

ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ OFDM СИГНАЛІВ В СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

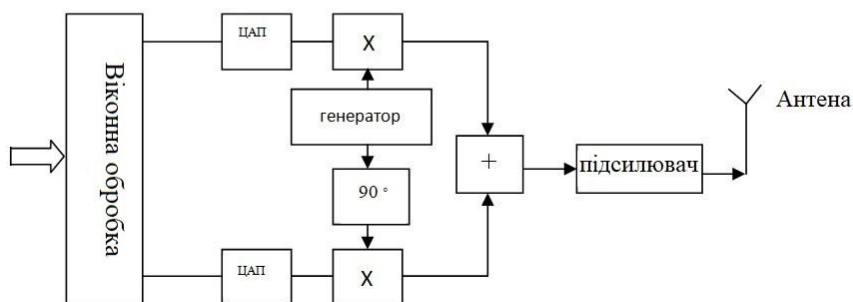
Вступ

Сучасні бездротові системи (наприклад, супутникові системи, системи мобільного телефонного зв'язку) відносяться до багатокористувачевих систем. При проектуванні таких систем основною проблемою є вибір способу множинного доступу, тобто можливості одночасного використання багатьма абонентами каналу зв'язку з мінімальним взаємним впливом [1, 2]. Ширококутні сигнали активно використовуються в сучасних високошвидкісних системах стільникового зв'язку стандартів WiMax, Mobile WiMax, MBWA, бездротових дискретних комунікаційних системах, наприклад LTE і Wi-Fi, при передачі інформації цифрового телебачення (DVB-T) і радіо (DRM, DAB), в системах радіолокації тощо. Використання сигналів з ортогональним частотним поділом каналів і мультиплексуванням (Orthogonal frequency-divisionmultiplexing, далі - OFDM), в тому числі в зазначених системах передачі інформації дозволяє підвищити не тільки інформаційну ємність системи в умовах багатопроменевого поширення при обмеженій смузі пропускання, але і швидкість прийому-передачі даних, наблизивши її до пропускну здатності каналу, збільшити скритність передачі і завадостійкість системи. В даний час йде бурхливий розвиток, дослідження та стандартизація технологій для п'ятого покоління мереж стільникового зв'язку - 5G. Найбільш пріоритетними завданнями даного напрямку вважаються: досягнення максимальної швидкості передачі даних (до 20 Гбіт/с); забезпечення щільності призначених для користувача пристроїв (до 106 пристроїв / км²); надання користувачам сервісів надійної комунікації з малою затримкою (URLLC) (затримка передачі даних не більше 1 ms) [3 - 4]. Як можливі рішення для досягнення зазначених завдань для 5G мереж розглядаються: використання спектра в міліметровому діапазоні [5]; нові види модуляції сигналів і методи кодування; методи множинного доступу; вдосконалені технології побудови архітектури антен і мереж [5 - 6]. Крім цього, заслуговують на увагу дослідження, які присвячені: ортогональному мультиплексуванню з частотним поділом каналів з фільтруванням (F-OFDM) [7 - 9]; технологіям просторового рознесення (MIMO) [10]; хмарним мережам радіозв'язку (CRAN) [11], технологіям ортогонального частотного поділу каналів з кодуванням (C-OFDM) [12] і багато інших.

Принципи технології OFDM

Розвиток технологій бездротових комунікацій постійно формувалася на основі досліджень форм сигналів. Як приклад можна привести успіх четвертого покоління (4G) зв'язку, який базується, в тому числі, на використанні схеми цифрової модуляції OFDM. Основна ідея OFDM полягає в тому, що для досягнення високої швидкості передачі в частотній області застосовується розподіл повного діапазону частот сигналу на деяке число частотних підканалів, що не перекриваються з меншими швидкостями. При цьому кожен підканал (піднесуча) модулюється окремим символом, потім ці канали мультиплекуються по частоті і далі дані передаються паралельно по ортогональних підканалах. У порівнянні з передачею з однієї несучої цей підхід забезпечує підвищену стійкість до вузькосмугової інтерференції і спотворень в каналі. Більш того, з цього випливає високий рівень гнучкості системи, так як параметри модуляції, такі як розмір сузір'я, швидкість кодування, можуть бути незалежно вибрані для кожного підканала. Структуру модему OFDM складають передавач та прийомний пристрій. У процесі передавання вихідний послідовний потік інформаційних бітів (рисунком) кодується завадостійким кодом (згідно з рекомендацією LTE 3GPP TS 36.211 викорис-

