

УДК 621.396

Слюсарь І.І., к.т.н., доцент,
Слюсар В.І., д.т.н., професор,
Козуб Р.О., студент
Довбиш Р.М., студент
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ БАЗИС ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Анотація. В роботі розглянуто особливості спільного використання багаточастотних сигналів на базі *N-OFDM (OFDM)* і методу розширення спектру *FHSS*. На основі проведеного аналізу характеристик та властивостей існуючих методів визначені основні переваги та недоліки зазначених методів, а також здатність протистояти завадам. Можливість практичної реалізації показана на прикладі специфікації *Bluetooth*. З метою підвищення пропускної здатності телекомунікаційної системи запропоновано впровадження технології *Massive-MIMO*. В роботі наведено рекомендації щодо збільшення кількості абонентів, які одночасно працюють у спільній смузі частот, або ж приросту швидкості передачі при незмінній кількості абонентів.

Ключові слова: антенний елемент, цифрова антенна решітка, *Bluetooth*, *FHSS*, *OFDM*, *Massive-MIMO*, *N-OFDM*.

Вступ

У сучасному інформаційному суспільстві з кожним днем зростають обсяги переданої інформації. Через це виникає потреба у розробці нових або ж поєднанні відомих методів цифрової обробки для підвищення ефективності передачі та завадостійкості. В даному контексті, доцільно розглядати технології,

що спираються на використання багаточастотних сигналів.

Основна частина

В роботі, для розв'язання даної проблеми запропонований підхід який базується на комбінації мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів (Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) і псевдовипадкової перебудови робочих частот (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Його сутність полягає в наступному.

Як відомо, OFDM забезпечує розподіл вхідного високошвидкісного потоку даних на множину низько-швидкісних паралельних потоків, кожен з яких передається на своїй ортогональній несучій частоті [1].

При бездротовій передачі сигналів один і той же сигнал в результаті багаторазових відображень може надходити в приймач різними шляхами. Тому, в точці прийому результуючий сигнал являє собою суперпозицію (інтерференцію) багатьох сигналів з різними амплітудами і початковими фазами. Стосовно до багатопроменевої інтерференції, що виникає при передачі сигналів, розрізняють два крайніх випадки. В першому випадку, максимальна затримка між різними сигналами не перевищує тривалості одного символу та інтерференція виникає в межах одного переданого символу. У другому випадку, максимальна затримка між різними сигналами більше тривалості одного символу, і в результаті інтерференції складаються сигнали, що представляють різні символи. Внаслідок цього виникає міжсимвольна інтерференція, яка найбільш сильно позначається на спотворенні сигналу. Для того, щоб частково компенсувати ефект багатопроменевого поширення, застосовують частотні еквайзери. Однак, у міру зростання швидкості передачі даних або за рахунок збільшення символної швидкості, або за рахунок ускладнення схеми кодування, ефективність їх застосування падає.

Як наслідок, для досягнення високої швидкості передачі даних використовують підхід, який полягає в тому, що вхідний високошвидкісний

потік даних розподіляється на множині частотних підканалів, в яких швидкість є невисокою. Це створює передумови для ефективного придушення міжсимвольної інтерференції. При частотному поділі каналів необхідно, щоб ширина кожного каналу була, з одного боку, досить вузькою для мінімізації спотворення сигналу в його межах, а з іншого – досить широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того, для економного використання всієї смуги каналу, яка поділяється на підканали, бажано якомога щільніше розташувати частотні підканали, але при цьому уникнути міжканальної інтерференції для забезпечення повної незалежності каналів один від одного. Функції, що описують несучі сигнали всіх цих каналів, ортогональні один одному, тобто для них виконується умова:

$$\int_0^T \sin 2\pi f_1(t) \sin 2\pi f_m(t) dt = 0, \quad m \neq 1 \quad (1)$$

де T – тривалість переданого символу (корисного), $f_{1(m)}$ – частоти 1-го m -го несучих сигналів відповідно.

