

ОСОБЛИВОСТІ OFTDM-ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

А. Е. Брянський

Одеський національний політехнічний університет

Анотація. Розглянуто особливості OFDM/QAM і OFDM/OQAM (OFTDM) модуляції, їх переваги та недоліки, а також області їх практичного застосування. Наведені основні підходи і методи, що застосовуються в цифрових системах зв'язку для придушення міжсимвольної і міжканальної інтерференції в умовах адитивних перешкод. Запропоновано розробку і застосування OFTDM технології передачі інформації на основі узагальненого ортогонального базису Вейля-Гейзенберга, який мінімізує рівень взаємного впливу піднесучих каналів як в частотній, так і в часовій областях. При цьому при обчисленнях використовується дискретне перетворення Хартілі замість дискретного перетворення Фур'є.

Ключові слова: OFDM/QAM модуляція, OFDM/OQAM (OFTDM) модуляція, передача інформації, міжсимвольна інтерференція, міжканальна інтерференція, хороша локалізація, 5G.

Вступ

У мережах 5G пропонується застосування нових сигнально-кодових конструкцій з підвищеною спектральною ефективністю на основі неортогональних сигналів і FTN-сигналів (сигналів Мазо) відмінних від OFDM-сигналів, які використовуються в мережах 4G.

FTN-сигнали використовують більш високу швидкість модуляції. Це призводить до міжсимвольної інтерференції на стороні передавача.

У зв'язку з цим актуальною є задача з пошуку нових базисних функцій, добре локалізованих, як в частотній, так і в часовій області.

1. Огляд літератури

В якості неортогональних сигналів запропоновано використовувати такі:

- F-OFDM (Fast-OFDM) базується на принципі OFDM і відрізняється використанням частотного рознесення піднесучих, в 2 рази меншого, ніж в разі OFDM. В основі методу F-OFDM лежить той факт, що дійсна частина коефіцієнта кореляції двох комплексних піднесучих дорівнює нулю, якщо рознос за частотою між піднесучими кратний цілому числу $1/2T$. Незважаючи на дворазове ущільнення за частотою, сигнали як і раніше залишаються ортогональними один одному;

- GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) – узагальнене мультиплексування з частотним розподілом каналів;

- UFMC (Universal Filtered Multicarrier) – універсальний фільтруємий багаточастотний сигнал;

- FBMC (Filter Bank Multicarrier) – гребінчастий фільтрований багаточастотний сигнал;

- BFDМ (Bi-orthogonal Frequency Division Multiplexing) – бі-ортогональне частотно-розподілене мультиплексування сигналів;

- CP-OFDM (Cyclic Prefix OFDM) – OFDM-сигнал з циклічним префіксом;

- UF-OFDM (Universal Filtered OFDM) – сигнал OFDM з універсальною фільтрацією позасмугового випромінювання;

- SCMA (Sparse Code Multiple Access) – це метод кодового розділення сигналів при забезпеченні багатостанційного доступу в мережі мобільного зв'язку, заснований на розріджених кодах. Цей метод кодової модуляції сигналів дозволяє забезпечити в 2.7 рази більше користувачів в соті в порівнянні з мережами 4G, які використовують OFDMA, і має меншу затримку в мережі. Компанія Huawei пропонує використовувати його в прототипах 5G.

Однак, перелічені вище сигнали в рівній мірі мають деякі недоліки, пов'язані з частотно-часовим розсіюванням (ЧЧР) сигналу.

2. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка та застосування, в якості основного методу боротьби з ЧЧР, спеціальних ортогональних добре локалізованих сигнальних базисів, які мінімізують рівень взаємного впливу піднесучих каналів, як в частотній, так і в часовій областях, але при цьому не погіршують спектральну ефективність системи. Пропонується застосовувати тільки дійсну арифметику при цифровій обробці сигналів. Системі передачі інформації, побудовану на базі даної технології, в подальшому, будемо називати OFTDM системою (Orthogonal Frequency-Time

Division Multiplexing – ортогональне частотно-часове ущільнення).

3. Основна частина

Розглянемо всі різновиди OFDM модуляції і виберемо із них найперспективніший.

OFDM-модуляція застосовується як в дротовому зв'язку, так і в бездротовому зв'язку.

У дротовому зв'язку вона застосовується в: ADSL і VDSL системах; системах цифрового кабельного телебачення стандарту DVB-C, DVB-C2; в системах передачі сигналів по лініях електроживлення (PLC).