товується згортаючи турбокоди з базовою швидкістю 1/3), перемежується (П) і демультимплексується на N паралельних підпотоків.



Структурна схема OFDM приймача

Далі кожен з потоків відображається в потік символів за допомогою процедури фазового (BPSK, QPSK, 8-PSK) або амплітудно-фазової квадратурної модуляції (QAM). При використанні модуляції BPSK формується потік двійкових чисел (1 і -1), при QPSK, 8-PSK, QAM - потік комплексних чисел. Крім тих піднесучих, на яких передається інформація формують службові піднесучі. До останніх відносяться захисні інтервали, пілот-сигнали і додаткова службова інформація для синхронізації приймача і передавача, і режимів їх роботи. Пілот-сигнали можуть мати фіксоване положення на піднесучих, або змінне - від символу до символу OFDM в кадрах. При цьому завдяки вставці між суміжними підканалами достатнього (за тривалістю) захисного інтервалу виключається спектральне перекриття. В цьому випадку знижується міжканальна інтерференція (міжбітова інтерференція, ICI), зменшується ймовірність бітової помилки, а значить, підвищується пропускна здатність системи бездротового доступу.

Операція множення на комплексну експоненту з відповідною частотою підканалу і потім складання усіх підканалів для формування OFDM сигналу дуже схожа з операцією зворотного перетворення Фур'є. У зв'язку з цим для формування необхідного OFDM-символу застосовують апарат швидкого зворотного перетворення Фур'є (ЗШПФ), що значно спрощує реалізацію модулаторів.

Збереження ортогональності є необхідним для того, щоб приймач міг правильно розпізнати інформацію на піднесучих. Для цього необхідно виконати наступні умови:

- приймач і передавач повинні бути точно синхронізовані;
- аналогові компоненти передавача і приймача повинні бути дуже високої якості;
- канал не повинен бути багатопроміневим (багатошляховим).

На жаль, багатопроміневе спотворення практично неминуче в системах радіозв'язку, що призводить до помилок при прийомі сигналів. Для усунення такого роду перешкод необхідно вибрати захисний інтервал, тривалість якого більше, ніж максимальна затримка поширення в каналі. Таким чином, можна усунути більшість видів інтерференції між каналами (тобто інтерференцію між піднесучими (ICI)) і між суміжними блоками передачі (тобто міжсимвольну інтерференцію (ISI)). Для зменшення позаполосного випромінювання сигналів використовується віконна обробка сигналу, вікном типу «піднятий косинус».

Далі цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) перетворюють в аналоговий вигляд окремо дійсну і уявну компоненти. Після проходження через фільтр нижніх частот сигнал надходить на квадратурний змішувач, який переносить корисний спектр OFDM-сигналу на несучу частоту. Ці сигнали далі складаються, посилюються і формується власне сигнал OFDM.

Широке використання цифрової схеми модуляції OFDM обумовлено цілим рядом чудових властивостей даної технології:

- стійкість до наслідків багатопроменевого поширення;
- висока стійкість до вузькосмугових перешкод;
- стійкість до міжсимвольної інтерференції за рахунок того, що тривалість символу в допоміжній піднесучій значно більше в порівнянні з затримкою поширення, ніж в традиційних схемах модуляції;
- висока спектральна ефективність в порівнянні з традиційними системами з частотним поділом каналів за рахунок великої кількості піднесучих;
- можливість використання різних схем модуляції для різних піднесучих, що дозволяє адаптуватися до умов поширення сигналу і до різних вимог відносно якості прийнятих сигналів;
- проста реалізація із застосуванням методів цифрової обробки і ін.