Ортогональність несучих сигналів забезпечує частотну незалежність каналів один від одного і, отже, відсутність міжканальної інтерференції. Розглянутий спосіб розподілу широкосмугового каналу на ортогональні частотні підканали називається ортогональним частотним поділом каналів чи OFDM-модуляцією.

Ортогональність несучих сигналів забезпечується тільки тоді, коли за час тривалості одного символу T несучий сигнал буде здійснювати ціле число коливань.

Так як кожен символ тривалості T передається обмеженою за часом синусоїдальною функцією, то її спектр описується функцією виду:

$$\frac{\sin 2\pi(f - f_i)}{2\pi(f - f_i)}, \quad (2)$$

де f_i – центральна (несуча) частота i -го каналу. Такою ж функцією описується і форма частотного підканалу.

Незважаючи на часткове перекриття частотними підканалами один одного (рис. 1), ортогональність несучих сигналів забезпечує їх частотну незалежність каналів один від одного і, отже, відсутність міжканальної інтерференції.

Для OFDM характерна низка властивостей. До плюсів відносяться: висока ефективність використання радіочастотного спектру, яка пояснюється майже прямокутною формою огинаючої спектра при великій кількості піднесучих; проста апаратна реалізація: базові операції реалізуються методами цифрової обробки; гарне протистояння міжсимвольним завадам і інтерференції між піднесучими; як наслідок – лояльність до багатопроменевого розповсюдження; можливість застосування різних схем модуляції для кожної піднесучої, що дозволяє адаптивно варіювати завадостійкість і швидкість передачі інформації.

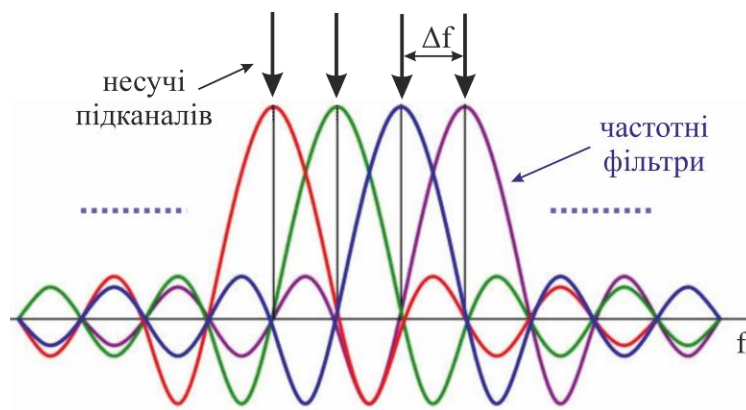


Рис. 1. Сутність OFDM

До мінусів OFDM можна віднести: необхідність високої синхронізації частоти і часу; чутливість до ефекту Доплера, що обмежує застосування OFDM в мобільних системах; не ідеальні приймачі і передавачі викликають фазовий шум, що обмежує продуктивність системи; захисний інтервал, який використовується в OFDM для боротьби з багатопроменевим поширенням, знижує спектральну ефективність сигналу.

Враховуючі наведені аспекти, доцільно підвищити завадостійкість за рахунок розширення бази сигналу.

Для цього доцільно використовувати FHSS (метод заснований на періодичній зміні несучої частоти з метою розширення його спектру для передачі сигналу по бездротових мережах).

При використанні методу псевдовипадкової перебудови робочих частот розширення спектру забезпечується шляхом стрибкоподібної зміни несучої частоти у виділеному для роботи ЗРЗ діапазоні. Під стрибкоподібною зміною частоти розуміють періодичну перестройку однієї або декількох частот які використовуються для передачі сигналів. Сигнали з FHSS можна розглядати як послідовність модульованих радіоімпульсів, несучі частоти яких перебудовуються у певному діапазоні. Число частот, що перебудовуються, а також їх порядок чергування визначається за псевдовипадковим алгоритмом.