В бездротовому зв'язку OFDM-модуляція застосовується в: стандартах IEEE 802.11a/g/n/ac – бездротові локальні мережі Wi-Fi, IEEE 802.16 – широкопasmовий бездротовий зв'язок WiMax; системах цифрового телебачення стандарту DVB-T, DVB-T2 і ISDB-T; наземних системах мобільного телебачення DVB-H, T-DMB, MediaFLO; системах цифрового радіомовлення DRM; бездротових системах зв'язку стандарту Flash-OFDM; перспективних системах з підвищеною швидкістю передачі на основі поєднаної технології ортогонального частотного і просторового розподілу (MIMO OFDM – multiple input, multiple output OFDM); 802.16e/m (Mobile WiMAX – розширення стандарту IEEE 802.16 технології WiMax), E-UTRA (протокол фізичного і каналного рівня технологій зв'язку LTE, є розвитком стільникового зв'язку) та інші системи радіозв'язку [1]. Перспективним застосуванням OFDM технології є сучасний авіаційний зв'язок, включаючи зв'язок з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Як видно, спектр застосування технології OFDM досить великий.

Пропускна здатність системи передачі цифрової інформації тим вище, чим більше потужність модульованого сигналу і ширше частотний спектр. Тому, щоб досягти оптимальної пропускної здатності при заданій ширині спектра, необхідно використовувати ефективні способи модуляції.

Технологія ортогонального частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) заснована на формуванні багаточастотного сигналу, що складається з безлічі піднесучих частот, які відрізняються на величину $\Delta f = \frac{|\omega_n - \omega_{n-1}|}{2\pi}$, вибрану з умови ортогональності сигналів на сусідніх піднесучих коливаннях (ω_n – радіальна частота n -го піднесучого коливання). Частотно-часове представлення OFDM-сигналу зображено на рис. 1.

OFDM технологія передбачає якомога ефективніше використання спектра, за рахунок передачі даних паралельно через безліч близько розташованих один до одного вузькосмугових частотних підканалів. При цьому на частині частот передається інформація, частина несучих використовується для передачі пілот-сигналів, а частина частот не використовуються. OFDM-сигнали успішно протистоять багатопромінності, за рахунок введення циклічного префіксу перед кожним символом – повторюваної послідовності що не несе інформації, на яку припадає весь вплив багатопромінності. Таким чином, на виході передавача виходить наступний сигнал (рис. 2).

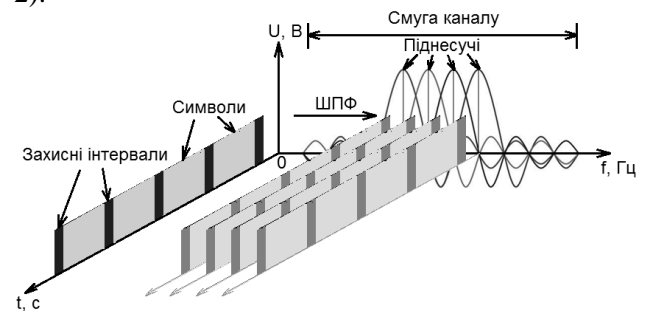


Рис. 1. Частотно-часове представлення OFDM-сигналу

У сумарному OFDM-сигналі частотні спектри частково перекриваються таким чином, що максимум спектральної щільності для будь-якої піднесучої завжди відповідає мінімальному значенню першої пелюстки сусідніх піднесучих. У цьому полягає сенс ортогональності [2]: скалярний добуток сусідніх частотних спектрів не дорівнює нулю тільки на частотах максимальних значень піднесучих.

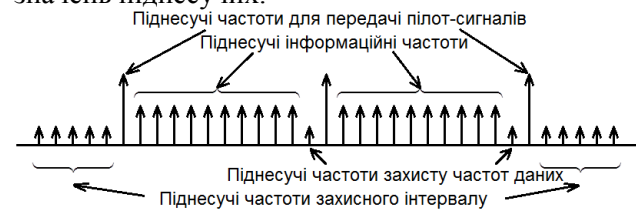


Рис. 2. Структура OFDM-сигналу

Головною перевагою методу OFDM, є та обставина, що модуляція і демодуляція сигналів може бути виконана в дискретній формі з використанням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Це стало причиною його широкого застосування.

Оскільки частотна характеристика прямокутного імпульсу має вигляд, описуваний виразом $\frac{\sin(x)}{x}$, то це не дозволяє говорити про оптимальність цього типу сигнальної конструкції при вирішенні задач мінімізації впливу суміжних символів і каналів один на одного [3].

