

УДК 621.391.372.019

А.В. ШИШАЦЬКИЙ, В.В. ЛЮТОВ, наук. співробітники

(Центр. наук.-дослід. ін-т озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ),

О. Г. ЖУК, канд. техн. наук (Військ. ін-т телекомунікацій та інформатизації, м. Київ)

АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ

Проведено аналіз недоліків засобів радіозв'язку, що використовують технологію ортогонального частотного мультиплексування. Запропоновано напрями підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку, що використовують цю технологію.

Проведен анализ недостатков средств радиосвязи, которые используют технологию ортогонального частотного мультиплексирования. Предложены направления повышения эффективности функционирования систем радиосвязи, использующих эту технологию.

Технологія ортогонального частотного мультиплексування – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) зараз широко застосовується в мережах безпроводового доступу стандартів IEEE 802.11 та IEEE 802.16, системах цифрового радіомовлення T-DAB та DRM, цифрового телебачення DVB-T, xDSL-модемах тощо [1–5].

При формуванні OFDM-сигналу інформаційний потік зі швидкістю B ділиться на N паралельних підканалів, швидкість кожного з яких у N разів менша (B/N). Кожний із цих підканалів модулює індивідуальну піднесучу, що ортогональні між собою. Спектри сигналів на індивідуальних несучих перекриваються, але завдяки ортогональності сигнали розділяються на прийомі без спотворень (рис. 1).

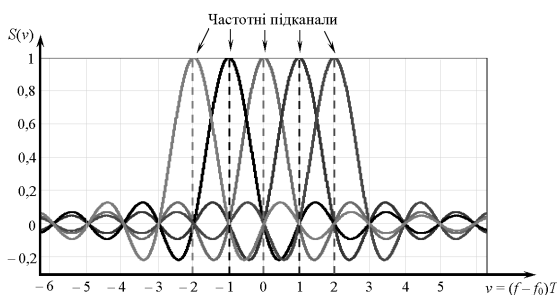


Рис. 1. Принцип формування OFDM-сигналу [3].

Група несучих частот, яка в даний момент часу переносить біти паралельних цифрових потоків, називається символом OFDM. Для модуляції піднесучих застосовують *КАМ-М* (М-позиційну квадратурну амплітудну модуляцію) або *ФМ-М* (М-позиційну фазову модуляцію) [2].

Переваги модуляції OFDM проявляються в разі великої (сотні й тисячі) кількості несучих N . Так, в стандарті IEEE 802.11a та IEEE 802.11g використовуються 52 несучі, в стандарті IEEE 802.16 – від 200 до 2048, в специфікації наземного цифрового телевізійного мовлення DVB-T – 6817 несучих [2–5].

До основних переваг технології OFDM слід віднести стійкість до завмирань сигналу за умов багатопроменевості та високу спектральну ефективність згідно робіт [2, 3]. Багаточастотна структура групового сигналу зменшує чутливість системи передачі до імпульсних завад і дозволяє ефективно боротися зі зосередженими за спектром завадами.

Однак OFDM-системам притаманні й свої проблеми [1–5]: одночасне випромінювання сигналу в усій смузі каналу, внаслідок чого зменшується радіус дії засобів зв'язку, а з метою збереження такої ж дальності дії, що й для одночастотних систем, необхідно збільшувати потужність передавача;

високий пік-фактор (P); висока чутливість до помилок компенсації фазових зсувів у каналі, що порушує ортогональність несучих; високий рівень паразитної амплітудної модуляції, що вимагає збільшення потужності з високою лінійністю характеристики; чутливість схеми до стабільності частоти.

З метою усунення впливу міжсимвольної інтерференції поміж символами OFDM вводиться захисний інтервал, який не дозволяє максимально ефективно використовувати наданий частотний ресурс (наприклад, для стандарту 802.11а коефіцієнт максимальної сумарної частотної ефективності складає 2,16 [5]).

Технологія OFDM є перспективною й знайшла широке застосування в безпроводових мережах зв'язку цивільного призначення. Але для систем військового радіозв'язку характерне функціонування в умовах впливу навмисних завад.

