

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-71-3-3>

УДК 621.396.969.1

ЮЛІЙ БОЙКО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

ІЛІЯ ПЯТІН

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1898-6755>

e-mail: ilkhmel@ukr.net

ОЛЕКСАНДР ЄРЬОМЕНКО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5110-3761>

yeromenko_s@ukr.net

ДМИТРО ШАЮК

Хмельницький національний університет

e-mail: D380919237912@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІЩЕННЯ НЕСУЧИХ ЧАСТОТ НА ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З OFDM

В роботі наведено результати досліджень синхронізації у телекомунікаціях з OFDM. Здійснена оцінка впливу зміщення частоти на коефіцієнт бітових помилок методом математичного моделювання у середовищі МАТЛАБ. Встановлено, що фазові спотворення символів збільшуються при переході від символу до символу. Проаналізована кількість бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з нормованим зміщенням частоти. Визначено, що зміщення частоти до 20% відстані між несучими приводить до погіршення відношення сигнал-шум на 7 дБ. Передбачається, що результати роботи будуть корисними при вирішенні проблем синхронізації у сучасних телекомунікаціях з OFDM.

Ключові слова: система OFDM, зміщення несучої частоти, дисперсія піднесучих, циклічний префікс.

JULIY BOIKO, OLEKSANDER EROMENKO, DMYTRO SHAYUK

Khmelnytskyi National University

ILYA PYATIN

Khmelnytskyi Polytechnic, Professional College by Lviv Polytechnic National University

ESTIMATION THE EFFECT OF CARRIER FREQUENCY OFFSET ON THE NOISE IMMUNITY OF TELECOMMUNICATIONS WITH OFDM

OFDM signal transmission is widely used in wireless communication systems Wi-Fi, WIMAX, LTE, digital television systems DVB-T, DVB-T2, and others. Advantages of OFDM: resistance to channel delays, equalization in the frequency domain, reduced sensitivity to frequency-sampling fading, and efficient implementation. Disadvantages of OFDM: loss of spectral efficiency due to higher side lobes; strict requirements for synchronization. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) provides high-speed data transmission by dividing wideband modulated carrier signals into many modulated narrowband subcarriers. To avoid intersymbol interference (ISI), individual subcarriers must be orthogonal to each other. The OFDM modulator works with a high-speed serial stream of symbols consisting of many parallel low-speed streams. Each orthogonal low-speed stream is transmitted over a relatively uniform channel with minimal MFIs and can be easily aligned. The purpose of the work is the study of synchronization in OFDM communication systems, the assessment of the effect of frequency shift on the bit error rate in the MATLAB environment. Carrier Frequency Offset (CFO) is of great importance to the performance of the decoder in an OFDM system because the phase distortion of symbols increases from symbol to symbol. Two receiver uncertainties with respect to an OFDM symbol are considered. Uncertainty in the arrival time of the OFDM symbol. Uncertainty of the carrier frequency, which arises due to the difference of local dynamism in the transmitter and receiver and leads to a shift in the frequency domain. The effect of the frequency shift is to shift the frequency characteristics of the channel, which leads to a loss of orthogonality between the subcarriers. For the effective operation of the OFDM system, a frequency accuracy of 1-2% of the distance between the carriers is required. Maximum likelihood estimation is used for samples with minimal variance and large size. The dependence of the dispersion of subcarriers on the frequency shift at the receiver input was investigated. From the obtained dependence, it can be concluded that the dispersion of OFDM subcarriers varies according to the Gaussian law. The length of the cyclic prefix is chosen based on the maximum possible frequency shift, at the boundaries of which the dispersion of the subcarriers is zero.