Метод FHSS має дві важливих особливості – це завадостійкість і скритність [2, 3]. При цьому в загальному випадку під завадостійкістю засобів радіозв'язку (ЗРЗ) з FHSS розуміється здатність нормально функціонувати, виконуючи завдання з передачі і прийому інформації в умовах дії радіозавад, а стійкість ЗРЗ – це здатність протистояти шкідливому впливу різного виду радіозавад, включаючи, в першу чергу, організовані завади. На практиці системи FHSS виявляються більш стійкими до широкосмугових завад і можуть продовжувати працювати (хоча і зі зниженою пропускну здатністю) [4, 5].



Рис. 2. Система радіозв'язку CNR-9000HDR

На даний час, номенклатура ЗРЗ, що використовує FHSS досить різноманітна. Прикладом є нові варіанти сімейства Tadiran CNR-9000 [6]. Tadiran CNR-9000 HDR (рис. 2) – це тактична радіосистема, яка має високу швидкість передачі даних 115 кбіт/с на 25 кГц рознесених тактичних VHF- FM-каналах. Забезпечує шифрування стрибка частоти: голосу та даних на всьому частотному діапазоні від 30,000 до 107,975 МГц. Представлена в різних конфігураціях, від портативної до авіації і судів, Tadiran CNR-9000 HDR дозволяє виконувати новітні бойові потреби, наприклад потокове відео в русі.

Додавання контролера зв'язку дозволяє отримати повноцінну тактичну IP-радіостанцію для передачі даних, зображення і електронної пошти. Однак, в ній не використовуються багаточастотні сигнали на базі OFDM. В цілому, FHSS є базовою опцією, що задекларована в Link-16 [7]. Це свідчить про істотне відставання її можливостей від сучасних вимог до швидкості передачі даних.

Ще одним прикладом використання FHSS є останні специфікації Bluetooth [8]. Бездротова технологія Bluetooth представляє собою недорогий радіоінтерфейс з низьким енергоспоживанням (потужність передавача близько 1 мВт) для організації персональних мереж (Personal Area Networking, PAN). Забезпечує передачу в режимі реального часу цифрових даних і звукових сигналів. Bluetooth реалізує собою інтерфейс бездротової взаємодії між електронними пристроями, використовуючи для цього спеціальні невеликі приймачі, які інтегровані в сам пристрій, або підключаються до них через вільний порт або інтерфейсну карту комп'ютера, позбавляючи при цьому користувачів пристроїв застосовувати проводові з'єднання.

Спочатку дальність дії радіо-інтерфейсу не перевищувала 10 метрів. Такої відстані вистачає для взаємодії пристроїв в межах кімнати. На даний час, специфікації Bluetooth забезпечують зону взаємодії близько 400 м.

Для роботи пристрою Bluetooth використовується нижній (2,45 ГГц) діапазон ISM (Industrial, Scientific, Medical), призначений для роботи промислових, наукових і медичних приладів. Особливістю даного діапазону є те, що майже у всіх країнах світу, він вільний від ліцензування, що не потребує отримання додаткового дозволу. Канал радіочастот має повну пропускну здатність близько 1 Мбіт/с, що забезпечує створення асиметричного каналу передачі даних на швидкостях 723,3 кбіт/с або повнодуплексного каналу на швидкості 433,9 кбіт/с. Через Bluetooth-з'єднання можна передавати до 3-ох дуплексних аудіоканалів по 64 кбіт/с в кожному напрямку.

