

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-5>

УДК 621.396.969.1

Юлій БОЙКО

Хмельницький національний університет

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

e-mail: boiko_julius@ukr.net

Ілля ПЯТИН

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»

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

e-mail: ilkhmel@ukr.net

СХЕМОТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ З OFDM

В запропонованій роботі розглянуто схемотехнічні аспекти забезпечення умов синхронізації в системах зв'язку з OFDM. Наведено дослідження оцінок міжканальних та міжсимвольних завад в системах синхронізації. Описано та алгоритмізовано можливі сценарії оцінки завад в каналах з OFDM за навчальними послідовностями та пілот-сигналами. Наведено експериментальні результати оцінки спотворення OFDM-сигналів в умовах міжканальних завад на основі сигналів типу 16QAM. Здійснено порівняльний аналіз середньоквадратичної оцінки міжканальних завад для трьох методів синхронізації які досліджувались у статті. Розглянуто конструкції OFDM-сигналів з пілот-сигналами. Досліджено концепції схемотехнічної реалізації систем тактової синхронізації в каналі зв'язку з OFDM. Проілюстровано процес спрацювання системи синхронізації з метою компенсації спотворень на основі сформованої сітки ресурсів в каналі зв'язку з OFDM.

Ключові слова: синхронізація, OFDM, канал зв'язку, завадостійкість, пілот-сигнал

Juliy BOIKO

Khmelnytskyi National University

Ілля PYATIN

Khmelnytskyi Polytechnic, Professional College by Lviv Polytechnic National University

CIRCUITRY ASPECTS OF PROVIDING SYNCHRONIZATION CONDITIONS IN COMMUNICATION SYSTEMS WITH OFDM

In this paper, circuitry aspects of providing synchronization conditions in OFDM communication systems are considered. Studies of estimates of inter-channel and inter-symbol interference in synchronization systems are given. Possible scenarios for estimating interference in OFDM channels from training sequences and pilot signals are described and algorithmized. Experimental results of OFDM-signal distortion estimation under conditions of inter-channel interference based on 16QAM type signals are presented. The problem of ensuring the orthogonality of subcarriers of OFDM signals under the conditions of a real interference complex is studied in order to obtain all the advantages of such signals. Possible cases of OFDM symbol temporal shift in case of interference are established. Mathematical models of OFDM signals under conditions of intersymbol and interchannel interference in a multipath channel are obtained. A comparative analysis of the root-mean-square estimate of inter-channel interference for three synchronization methods, which were studied in the article, was carried out. The constructions of OFDM signals with pilot signals are considered. The concepts of circuit implementation of clock synchronization systems in the communication channel with OFDM are studied. A timing error may be caused by a mismatch between the transmitter and receiver frequencies due to Doppler shift when intersymbol interference occurs. It is shown that, on the receiving side, the OFDM receiver samples the received continuous signal at times determined by clock synchronization. Depending on the clock mechanism, two sampling clock compensation schemes can be distinguished. The first scheme is based on a synchronous sampling format, and the second one is based on a non-synchronous one. A synchronous synchronization circuit can be represented by a circuit that controls the timing of sampling an analog signal using a voltage-controlled oscillator (VCO) and a digital phase-locked loop (PLL) circuit. The second circuit compensates for clock offset digitally after off-line sampling. The process of triggering the synchronization system to compensate for distortions based on the formed resource grid in the communication channel with OFDM is illustrated.

Keywords: synchronization, OFDM, communication channel, noise immunity, pilot signal

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Особливість каналів зв'язку наземного мовлення, наприклад в порівнянні з каналами супутникового зв'язку або каналами кабельної передачі інформації, полягає у виникненні в таких каналах явищ пов'язаних з ефектом багатопробеневого поширення хвиль [1]. В цьому випадку, відбиття передбачуваних сигналів від перешкод, зокрема, таких як будівлі або фрагменти гірського ландшафту, здатні асинхронно накладатись безпосередньо на прийнятий сигнал. Виникаюча проблема забезпечення приймання сигналів в таких умовах ускладнюється можливою затримкою в часі відбитих від перешкод сигналів і як результат - утворення завад. Наголосимо, що у випадку наближення часу затримки відбитих (ехо-сигналів) до тривалості символів переданого сигналу, можливе виникнення явища вибіркової селективності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) трактів основної вибірки [2]. Розгляд такого безпосередньо наближеного до реальності сценарію забезпечення зв'язку, частото ускладнюється наявністю суміщених частотних каналів від