Keywords: OFDM system, carrier frequency shift, subcarrier variance, cyclic prefix

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зсув частоти несучої (ЗЧН) має велике значення для продуктивності декодера в системі мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM), оскільки фазові спотворення символів збільшуються при переході від символу до символу. Відомі засоби оцінки CFO мають різні характеристики з точки зору точності та діапазону оцінок, і для того, щоб приймач мав задовільну

продуктивність декодера необхідно використовувати належний засіб оцінки [1-4]. ЗЧН виникає в системі LTE через розбіжність частот сигналу, що приймається, і гетеродину в приймачі. Причина цього зсуву викликана доплерівським зсувом, що призводить до інтерференції між несучими та міжсимвольною інтерференцією (MCI), коли його продуктивність погіршується зі збільшенням частоти помилок по бітах (BER). Будь-яка помилка синхронізації призводить до фазового зсуву загасання каналу

Метою роботи є дослідження синхронізації у системах зв'язку з OFDM, оцінка впливу зміщення частоти на коефіцієнт бітових помилок за допомогою математичного моделювання у середовищі МАТЛАБ.

Аналіз досліджень та публікацій

Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM) забезпечує передачу даних з високою швидкістю за рахунок поділу широкосмугових модульованих несучих сигналів на багато модульованих вузькосмугових піднесучих [4, 5]. Для передачі OFDM використання вузькосмугових піднесучих знижує чутливість до частотно-вибіркових завмирань. У бездротовому зв'язку використовують формат модуляції OFDM з кількома несучими. Для підтримки високих швидкостей передачі даних у системах з однією несучою потрібна широка смуга пропускання та, отже, коротка тривалість символів [6, 7]. Проходження широкосмугової несучої через частотно-вибірковий багатопроменовий канал погіршує сигнал, оскільки імпульсна характеристика каналу охоплює кілька символів у часі і робить сигнал вразливим до міжсимвольної інтерференції (MCI) [8-10]. Для уникнення MCI, окремі піднесучі повинні бути ортогональними одна одній. Модулятор OFDM працює з високошвидкісним послідовним потоком символів, що складається з багатьох паралельних низькошвидкісних потоків. Кожний ортогональний низькошвидкісний потік передається через відносно рівномірний канал з мінімальною MCI і може бути легко вирівняний [5].

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 приведена структурна схема системи зв'язку з OFDM. Вхідний сигнал надходить на демультимплексор, який формує сигнали піднесучих. Інформація для кожної піднесучої піддається QAM модуляції [1, 2, 4, 5].

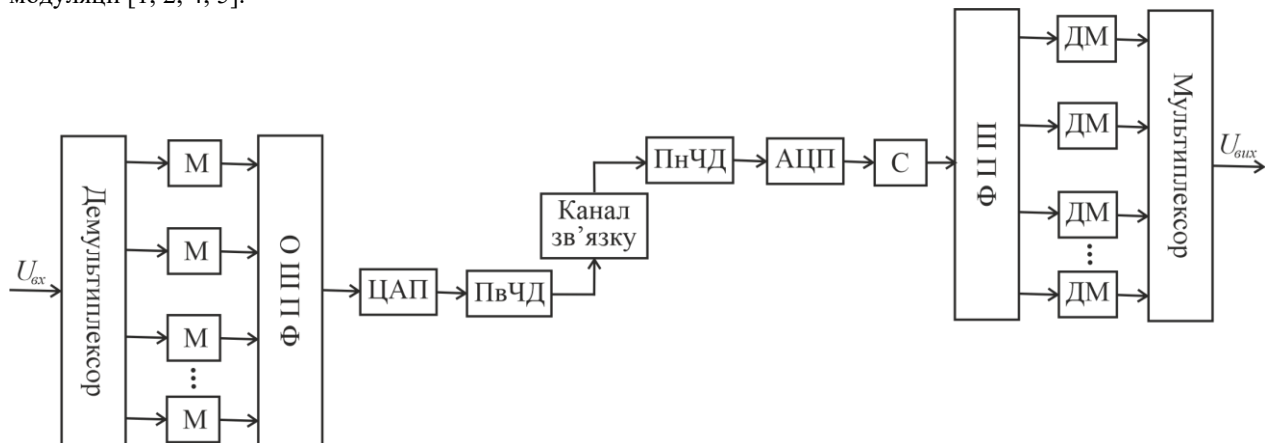


Рис. 1. Цифрова система зв'язку з OFDM (М – QAM модулятор; ОШПФ – обернене швидке перетворення Фур'є; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПВЧД – підвищуючий перетворювач частоти дискретизації; ПНЧД – понижуючий перетворювач частоти дискретизації; АЦП – аналого-цифровий перетворювач ФШП – швидке перетворення Фур'є; С – блок синхронізації; ДМ – QAM демодулятор)