Відзначимо наступні особливості сигналів OFDM:

- мультиплексування несучих коливань (названих піднесучими), модульованих інформаційними символами за обраним законом (QPSK, 16QAM, 64QAM);

- піднесучі ортогональні (взаємна кореляційна функція дорівнює нулю), або, принаймні, квазіортогональні (на практиці);

- кожен OFDM-символ має захисний часовий інтервал для виключення міжсимвольної інтерференції. Цей захисний інтервал вибирається з урахуванням імпульсної характеристики лінії зв'язку (фізичного середовища поширення радіосигналу).

Коротко розглянемо особливості OFDM/QAM і OFDM/OQAM (OFTDM) модуляції, а також, виділимо їх переваги та недоліки.

Ще до недавнього часу сигнали з OFDM/QAM не застосовувалися в системах рухомого зв'язку. Але все змінилося з прогресом мікроелектроніки і розробкою нових технологій передачі інформації.

При прийомі OFDM/QAM сигналу, для розпізнавання його елементів, нам потрібна інформація про фазу і амплітуду. Для об'єктів, що пересуваються з великою швидкістю, амплітуда радіосигналу є випадковим параметром, який швидко змінюється, тому її не можна використовувати як інформаційний параметр при прийомі без складної обробки.

В існуючих системах зв'язку з сигналами OFDM/QAM використовується базис на основі зворотнього перетворення Фур'є. Якщо мова йде про системи фіксованого зв'язку, то цей базис забезпечує розпізнавання елементів сигналу при наявності відповідної зовнішньої синхронізації, оскільки він є добре локалізованим в часовій області.

В ідеальному каналі, в якому відсутній відхід (зсув) частоти (frequency offset) інтерференція між піднесучими (ICI – intercarrier interference) може бути повністю виключена за рахунок ортогональності піднесучих. Міжсимвольна інтерференція (ISI – intersymbol interference), яка викликана багатопроменевим поширенням через багаторазові перевідбиття, наприклад, в умовах міста, також може бути усунена за рахунок додавання захисного інтервалу, який довший за максимальну величину часового розсіювання. Якщо об'єкт пересувається з великою швидкістю, то при застосуванні базисних функцій класичної схеми OFDM/QAM зі слабкою локалізацією в частотній області, доводиться істотно знижувати швидкість передачі.

Системи, засновані на принципі застосування базисних функцій класичної схеми OFDM/QAM, слабо захищені від ефектів завмирання, частотного зсуву і міжсимвольної інтерференції, тому робота з пошуку нових базисних функцій, добре локалізованих, як в частотній, так і в часовій області, є важливою і актуальною.

Для досягнення кращої спектральної ефективності одночасно з поліпшенням ISI/ICI була розроблена OFDM/OQAM-модуляція – OFDM-модуляція з використанням QAM із зсувом (offset QAM). По-іншому цю технологію іноді називають OFTDM (Orthogonal Time-Frequency Division Multiplexing) – ортогональне частотно-часове ущільнення. На відміну від OFDM/QAM-модуляції, де кожна піднесуча модулюється комплексно-значним символом, OFTDM-модуляція відбувається за допомогою дійсних символів, що дозволяє використовувати імпульси, добре локалізовані в частотно-часовій області. Класичні OFDM-системи засновані на звичайній квадратній модуляції (OFDM/QAM), тому в них неможливо використовувати добре локалізовані базисні функції в разі високої частотно-часової щільності, коли спектральна ефективність максимальна.

Із теорії Габора про базисні функції [4] впливає основний недолік OFDM/QAM-систем, який полягає в тому, що неможливо створити добре локалізовані імпульсні фільтри в разі високої частотно-часової щільності, тобто у разі високої спектральної ефективності. При використанні таких систем потрібно дотримуватися компромісу між локалізацією імпульсних фільтрів і спектральною ефективністю.

Із теореми Баліан-Лоу впливає, що неможливо синтезувати ортогональні базиси на основі добре локалізованих формуючих імпульсів в разі граничної щільності частотно-часової сітки. Таким чином, не можна побудувати прямокутний сигнальний базис з хорошою локалізацією для OFDM-систем без втрати спектральної ефективності. З іншого боку, ортогональність є обов'язковою вимогою, що дозволяє синтезувати реальну систему зв'язку. Існує кілька підходів до подолання цієї проблеми. Однак описані методи призводили до сильної втрати спектральної ефективності, що є небажаним для пристроїв, в яких потрібна високошвидкісна передача даних. Вирішення цієї проблеми призвело до розробки альтернативної схеми модуляції, що дозволяє отримати найкраще частотно-часове ущільнення модулюючих символів – OFTDM. Завдяки цьому можна було отримати добре локалізовані імпульсні фільтри навіть в разі високої частотно-

часової щільності (тобто у разі максимальної спектральної ефективності).