інших джерел які в кінцевому рахунку створюють додаткові завади для основного каналу. Отже, реальний сценарій забезпечення зв'язку найчастіше супроводжується виникненням окремих ехо-сигналів які далі послідовно досягають приймача та різняться як за амплітудою (рівнем потужності) так і часом затримки [3]. Накладання таких сигналів на основний канал призводить до коливання передаточної функції каналу зв'язку. У таких каналах, які містять завмирання, актуальним є контроль відношення потужності основного каналу приймання до суми потужностей усіх побічних ехо-сигналів.

Використовуючи відповідні еквалайзери, можна спробувати компенсувати спотворення у частотній області. Однак, важливо акцентувати увагу на ту обставину, що часові затримки різних ехо-сигналів часто набагато перевищують тривалість символу. Це означає, що відповідна кількість сусідніх символів впливає одна на одну. Отже, фільтр зменшення міжсимвольних звад (МЗ) має бути високого порядку, що робить його реалізацію дуже дорогим. Можна мінімізувати кількість символів, що впливають один на одного шляхом збільшення тривалості переданого символу. Це можна зробити шляхом паралельної передачі кількох символів. Таким чином, як показано в роботах [4, 5, 6], базовою технологією розгортання систем зв'язку 4 та 5-го покоління [7], цифрового телебачення тощо, є концепція ортогонального частотного мультиплексування каналів (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) яка дозволяє підвищити завадостійкість каналів зв'язку та ефективність сучасних електронних комунікацій.

В запропонованій статті представлено дослідження аспектів завадостійкості каналів зв'язку з OFDM в частині аналізу можливих схемотехнічних рішень побудови систем синхронізації, зокрема тактової синхронізації та синхронної демодуляції.

Аналіз досліджень та публікацій

Як зазначено вище, дієвою технологією забезпечення зв'язку в умовах наявності завад є технологія OFDM. Зокрема, а роботах [2, 8] показано, що система OFDM здійснює перенесення даних повідомлень на ортогональних піднесучих в паралельному форматі, причому одночасно здійснюючи протидію спотворенням які виникають у частотно-вибірному каналі та які супроводжуються МЗ внаслідок багатопроменевого завмирання при розповсюдженні сигналів. Крім того, у [6, 9] наголошувалось, що переваги OFDM для інформаційних каналів актуальні лише у випадку забезпечення умов ортогональності. У випадку якщо умови ортогональності не виконуються, або виконуються не в повній мірі, продуктивність каналу з OFDM погіршується [2]. Зрив ортогональності супроводжують такі явища як виникнення МЗ і явище виникнення міжканальних завад (МкЗ). Враховуючи зазначене вище, в роботах [2, 9] розглянуто можливі сценарії забезпечення ортогональності піднесучих OFDM-сигналів в умовах реального комплексу завад для отримання усіх переваг таких сигналів. Наголосимо, що в контексті вирішення сформульованої проблематики, потрібно дослідити умови часового зміщення символів МЗ та чинники які впливають на зміщення несучих частот МкЗ. З цією метою потрібно дослідити методи синхронізації в системах OFDM. Для врахування явищ МЗ та МкЗ під час аналітичного опису умов синхронізації [10] позначимо помилку в наслідок дії МЗ як ψ , а внаслідок дії МкЗ – μ . Тоді математична модель обробки сигналів OFDM на приймальному боці каналу, за умов часового та частотного зміщення символів під впливом завад, може бути представлена наступним виразом [4]:

$$s_l(n) = R'_{n,k} [S_l[k]] = R'_{n,k} [H_l[k] \cdot U_l[k] + \xi_l[k]] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_l[k] \cdot U_l[k] e^{j2\pi(k+\mu)(n+\psi)/N} + \xi_l[n] \quad (1)$$

де $\xi_l[n] = R'_{n,k} [\xi_l[k]]$ – представляє собою процедуру зворотного швидкого перетворення Фур'є, тобто (ЗШПФ).

