

УДК 621.391

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ МІЖКАНАЛЬНИХ ЗАВАД В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА БАЗІ СИГНАЛУ OFDM

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-10

Полонський К. І. Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

k.polonskiy26@gmail.com

Говорун О. І. Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

govorun70@ukr.net

Анотація: В роботі розглянуті питання підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних систем передачі даних на базі технології паралельної передачі даних і частотного розподілу з мультиплексуванням фазомодульованого сигналу – технології OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). А саме: проведено аналіз структури сигналу OFDM; визначено, що зміна положення та параметрів піднесучої з складу даного OFDM-символу створюють міжканальну заваду, яка характеризується величиною потужності та залежить від кількості піднесучих в структурі даного OFDM-символу; подано перелік параметрів сигналу OFDM, які можуть впливати на появу міжканальних завад.

На основі отриманих результатів запропоновано методологічний підхід до зменшення рівня міжканальних завад телекомунікаційних системах передачі даних на базі сигналу OFDM, визначено критерій оцінки ефективності і алгоритм реалізації поданої методології.

Ключові слова: сигнал OFDM, піднесуча, міжканальна завада, потужність міжканальної завади.

METHODOLOGICAL APPROACH TO REDUCING THE LEVEL OF INTERCHANNEL INTERFERENCE IN TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF DATA TRANSMISSION BASED ON THE OFDM SIGNAL

Konstantin Polonskyi. State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

k.polonskiy26@gmail.com

Oleg Govorun. State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. govorun70@ukr.net

Abstract: The article considers the power to improve the efficiency of the functioning of telecommunication data transmission systems based on the technology of parallel data transmission and the frequency division of the phase-modulated signal multiplexing - OFDM technology (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). OFDM technology today is considered as one of the most promising for encouraging wide-range digital radio communication systems over rich communication channels, OFDM technology may have a number of advantages, until such a high level of data transmission security, the possibility of influx on the signal / noise ratio, as a result, the independence of the influx of external factories, simple algorithms for processing data packets on the basis of the real algorithm of the simple Fourier transformation. One hour before such a technology is short, there is a high sensitivity to the shift in frequency and phase of the input signal of the externally reference signal, low energy efficiency, staleness due to the Doppler effect when the technology is blocked in mobile devices.

In the article, an analysis of the structure of the OFDM signal was carried out, and it was identified as one of the factors that can affect the efficiency of data transmission - the position and parameters of the subcarrier in the warehouse of a given OFDM symbol. It is shown that changing the position of the subcarrier in the bottom line from the warehouse of this OFDM-symbol creates an influx of one bottom line on the line - it is formed as a negative phenomenon, it is designated as an interchannel shift. The methodological approach was approved before changing the level of inter-channel factories of telecommunication systems for data transmission based on the OFDM signal.

Key words: OFDM signal, subcarrier, inter-channel interference, inter-channel interference power.

Вступ

На сьогоднішній день в найбільш сучасних та ефективних телекомунікаційних дротових та бездротових системах використовуються стандарти передачі даних, засновані на технології паралельної передачі даних і частотного розподілу з мультиплексуванням фазомодульованого сигналу – технології OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

Технологія OFDM – одночасна передача потоку цифрових даних по багатьом частотним каналам (з багатьма несучими коливаннями) на сьогодні розглядається як одна з найбільш перспективних для побудови широкосмугових систем цифрового радіозв'язку по багатопроменевих каналах, що забезпечує досить високу спектральну ефективність цих систем. Однією із привабливих властивостей даної технології вважається відносно висока стійкість стосовно частотно-селективних завмирань і вузькосмугових завад [1].

Це пояснюється тим, що у системах з одним несучим коливанням, завмирання на даній частоті або вузькосмугова завада, що попадає на цю частоту, можуть повністю перервати передавання даних. У багаточастотних системах в аналогічних умовах виявляються подавленими лише незначна частина несучих коливань. А завадостійке кодування може забезпечити відновлення даних, загублених на подавлених несучих.