Цифровий сигнал в області часу створюється за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є (ОШПФ) [4, 5]. Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) створює аналоговий сигнал, який далі перетворюється з підвищенням частоти дискретизації і передається в канал зв'язку. Спектр сигналу на виході передавача приведений на рис. 2.

Сигнал на вході приймача представляє собою згортку переданого сигналу з імпульсною характеристикою багатопроменового каналу зв'язку згідно виразу:

$$y(t) = \sum_i h_i x(t - \tau_i) + v(t),$$

де h_i – комплексний коефіцієнт згортання i -го променю; τ_i – затримка розповсюдження i -го променю; $v(t)$ – білий шум.

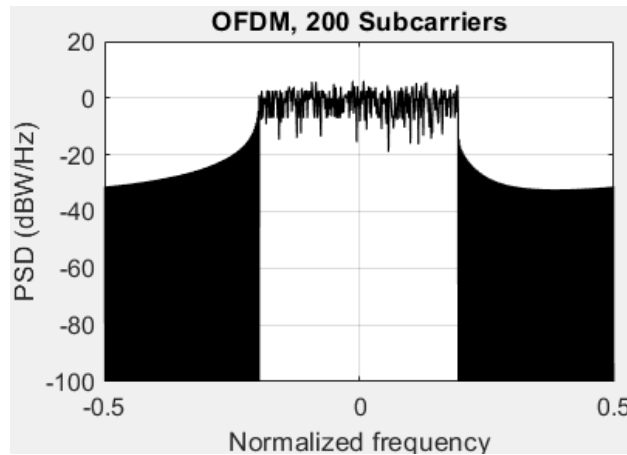


Рис. 2. Спектр сигналу OFDM

У приймачі понижуючий перетворювач частоти переводить сигнал OFDM в смугу модулюючих частот. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює сигнал в цифрову форму і передає його в блок ШПФ. Блок ШПФ розмірністю N перетворює сигнал з області часу в масив піднесучих з QAM модуляцією, на виході якого сигнал має вигляд:

$$Y = XH + V,$$

де $Y = [Y_0, Y_1, \dots, Y_{N-1}]^T$ - вектор прийнятого сигналу; $X = \text{diag}(X_0, X_1, \dots, X_{N-1})$ - матриця з переданим сигналом у головній діагоналі; $H = [H_0, H_1, \dots, H_{N-1}]^T$ - вектор частотної характеристики каналу; $V = [V_0, V_1, \dots, V_{N-1}]^T$ - вектор білого шуму з нульовим математичним очікуванням.

Для подальшої обробки приймач має оцінити частотну характеристику каналу зв'язку [11-13].

Модель передавання сигналів

Розглянемо передачу комплексних чисел x_k , взятих із деякого сузір'я сигналів (рис. 1).

Дані x_k модулюються на N піднесучих за допомогою зворотного дискретного перетворення Фур'є (ЗДПФ), а останні L вибірок копіюються і поміщаються як преамбула (циклічний префікс) для формування символу OFDM s_k . Цей вектор даних послідовно передається каналом з дискретним часом, імпульсна характеристика якого коротше L відліків. Циклічний префікс видаляється в приймачі, сигнал r_k демодулюється за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Вставка циклічного префіксу дозволяє уникнути МСІ та зберігає ортогональність між тонами, що призводить до наступного співвідношення між входом і виходом:

$$y_k = h_k x_k + n_k, \quad k = 0, K, N-1, \quad (1)$$

де h_k - загасання в каналі на k -й піднесучій; n_k - адитивний білий Гауссовий шум. Не зважаючи на втрату потужності передачі та пропускну здатності, пов'язану з префіксом, проста корекція каналу для структури підканалу (1) є перевагою використання циклічного префіксу.