В організації обміну даними, Bluetooth відповідає специфікації стандарту локальних мереж IEEE 802 і використовує сигнали з FHSS. Це робить Bluetooth незалежним від вибору смуги радіочастотної взаємодії. В діапазоні частот,

обраному для Bluetooth, функціонує велика кількість різних пристроїв. Так як використання всіх цих пристроїв дозволено на безліцензійній основі, то вибір будь-якої фіксованої частоти функціонування пристрою Bluetooth неминуче призводить би до «частотного конфлікту» з іншими пристроями та неможливості роботи через взаємні радіозавади. Використання FHSS призводить до того, що ураження окремих частот завадами буде призводити до втрат тільки невеликих фрагментів даних, які можуть бути легко відновлені шляхом застосування завадозахищеного кодування. Також, зміна частот по псевдовипадковому закону знижує вплив інтерференційних завмирань сигналів за рахунок перевідбиття від навколишніх предметів, а також ускладнює перехоплення переданих даних злоумисниками.

При комбінації OFDM та FHSS вирішується проблема завадозахищеності, але при цьому порушується властивість ортогональності несучих частот. Для вирішення даної проблеми доцільно перейти до неортогонального OFDM (N-OFDM) (рис. 3) [9]. До особливостей слід віднести: більш висока спектральна ефективність, що дозволяє зменшити смугу частот, яку займає сигнал, і поліпшити електромагнітну сумісність безлічі терміналів; адаптивна відбудова від зосереджених по частоті завад шляхом зміни номіналів частот піднесучих; можливість обліку доплерівських зрушень частот піднесучих при роботі з абонентами які переміщуються на високих швидкостях; використання різних частотних планів в якості додаткового ключа для захисту інформації від несанкціонованого доступу до каналу зв'язку; зменшення пік-фактору багаточастотної сигнальної суміші.

На даний час, відомий підхід [10], що спирається на одночасне використання OFDM і FHSS. Сутність даного методу полягає в перебудові частоти з переналаштуванням на одну з несучих підканалів OFDM (рис. 4). Однак, він має суттєвий недолік, що полягає у використанні лише одного підканалу OFDM у визначений інтервал часу. Тобто, є неефективним з точки зору використання радіочастотного ресурсу, відповідно спектральної ефективності та пропускної здатності.

Як наслідок, в роботі наведений метод, що зводиться до застосування способу формування сигналів в умовах впливу навмисних завад та частотно-селективних завмирань у засобах радіозв'язку, в яких передбачене застосування гібридних інформаційних технологій зв'язку для забезпечення заданого рівня завадозахищеності та пропускної здатності.

В якості прикладу розглянемо варіант практичної реалізації заявленого способу на базі Bluetooth, коли швидкість псевдовипадкової перебудови частот становить 1600 стрибків за 1 с. Така швидкість обумовлює період стаціонарності сигналу 625 мкс, якого цілком достатньо для демодуляції OFDM-паketу з 256 піднесучих. За інтервал стаціонарності символу в OFDM-сигналі візьмемо 562,5 мкс, а решту 62,5 мкс із визначених 625 мкс відведемо під захисні інтервали та перехідні процеси, пов'язані зі зміною несучої частоти.