При OFDM високошвидкісний потік даних розбивається на велике число низькошвидкісних потоків, кожний з яких передається у своєму частотному каналі (на своїй несучій частоті, інше визначення – піднесуча). Тобто в частотних каналах тривалість каналних символів може бути обрана досить великою, що значно перевищує час збільшення затримки сигналу в каналі. Отже, в кожному частотному каналі вражається лише незначна частина каналного символу, яку можна вилучити з наступної обробки в приймачі за рахунок введення часового захисного інтервалу між сусідніми каналними символами при контрольованому зниженні швидкості передачі даних [1,2].

На рис 1. представлено графіки спектрів одного радіоімпульсу із прямокутною обвідною несучої у вигляді гармонійного коливання із частотою f_0 і одного OFDM - символу, що містить аналогічні радіоімпульси на декількох несучих, які відстоять по частоті один від одного на інтервалах кратно $\Delta f = 1/T$ [2,3].

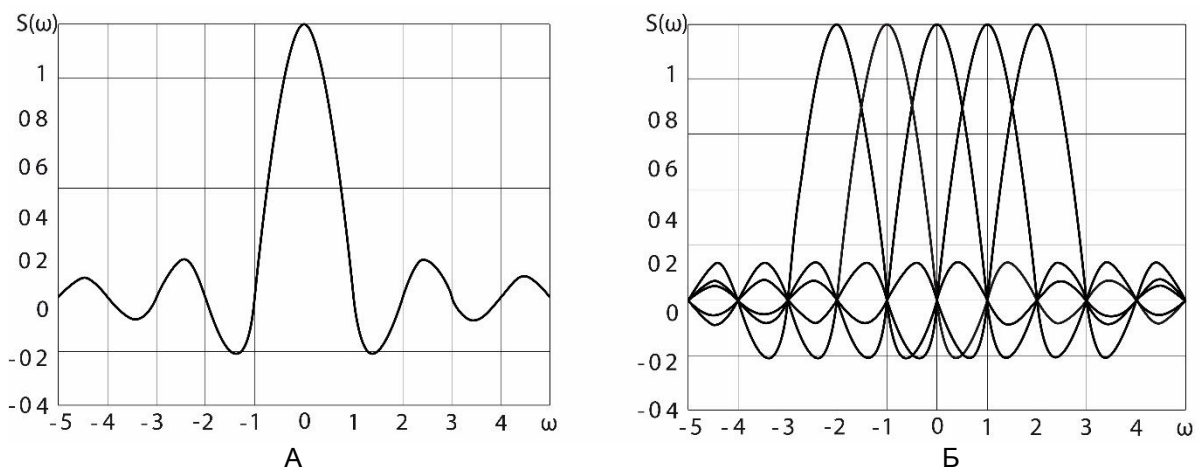


Рис.1. Спектральна щільність одного елементарного символу (А) і одного OFDM-символу (Б)

Технологія OFDM має ряд переваг, до яких слід віднести високу швидкість передачі даних, можливість впливу на співвідношення сигнал/шум та, як наслідок відносна незалежність від впливу зовнішніх завад прості алгоритми обробки пакетів даних на основі алгоритмів швидкого перетворення Фур'є та простота апаратної реалізації при можливості забезпечення одночасної передачі сигналів різного спектру через одну мережу. До переваг також можна віднести можливість застосування різних схем модуляції для кожної під несучої, що дозволяє адаптивно варіювати завадостійкість і швидкість передачі інформації [3,4].

Одночасно до недоліків такої технології слід віднести високу чутливість до зміщення частоти і фази вхідного сигналу відносно опорного коливання, низьку енергетичну ефективність, залежність від ефекту Допплера при застосуванні вказаної технології в мобільних мережах [3,4,5].