OFTDM-модуляція в порівнянні з OFDM/QAM-модуляцією має наступні переваги:

- можна значно скоротити довжину і частоту використання захисного інтервалу за рахунок використання багатофазної фільтрації (фільтруюча функція IOTA – Isotropic Orthogonal Transform Algorithm) після перетворення IFFT (Inverse Fast Fourier Transform – зворотне швидке перетворення Фур'є), що призведе до збільшення пропускної здатності на 20-25 %. Одним зі спрощених варіантів багатофазної фільтрації, що забезпечує ортогональність сигналів, є функція Гаусса в часовій і частотній області;

- завдяки функції IOTA відбувається локалізація спектра (виходить більш крутий спад в порівнянні з класичним OFDM), в результаті чого зменшуються інтерференційні міжсимвольні перешкоди в мережі, а сигнал ущільнюється за часом;

- можливість збільшити зону і щільність радіопокриття;

- збереження високої швидкості передачі для об'єктів, які швидко рухаються, що дає принципово нові можливості рухомого зв'язку і мобільного телебачення, недоступні раніше, або доступні з великим подорожчанням інфраструктури мережі.

Основним недоліком OFTDM-модуляції на даний момент є досить складний прийом, який включає в себе велику кількість складних, витратних математичних операцій (рис. 3).

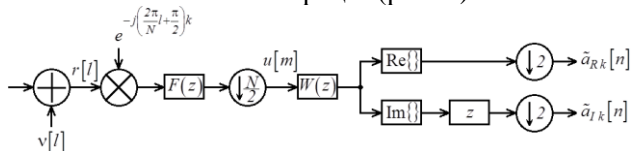


Рис. 3. Схема OFTDM-приймача

У OFTDM-приймачі виконуються наступні основні операції:

- виділення дійсних і уявних частин комплексних інформаційних QAM-символів – крім такого ж числа комплексних додавань і мнужень, як для модуляції, потрібно ще зробити операцію взяття реальної частини вектора;

- виділення реальної і уявної частин сигналу ($4N^2$ дійсних мнужень і $4N^2 - 3N$ дійсних додавань).

Для проведення модуляції і демодуляції OFTDM-сигналу потрібно близько $O(N^2)$ операцій. Це значно більше класичної OFDM схеми, де обсяг обчислень становить $O(M \log_2(M))$

операцій, де N і M – число точок швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Таким чином, актуальною є задача спрощення схеми OFTDM-приймача за рахунок застосування альтернативних алгоритмів обробки сигналів, що призведе до зменшення числа математичних операцій при прийомі.

Головним недоліком OFTDM-мультиплексування є досить складна конструкція модулятора і демодулятора, яка включає в себе велику кількість складних комплексних помножувачів і суматорів, що застосовуються для виконання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). На рис. 4 представлена структурна схема системи зв'язку з використанням OFTDM-мультиплексування з ядром перетворення Хартлі, що дозволяє перейти до використання тільки дійсної арифметики при мнуженні і підсумовуванні [5]. Це дозволяє скоротити число помножувачів і суматорів і застосувати поточно-рекурсивний конвеєрний процесор швидкого перетворення Хартлі (ШПХ, з проріджуванням по частоті і основою два) [5]. Поточно-рекурсивний конвеєрний процесор ШПХ вносить тільки групову затримку і, як наслідок, не впливає на швидкість проходження інформації через канал зв'язку, що дозволяє працювати на граничній тактовій частоті для елементної бази і підвищити швидкість обчислення в два рази в порівнянні з класичними конвеєрними процесорами ШПФ типу Рабінера-Голда [5].

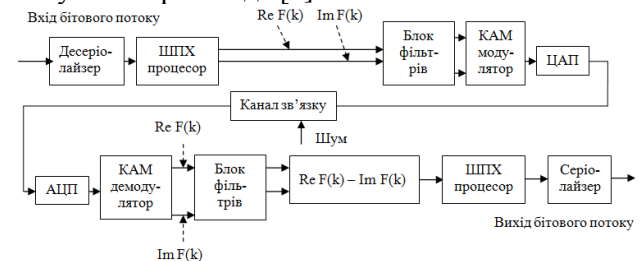


Рис. 4. Структурна схема каналу передачі даних з OFTDM-мультиплексуванням з ядром ШПХ

Для каналів зв'язку з істотною неоднорідністю найбільшою мірою властиві спотворення сигналу, викликані частотною залежністю параметрів каналу і ефектом багатопробного поширення. Це зазвичай викликано тим, що сигнал в точку прийому приходиться численними шляхами після багаторазових відображень від нестационарних неоднорідностей середовища (міські будівлі, рухомі об'єкти, шари іоносфери, гідрометеори та ін.) [6].

