УДК621.391.26(075)

КОНВЕЙЄРНИЙ МОДУЛЯТОР QOFDM СИГНАЛУ

[1]Коханов О.Б., д.т.н, проф.; [2]Таранін В. П.; [3]Оршацький Г. В.[3]
[1,2,3]Національний університет «Одеська політехніка»
[1,2,3]Україна, Одеса
[1]o.b.kokhanov@op.edu.ua;[2]taraninv2002@stud.op.edu.ua;
[3]orshatskyi.8865123@stud.op.edu.ua

Анотація. *Розглядається метод формування сигналу з квадратурним ортогональним частотним цифровим мультиплексуванням (QOFDM) та структура побудови модулятора та демодулятора для такого сигналу. Для формування QOFDM сигналу застосовується квадратурна амплітудно-фазова модуляція Хартлі (КМХ), що дозволяє забезпечити енергетичний виграш у 9 дБ порівняно з відомою OFDM..*
Ключові слова*: Сигнал; модуляція; QOFDM; КМХ.*

Вступна частина. У сучасних системах передачі інформації з використання OFDM модуляції (мультиплексування) використовуються швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [1], що дозволяє у 10-15 разів підвищити швидкість обчислень у порівнянні зі звичайними процесорами при рівній тактовій частоті звичайного процесора і конвеєра. Конвеєрні процесори виконуються з фіксованою архітектурою і виконувати інші перетворення не в змозі. Вони відносяться до класу паралельних обчислювальних машин типу БКОД (MISD) — багато потоків команд (інструкцій) один потік даних. Але ШПФ потребує виконувати математичні операції над комплексними числам.

Метою дослідження є розробка функціональної схеми конвеєрного модулятора QOFDM сигналу на основі об'єднання ПРКХ [2] та модулятора квадратурної модуляції Хартлі (КМХ) [3].

Основна частина. Для подолання недоліку використання ШПФ було проведено зміну структури конвеєрного процесора Фур'є на структуру поточно-рекурсивного конвеєра Хартлі (ПРКХ). Арифметичні секції (блоки) мають однакову структуру для всіх блоків і повинні забезпечувати виконання операції метелика (елементарної операції) Хартлі [2]. Для алгоритму швидкого перетворення Хартлі (ШПХ) з підставою 2 і проріджуванням по частоті функціональна схема арифметичного блоку наведено на рисунку 1.

Алгоритм обчислення коефіцієнтів Хартлі задається наступними рівняннями

$$H_{(2k)} = h_n + h_{N/2+n},$$

$$H_{(2k+1)} = b_n \cos(\frac{2\pi}{N} n) + b_{N/2-n} \sin(\frac{2\pi}{N} n), \quad (1)$$

де $b_n = h_n - h_{N/2+n}$; $b_{N/2-n} = h_{N/2-n} - h_{N-n}$; $n=0,1,2,.....,N/2-1$; N — число елементів в оброблюваній послідовності, h_n – n-й елемент числової послідовності, k – номера елементів вихідної послідовності.

Функціональну схему формування сигналу з квадратурним частотним ортогональним мультиплексуванням (QOFDM) наведено рисунку 2. Вхідний бітовий потік x(k), де k=0,1,2,…. — нормований час, надходить на вхід формувача символів FS, який формує два масиви символів a(n) та b(n). Цифрова амплітуда M кожного символу a(n) і b(n) відповідає значенню $M = 2^p$, де p — ціле позитивне число 1, 2, 3, … . Цей же формувач символів FS формує на своєму виході два вихідні потоки символів