Системам OFDM властива довга послідовність, яка дозволяє ефективніше послабити вплив багатопроменевості на завадостійкість прийому, і разом з тим, забезпечити високу сумарну швидкість передачі. Ці переваги зумовили одержати значний розвиток властивості

багатопроменовості на дровових каналах телекомунікаційних систем (ТС): довга посилка при порівняно високій стійкості відносно імпульсних завад і переривань. Крім того, параметри багатопроменового сигналу, виходячи з припустимих відхилень амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик (АФЧХ) каналу ТС, вибираються такими, щоб система була нечутлива (інваріантна) до цих відхилень, чим би вони не були зумовлені. Тобто система будується на основі інваріантного підходу, що є позитивною властивістю систем передачі даних на основі технології OFDM [4,5]

Вирішення питання підвищення ефективності телекомунікаційних систем, що працюють на основі технології OFDM вимагають обґрунтування подальших напрямків досліджень щодо удосконалення вказаної технології при умові збереження всіх притаманних їй властивостей, а саме інваріантності та високої завадостійкості.

Аналіз спектральної щільності одного елементарного OFDM-символу (Рис.1) та технології і теорії його побудови дозволяють визначити, що однією з груп параметрів, які можуть чинити вплив загалом на інваріантність системи та безпосередньо на її завадостійкість є положення та параметри кожної несучої. А саме, завадостійкість забезпечується кількістю під несучих, які повинні, в першу чергу займати своє положення в частотному розподілі OFDM-символу. В свої чергу, ці параметри необхідно розглядати як з точки зору розповсюдження радіолокаційної хвилі визначеної частоти і спектральної щільності сигналу, яка формує один канал передачі даних, так і з точки зору побудови дискретного сигналу, який передається цим каналом та має свої параметри [2,5].

Очевидно, зміна параметрів радіолокаційної хвилі каналу передачі даних може сформувати явище, яке визначається як між канална завада. Сутність її полягає в впливу сусідніх несучих одна на одну через недодержання однією з несучих параметрів радіохвилі в заданих номінальних значеннях.

Дані обставини формують певний науковий завдання щодо обґрунтування методології зменшення впливу міжканальних завад в телекомунікаційних системах передачі даних на базі сигналу OFDM.

Питанню формування методології підвищення ефективності передачі даних на фоні забезпечення високої завадостійкості в телекомунікаційних системах, які працюють на основі використання сигналів OFDM присвячено ряд робіт.

Робота [6] присвячена розгляду математичної моделі побудови каналу зв'язку телекомунікаційної системи на базі сигналу OFDM при умові впливу навмисних завад. Запропонований в даній роботі механізм зменшення їх впливу направлений на удосконалення процесу мінімізації втрат частини даних з вхідного сигналу за рахунок введення часового захисного інтервалу та компенсування вказаної втрати даними з сусіднього каналу. Питання формування загальної методології зменшення такого роду негативних впливів та безпосередня втрата даних через міжканальні завади в даній роботі не висвітлені.

В роботі [7] розглянуто питання зменшення перешкоди в елементарному каналі передачі даних системи сигналу OFDM. Запропоновано, при умові врахування потужності внутрішньої каналної перешкоди, нове асиметричне вікно, яке забезпечує скорочення циклічного префіксу сигналу без зменшення потужності корисного сигналу. Певне питання обмеження впливу вказаних внутрішніх перешкод на сусідні канали в роботі розглянуто в частині, яка констатує можливості обраного методу щодо забезпечення обмеження впливу на потужність перешкоди в сусідньому каналі. Питання загального формування методології обмеження міжканальних завад в даній роботі не розглянуто.

Роботи [8,9] присвячені розгляду питання обмеження впливу поза смугових випромінювань в системах з ортогональним частотним поділом (OFDM). Певним чином такі випромінювання можна віднести до міжканальних завад але формуються вони випромінюваннями, які не несуть елементів корисних сигналів і, по суті являються зовнішніми перешкодами. Для їх зменшення в даних роботах запропоновано частотне спектральне попереднє кодування та нова структура прекодера, який забезпечує умови, що дозволяють приймачу вхідного сигналу використовувати класичний оцінювач каналу OFDM. Загальні підходи до зменшення такого роду перешкод та інших завад і збурень та методологія їх побудови в даних роботах не висвітлено.