Аналіз характеристик навмисних завад, які можуть створювати сучасні комплекси та засоби радіоелектронного подавлення, показав, що особливу небезпеку для систем радіозв'язку з цифровою модуляцією являють ретрансльовані та імітаційні дезінформуючі завади. Так, американський наземний комплекс радіоелектронної боротьби для сухопутних військ "Вулфпак" за допомогою одного або декількох малогабаритних приймально-передавальних пристроїв може здійснювати оптимальне подавлення ліній радіозв'язку спрямованими малопотужними завадами, в результаті дії яких цифрові засоби радіозв'язку залишаються працездатними, але не забезпечують передачі корисної інформації [3].

Основними перевагами цього комплексу є: висока ефективність розкриття радіоелектронної ситуації; оптимальне подавлення ліній радіозв'язку малопотужними завадами без залучення традиційних засобів радіоелектронного придушення; можливість використання в режимі протидії засобам радіозв'язку та радіотехнічної розвідки супротивника з метою ведення ним розвідки американських систем зв'язку й управління.

З вищесказаного видно, що застосування OFDM сигналу при впливі навмисних завад ускладнено та потребує вдосконалення [3].

Метою статті є аналіз можливих шляхів вдосконалення засобів радіозв'язку з технологією OFDM при впливі навмисних завад.

Додаткове розширення спектру. Одним з перспективних методів боротьби з навмисними

завадами є розширення спектра за допомогою розширювальної технології кодових послідовностей (стандарту IMT-MS, CDMA-2000, CDMA), основними принципами якої є розширення спектра в поєднанні з кодовим розділенням фізичних каналів за рахунок використання псевдовипадкових послідовностей (ПВП). Своєрідне поєднання технологій OFDM та CDMA створює технологію MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access). У разі формування MC-CDMA систем кожен біт потоку сигналів відображається на всі піднесучі, а кожна піднесуча використовує своє постійне в часі фазове зміщення, яке обирається відповідно до заданого закону кодування. Ця система має всі переваги OFDM та CDMA систем, та дозволяє боротися з частотно-селективними завмираннями та багатоприменістю.

Зменшення впливу завад забезпечується такими факторами:

- ефектом „розмивання” завад за спектром шляхом перемноження прийнятої суміші сигналу й завади з ПВП;

- підвищення завадостійкості приймання OFDM-сигналу шляхом підвищення стійкості пілот-сигналів (пілот-несучих) щодо впливу завад, що забезпечує більш точну оцінку поточного стану каналу зв'язку. Знання передавальної характеристики каналу, у свою чергу, дозволяє застосувати резекцію частини спектра, яку уражено завадою, з відключенням передачі корисної інформації та відповідних піднесучих;

- незнання супротивником закону формування ПВП, при застосуванні імітаційних завад.

Вибір виду розширювальної послідовності.

Для розширення спектра в системах MC-CDMA використовуються різні види розширювальних послідовностей: двійкові (послідовності Уолша, ШАПіро-Рудіна, коди Баркера, коди Голда, M-послідовності, Адамара) та багатофазні (послідовності Френка та Задова-Чу, Мілевського, Голя).

Нижче розглянемо деякі найбільш ефективні послідовності, що використовуються в даний час.

Порівняльний аналіз цих послідовностей показав, що в системах

MC-CDMA найменший пік-фактор забезпечують ідеальні багатофазні послідовності Френка, Задова-Чу, Мілевського ($P \leq 2$ (3 дБ)). Двійкові послідовності ШАПіро-Рудіна забезпечують $P \leq 4$ (6 дБ). Недоліком вищеперелічених ідеальних послідовностей є те, що

об'єм їхнього алфавіту збільшується зі зростанням числа піднесучих.

Також в роботі [3] розглянуто 4-фазні послідовності Лі з одним нулем, ідеальні 8-фазні послідовності Люке з одним нулем та ідеальні 8-фазні послідовності з двома нулями. Ці послідовності також демонструють $P \leq 2$ [8, 9].

Широке застосування в системах широкосмугового зв'язку знайшли так звані M -послідовності. Як правило, використовуються двійкові M -послідовності, що мають такі властивості:

1) M -послідовність є періодичною з періодом $N = 2^n - 1$ символів, де N – кількість елементарних символів ПВП, а n — довільне ціле додатне число;

2) кількість символів, які приймають значення одиниці, на довжині одного періоду M -послідовності дорівнює 2^{n-1} , що на одиницю більше, ніж кількість символів, що приймають значення нуль;

3) різні комбінації символів довжини n на довжині одного періоду M -послідовності, за винятком комбінації із n нулів зустрічаються не більш одного разу. Комбінація з n нулів є забороненою, на її основі можлива генерація тільки послідовності із самих нулів;

4) сума за $\text{mod } 2$ будь-якої M -послідовності з її довільним циклічним зсувом також є M -послідовністю;

5) періодична автокореляційна функція (АКФ) M -послідовності має постійний рівень бокових пелюстків, який дорівнює $1/N$.