В результаті частотно-часового розсіювання OFDM-сигналу, на приймальній стороні спостерігаються ефекти багатопробності, амплітудно-фазових завмирань, доплерівського розширення і частотного зсуву. Дані спотворення при-

зводять до частотно-селективних завмирань. В результаті виникає ефект міжсимвольної (МСІ) і міжканальної (МКІ) інтерференції, що призводить до зростання ймовірності помилки при прийомі сигналу і обмежує, таким чином, якість, швидкість і відстань передачі інформації.

Виникнення МСІ і МКІ пояснюється втраченою ортогональністю між "спотвореними" базисними функціями сигналу на виході каналу, що призводить до просочування інформації з кожного піднесучого каналу в сусідні. Величина цих взаємних перешкод залежить від частотно-часової локалізації (ЧЧЛ) сигнальних базисних функцій і визначається ефективним носієм їх функції невизначеності. Чим швидше спадають "хвости" функції невизначеності, тим краще ЧЧЛ сигнального базису, а значить менше рівень МСІ і МКІ.

Надійна високошвидкісна передача даних по бездротових каналах стає можливою завдяки впровадженню сучасних методів модуляції, кодування і корекції сигналу. Основним способом боротьби з проблемою МСІ в технологіях, що застосовують OFDM, є використання захисного інтервалу (циклічного префіксу) (рис. 5).

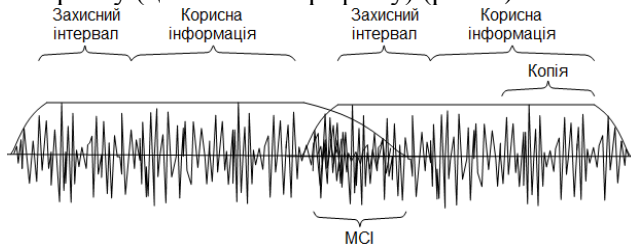


Рис. 5. Виникнення МСІ в технологіях, що застосовують OFDM

Отже, вплив часового розсіювання на сигнал можна практично повністю компенсувати, а основну увагу приділити боротьбі з МКІ, що виникає через частотне розсіювання сигналу. У зв'язку з цим, проведемо огляд основних підходів та методів, що застосовуються в даний час в цифрових системах зв'язку для придушення МКІ в умовах адитивних перешкод [6].

У системах зв'язку, що використовують принцип OFDM передачі (Wi-Fi, Wi-Max, DVB-T/H та ін.), сигнальні базисні функції являють собою відрізки гармонік, а їх амплітудний спектр має вузький основний пелюсток і повільно спадаючі хвости, як у функції

$\left| \frac{\sin(kx)}{kx} \right|$. У цих умовах

можливо зменшити чутливість до доплерівських ефектів каналу зв'язку, шляхом розширення спектра базисних функцій, тобто зменшення тривалості переданих гармонік. Це веде до розширення спектра OFDM сигналу і збільшення відстані між піднесучими каналами, що не зав-

жди допустимо в рамках використовуваного стандарту зв'язку. Також, це не рятує від МКІ, викликаного просочуванням інформації через бічні

пелюстки спектру $\left| \frac{\sin(kx)}{kx} \right|$ сусідніх гармонік.

Однак, оскільки МКІ діє у всій смузі частот OFDM сигналу, її додаткове придушення може бути отримано створенням захисних інтервалів (у вигляді "нульових" піднесучих) на межах частотного діапазону і між інформаційними піднесучими. Відомо, що розширення спектра і "нульові" піднесучі зменшують спектральну ефективність системи зв'язку, проте їх, в розумних межах, використовують при розробці відповідних стандартів.