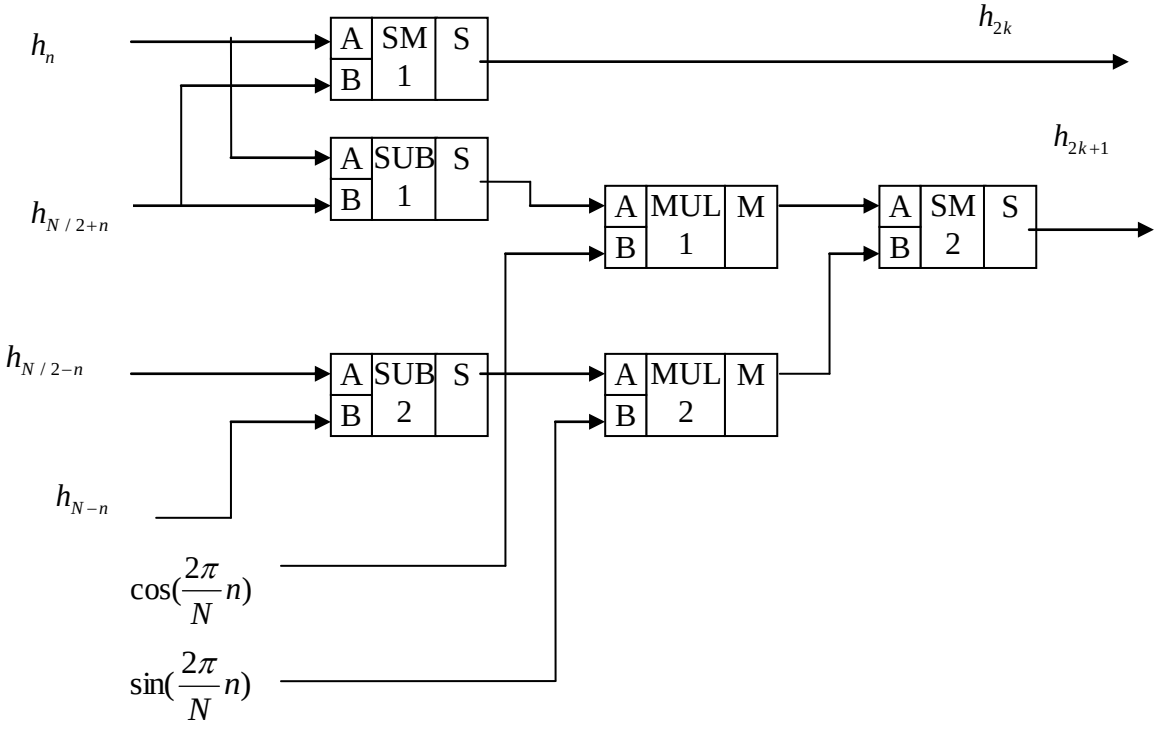


Рис. 2 – Функціональна схема арифметичного блоку для обчислення метелика Хартлі.

$$c(n) = [a(n) + b(n)]/2, \quad (2)$$
$$d(n) = [a(n) - b(n)]/2. \quad (3)$$

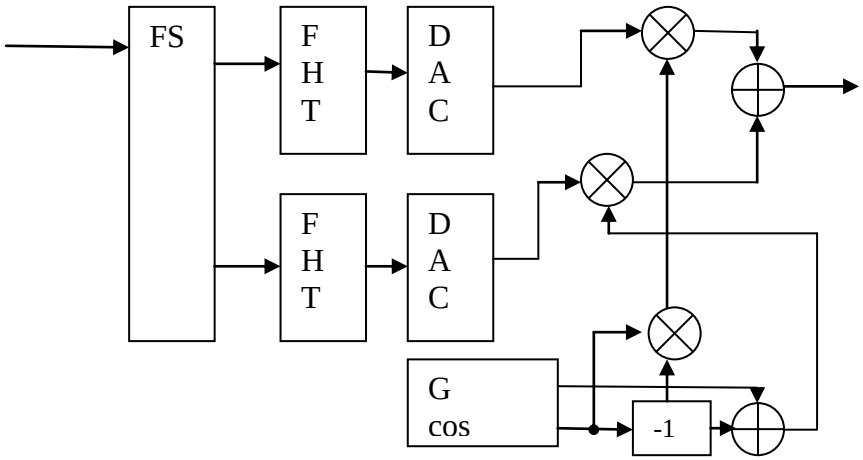


Рис. 2 — Функциональная схема формирования QOFDM сигнала (модулятора) [3].