Нехай канал не дисперсійний і на сигнал $s(k)$, який передається, впливає тільки адитивний білий Гаусів шум (AWGN) $n(k)$ (тобто $h_k = 1, \forall k \in (0, K, N-1)$).

Розглянемо дві невизначеності у приймачі щодо поточного символу OFDM. Невизначеність у часі надходження символу OFDM моделюється як затримка імпульсної характеристики каналу, тобто $\delta(k - \Theta)$, де Θ - цілочисельний невідомий час надходження символу. Невизначеність несучої частоти, що виникає через різницю гетеродинів у передавачі та приймачі, призводить до зсуву в частотній області. Така поведінка моделюється як комплексне мультиплікативне спотворення прийнятих даних в області часу $e^{j2\pi\epsilon k/N}$, де ϵ - різниця частот генераторів передавача та приймача, позначену часткою відстані між несучими. Отримані дані:

$$r(k) = s(k - \Theta) e^{j2\pi \varepsilon k / N} + n(k). \quad (2)$$

Розглянемо переданий сигнал $s(k)$. Це ДПФ даних x_k , що є білим шумом. Отже, $s(k)$ є лінійною комбінацією незалежних однаково розподілених випадкових величин. Якщо число піднесучих досить велике, то з центральної граничної теореми ми знаємо, що $s(k)$ апроксимує складний Гаусів процес, дійсна і уявна частини якого незалежні. Цей процес, однак, перестав бути білим, оскільки поява циклічного префіксу призводить до кореляції між деякими парами відліків, віддалених один від одного на N відліків. Отже, $r(k)$ також не є білим процесом, але через свою ймовірнісну структуру він містить інформацію про зміщення часу Θ і зміщення несучої частоти ε . Це дозволяє одночасну оцінку цих параметрів з урахуванням $r(k)$.

Розглянемо чутливість до зміщення часу та частоти. Синхронізатор не може розрізняти фазові і частотні зміщення, що вносяться каналом і зсуви, що вносяться затримками синхронізації символів.

У системах зв'язку, де оцінка каналу виконується безперервно, помилки синхронізації можуть бути виправлені еквалайзером. Помилка синхронізації призводить до фазового зсуву загасання каналу h_k .

Ефект зсуву частоти полягає у зміщенні частотних характеристик каналу, що призводить до втрати ортогональності між піднесучими. Відношення сигналу до завади (SIR) обмежено знизу значенням:

$$SIR \geq \frac{1}{0,6\pi^2 \varepsilon^2}.$$

Для ефективної роботи системи OFDM необхідна точність частоти 1-2% від відстані між несучими.

Зміщення частоти визначається як різниця між номінальною частотою та фактичною вихідною частотою і позначається як Δf_c . Сигнал OFDM, що генерується передавачем, позначається як $s(t)$, а $y(t)$ є сигналом, що приймається приймачем, тоді:

$$s(t) = e^{j\omega t} x(t),$$
$$y(t) = e^{j(\omega - \hat{\omega})t} x(t).$$

Зміщення частоти визначається виразом: $\Delta\omega = \omega - \hat{\omega} = 2\pi f_c$.

Тоді прийнятий сигнал має фазовий зсув, рівний:

$$y(nT) = e^{j\Delta\omega nT} x(nT),$$
$$\varphi(n) = \Delta\omega nT.$$

Частотна характеристика кожного підканалу дорівнює нулю на частотах інших піднесучих, тобто підканали не повинні заважати один одному. Ефект зсуву частоти є перетворенням цих частотних характеристик, що призводить до втрати ортогональності між піднесучими і веде до завад між несучими (ЗН).

Існує кілька алгоритмів оцінки каналу, наприклад, лінійна інтерполяція першого та другого порядків, лінійна мінімальна квадратична помилка (LMSE) та метод максимальної правдоподібності (ML). Розглянемо метод МП для оцінки як зміщення частоти (CFO), так і каналу кожного користувача в системах OFDMA.