Інший підхід до зменшення МКІ пов'язаний із застосуванням віконного перетворення Фур'є [7]. У цьому випадку, ми нічого не змінюємо на передавальній стороні, але в алгоритмі демодуляції OFDM сигналу вихідний прямокутний базис ШПФ замінюємо на неортогональний базис зваженого ШПФ, який добре локалізований в частотній області. Це дозволяє зменшити складову міжканальної перешкоди, викликану просочуванням інформації через бічні пелюстки спектрів сусідніх гармонік. Однак, вагова функція вікна розширює смугу кожного піднесучого каналу приймача, збільшуючи просочування інформації через основний пелюсток спектра. Крім того, порушення властивості ортогональності в разі віконного ШПФ збільшує шумову складову.

Третій підхід до вирішення описаної проблеми пов'язаний з різними узагальненнями теореми Котельникова [8]. Суть їх зводиться до того чи іншого варіанту "передискретизації" (oversampling) відліками і використанні для інтерполяції сигналів узагальнених рядів Котельникова з добре локалізованим за частотою ядром. Сигнал, що приймається, дискретизується з частотою набагато більшою, ніж критична частота Найквіста, а для відновлення або цифрової обробки сигналу використовуються, так звані, атомарні функції. Набір атомарних функцій, рівномірно зсунутих за частотою, утворює сигнальний базис, який добре локалізований в частотній області, але не є обов'язково ортогональним. За рахунок "передискретизації" відліками, основний пелюсток спектра атомарної базисної функції може бути обраний за шириною таким же, як у

функції $\left| \frac{\sin(kx)}{kx} \right|$, що описує піднесучий канал

OFDM сигналу. Перевагою третього підходу є те, що швидкий спад бічних пелюстків спектра зберігається. Але відповідний по локалізації в

частотній області сигнальний базис з атомарних функцій зазвичай виявляється неортогональним, що ускладнює обчислювальну реалізацію і зменшує стійкість по відношенню до шумових перешкод.

Задача боротьби з міжканальною інтерференцією в мобільних OFDM системах є дуже актуальною, і в багатьох випадках поки не знаходить задовільного рішення.

У найбільш повному обсязі переваги OFTDM технології реалізуються, якщо узагальнений ортогональний базис Вейля-Гейзенберга (WH-базис) застосовується і для формування сигналу, і для його обробки на приймальній стороні. Однак, якщо стандарт мобільного зв'язку вже прийнятий і заснований на використанні класичної OFDM технології (наприклад, мобільна мережа Wi-Max), то WH-базис може бути успішно використаний для проектування приймальної частини, стійкої до дії МСІ і МКІ [6].

В цьому випадку для розфільтровування і демодуляції OFDM сигналу пропонується використовувати модифікований варіант OFTDM технології, при якому сигнал обробляється у зсунутих за часом ортогональних вікнах, які формуються за допомогою WH-базису. Даний базис в умовах частотно-часового розсіювання (ЧЧР) призводить до мінімальних значень МСІ і МКІ і має максимальну частотно-часову щільність упаковки.

Окрім можливості застосування OFTDM технології в мобільному зв'язку існують й інші області її практичного застосування [6].

У разі застосування добре локалізованих базисів для ефективного спектрально-часового аналізу різних процесів вдається отримати гнучкі багаторівневі алгоритми аналізу процесів, які спостерігаються на виході різних пристроїв реєстрації. Такими пристроями можуть бути датчики біомедичних приладів, приймачі ехосигналів в радіолокаторах (або гідролокаторах) різного призначення, сейсмографічні датчики, та ін. Особливість спектрально-часового WH-аналізу полягає в тому, що базисні функції, за якими розкладається спостережуваний процес, ортогональні і мають хорошу роздільну здатність, як в частотній, так і в часовій області. Більше того, рівень роздільної здатності в цих двох областях може гнучко змінюватися, дозволяючи дослідникові більш детально вивчати властивості спостережуваного процесу. Важливою перевагою є також існування швидких прямих і зворотних алгоритмів спектрального WH-аналізу.

Також можливе застосування добре локалізованих базисів для ідентифікації та класифікації об'єктів (процесів) за частотно-часовими ознака-

ми. В даному випадку перевага використання WH-базисів полягає в тому, що процес (об'єкт), що підлягає виявленню або розрізненню (на тлі інших аналогічних), апроксимується багатофакторною параметричною моделлю в частотно-часовій області. Як фактори виступають задіяні часові і частотні розмірності WH-базису, а в якості параметрів – коефіцієнти розкладання процесу за відповідному цим факторам ортогональному WH-базису. При цьому характеристики частотно-часової локалізації базисних функцій можуть гнучко змінюватися і служать додатковим параметром для адекватної настройки моделі. Перевагами такої WH-моделі є хороші апроксимуючі властивості (широкий діапазон апроксимації, обумовлений великим набором факторів і параметрів), а також існування швидкого оптимального алгоритму ідентифікації, який фактично будується на швидкому розкладанні процесу в ортогональному WH-базисі.