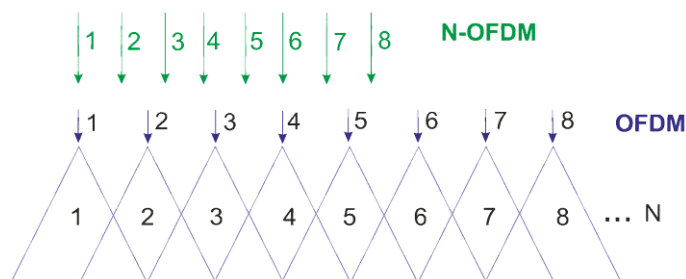


Рис. 3. Частотне розділення каналів з неортогональними несучими сигналами

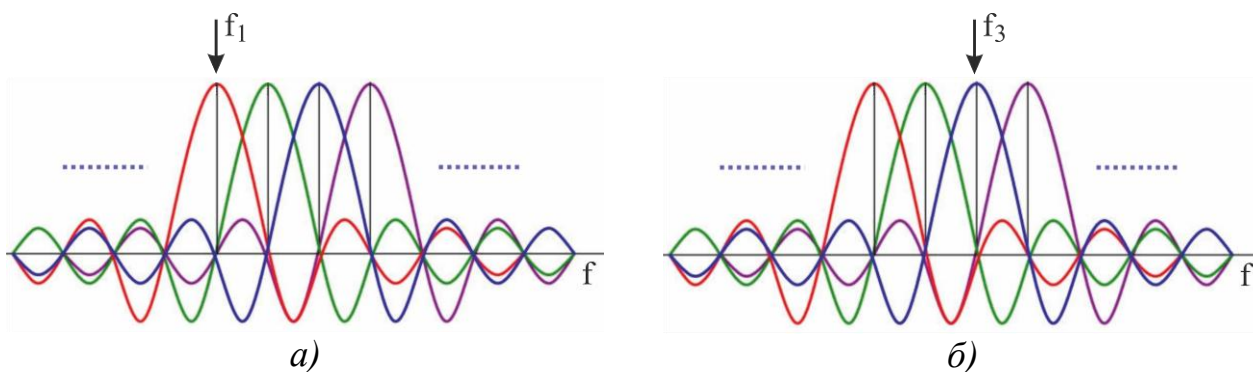


Рис. 4. Передача комбінованого сигналу при OFDM і FHSS:
а) в момент часу t_i ; б) в момент часу t_{i+1}

Якщо на приймальній стороні за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) сформувати частотні фільтри шляхом накопичення сигналу на інтервалі 562,5 мкс, то ширина головної пелюстки амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) окремо взятого синтезованого частотного фільтру становитиме 80 кГц.

Для ортогонального рознесення 256 піднесучих необхідно задіяти смугу частот $80000 \times 256 = 20,48$ МГц. При 512 піднесучих зазначена смуга розшириться до 40,96 МГц. Як результат це дозволить підвищити швидкість передачі даних мінімум у 512 разів, порівняно з традиційним використанням способу FHSS. Порівняно вузькі смуги частот сигналів дозволяють використовувати пропонуваній метод у КХ/УКХ діапазоні частот і вище. За необхідності додаткової завадозахищеності сумарний OFDM-пакет на кожній робочій частоті може бути підданий додатковому кодуванню, наприклад шляхом зміни фази. Якщо припустимо розширити смугу сигналу до 800 кГц, то при зазначених вище параметрах сигналів тривалість елементарного інтервалу кодової послідовності становитиме 56,25 мкс, що дозволить застосувати 10-позиційний фазовий код. Такий чином, технічний результат від застосування зазначеного способу полягає у підвищенні швидкості передачі даних, енергетичної ефективності засобів радіозв'язку та як наслідок підвищенні стійкості їхнього функціонування.

В свою чергу, у сфері телекомунікацій найкращим технічним рішенням стало програмно-реконфігуроване обладнання для систем MIMO-OFDM 4x4 [11]. Хоча відповідні приймальні цифрові модулі обробки і містили лише 8 каналів АЦП, що не є унікальним рішенням на тлі зазначених раніше досягнень, передаючі цифрові модулі стали першими в своєму роді, завдяки інтеграції на їх борту 8 каналів ЦАП. У той же час, серйозним недоліком схемотехніки стала надмірна кількість FPGA в складі плати, що супроводжувалося зайвим виділенням тепла. В умовах широкого поширення різних «розумних» пристроїв обсяг передачі даних по бездротових мережах збільшується щороку практично в 2 рази. Передбачається, що до 2020 р. обсяг збільшиться в 1 тис. раз у порівнянні з рівнем передачі даних в 2010 р. Із цієї причини фахівці в усьому світі займаються розробкою технології бездротової передачі даних п'ятого покоління (5G), яка буде підтримувати швидкість передачі даних понад 10 Гбіт/с.