Певні елементи методології зменшення міжканальних завад в OFDM сигналах висвітлено в роботі [10]. Розглянутий в роботі підхід до зменшення блокової діагоналізації перешкод

низхідної лінії зв'язку та розподілу потужності з урахуванням як відсутності, так і наявності інформації про стан каналу в багатокористувальницьких телекомунікаційних мережах на основі сигналів MIMO-OFDM певним чином стосується одного з проявів міжканальної завади але тільки в частині обмеження просторових перешкод. Безпосередній вплив відхилення параметрів одного з каналів та формування негативного впливу від нього на сусідні канали а також загальна методологія зменшення вказаного впливу в роботі не розглядалися.

Виконання досліджень

При побудові сигналу по технології OFDM необхідно вибирати чисельні значення таких параметрів, як число несучих гармонійних коливань (несучих), частотний інтервал між сусідніми несучими, захисний інтервал часу між сусідніми OFDM-символами, тривалість каналного символу, спосіб модуляції коливання несучої, методи завадостійкого кодування. Значення перерахованих параметрів визначаються вимогами до самої системи, такими як смуга займаних частот, необхідна швидкість передачі інформації, значення розширення затримки й доплерівського розширення спектра сигналу в каналі. Деякі із цих вимог суперечливі [1,2,5]

Як було зазначено вище, OFDM-сигнал є сумою несучих гармонійних коливань (Рис.1), кожна з яких модулюється своїм підпотокм переданих біт з використанням фазової модуляції (ФМ) або квадратурної амплітудної модуляції (QAM). Нехай d_i – комплексне число, що представляє амплітуду $|d_i|$ й початкову фазу $\arg(d_i)$ i -го гармонійного коливання несучої OFDM-символу при використанні ФМ або QAM – символу. Кожний QAM-символ у системах цифрового радіозв'язку переносить кілька кодових біт. Якщо один OFDM – символ містить N_s носієвих коливань, то можна вважати, що один OFDM-символ переносить блок $i = 0, 1, 2, \dots, N_s-1$ QAM-символів. Тоді комплексна обвідна одного OFDM-символу тривалістю T в момент часу t_k має вираз (1.1) [2,5]:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left\{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)\right\}, \quad t_k < t < t_k + T. \quad (1.1)$$

Поза цим інтервалом часу OFDM-символ з номером k дорівнює нулю.

Вираз (1) описує граничний відеоеквівалент OFDM-радіосигналу.

Щоб одержати реальний OFDM – символ радіосигналу із прямокутною обвідною несучого гармонійного коливання частотою f_0 , необхідно цілу й уявну частини обвідної виразу (1), що відповідає синфазної й квадратурної компонентам QAM – сигналу, помножити на $\cos(2\pi f_0 t)$ і $\sin(2\pi f_0 t)$ з наступним додаванням отриманих коливань [2,5].

З виразу (1) випливає, що для OFDM-сигналу інтервал між частотами сусідніх несучих $\Delta f = 1/T$, а частоти всіх несучих кратні цьому інтервалу. Отже, на тривалості одного OFDM-символу завжди укладається ціле число періодів кожної несучої. Для будь-яких сусідніх періодів число кожної несучої відрізняється на одиницю. Початкова фаза й амплітуда кожної несучої визначаються значенням трансльованого QAM-символу цієї несучої, а для різних несучих вони, звичайно, виявляються різними. У таких умовах когерентна демодуляція цього сигналу може бути здійснена з використанням взаємної ортогональності всіх несучих на інтервалі $t_k < t < t_k + T$ [2,5,11].