В роботах [1-4] наголошено, що ЗШПФ і ШПФ це основні функції які супроводжують відповідно процес модуляції та демодуляції на передавальному та приймальному боці каналу. Таким чином, для того щоб здійснити N -точкове ШПФ в приймальному тракті необхідно мати точні вибірки переданого сигналу тривалістю яка відповідає символу OFDM. Тобто потрібна часова синхронізація з метою фіксації початкових точок кожного символу OFDM. МЗ в часовій області викликає зсув по фазі $2\pi k\psi/N$ в частотній області який пропорційний індексу піднесучої і відповідно помилці ψ .

Виклад основного матеріалу

Розглянемо питання оцінювання МкЗ зменшенням відстані між двома блоками вибірок шляхом їх кореляційного зважування. Ідея полягає в тому, щоб використати навчальну послідовність символів які повторюються з більш коротким періодом ніж OFDM-сигнали. Позначимо за R число яке покаже частку між тривалістю OFDM-символу і тривалістю навчального символу який буде періодично повторюватись. Нехай передавач здійснює відправлення навчальних символів R за шаблонами які повторюються в часовій області:

$$U_l[k] = \begin{cases} U_m, & \text{для } k = R \cdot j, j = 0, 1, \dots, (N/R - 1) \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (2)$$

де U_m – й символ, N/R – ціле число.
Тоді оцінку M_k3 можна провести з виразу:

$$\hat{\mu} = \frac{R}{2\pi} \arg \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} s_i^* [n] s_l \left[n - \frac{N}{R} \right] \right\} \quad (3)$$

Оцінка M_k3 за допомогою формули (3) має ту особливість, що її ефективність залежить від R . Загалом кількість вибірок для обчислення кореляції у (3) зменшується у $1/R$ разів, що в кінцевому рахунку впливає на середньоквадратичну оцінку (СКО $_{\mu}$), формула (4):

$$\text{СКО}_{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \hat{\mu})^2. \quad (4)$$

Підвищити діапазон оцінювання M_k3 можна шляхом використання навчальних послідовностей в R -разів шляхом використання навчальних символів із шаблонами які повторюються. Шаплони для таких послідовностей можна згенерувати за допомогою (2). Тоді рівняння (2) можна застосувати до піднесучих з нульовими значеннями. Далі провести усереднення по набору піднесучих. В цьому випадку, продуктивність такого підходу (оцінюється СКО $_{\mu}$) погіршується у випадку зменшення кількості ненульових вибірок які можна використати для проведення усереднення у частотній області. Доцільно зазначити, що такий підхід для оцінювання M_k3 вимагає додаткового часового інтервалу – преамбули, протягом якого оцінюються послідовні навчальні символи для обчислення кореляції. З практичної точки зору, такий алгоритм створює часовий проміжок (пов'язаний з тривалістю преамбули) протягом якого символи даних OFDM не передаються.

Альтернативним методом описаному вище, є метод коли оцінка M_k3 здійснюється одночасно із передачею символів даних OFDM. Такий підхід до організації схеми синхронізації можна реалізувати на основі пілотних сигналів (тонів) (ПТ) [11]. Такі сигнали можна розмістити в частотній області і передати в кожному символі OFDM. На рис. 1 представлено схему системи синхронізації приймача OFDM-сигналів для оцінювання M_k3 на основі ПТ. Алгоритм роботи такої схеми наступний. Два символи $s_l[n]$ та $s_{l+R}[n]$ зберігаються у пам'яті (рис. 1) для проведення синхронізації. Далі, ці сигнали перетворюються $\{S_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$ і $\{S_{l+R}[k]\}_{k=0}^{N-1}$ за допомогою ШПФ для вилучення ПТ. Після оцінювання M_k3 в частотній області за допомогою пілотів, M_k3 компенсується у часовій області. Як видно з рис. 1 такий процес супроводжується двома режимами: збирання інформації та відстежування.