Подвоєння кількості антенних елементів (АЕ) R · D БС дозволяє зменшити

на 3 дБ потужність передавачів абонентів при забезпеченні незмінного рівня якості сервісу, який пропонується споживачам [12]. У разі, якщо A абонентів застосовують N -елементні антенні решітки, кожен з елементів яких випромінює свій інформаційний сигнал, і виконується умова $R \cdot D \geq A \cdot N$, то можливо записати:

$$C = \Delta F \cdot A \cdot N \cdot \log_2(1 + R \cdot D \cdot p_u). \quad (3)$$

Якщо всі антенні елементи окремо взятої N -елементної антенної решітки передавального сегменту абонента випромінюють один і той же сигнал, то величину N необхідно переставити в аргумент логарифма, тобто вираз (3) перепишеться у вигляді:

$$C = \Delta F \cdot A \cdot \log_2(1 + N \cdot R \cdot D \cdot p_u). \quad (4)$$

При фіксованих значеннях смуги пропускання системи ΔF та кількості абонентів пропускна здатність C визначається цілковито аргументом логарифмічної функції. Для того, щоб визначити загальний характер залежності $\log_2(1 + R \cdot D \cdot p_u)$ було проведено відповідні розрахунки у пакеті Mathcad. Їхні результати представлені на рис. 6-8. При цьому, уздовж горизонтальної осі відкладено кількість антенних елементів $R \cdot D$ у складі приймальної ЦАР БС, а по вертикалі – нормована на смугу пропускання пропускна здатність C (біт/с) для ВСШ = 2 (суцільна лінія) і ВСШ = 16 (штрихова лінія). Як і слід було очікувати, лінії відносної пропускної здатності проходять вище для більших значень ВСШ [12]. Подвоєння кількості антен $R \cdot D$ на БС дозволяє збільшити нормовану пропускну здатність на 1 біт/с. Наприклад, нарощування кількості антенних елементів з 128 до 256 (16×16 , 8×32 , 4×64) при ВСШ $p_u = 2$ на рис. 7 призводить до збільшення показника ефективності з 8 до 9 біт/с. Аналогічно для тих же кількостей АЕ при ВСШ=16 спостерігається зростання пропускної здатності з 11-ти до 12-ти біт/с.

Збільшення розмірності ЦАР у 4 рази, наприклад, з 32-ох до 128-ми елементів на рис. 6 дозволяє отримати вигреш на 2 біт/с (з 6-ти до 8-ми біт/с, див. лінію для ВСШ $p_u = 2$). Нарощування кількості АЕ у 8 разів призводить до

підвищення спектральної ефективності приблизно на 3 біт/с/Гц. Для проведених розрахунків такий вигаш спостерігається при переході уздовж суцільної лінії ($p_u = 2$) на рис. 6 від абсциси $R \cdot D = 32$ до $R \cdot D = 256$ зі зростанням ординати з 6 до 9 біт/с та аналогічно для штрихової лінії ($p_u = 16$) зі зміною ординати від 9 до 12 біт/с [13, 14].

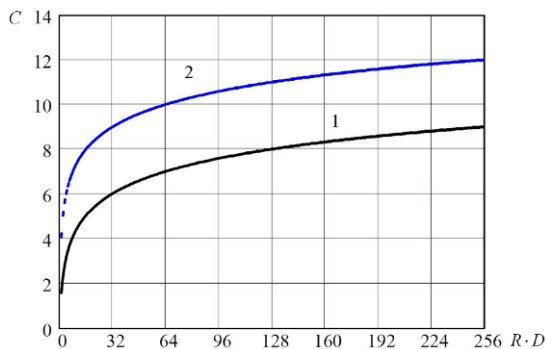


Рис. 6. Залежність нормованої пропускної здатності системи зв'язку від кількості АЕ БС