Формування M -послідовності відбувається за допомогою багатократних лінійних фільтрів у вигляді регістрів зсуву зі зворотнім зв'язком. У разі формування M -послідовностей із періодом $N = 2^n - 1$ може використовуватись регістр зсуву довжиною n . Приклад регістру зсуву наведено на рис. 2., де каскад 1 – з початковим станом 0, каскад 2 – з початковим станом 0, каскад 3 – з початковим станом 1.

Коди Голда мають високе значення автокореляційної функції та низьке значення кореляції. Такі

властивості забезпечують можливість використання цих кодів для реалізації множинного доступу з кодовим розділенням [8].

Коди Голда з періодом $2^n - 1$ формуються на основі двох M -послідовностей з відбором так званих “передавальних пар”, які мають тризначну функцію автокореляції $(1, \varphi(t), \varphi(t) \cdot 2)$, де

$$\varphi(t) = \begin{cases} 2(N+1)/2 & \text{де } N \text{ парне;} \\ 2(N+2)/2 & \text{де } N \text{ непарне.} \end{cases} \quad (1)$$

Ортогональні коди Голда утворюються на основі M -послідовності довжиною 255 бітів та додавання одного надлишкового символу. Первинний синхрокод має аперіодичну автокореляційну функцію та використовується для початкового входу в синхронізм.

Вторинний синхрокод представляє собою немодульований код Голда, який передається з первинним синхрокодом. Кожний вторинний синхрокод вибирається з 17 різних кодів Голда [8].

Оцінка стану каналу зв'язку. Завадостійкість приймання сигналів у сучасних системах радіозв'язку значною мірою залежить від точності оцінювання стану багатопробеневого каналу, який визначається його передавальною характеристикою й статистикою шуму [4]. Оцінка передавальної характеристики каналу зв'язку може бути подана як знаходження значень імпульсної характеристики каналу або відповідних їй значень частотної характеристики.

Розподіл потужності сигналу між підканалами OFDM системи. Також важливим фактором є відключення найгірших за відношенням сигнал/шум піднесучих. Відключення піднесучих з низькими відношеннями сигнал/шум зменшує шкідливий вплив частотно-селективних завмирань на пропускну здатність і дозволяє перерозподілити потужність передавача між іншими піднесучими.

Вибір виду сигнально-кової конструкції в підканалі. Алгоритм вибору сигнально-кової конструкції (СКК) для кожного власного каналу

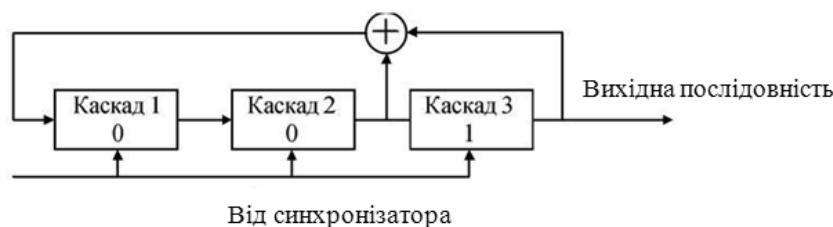


Рис.2. Приклад регістру зсуву [5].

складається з вибору, залежно від заводої ситуації, виду модуляції, вибору коректувального і маніпуляційного коду.

Вибір виду модуляції. При створенні СКК розвитку одержали методи двовимірної модуляції, у разі яких ансамблі сигналів можуть бути подані точками в двовимірному евклідовому просторі. Незважаючи на те, що теоретично для передачі інформації з каналу одновимірні види модуляції мають такі ж потенційні можливості, що і двовимірні, при формуванні СКК одновимірна модуляція використовується набагато рідше.

Застосування багатовимірних сигналів обмежується складністю реалізації таких СКК. Більшість відомих СКК базуються на використанні сигналів фазової маніпуляції (ФМ-М) і квадратурної амплітудної модуляції (КАМ-М) [7].