Наприклад, відповідно до класичної теорії потенційної завадостійкості для одержання оцінки QAM-символу d_i з номером i із прийнятої комплексної обвідної (1) (після її виділення в приймачі традиційним способом) необхідно помножити на коливання несучої

$\exp\left\{-j2\frac{l}{T}\pi(t-t_s)\right\}$ і результат проінтегрувати на інтервалі часу $t_k < t < t_k + T$ [5,11]:

$$\int_{t_k}^{t_k+1} \dot{u}(t) \exp\left\{-j2\pi \frac{l}{T}(t-t_k)\right\} dt =$$

$$= \int_{t_k}^{t_k+1} \exp\left\{-j2\pi \frac{l}{T}(t-t_k)\right\} \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp\left\{j2\pi \frac{i}{T}(t-t_k)\right\} dt = d_1 T$$

Фактично відповідно до (2) при демодуляції одного OFDM – символу обчислюється значення спектральної щільності амплітуд даного символу на частоті $F_l = l\Delta f$ коливання несучої, з номером 1 [5,11].

На Рис.2 зображені спектри, які перекриваються різними несучими одного OFDM – символу і видно, що спектри всіх інших несучих на цій частоті дорівнюють нулю [2,5].

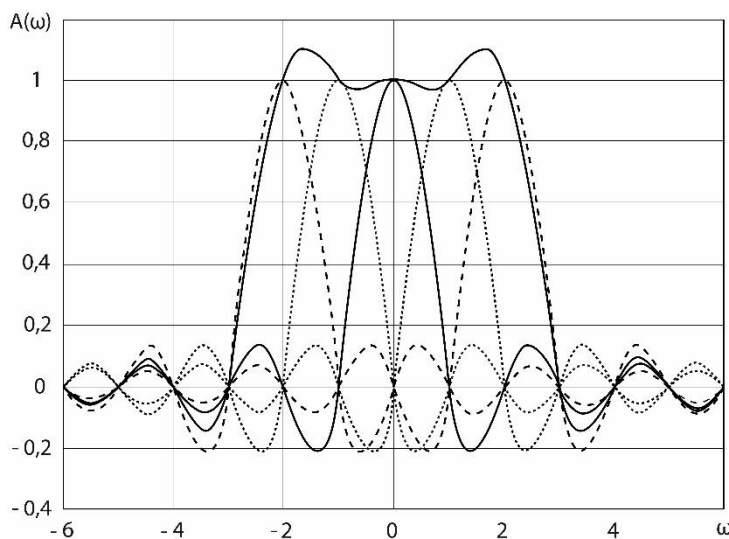


Рис. 2. Спектральна щільність суми п'яти несучих із однаковими амплітудами й початковими фазами

Таким чином, при визначеному виборі частот несучих коливань і інтервалу між сусідніми частотами, пов'язаного із тривалістю OFDM-символу (T), забезпечується відсутність взаємних впливів між несучими [5,11,12].

Однією із основних властивостей технології OFDM є нечутливість до розширення затримки багатопроменевого сигналу. Ця властивість забезпечується за рахунок значного збільшення тривалості одного OFDM-символу, яка більша тривалості QAM-символу в значенні кількості піднесучих сигналу (N_s), тобто в N_s раз. При цьому відносний час збільшення затримки в каналі у стільки ж раз зменшується. Для того, щоб практично повністю усунути міжсимвольну інтерференцію між сусідніми OFDM – символами, вводиться захисний часовий інтервал T_g . Цей інтервал міг би зовсім не містити сигналу. Однак могла б виникнути міжканальна інтерференція між різними несучими, оскільки була б порушена їхня взаємна ортогональність. Причиною виникнення таких взаємних завад служить багатопроменевість [5,11].

Щоб усунути порушення ортогональності через багатопроменевість кожне несуче коливання циклічно триває на захисному інтервалі. У цьому випадку навіть затримка другого променя на деякий час t не приведе до порушення ортогональності між несучою першого променя та несучою іншого променя, оскільки на будь-якому інтервалі часу тривалість T завжди буде укладатися ціле число періодів кожної несучої незалежно від розміщення цього інтервалу.

