ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING ON THE BASIC OF THE HARTLEY TRANSFORM WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION OF THE FREQUENCY CARRIERS

Slyusar V.I., Vasilyev K.A.

In article the method of non-orthogonal frequency division multiplexing (N-OFDM) on the basic of the Hartley transform with quadrature amplitude modulation (QAM) of the frequency carriers is considered. Application of a real kernel of functions Hartley provides calculations without use of complex numbers and, as consequence, allows to reduce computing expenses, to simplify hardware realisation of method N-OFDM. Modulation of separate frequency carriers signals N-OFDM with use of QAM modulation raises throughput of communication channels.

Keywords: non-orthogonal frequency division multiplexing, Hartley transform, even and odd functions Hartley, pulse amplitude modulation, quadrature amplitude modulation, least-squares method.