Перспективні технології формування сигналів в сучасних мобільних системах телекомунікацій

Ефективність сучасного покоління мобільного зв'язку значною мірою ґрунтується на використанні OFDM модуляції. Однак для подальшого прогресу і переходу на більш досконалі технології п'ятого покоління зв'язку необхідно переглянути технології OFDM, які використовуються, так само як і досліджувати інші технології. Можна виділити наступні основні відмінності технології 5G від технологій мобільної комунікації попереднього покоління [4 - 5].

1. Однією з цілей 5G є забезпечити використання різних сервісів, зокрема eMBB, mMTC і URLLC. Передбачається, що технологія 5G повинна підтримувати більш гнучке використання доступної смуги частот для збільшення пропускної здатності. Для цього необхідно розробити і впровадити різні варіанти використання доступних частотних і часових ресурсів для різних послуг.

2. Зростання пропускної здатності. Передбачається триразове зростання ефективності використання спектру сигналу в 5G в порівнянні з сервісами eMBB [3]. Для підвищення пропускної здатності в мережах 5G передбачається зменшити захисні інтервали [4].

3. При асинхронній передачі даних в мережах 4G базова станція постійно синхронізується з призначеним для користувача обладнанням для зменшення взаємних перешкод між несучими (inter-carrier interference - ICI) [4]. Втрати, спричинені такими перешкодами, негативно позначаються на сервісах, зокрема mMTC, які пов'язані з масовим підключенням абонентів мережі. Таким чином, підтримка мережами 5G при асинхронній передачі необхідна з метою вирішення проблем, які пов'язані з ICI і забезпеченням роботи при множинних підключеннях [4].

Як зазначалося вище, ортогональне частотне ущільнення (OFDM) це схема доступу, яка використовується в сучасних мережах 4G. Для отримання доступу до мережі використовуються два окремих сигнали: сигнал доступу з ортогональним частотним ущільненням (OFDMA) в низхідному каналі і сигнал множинного доступу з частотним ущільненням і однією несучою (SC-FDMA) у висхідному каналі. Переваги даної схеми пов'язані з можливістю передачі сигналів на безлічі несучих. При цьому дана схема (OFDM) має ряд недоліків, зокрема: висока чутливість до зсувів тактової частоти; високе відношення пікового рівня потужності сигналу до середнього (пік фактор (PAPR)); використання захисних інтервалів знижує спектральну ефективність; метод чутливий до ефекту Доплера, що накладає деякі обмеження на його застосування в мобільних мережах; перекриття смуг піднесучих призводить до появи

міжбітової інтерференції; сигнал OFDM вразливий для спектральних продуктів перетворень, викликаних нелінійними підсилювачами, зміщенням постійної складової при використанні швидкого перетворення Фур'є. Крім того, чутливість до зсувів тактової частоти робить необхідним періодичне додавання сигналів синхронізації в загальний обсяг використовуваних сигналів і вимагає синхронізації пристрою і мережі перед початком зв'язку (обміну даними). Відсутність безперервності (фазовий перехід) між двома символами під час генерації символів OFDM ініціює спектральні скачки в частотній області, що призводить до інтенсивних позасмугових випромінювань і інше.

Обмежені можливості сигналів на основі схеми OFDM модуляції стали передумовою для досліджень з метою вибору кандидатів сигналів для наступних поколінь мобільного зв'язку, зокрема 5G. У зв'язку з цим, одним із завдань, що підлягають вирішенню, є виконання вимоги значного зменшення затримки при введенні нових служб і додатків. Поряд з цим, виникає потреба у формуванні циклічного префіксу і зменшенні тривалості символів. Ці міркування привели до створення цілого ряду технологій формування сигналів: з узагальненим частотним ущільненням (GFDM); з декількома несучими на базі набору фільтрів (FBMC); OFDM з тимчасовим поділом (w-OFDM); універсальний сигнал, що фільтрується з декількома несучими (UFMC); ортогональне мультиплексування з частотним поділом каналів з фільтруванням F-OFDM і іншим. Проводяться також дослідження нових схем множинного доступу, в тому числі: множинного доступу з розрідженим кодом (SCMA), неортогонального множинного доступу (NOMA) і множинного доступу з розподілом ресурсів (RSMA).