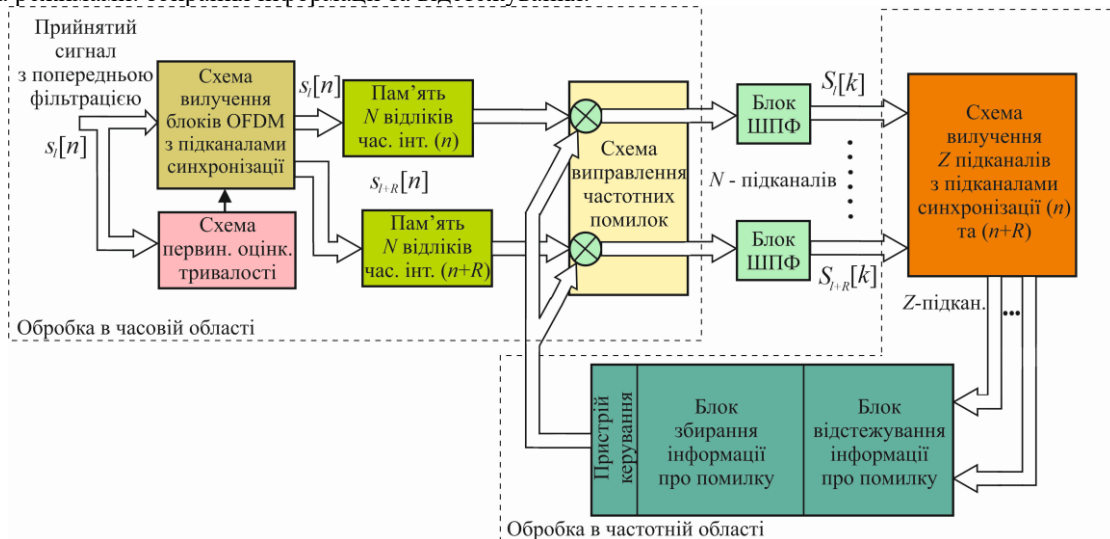


Рис. 1. Блок-схема системи синхронізації M_k3 OFDM-символів з ПТ: Пам'ять N відліків час. інт. (n) – блок пам'яті для N відліків часового інтервалу (n); Пам'ять N відліків час. інт. ($n+R$) – блок пам'яті для N відліків часового інтервалу ($n+R$) де R (ціле число) розуміється відношення довжини символу OFDM до довжини шаблону який повторюється; ШПФ – швидке перетворення Фур'є; Схема первин. оцінк. тривалості – схема грубого оцінювання часової помилки

Відповідно у режимі збирання інформації оцінюванню піддається широкий діапазон M_k3 . У режимі відстежування оцінюванню піддаються малі помилки які обумовлені M_k3 . Для аналітичного опису помилки M_k3 в режимі збирання можна записати наступний вираз:

$$\hat{\mu}_{\text{ПТ}} = \frac{1}{2\pi T_{\text{см}}} \max_{\mu} \left\{ \left| \sum_{j=0}^{L-1} S_{l+R}[\delta[i], \mu] S_l^*[\delta[i], \mu] U_{l+R}^*[p[i]] U_l[p[i]] \right| \right\} \quad (5)$$

де $T_{\text{см}}$ – тривалість ефективного символу OFDM без врахування захисного інтервалу [2], L , $\delta[i]$, $U_i[p[i]]$ – відповідно позначені кількість ПТ, розміщення i -того ПТ, та $U_i[p[i]]$ – розміщення ПТ в першому періоді OFDM-символу в частотній області.

На рис. 2 представлено констеляційні діаграми сигналів 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) отримані при дослідженні впливу рівня МкЗ на OFDM-символ. На рис. 3 представлено оцінювання SKO_{μ} для трьох методів синхронізації які досліджувались у статті.