Завдяки високій щільності упаковки WH-базисних функцій, їх взаємній ортогональності, можливості гнучкої перебудови параметрів локалізації та існуванню швидких обчислювальних алгоритмів, OFTDM технологія може бути використана для ефективної частотно-часової обробки практично будь-якої інформації природного характеру. Більш того, у багатьох додатках ця технологія становить потужну конкуренцію вейвлет-технології [7], де поєднати хорошу локалізацію, симетрію і ортогональність базисних функцій не завжди вдається.

Висновки

Проведене дослідження показало, що застосування OFTDM технології, замість технології OFDM, в каналах з ЧЧР дозволяє:

- за рахунок організації внутрісимвольного часового ущільнення підвищити спектральну і енергетичну ефективність системи. Також перевагою є хороша локалізація базисних функцій в частотній області. Спектр OFTDM символу має швидко спадаючі хвости, а значить низький рівень зовнішнього смугового випромінювання, що істотно знижує вимоги до фільтрації сигналу на виході передавача, і сприяє зменшенню необхідного числа захисних “нульових” піднесучих на межах частотного діапазону. Вивільнені піднесучі можуть бути використані для передачі корисної інформації;

- значно знизити рівень зовнішнього смугового випромінювання, і тим самим послабити вимоги до вихідного фільтру передавача і захисного інтервалу на межах частотного діапазону. Ще однією перевагою є стійкість (робастність) системи до МСІ і МКІ всередині кожного OFTDM

символу. Це обумовлено тим, що квадрат модуля WH -базисної функції і її спектра (тобто відповідні перерізи функції невизначеності) мають досить плоскі вершини і швидко спадаючі хвости. В результаті, частотно-часові спотворення не так сильно деформують кожну базисну функцію, як у випадку OFDM символу, а просочування інформації в сусідні піднесучі канали, що виникає при цьому, поширюється тільки на найближчих сусідів. Щоб мінімізувати рівень взаємних перешкод, параметри функції невизначеності WH -базису повинні бути узгоджені з параметрами функції розсіювання каналу. Базис з такими властивостями є оптимально локалізованим.

Отримані в роботі результати показали, що технологія OFTDM з використання ядра перетворення Хартлі дозволяє збільшити швидкість передачі інформації в два рази і скоротити число апаратних помножувачів і суматорів в модуляторі і демодуляторі. При цьому зберігаються всі властивості OFTDM модуляції з використанням функцій WH .

Автором встановлено, що технологія OFTDM є дуже перспективним напрямком для розробки нових мобільних широкосмугових систем, як спеціального, так і цивільного призначення.

Список використаної літератури

1. Рошан, П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Руководство Cisco. [Текст] / П. Рошан, Дж. Лиэри // Москва, Вильямс. – 2004. – 304 с.
2. Жилияков, Е. Г. О возможности повышения эффективности использования выделенного частотного ресурса в системах с OFDM. [Электронный ресурс] / Е. Г. Жилияков, С. П. Белов, Е. М. Маматов, Д. И. Ушаков, И. А. Старовойт // НИУ БелГУ, Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 39–41.
3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для студ. ВУЗов. [Текст] / А. Б. Сергиенко // Санкт-Петербург, Питер. – 2002. – 603 с.: ил.
4. Gabor, D. Theory of communication. [Text] / D. Gabor // J. Inst. Elect. Eng. – 1946. – Vol. 93, № 3. – P. 429–457.
5. Коханов, О. Б. Патент України на винахід №63068. (51) МПК 7 G06F17/14, G06F15/00. Конвеєрний пристрій швидкого перетворювання Хартлі / О. Б. Коханов; заявник і патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. А.С. Попова.— № 2002076378; заяв. 31.07.2002, опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6.
6. Волчков, В. П. Новые технологии передачи и обработки информации на основе хорошо локализованных сигнальных базисов. [Электронный ресурс] / В. П. Волчков // Научные ведомости БелГУ. Серия: Экономика. Информатика. – 2009. – № 15(70). – С. 181–189.
7. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам [Текст] / И. Добеши // Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 464 с.
8. Кравченко, В. Ф. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях [Текст] / В. Ф. Кравченко // Москва, ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 544 с.