Вибір коректувального коду. Важливим етапом побудови ефективних СКК є вибір методу захисту від помилок, що базуються на застосуванні заводостійких кодів. Використання цих кодів дозволяє отримати енергетичний вигравш кодування, який характеризує ступінь можливого зниження енергетики передачі при кодуванні в порівнянні з відсутністю кодування, якщо достовірність передачі в обох випадках однакова. Цей вигравш можна використовувати для поліпшення параметрів і характеристик багатьох важливих властивостей систем передачі даних, наприклад, для зменшення розміру дорогих антен, підвищення дальності зв'язку, збільшення швидкості передачі даних, зниження необхідної потужності передавача [8].

З роботи [8] видно, що найбільш ефективними на даний час коректувальними кодами є турбо- і низькощільнісні коди. Кожен з них має свої переваги та недоліки. Застосування турбокодів при побудові СКК дозволить одержати додатковий енергетичний вигравш відношення сигнал/шум для каналів з флуктуаційним шумом і завмираннями в порівнянні зі схемами, що використовують згорткові коди. Тому ці СКК на основі турбокодів використовуються в багатьох сучасних комунікаційних засобах, таких як стандарти безпроводового доступу IEEE 802.16a,e та IEEE 802.11n [8].

Вибір маніпуляційного коду. При узгодженні кодека двійкового заводостійкого коду і модему багатопозиційних сигналів, необхідно використовувати маніпуляційний код, при якому більшій відстані за Хеммінгом між кодівими комбінаціями відповідає більша відстань за

Евклідом між сигналами. Способи узгодження модуляції і кодування можна розділити на дві групи: узгодження оптимальним маніпуляційним кодом і узгодження на основі розбиття ансамблю на вкладені підансамблі.

СКК, що відносяться до першої групи, є результатом узгодження відомих двійкових заводостійких кодів з багатопозиційним ансамблем сигналів шляхом використання спеціальним чином підбраного маніпуляційного коду. Оскільки помилки найчастіше відбуваються за рахунок переходу в ділянки сусідніх сигналів, то кодові комбінації, що відповідають сусіднім сигналам, повинні розрізнятися найменшою кількістю двійкових символів. Цій вимозі в ряді випадків задовольняє код Грея [3, 8]. Друга група включає досить велику кількість типів СКК, що розрізняються модифікаціями методів узгодження. Основою побудови СКК такого виду є розбиття ансамблю сигналів на вкладені підансамблі [3, 7]. Розбиття здійснюється таким чином, що підансамблі мають однакову кількість сигнальних точок. Відстані між сусідніми сигналами підансамблів однакові, а мінімальні відстані між сигналами підансамблю збільшуються з кожним кроком розбиття.

Висновки

1. Основним напрямом вдосконалення технології ортогонального частотного мультиплексування в умовах впливу навмисних завод та міжсимвольної інтерференції є додаткове розширення спектра сигналу.

2. Іншим напрямом підвищення ефективності систем радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням є створення гібридних інформаційних технологій: багатоантенних систем з ортогональним частотним мультиплексуванням та ортогональне частотне мультиплексування з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти.

Список літератури

1. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев // М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.
2. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишнеvский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

3. *Кувшинов О.В.* Технологія OFDM: огляд проблем та шляхів їх розв'язання / О.В. Кувшинов, Т.Г. Гурський // Зв'язок. – 2008. – № 1 (77). – С. 42-46.
4. *Міночкін Д.А.* Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д.А. Міночкін, І. В. Борисов. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 66-71.
5. *Кувшинов О.В.* Теорія електричного зв'язку. Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації. – Ч. 2. – / О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич // Підручник. – К.: ВІТІ НТУУ «КПІ» – 2008. – 286 с.
6. *Голяницкий И.А.* Математические модели и методы в радиосвязи /И.А. Голяницкий // Под ред. Ю.А. Громакова. – М: Эко-Трендз, 2005. – 440 с.
7. *Кувшинов О.В.* Методика вибору сигнально-кодових конструкцій в системах рухомого радіозв'язку / О.В. Кувшинов. // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 30-34.
8. *Van Nee R. and Prasad R.*, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech, 2000. – 275 p.
9. *Hanzo L.* OFDM and MC-CDMA for Broadband multi-User Communications, WLANs and Broadcating, John Wiley&Sons,Ltd., – 2003. – 374 p.