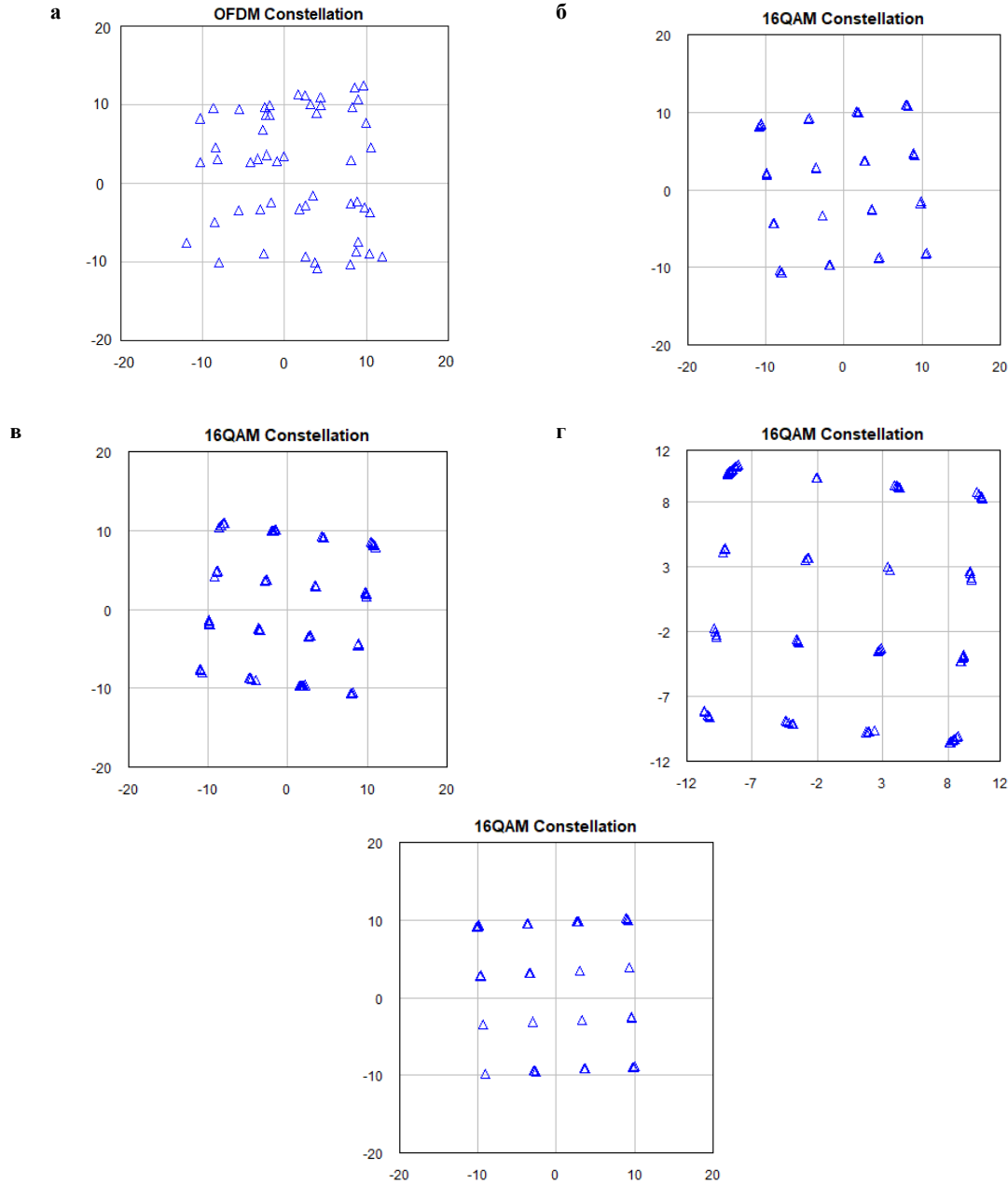


Рис. 2. Констеляційні діаграми OFDM-сигналів (16QAM) під дією МкЗ: а – $\mu=0,4$; б- $\mu=0,2$; в - $\mu=0,1$, г- $\mu=0,05$; д - $\mu=0,01$

Для режиму відстежування із врахуванням (5) отримаємо:

$$\hat{\mu}_{\text{ПТВ}} = \frac{1}{2\pi T_{\text{см},R}} \arg \left\{ \sum_{j=0}^{L-1} S_{i+R}[\delta[i], \hat{\mu}_{\text{ПТВ}}] S_i^*[\delta[i], \hat{\mu}_{\text{ПТВ}}] U_{i+R}^*[p[i]] U_i[p[i]] \right\} \quad (6)$$