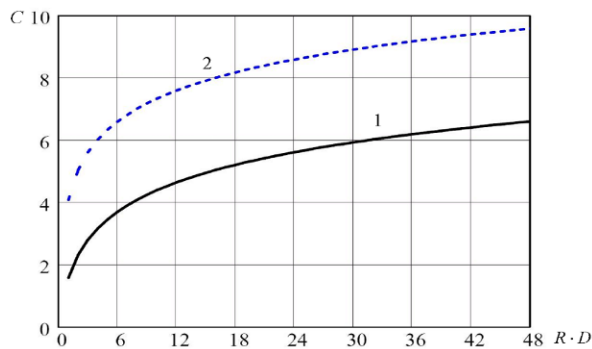


Рис. 7. Залежність нормованої пропускної здатності системи зв'язку від кількості АЕ БС

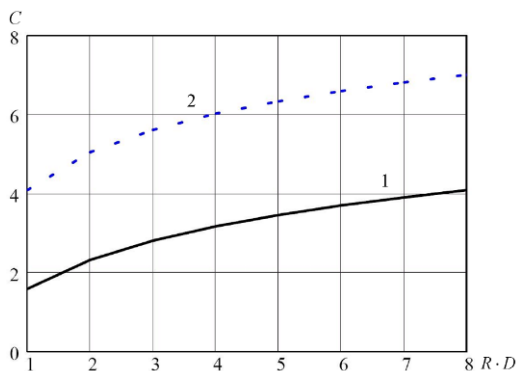


Рис. 8. Залежність нормованої пропускної здатності системи зв'язку від кількості АЕ БС

Таким чином, аналіз наведених результатів дозволяє визначити емпіричну залежність для розрахунку оцінки вигашу у пропускній здатності, нормованій на ширину смуги частот, при фіксованому ВСШ і зростанні кількості АЕ в цифровій ЦАР БС зв'язку у вигляді:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta\delta(\cdot D)) \text{ біт/с.} \quad (5)$$

Інший напрям аналізу поведінки залежностей пропускної здатності – дослідження впливу змін у ВСШ [15]. З розгляду рис. 7 видно, що при кількості антенних елементів $R \cdot D = 30$ перехід від ВСШ $p_u = 2$ до $p_u = 16$ змінює відносну пропускну здатність з 6 до 9-ти біт/с, тобто на 3 біт/с. Таку величину

приросту показника ефективності можливо отримати, якщо взяти логарифм від величини приросту ВСШ: $\log_2(8) = 3$.

Таким чином, виграш у нормованій пропускній здатності при збільшенні ВСШ для фіксованої кількості АЕ приймальної ЦАР у δp_u разів описується:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta p_u) \text{ біт/с.} \quad (6)$$

У випадку сумісного зростання розмірності приймальної ЦАР і ВСШ, на основі виразів (5) та (6), отримуємо:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta(R \cdot D)) + \log_2(\delta p_u) \text{ біт/с.} \quad (7)$$

Наприклад, для того, щоб досягти збільшення пропускної здатності на 8 біт/с необхідно у 16 раз підняти ВСШ та у стільки ж разів наростити розмірність антенної решітки:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(16) + \log_2(16) = 8 \text{ біт/с.}$$

Розглянуті залежності для виграшу у величині нормованої спектральної ефективності описують верхню межу виграшу за ідеальних умов прийому сигналів на БС.

Висновок

Наведені результати досліджень свідчать про можливість практичної реалізації комбінації технологій OFDM і FHSS в інтересах підвищення ефективності телекомунікаційних систем. Усунення обмежень, що пов'язані з ортогональністю підканалів доцільно вирішувати за рахунок впровадження N-OFDM.

В свою чергу, досить привабливим є підхід на базі Massive-MIMO, що дозволяє значну підвищити пропускну здатність. При цьому може бути збільшена кількість абонентів, що одночасно працюють у спільній смузі частот, або ж швидкість передачі при незмінній кількості абонентів. Подвоєння кількості антен $R \times D$ на базовій станції дозволяє збільшити нормовану пропускну здатність на 1 біт/с.