Технологія UFMC [13] рекомендована для подолання проблеми інтерференції (ICI) при множинному доступі користувачів в режимі асинхронної передачі і заснована на частотному поділу і мультиплексуванню за допомогою застосування операції фільтрації групи піднесучих. UFMC є узагальненою версією техніки фільтрування безлічі бічних смуг (БС). Бічні смуги обробляються фільтром одночасно, замість обробки кожної БС окремо. Таким чином, зменшуються взаємні перешкоди для БС в порівнянні з традиційним OFDM. Також, застосування операцій фільтрації БС націлене на збільшення ефективності ряду додатків комунікацій, таких як системи з малою затримкою пакетів. Даний вид модуляції виявляється кращим для подібних додатків по відношенню до схеми модуляції FBMC.

FBMC є одним з найбільш відомих форматів модуляції з розширенням спектру в бездротових комунікаціях [14]. Даний вид модуляції забезпечує значну перевагу у формуванні кожної піднесучої і полегшує гнучке використання спектрального ресурсу, дозволяє задовольнити різним системним вимогам, таким як низька затримка, множинний доступ і інші, що призводить до поліпшення показників завадозахищеності системи в умовах розсіювання сигналу у часовій і частотній областях [15]. Для прикладу, прямокутні фільтри більш кращі для каналів, які розподілені у часі, в той час як фільтр з характеристикою типу «піднятий косинус» більш стійкий проти частотного розсіювання. Незважаючи на всі вигоди від використання FBMC, значна довжина фільтрів призводить до великої тривалості символу, що є проблемою не тільки для додатків, до яких висуваються вимоги малої затримки та/або великої кількості користувачів в комунікаціях, але також призводить до збільшення обчислювальної складності для технології MIMO детектування, що, зрештою, призведе до проблем в роботі всіх основних додатків 5G.

GFDM є блокової схемою модуляції з частотним ущільненням каналів, яка розроблена для роботи з різноманітними додатками 5G, забезпечуючи змінну форму сигналу [16]. Для поліпшення показників надійності і затримки в комунікаціях без корекції помилок, можна використовувати GFDM сигнали разом з перетворенням Уолша - Адамара. При комбінуванні GFDM з квадратурною амплітудною модуляцією в системах з множинним доступом вирішується проблема внутрішньосистемних перешкод за умови використання неортогональних фільтрів. З іншої точки зору, можна розглядати GFDM як схеми з гнучким настроюванням окремих блоків, а не тільки лише однієї несучої в цілому. При маніпуляції відповідних параметрів сигналу GFDM можливе отримання різних форм сигналу таких як OFDM, частотне

вирівнювання з єдиною несучою (SC-FDE) і ін. Незважаючи на досить перспективні можливості, які відкриваються завдяки застосуванню сигналів з GFDM, даний вид модуляції є обчислювально складним [16].

F-OFDM застосовується у каналах низхідної лінії зв'язку 4G технології. Для F-OFDM сконфігурований фільтр застосовується до символу OFDM в часовій області для зниження рівня позасмугового випромінювання сигналу, зберігаючи ортогональність комплексних доменів OFDM-символів. Оскільки смуга пропускання фільтра відповідає смузі пропускання сигналу, зачіпаються тільки кілька піднесучих, близьких до краю. Основне міркування полягає в тому, що довжина фільтра може перевищувати довжину циклічного префіксу для F-OFDM [6]. При цьому знижується рівень міжсимвольної інтерференції, що обумовлено обраною конструкцією фільтра з використанням віконної обробки (з м'яким урізанням). Генерація F-OFDM сигналу заснована на формуванні блоку з M прилеглих БС в ряді послідовних OFDM символів [17]. Зокрема, під час обробки кожного символу, в передавачі формуються параметри: значення розмірності зворотного швидкого перетворення Фур'є (ОБПФ) (N), тривалість M «інформаційних символів» разом з циклічним префіксом, де $N > M$. Інформаційні символи можуть бути точками сузір'їв (constellation points) як в OFDM. Вказане можна представити в наступному вигляді:

$$s(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l(n - l(N + Ng)) \quad (1)$$