Це справедливо для будь-якого променя, якщо розширення затримки Δt через багатопроменевість каналу не перевищує тривалість захисного інтервалу T_g [11,12].

Після вибору захисного інтервалу можна знайти тривалість OFDM-символу T_c . Чим меншу частку інтервалу T_c становить тривалість захисного інтервалу T_g , тим менші енергетичні втрати, отже, менше необхідна випромінювана потужність для забезпечення необхідного значення відношення сигнал/завада в приймачі.

Однак тривалість T_c не може бути занадто великою, тому що кількість несучих стає значно більшою, а частотні інтервали між ними дуже малими. При цьому зростає чутливість системи до відхилень частоти в приймачі і до флуктуацій фази. Зростає також пікфактор OFDM-сигналу. Останнє ускладнює забезпечення лінійного режиму підсилювачів потужності сигналу в передавачах.

Тому вибір тривалості T_c символу може бути сформульовано в такий спосіб: якщо допустити енергетичні втрати не більші 1 дБ, то тривалість символу повинна бути більше захисного інтервалу принаймні в п'ять раз [5,11,12].

Отже, тривалість основного інтервалу інтегрування OFDM-символу в приймачі $T = T_c - T_g$, а, як було зазначено раніше, частотний інтервал між сусідніми несучими коливаннями $\Delta f = 1/T$.

Число несучих N_s можна визначити як $N_s = F/\Delta f$. З іншого боку, число несучих можна визначити як відношення сумарної швидкості передачі лінії R до швидкості передачі R_n на одній несучій.

У свою чергу, швидкість передачі на одній несучій визначається видом модуляції (наприклад, QAM-16), швидкістю використовуваного коду, швидкістю каналних символів. При знайденій швидкості проходження OFDM-символів і заданій швидкості передачі лінії можна обчислити число біт дискретного сигналу.

Число несучих є одним з найважливіших параметрів систем OFDM. Воно формує число підканалів (W) в структурі сигналу. Саме кількість підканалів W значною мірою формує та забезпечує інваріантність системи передачі даних OFDM.

За інших рівних умов з ростом W збільшується тривалість тактового інтервалу і знижується ефективно використовувана смуга частот, що в сукупності зменшує вплив неідеальності АФЧХ каналу. Однак, при цьому збільшується кількість операцій, що виконуються при модуляції і демодуляції сигналу, зростає вплив частотного розстроювання і фазового дрижання каналу [5,11,12].

Аналіз побудови сигналу за технологією OFDM, встановлення взаємозв'язку та взаємовпливу параметрів вказаного сигналу та сумісна взаємодія сусідніх каналів передачі даних в структурі одного сигналу дозволяють визначити наступний перелік важливих та критичних параметрів, які формують сам сигнал та, очевидно, можуть мати відношення до міжканальних завад.

До них відноситься:

- інтервал частот несучих коливаний сигналу OFDM;
- частотна невизначеність вхідного сигналу (формує відхилення АФЧХ та мінімізується побудовою каналу прийому вхідного сигналу);
- кількість несучих в одному сигналі OFDM;
- початкова фаза та амплітуда кожної несучої;
- частотний інтервал між сусідніми несучими;
- часовий інтервал когерентної демодуляції сигналу OFDM при умові взаємної ортогональності всіх несучих сигналу;
- часовий інтервал тривалості OFDM-символу;
- захисний часовий інтервал, що забезпечує міжсимвольну інтерференцію при прийомі багатопроменевих сигналів та є складовим часового інтервалу OFDM-символу.

Як було зазначено раніше, збільшення кількості піднесучих збільшує кількість операцій, що виконуються при модуляції і демодуляції сигналу. А при цьому зростає вплив частотного розстроювання і фазового дрижання каналу [11,12,13]. Через ці ефекти несуча зміщується з встановленого частотного положення, тобто формується міжканальна завада, вплив якої, як радіотехнічного збурення, можна оцінити по її потужності.