Кожен потік символів c(n) і d(n) розділяється на виході формувачем FS на пакети довжиною $N = 2^m$, де m – 0, 1, 2, ..., які піддаються швидкому перетворенню Хартлі (ШПХ).

$$c(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c(n)\, cas\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad k=0, 1, 2, \ldots\ldots, N-1, \quad (4)$$

$$d(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} d(n)\, cas\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad k=0, 1, 2, \ldots\ldots, N-1, \quad (5)$$

у конвеєрних ПРКХ. Структура ПРКХ [2] дозволяє виконувати обробку двох потоків c(k) та d(k) паралельно (не змішуючи їх). Виконання ШПХ дозволяє перевести сигнал із частотної області у часову область [3]. На виходах процесорів ПРКЧ формуватимуться пакети символів c(k) і d(k) довжиною N до яких додається циклічний префікс і подовжені пакети

надходять на входи відповідних цифро-аналогових перетворювачів (DAC). З виходів DAC сигнали надходять на вхід модулятора, що забезпечує виконання квадратурної модуляції Хартлі (КМХ) [3]. На виході модулятора КМХ формується вихідний сигнал S(t) із квадратурною амплітудною модуляцією Хартлі

$$S(t) = \frac{A_m}{\sqrt{2}}\cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{A_m}{\sqrt{2}}\sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{B_m}{\sqrt{2}}\cos(\omega_0 t + \varphi) - \frac{B_m}{\sqrt{2}}\sin(\omega_0 t + \varphi) =$$
$$= \frac{A_m + B_m}{\sqrt{2}}\cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{A_m - B_m}{\sqrt{2}}\sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (6)$$

де A_m та B_m — амплітуди синфазного та квадратурного каналів на символьному інтервалі m , що забезпечує енергетичний виграш (6+3) дБ порівняно з відомою квадратурною модуляцією (КАМ) [3]. Отриманий сигнал з QOFDM *S(t)* передається радіоканал через передавальну частину системи. Сигнальне же сузір'я для сигналу КМХ формується так як і для відомої квадратурної модуляції (КАМ).

Висновки. В роботі було показано, що рівень шуму де модульованих сигналів QOFDM знизився на величину, що дорівнює √2=1,41 разів, що відповідає 3 дБ у порівнянні з сигналами відповідно. Ураховуючи, що використання КМХ сигналу при його демодуляції забезпечує енергетичний виграш 6 дБ порівняно з відомим сигналом КАМ [3,4], який використовується окремими несучими при формуванні COFDM і OFDM сигналів, то сумарний енергетичний виграш QOFDM модуляції порівняно з COFDM та OFDM модуляціями становитиме 6 дБ + 3 дБ = 9 дБ.

Ширина діапазону такого сигналу залежить від тривалості символьного інтервалу T_S,, який залежить, своєю чергою, від такої частоти вхідного бітового потоку. Наприклад, QOFDM 256 при швидкості вхідного бітового потоку 2 Гбіт/с тривалість періоду вхідного бітового потоку *X(t)* відповідає періоду бітового інтервалу, який дорівнює T_b = 0,5нС. Для M=256 число біт у символі m дорівнюватиме 8. У цьому випадку ширина спектра сигналу QOFDM 256 складе $\Delta f = \frac{1}{T_S} = \frac{1}{T_b \cdot p} = \frac{1}{0{,}5\cdot 10^{-9}\cdot 8} = 250 \cdot 10^6$ (Гц). Скорочення смуги спектра частот, в цьому випадку для сигналу, що передається, зменшиться з 2 ГГц до 250 МГц.

Використання інструментів ШІ. ШІ не використовувався.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Коханов, А.Б.,Власенко, В.А.,Заганич, В.Г.,(1997). *Поточно-рекурсивний пристрій швидкого перетворення Фур'є*. Патент України на винахід 15340А. Київ. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».

[2] Коханов, А.Б.(2004). *Конвейерний пристрій швидкого перетворювання Хартлі*. Патент України на винахід 63068. Київ. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».

[3] Коханов, О.Б.(2026). Амплітудно-фазова модуляція Хартлі та її порівняння з амплітудно-фазовою модуляцією. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*. https://doi.org/10.20535/S002134702509002X

[4] Kokhanov, A.(2025). Formation of a signal with Hartley amplitude-phase modulation as the sum of two signals with Hartley amplitude modulation. *Pratsi OPU*, no 1(71), pp. 167–177. https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.19

Kokhanov O.B., Taranin V.P., Orshatskiy G.V.

Pipeline modulator for QOFDM signal

Abstract*. The method of forming a signal with quadrature orthogonal frequency digital multiplexing (QOFDM) and the structure of the modulator and demodulator for such a signal are considered. To form a QOFDM signal, quadrature amplitude-phase Hartley modulation (QMP) is used, which allows for an energy gain of 9 dB equal to the OFDM input.*

Key words*: Signal; modulation; QOFDM; KMH.*