References

1. Pejman Roshan, Jonathan Leary, (2009), 802.11 Wireless LAN Fundamentals, Cisco Press, Indianapolis, USA. – 295 p.
2. E. G. Zhilyakov, S. P. Belov, E. M. Mamatov, D. I. Ushakov, I. A. Starovoit, (2011), About the possibility of increasing the efficiency of the use of a dedicated frequency resource in systems with OFDM [O vozmozhnosti povyisheniya effektivnosti ispolzovaniya vyidelenennogo chastotnogo resursa v sistemah s OFDM], Information systems and technologies, SRU BelHU. – № 1. – P. 39–41.
3. A. B. Sergienko, (2002), Digital signal processing: a textbook for university students [Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. posobie dlya stud. VUZov], Piter, St. Petersburg. – 603 p.
4. D. Gabor, (1946), Theory of communication, J. Inst. Elect. Eng. – Vol. 93, №3. – P. 429–457.
5. Odessa National Academy of Telecommunications named after O.S.Popov (2004) The conveyor device fast Hartley transform. Ukraine Patent: UA 63068.
6. V. P. Volchkov, (2009), New technologies of information transmission and processing based on well-localized signal bases [Novyie tehnologii peredachi i obrabotki informatsii na osnove horosho lokalizovannyih signalnyih bazisov], Scientific statements BelHU. Series: Economy. Computer science. – №15(70). – P. 181–189.
7. Ingrid Daubechies, (1992), Ten lectures on wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), University of Lowell, Philadelphia. – 357 p.
8. V. F. Kravchenko, (2007), Digital processing of signals and images in radiophysical applications [Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazheniy v radiofizicheskikh prilozheniyah], Fizmatlit, Moscow. – 544 p.

FEATURES OF THE OFTDM-TECHNOLOGY OF DATA TRANSMISSION

A. E. Bryanskiy

Odessa National Polytechnic University

Abstract. The features of OFDM/QAM and OFDM/OQAM (OFTDM) modulation, their strengths and weaknesses and areas of their practical application are considered. The basic approaches and methods used in digital communication systems to suppress the intersymbol and interchannel interference in terms of additive interference are presented. A development and application of OFTDM information transfer technology based on generalized orthogonal basis of Weyl-Heisenberg that minimizes the level of mutual influence of subcarrier channels both in frequency and in the time domain are offered. In calculations the discrete Hartley transform is used instead of the discrete Fourier transform.

The study showed that the use of OFTDM technology instead of OFDM technology in channels with variable time division allows to:

– increase the spectral and energy efficiency of system by organizing intersymbol time consolidations. Another advantage is the good location of base functions in the frequency domain. Spectrum of OFTDM symbol has rapidly falling tails so low external bandpass emission, which significantly reduces requirements for filtering the output signal transmitter and reduces the required number of protective "zero" subcarriers within the frequency domain. Freed subcarriers can be used for the transmission of useful information;

– significantly reduce external bandpass emission, and thereby to ease the requirements for output filter of the transmitter and for the protective interval within frequency domain. Another advantage is the system stability (robustness) to intersymbol and interchannel interference within each OFTDM character.

Obtained results showed that OFTDM technology with the Hartley transformation core can speed up data transmission rate twice and reduce the number of hardware multipliers and adders in the modulator and demodulator.

Key words: OFDM/QAM modulation, OFDM/OQAM (OFTDM) modulation, data transmission, intersymbol interference, interchannel interference, good localization, 5G.

ОСОБЕННОСТИ OFTDM-ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А. Э. Брянский

Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. Рассмотрены особенности OFDM/QAM и OFDM/OQAM (OFTDM) модуляции, их преимущества и недостатки, а также области их практического применения. Приведены основные подходы и методы, применяемые в цифровых системах связи для подавления межсимвольной и межканальной интерференции в условиях аддитивных помех. Предложено разработку и применение OFTDM технологии передачи информации на основе обобщенного ортогонального базиса Вейля-Гейзенберга, который минимизирует уровень взаимного влияния поднесущих каналов, как в частотной, так и во временной областях. При этом при вычислениях используется дискретное преобразование Хартли вместо дискретного преобразования Фурье.

Ключевые слова: OFDM/QAM модуляция, OFDM/OQAM (OFTDM) модуляция, передача информации, межсимвольная интерференция, межканальная интерференция, хорошая локализация, 5G.

Получено 04.05.2017



Брянський Андрій Едуардович, асистент кафедри радіотехнічних та телекомунікаційних систем Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: deathracer13@mail.ru, тел. 067-423-18-80.

Andrey Bryanskiy, Assistant of the Department of radio and telecommunication systems, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-9432-2814