Виходячи з цього, в якості методологічного підходу до зменшення рівня міжканальних завад в телекомунікаційних системах передачі даних на базі сигналу OFDM можна сформулювати наступний алгоритм.

1. Основний критерій оцінки зменшення впливу – потужність міжканальної завади;
2. При визначенні потужності міжканальної завади прийняти фіксованими наступні параметри:
 - смугу пропуску каналу;

- швидкість передачі повідомлення;
- кратність модуляції.
- АЧХ і ФЧХ каналу прийняти в вигляді нормованих шаблонів для кожного числа переприйомів вхідного сигналу OFDM.

3. Вибір захисного інтервалу прийому вхідного сигналу демодулятором для обмеження перехідних процесів, що виникають на кордоні тактових інтервалів;

4. Створення моделі прийому вхідного сигналу як суми корисного сигналу та компонентів міжканальних завад. Вказана модель повинна однозначно пов'язувала відстань між піднесучими, їх кількість та значення захисного інтервалу при умові мінімізації потужності міжканальної завади.

Висновки

1. Проведено аналіз структури сигналу OFDM та визначено, що одним з факторів, який може вплинути на ефективність передачі даних за допомогою вказаної технології є положення та параметри кожної піднесучої з складу даного OFDM-символу.

2. Визначено, що зміна положення та параметрів піднесучої з складу даного OFDM-символу створюють вплив однієї піднесучої на іншу. Таке явище визначається як міжканальна завада, яка характеризується величиною потужності.

3. Встановлено, що кількість під несучих в структурі сигналу забезпечує інваріантність системи до зовнішніх збурень та перешкод, але створює умови формування міжканальних завад, ріст яких пов'язаний з збільшенням кількості піднесучих в структурі даного OFDM-символу.

4. Запропоновано методологічний підхід до зменшення рівня міжканальних завад телекомунікаційних системах передачі даних на базі сигналу OFDM, визначено критерій оцінки ефективності та алгоритм реалізації поданого методологічного підходу.

Література

1. Попівський В.В., Лемешко О.В., Ковальчук В.К. Плотніков М.Д., Картушин Ю. П. та інші Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. Том 1..URL: <http://www.znanius.com/3534.html>.
2. Балашов В. О., Воробієнко П. П., Ляховецький Л. М., Педяш В. В. Системи передавання широкосмуговими сигналами. Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. 336 с.
3. Бакулин, М. Г., Крейнделін В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 60 с.
4. Мазурков, М.И. Системы широкополосной радиосвязи. Одесса: Наука и техника, 2010.340 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1099 с.
6. Зайцев С.В. Математичні машини і системи.Київ: 2011.№ 4. С. 166–175.
7. Taheri, T. Nilsson, Van de Bee J. Asymmetric Transmit-Windowing for Low-Latency and Robust OFDM /T. Taheri, R. k // 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). –Washington, DC USA, 2016. pp. 1-6.
8. Mohamad, M, Nilsson. R., De Beek A Novel J. Van. Transmitter Architecture for Spectrally-Precoded OFDM / M. Mohamad, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. –Beijing, China, Aug. 2018. –Vol.65, №8.pp. 2592-2605.
9. Beek, J. OFDM Spectral Precoding with Protected Subcarriers .IEEE Communications Letters. Paris: December 2013. –Vol.17, №12, pp. 2209-2212.
10. Agrahari, A. , Agrahari A., Varshney P. Jagannatham Precoding and Downlink Beamforming in Multiuser MIMO-OFDM Cognitive Radio Systems With Spatial Interference Constraints . IEEE Transactions on Vehicular Technology. Sydney: March 2018. Vol.67, №3.pp. 2289-2300.
11. Гусев, О.Ю. Конахович Г.Ф., Корнієнко В.І, Кузнецов Г.В., Пузиренко О.Ю. Теорія електричного зв'язку..Львів: Магнолія , 2010. 364 с.
12. Стеклов, В.К., Беркман Л.Н. К.: Техніка, 2006. 552 с.
13. Beek, J.J. Sandell M., Borjesson P.O. ML Estimation of Timing and Frequency On-set in Multicarrier Systems . Lulea, Sweden : University of Technology, 1996. 32 p.