і

$$S_l(n) \equiv \sum_{m=m_0}^{m_0+M-1} d_{l,m} e^{j2\pi mn/N}, -N_g \leq n < N, \quad (2)$$

де Ng – довжина циклічного префіксу (CP), d – інформаційний символ піднесучої m OFDM системи, L означає кількість OFDM символів, а $\{m_0, m_{0+1}, \dots, m_{0+M-1}\}$ – обраний набір піднесучих. Сигнал F-OFDM формується при обробці сигналу $s(n)$ за допомогою відповідного фільтра, тобто

$$\tilde{s}(n) = s(n) * f(n). \quad (3)$$

Пропускна здатність фільтра дорівнює сумі пропускної здатності обраних БС, а часові витрати - це тривалість символу OFDM. У прийомному пристрої отриманий сигнал спочатку проходить через фільтр $f(-n)$, який ідентичний фільтру передавача. Прийнятий сигнал обробляється з використанням стандартних OFDM перетворень, а потім відфільтрований сигнал розділяється на послідовність окремих OFDM символів з видаленням циклічного префіксу. При цьому до кожного символу застосовується БПФ розмірності N і далі виділяють інформаційні символи з відповідних піднесучих.

Фільтр для F-OFDM повинен відповідати таким критеріям: мати плоску смугу пропускання; мати гостру перехідну смугу для мінімізації захисних смуг. Даним критеріям відповідають фільтри з прямокутним частотним відгуком. Щоб задовольняти зазначеним вимогам, фільтр нижніх частот реалізується за допомогою «вікна», яке ефективно обрізає імпульсну характеристику і забезпечує плавні переходи до нуля на обох кінцях [18] Таким чином, реалізація F-OFDM привносить додатково до існуючої процедури обробки CP-OFDM етап фільтрації як на стороні передачі, так і на стороні прийому.

Технологія W-OFDM. Для зменшення позасмугового випромінювання сигналів використовується віконна обробка сигналу в часовій області, вікном типу «піднятий косинус». Відомо, що спектр OFDM сигналу має безліч бічних пелюсток, які повільно загасають в частотній області, що призводить до збільшення позасмугового випромінювання. Для зниження позасмугового випромінювання OFDM символу використовують захисні поднесучі, які додають по краях OFDM сигналу. З цією ж метою застосовується віконна обробка сигналу. Така обробка сигналу дозволяє здійснювати плавний перехід між закінченням попереднього і початком наступного символу. Такий перехід здійснюється за допомогою перекриття в часі префі-

ксу поточного символу і суфіксом попереднього символу за допомогою їх підсумовування. Вікно «піднятий косинус» має вигляд

$$h(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\beta)}{2}; \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi}{\beta+T} \left(|t| - \frac{T(1-\beta)}{2} \right) \right] \right), \frac{T(1-\beta)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\beta)}{2}; \\ 0, \end{cases} \quad (4)$$

де T – тривалість символу, β – спад, який приймає значення в інтервалі від 0 до 1.

Для даної технології важливим є вибір тривалості вікна спаду. Значення тривалості вікна піднесеного косинуса необхідно вибирати рівним або меншим тривалості циклічного префіксу. У цьому випадку застосування віконної обробки для формування символів OFDM дозволяє значно знизити позасмугове випромінювання. На рівень позасмугового випромінювання також впливає вибір захисного інтервалу між піднесучими. Дослідження показали, що чим довше захисний інтервал, тим менше рівень позасмугового випромінювання [19].