Оцінка максимальної правдоподібності (МП)

Відомо, що оцінка МП ефективна для вибірок з мінімальною дисперсією і великим розміром [1]. Якщо шум каналу $z(n)$ є Гаусовим, кращі результати дає оцінка максимальної правдоподібності. Однак, оцінки МП можуть бути чутливими до початкових значень, а також можуть бути дуже спотворені для невеликих вибірок.

Під час процедури МП-оцінки зсуву частоти в OFDM ми припускаємо, що тільки перші M з N піднесучих в символі OFDM використовуються як інформаційні піднесучі. Символи, що відповідають останнім $N - M$ піднесучим, рівні нулю. Модель сигналу OFDM із дискретним часом визначається виразом:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{M-1} d_k e^{j2\pi nk/N} \quad (3)$$

де $n=0,1,K,N-1$ і кожен d_k використовується для модуляції піднесучої $e^{j2\pi nk/N}$.
Модель сигналу OFDM у матричній формі має вигляд:

$$s = Wd,$$

де $d = [d_0, K, d_{M-1}]^T$ - вектор символів.

За наявності каналу з дисперсією в області часу, адитивним шумом та зміщення несучої частоти, сигнал OFDM у приймачі може бути записаний у вигляді:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{M-1} H(k) d_k e^{(j2\pi k/N + \Delta\omega T_s)n} + z(n) \quad (4)$$

де $H(k)$ – частотна характеристика каналу, що відповідає піднесучій k , $z(n)$ – адитивний Гаусовий шум, T_s – період символу QAM, тобто частота дискретизації, а $\Delta\omega$ – зміщення частоти.

Фазовий зсув φ визначається наступним чином: $\varphi = \Delta\omega T_s$, тоді φ і $\Delta\omega$ відрізняються тільки постійним скаляром, тому оцінка $\Delta\omega$ еквівалентна оцінці нормованого фазового зсуву φ .

Модель прийнятого сигналу у матричній формі визначається виразом:

$$x = PWHd + z, \quad (5)$$

де H представляє собою діагональну матрицю розміру $M \times M$ з діагональним елементом, рівним $H(k)$, а матриця P враховує фазовий зсув через зміщення частоти і визначається виразом:

$$P = \text{diag}(1e^{j\varphi} K e^{j(N-1)\varphi}) \quad (6)$$

Якщо позначити оцінений прийнятий символ як \hat{d} , то $\hat{d} = Hd$,

$$x = PWH\hat{d} + z \quad (7)$$

Припускаючи, що z є комплексною Гаусовою величиною з коваріаційною матрицею $\sigma^2 I$, функція правдоподібності від φ і \hat{d} визначається виразом:

$$L(\varphi, \hat{d}) = \frac{1}{(\pi\sigma^2)^N} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} (x - PWH\hat{d})^H (x - PWH\hat{d}) \right\} \quad (7)$$

Таким чином, оцінка максимальної правдоподібності для φ і \hat{d} визначається виразом:

$$(\varphi_{ML}, \hat{d}_{ML}) = \arg \max \ln L(\varphi, \hat{d}) \quad (8)$$

Експериментальні дослідження

Проведемо дослідження системи зв'язку за рис. 1 у середовищі MATLAB. Частота дискретизації сигналу 20 МГц. Модуляція - QPSK [9]. Параметри середовища передачі: зміщення частоти 10^4 ; зміщення фази 15° ; початкова затримка потоку даних 80 відліків. У приймачі також виконуються наступні операції: - відновлення синхронізації – визначається початок кожного фрейму. Використовується відома преамбула в прийнятому фреймі, знайдена за допомогою взаємної кореляції. Функція взаємної кореляції даних передавача і приймача має визначену відстань між піками, що дозволяє їх ідентифікувати. Використовується нормована висота піку та мінімальна кількість необхідних піків для пошуку можливого збігу преамбули;