References

1. Popivs'kyi V.V., P. P. Vorobiyenko, L. M. Lyakhovets'kyi, V. V. Pedyash Lemeshko O.V., Koval'chuk V.K., Plotnikov M.D., Kartushyn Y.P. ta inshi Telekomunikatsiyni systemy ta merezhi. Struktura ta osnovni funktsiyi .[Telecommunication systems and networks. Structure and main functions] Tom 1 <http://www.znanius.com/3534.html>.
2. Balashov, V. O. Systemy peredavannya shirokosmuhovymy syhnalamy. [Broadband signal transmission systems] Odesa: Vyd. tsentr ONAZ im. O.S. Popova, 2012. –336 s.
3. Bakulin, M. H., Kreyndelin V.B., Shloma A.M., Shumiv A.P. Tekhnolohiya OFDM.[OFDM technology] .M.: Haryacha liniya - Telekom, 2015. - 60 s.

4. Mazurkov, M.I. Systemy shyrokosmuhovoho radiozv'yazku. [Broadband radio communication systems]. Odesa: Nauka ta tekhnika, 2010. -340 s.
5. Sklyar, B. Tsyfrovyi zv'yazok. Teoretychni osnovy ta praktychne zastosuvannya. [Theoretical foundations and practical application] -Moskva: Vydavnychiy budynok «Vil'yams», 2003.-1099 s.
6. Zaytsev, S.V. Matematychna model' kanalu zv'yazku iz syhnalamy OFDM ta navmysnymy zavadamy Matematychni mashyny ta systemy. [Mathematical model of a communication channel with OFDM signals and intentional interference]. Kyiv: 2011. № 4. S. 166-175.
7. Taheri, T. Nilsson, Van de Beek J Asymmetric Transmit-Windowing dlya Low-Latency and Robust OFDM /T. Taheri, R. Nilsson, J. van de Beek // 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). -Washington, DC USA, 2016. -P. 1-6.
8. Mohamad, M, Nilsson. R., De Beek A Novel J. Van. Transmitter Architecture dlya Spectrally-Precoded OFDM / M. Mohamad, R. Nilsson, J. Van De Beek // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. -Beijing, China, Aug. 2018. -Vol.65, №8. -P. 2592-2605.
9. Beek, J. OFDM Spectral Precoding with Protected Subcarriers / J. Van De Beek // IEEE Communications Letters. - Paris, December 2013. -Vol.17, № 12, -P. 2209-2212.
10. Agrahari, A. ,. Agrahari A., Varshney P. P. Precoding and Downlink Beamforming v Multiuser MIMO-OFDM Cognitive Radio Systems z Spatial Interference Constraints / A. Agrahari, P. Varshney, A. K. Jagannatham // IEEE Transactions on Vehicular Technology. -Sydney, March 2018. -Vol.67, №3. -P. 2289-2300.
11. Husyev O.Yu. ,Konakhovych H.F. Korniyenko, V.I., Kuznyetsov H.V. Teoriya elektrychnoho zv'yazku . [Theory of electrical communication]. L'viv: Mahnoliya 2006, 2010. 364 s.
12. Steklov, V.K., Berkman L.M. Teoriya elektrychnoho zv'yazku: Pidruchnyk dlya VNZ .[Theory of electrical communication: Textbook for universities] K.: Tekhnika, 2006. - 552 s.
13. Beek, JJ. ML Estimation of Timing and Frequency On-set v Multicarrier Systems / J.J. Beek, M. Sandell, P.O. Borjesson. - Lulea, Sweden: University of Technology, 1996. - 32 p.