Посилання

1. Сергиенко А.Б. Цифровая связь: Учеб. Пособие. / Сергиенко А.Б. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
3. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: «Свое издательство», 2013. – 166 с.
4. Корчинский В.В. Конфиденциальная система связи на основе псевдослучайной перестройки рабочей частоты и таймерных сигналов/ Корчинский В.В. // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПИ», – 2013.
5. Чердынцев В.А. Системы передачи информации с расширением спектра сигналов: учеб.-метод. Пособие / Чердынцев В.А., Дубровский В.В. – Минск: БГУИР, 2009. 130 с.
6. Tadiran CNR-9000HDR. IP RADIO [Electronic resource] / Elbit Systems. – Last access: http://www.elbitsystems.com.au/media/CNR9000HDR-IP_Radio.pdf.
7. STANAG 5516 Ed.4 “Tactical Data Exchange - Link 16”. [Electronic resource] / Standards Library IEEE – Last access: <http://standards.globalpec.com/std/1307656/nato-stanag-5516>.
8. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л. и др. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
9. Слюсар В.И. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. Ч. 1. / Слюсар В.И. // Технологии и средства связи. – 2013. – № 5. – С. 61-65.
10. Зайцев С.В. Інформаційна технологія побудови системи OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот в умовах впливу навмисних завад/ С.В. Зайцев, В.В. Приступа, А.В. Яриловець // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 4. – С. 131-140.
11. Слюсар В.И. Метод мульти-ММО для беспроводной сети на чипе. / Слюсар В.И., Слюсар Д.В. // VII Міжнародна науково-технічна конференція студентства і молоді «Світ інформації та телекомунікацій – 2010» (15-16 квітня 2010 р.). – К.: ДУІКТ. – С. 53-54.
12. Слюсарь І.І. Перспективні схемотехнічні рішення щодо створення систем зв'язку з цифровими антенними решітками / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Зінченко А.О. // Зб. наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ” № 1. – К.: ВІПІ, 2010. – С. 84-91.
13. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: аспекты развития. / Слюсар В.И. // Специальная техника и вооружение. – 2002. – № 1, 2. – С. 17-23.

14. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2001. – № 3. – С. 42-46.

15. Слюсар В.И. Модульные решения в схемотехнике цифрового диаграммообразования. / Слюсар В.И. // *Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.* – 2003. – Том 46, № 12. – С. 48-62.

Authors:

Sliusar I.I., Slyusar V.I., Kozub R.O., Dovbish R.M.

TECHNOLOGICAL BASIS OF PERSPECTIVE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. In the article considered the features of common using multi-frequency signals based on N-OFDM (OFDM) and the expansion method of the spectrum of FHSS. Based on the analysis of the characteristics and properties of existing methods, it has been defined advantages and disadvantages of these methods, and also the ability to withstand barriers. Practical implementation is shown on an example of Bluetooth specification. The introduction of Massive-MIMO technology is proposed in order to increase the bandwidth of the telecommunication system. The article gives recommendations for increasing the number of subscribers who work simultaneously in the common frequency band, or the growth rate of transmission at a constant number of subscribers.

Keywords: antenna element, digital antenna array, Bluetooth, FHSS, OFDM, Massive-MIMO, N-OFDM.

Авторы:

Слюсарь И.И., Слюсарь В.И., Козуб Р.А., Довбыш Р.М.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. В работе рассмотрены особенности совместного использования многочастотных сигналов на базе N-OFDM (OFDM) и метода расширения спектра FHSS. На основе проведенного анализа характеристик и свойств существующих методов определены основные преимущества и недостатки указанных методов, а также способность противостоять помехам. Возможность практической реализации показана на примере спецификации Bluetooth. С целью повышения пропускной способности телекоммуникационной системы предложено внедрение технологии Massive-MIMO. В работе приведены рекомендации по увеличению количества абонентов, которые одновременно работают в общей полосе частот, или прироста скорости передачи при неизменном количестве абонентов.

Ключевые слова: антенный элемент, цифровая антенная решётка, Bluetooth, FHSS, OFDM, Massive-MIMO, N-OFDM.