- відновлення несучої частоти – оцінка частоти виконується шляхом обчислення різниці фаз між половинами довгої частини преамбули. Ця різниця фаз потім перетворюється на зсув частоти;
- вирівнювання в частотній області. Оскільки оцінка частоти може бути неточною, на рівні піднесучої символу OFDM буде мати місце додаткове зміщення фаз. Крім зміщення фаз, загасання каналу також впливає на сигнал, що приймається. Обидва ці спотворення коригуються еквалайзером у частотній області. Еквалайзер має два рівні, які використовують як преамбулу, так і дані пілот-сигнали. По-перше, отримане корисне навантаження вирівнюється за допомогою відводів, згенерованих з отриманих довгих вибірок преамбули. Потім пілотні піднесучі витягуються та інтерполюються по частоті для отримання повної оцінки каналу;
- демодуляція QAM – відтворює переданий сигнал кожної піднесучої, який потім мультиплексується для отримання початкового потоку даних.

Проведемо дослідження кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум (рис. 3) для системи зв'язку з нормованим зміщенням частоти несучої (ЗЧН) від 0 до 0,2, тобто до 20% відстані між несучими.

Розглянемо дисперсію піднесучих OFDM сигналу на вході приймача. Залежність дисперсії піднесучих від зміщення частоти зображена на рис. 4.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що зміна зміщення частоти від 0 до 20% відстані між несучими приводить до погіршення відношення сигнал-шум на 7 дБ. Дисперсія піднесучих OFDM змінюється за Гаусовим законом. Довжина циклічного префіксу обирається за величиною максимально можливого зміщення частоти, на границях якого дисперсія піднесучих дорівнює нулю.

Розглянемо залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для синхронізованих систем зв'язку з різними зміщеннями частоти і різною величиною початкової затримки відліків потоку даних в каналі зв'язку, що приведено на рис. 5 та рис. 6.

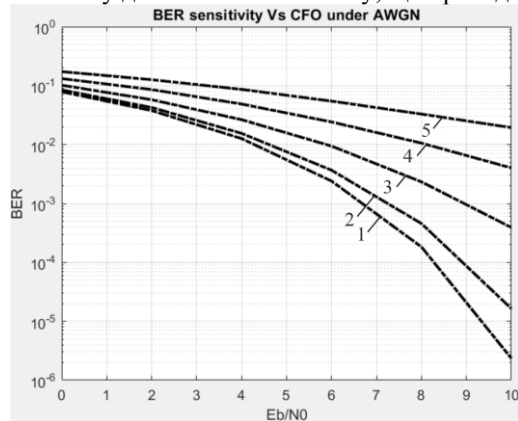


Рис. 3. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум системи OFDM з ЗЧН (1 – ЗЧН=0; 2 – ЗЧН=0,05; 3 – ЗЧН=0,1; 4 – ЗЧН=0,15; 5 – ЗЧН=0,2)