Висновки

Представлено технології формування сигналів, які вже використовуються в системах зв'язку і телекомунікацій, а також наведено аналіз перспективних технологій, які можливо знайдуть застосування в різних створюваних системах, в тому числі бездротових системах зв'язку широкосмугового доступу. Показано, що схема модуляції OFDM, яка широко використовується, має ряд недоліків, які можуть призвести до зниження показників ефективності систем, в яких вони застосовуються, зокрема: зниження завадостійкості прийому сигналів, в слідстві спотворень, які викликані багатопроміневістю при поширенні електромагнітного поля між базовою і мобільною станціями, а також впливу міжсимвольних і міжканальних перешкод; нераціональне, в порівнянні з послідовними формами сигналів, використання потужності передавача, що пов'язано з використанням захисного інтервалу для захисту від міжсимвольної інтерференції і високим пік-фактором сигналу та ін. Представлено альтернативні технології формування сигналів, зокрема технологія формування сигналів, яка заснована на віконній обробці сигналів (W-OFDM) і забезпечує низький рівень позасмугового випромінювання.

Список літератури:

1. Gorbenko I.D., Zamula A.A., Semenko Ye.A. Ensemble and correlation properties of cryptographic signals for telecommunication system and network applications // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75, Issue 2. P. 169-178.
2. I Gorbenko I.D., Zamula A.A. Cryptographic signals: requirements, methods of synthesis, properties, application in telecommunication systems Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, Issue 12. P. 1079-1100.
3. ITU-R, Recommendation M.2083-0, "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", ITU recommendation, Sept. 2015.
4. Pen Guan et. al. 5G Field Trials: OFDM-Based Waveforms and Mixed Numerologies // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1234-1243, March 2017.
5. Rappaport T. S. et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! // IEEE Access. , 2013. vol. 1, pp. 335-349.
6. Andrews J.G. et al. What will 5G be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014.
7. Abdoli J. et al. Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems // Proc. IEEE SPAWC, pp. 66-70, Jun. 2015.
8. Zhang X. et al. Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in "The 5th Generation Cellular Networks", Proc. IEEE GLOBECOM, pp. 1-6, Dec. 2015.
9. Li, Jialing, et al. A resource block based filtered OFDM scheme and performance comparison // Proc. IEEE ICT, pp. 1-5, May 2013.

10. Marzetta T. L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
11. China Mobile Research Institute C-RAN: The Road Towards Green RAN”, white paper, 2011. [Online]. Available: <http://labs.chinamobile.com/cran/>.
12. Nikopour H. et al. Sparse code multiple access // Proc. IEEE PIMRC, pp. 332-336, Sept. 2013.
13. 5G Forum. (2016, Mar.). 5G white paper: 5G vision, requirements, and enabling technologies [Online]. Available: <http://kani.or.kr/5g/whitepaper/5G%20Vision,%20Requirements,%20and%20Enabling%20Technologies.pdf>.
14. Farhang Boroujeny B. Filter bank multicarrier modulation: a waveform candidate for 5G and beyond // Advances in Electrical Engineering, vol. 2014, Dec. 2014. doi:10.1155/2014/482805.
15. Zekeriyya Esat Ankaralı et. al. Enhanced OFDM for 5G RAN. June 2017, doi: 10.3969/j. issn. 1673-5188. 2017. S1. 002.
16. Şahin A., Güvenç I. and Arslan H. A survey on multicarrier communications: prototype filters, lattice structures, and implementation aspects // IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 3, pp. 1312-1338, Aug. 2014. doi:10.1109/SURV.2013.121213.00263.
17. Huawei and HiSilicon. f-OFDM scheme and filter design // 3GPP Standard Contribution (R1-165425), Nanjing, China, May 2016.
18. R1-165425. F-OFDM scheme and filter design. 3GPP TSG RAN WG1 meeting 85. Huawei; HiSilicon. May 2016.
19. Федосов В.П., Ковтун Д.Г., Легин А.А., Ломакина А.В. Исследование модели OFDM сигнала с малым уровнем внеполосного излучения // Известия ЮФУ. Техн. науки. 2016. С. 6-16.

*Харківський національний
університет імені В.Н. Каразіна*

Надійшла до редколегії 26.02.2018