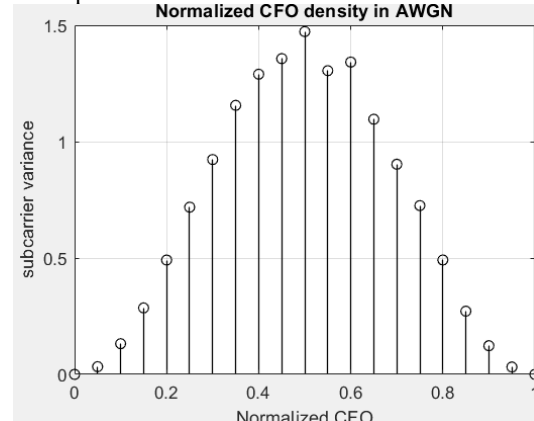


Рис. 4. Залежність дисперсії піднесучих від зміщення частоти

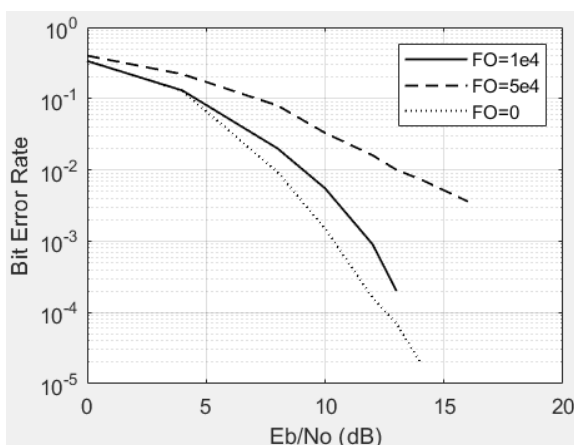


Рис. 5. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум системи OFDM з різними значеннями зміщення частоти (FO)

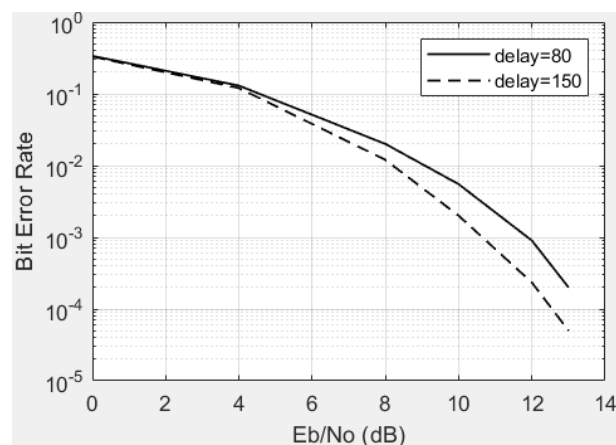


Рис. 6. Залежність кількості бітових помилок від відношення сигнал-шум системи OFDM з різними значеннями затримки потоку даних (delay)

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що енергетично вигідні режими роботи з меншими зміщеннями частоти. Якщо зміщення частоти виходить за межі смуги утримування кіл синхронізації, відношення сигнал-шум погіршується.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведено дослідження системи зв'язку з OFDM у середовищі MATLAB. Проаналізована кількість бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку з нормованим зміщенням частоти до 20% відстані між несучими, що приводить до погіршення відношення сигнал-шум на 7 дБ. Дисперсія піднесучих OFDM на вході приймача змінюється за Гаусовим законом. Довжина циклічного префіксу обирається за величиною максимально можливого зміщення частоти, на границях якого дисперсія піднесучих дорівнює нулю. Розглянута залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для синхронізованих систем зв'язку з різними зміщеннями частоти і різною величиною початкової затримки відліків потоку даних в каналі зв'язку. З отриманих залежностей можна зробити висновок, що енергетично вигідні режими роботи з меншими зміщеннями частоти. Якщо зміщення частоти виходить за межі смуги утримування кіл синхронізації, відношення сигнал-шум погіршується.

Література

1. Minn H. On timing offset estimation for OFDM systems /H. Minn, M. Zeng, V.K. Bhargava //Communications Letters, IEEE. – 2000. -Vol.4, no.7. - P.242 – 244.
2. Schmidl T.M. Robust frequency and timing synchronization for OFDM /T.M. Schmidl, D.C. Cox //Communications, IEEE Transactions on. – 1997. - Vol.45, no.12. - P.1613 – 1621.
3. Cho Y. S. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB /Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, C-G. Kang. – John Wiley & Sons, 2010. – 544 p.
4. Пятін І.С. Дослідження систем зв'язку з сигналами F-OFDM/ І.С. Пятін, В.Є. Гавронський, В.І. Лужанський, В.О. Михальчук // Вісник Хмельницького національного університету. - 2021. - №5. – С. 170-176.
5. Бойко Ю.М. Методика обробки та синхронізації сигналів у програмно-обумовлених радіосистемах з OFDM /Ю.М. Бойко, І.С. Пятін, І.П. Пархомей //Вісник Хмельницького національного університету. - 2022. - №2. – С. 123-132.
6. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O. Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies //2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – IEEE, 2022. – С. 01-06.
7. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems. London: Artech House, Inc., 2004, P. 292.
8. Berkman L. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovsky, V.Fokin, V. Strelnikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Т. 1. – № 9-109. – С. 66–76.
9. Бойко Ю. М. Аналіз ефективності цифрових методів модуляції/демодуляції в системах зв'язку та передачі інформації [Текст] / Ю. М. Бойко, Н. М. Сворін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 103-110.
10. Туровський О. Л. Оцінка можливостей підвищення ефективності роботи системи синхронізації радіотехнічного пристрою в ході стеження за несучою частотою / О. Л. Туровський //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2020. – № 1. – С. 116–122.
11. Козловський В. В. Синтез складного розімкнутого зв'язку в системі синхронізації при умові мінімізації дисперсії фазової помилки в ході стеження за несучою частотою /В. В. Козловський, О. Л. Туровський //Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – С. 162 -168.
12. Shengli Z. OFDM Basics. OFDM for Underwater Acoustic Communications /Z. Shengli, W. Zhaohui. - USA: Wiley Telecom, 2014. P. 23–38.
13. Бойко Ю. Transmission of control information in 5G broadband telecommunication systems /Ю. Бойко, І. Пятін, Л. Карпова, І. Пархомей //Адаптивні системи автоматичного управління. – 2021. – Т. 1. – № 38. – С.82–95.

References

1. Minn H. On timing offset estimation for OFDM systems /H. Minn, M. Zeng, V.K. Bhargava //Communications Letters, IEEE. – 2000. -Vol.4, no.7. - P.242 – 244.
2. Schmidl T.M. Robust frequency and timing synchronization for OFDM /T.M. Schmidl, D.C. Cox //Communications, IEEE Transactions on. – 1997. - Vol.45, no.12. - P.1613 – 1621.
3. Cho Y. S. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB /Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, C-G. Kang. – John Wiley & Sons, 2010. – 544 p.
4. Pyatin I.S. Research communication systems with F-OFDM signals / I. S. Pyatin, V. Ye. Havronskyi, V. I. Luzhanskyi, V. O. Mykhalchuk // Herald of Khmelnytskyi national university. – 2021. – № 5. – S. 170-176.
5. Boiko J. Signal processing and synchronization technique in software-defined radio systems with OFDM /J. Boiko, I. Pyatin, I. Parkhomey // Herald of Khmelnytskyi national university. - 2022. - №2. – S. 123-132.
6. Boiko J., Pyatin I., Eromenko O. Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies //2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – IEEE, 2022. – С. 01-06.
7. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems. London: Artech House, Inc., 2004, P. 292.
8. Berkman L. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovsky, V.Fokin, V. Strelnikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1. – no 9-109. – pp. 66–76.
9. Boiko J. Analiz cifrovich metodiv modulyacii/demodulyacii v sistemach zv'yazku ta peredachi informacii / J. Boiko, N. Svorin // Herald of Khmelnytskyi national university. – 2011. – № 1. – S. 103-110.
10. Turovsky O. Evaluation of possibilities to improve work efficiency systems of synchronization of a radio technical device during

carrier frequency tracking / O. Turovsky // Measuring and computing devices in technological processes. – 2020. - № 1 – S. 116–122.

11. Kozlovskyi V. V. Synthesis of a complex interconnected relationship in the synchronization system under the minimization of phase error dispersion during discontinuation / V. V. Kozlovskyi, O. L. Turovskyi // Herald of Khmelnytskyi national university. – 2020. – S. 162–168.

12. Shengli Z. OFDM Basics. OFDM for Underwater Acoustic Communications /Z. Shengli, W. Zhaohui. - USA: Wiley Telecom, 2014. P. 23–38.

13. Boiko J. Transmission of control information in 5G broadband telecommunication systems /J. Boiko, I. Piatin, L. Karpova, I. Parkhomei //Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia. – 2021. – T. 1. – № 38. – S. 82–95.