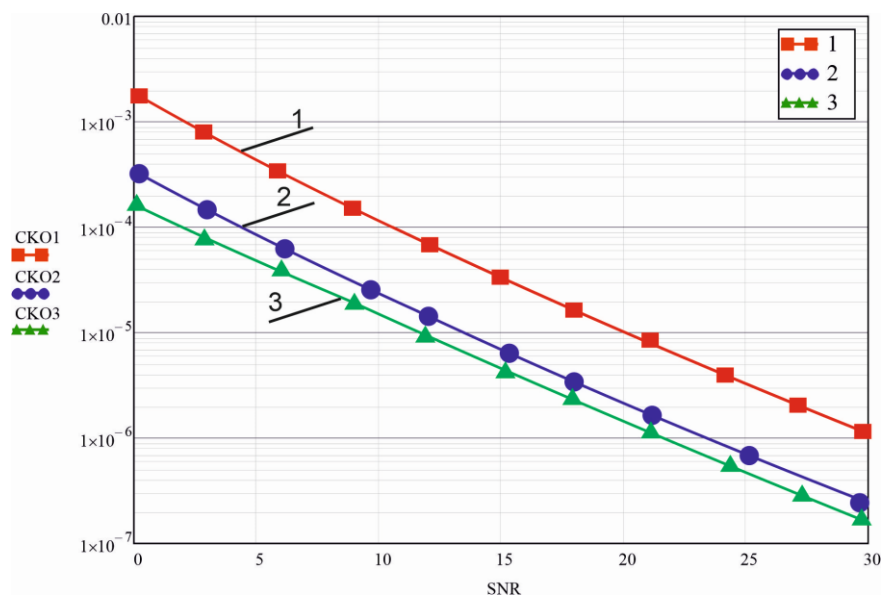


Рис. 3. Графіки оцінювання СКОμ у випадку Mk3: 1 – використання ЦП (циклічного префіксу) [2]; 2 – використання преамбули R; 3 – використання ПТ

З графіків на рис 3 спостерігаємо зменшення СКОμ при підвищенні відношення сигнал/шум. Найкращі показники щодо мінімізації μ за наявності в каналі OFDM-сигналів Mk3 має метод який ґрунтується на застосування ПТ.

На рис. 4 представлено схему розміщення ПТ на піднесучих OFDM-символів. На рис. 5 представлено гребінчасту структуру OFDM-символу з ПТ. На рис. 6 представлено решітчасту конструкцію OFDM-символу з ПТ.

Як було описано вище в структурі OFDM-символів ПТ які передаються періодично на усіх піднесучих застосовуються для оцінювання каналу. За допомогою таких ПТ виконується інтерполяція у часовій області [12]. Якщо позначити період розміщення ПТ по структурі OFDM-піднесучих за T_n (як позначено на рис. 4) то для відстеження змін які відбуваються у каналі передачі даних ПТ повинні розміщуватись досить часто (потрібно враховувати час протягом якого забезпечується когерентність символів). Такий час є оберненим до доплерівської частоти: $T_n \leq \frac{1}{f_d}$. Оскільки ПТ розміщено по усіх піднесучих з певним періодом така конфігурації (блочної структури) більше доцільна для частотно-вибірних каналів. Однак якщо в каналі присутні швидкі завмирання кількість ПТ потрібно збільшувати. Така вимога пов'язана із необхідністю якісного відстежування змін у каналі.

Гребінчаста конструкція, рис.5 має ту особливість, що ПТ розміщено на періодично розташованих піднесучих. Такі ПТ можна використати для інтерполяції в частотній області. В цьому випадку для відстеження характеристик частотно-вибірних каналів ПТ потрібно розміщувати шляхом узгодження із когерентною смугою пропускання. Період ПТ повинен задовольняти умову: $T_f \leq \frac{1}{X_{\max}}$, де X_{\max} - максимальне значення розкиду затримки.

У решітчастій конструкції (рис. 6) ПТ розміщуються як вздовж осі часу так і вздовж осі частот з певним кроком. Такий підхід у випадку конструювання OFDM-сигналів досить ефективний при проведення інтерполяції як в часовій так і в частотній області з метою оцінювання каналу. Звісно, в цьому випадку упаковка ПТ в конструкцію повинна задовольняти обидві умови як рис. 4 так і рис. 5.

На рис. 7 представлено констеляційні діаграми стабілізації параметрів сигналів OFDM з ПТ отримані в процесі дослідження.

Тепер зупинимось на схемотехнічних особливостях тактової синхронізації в каналі з OFDM. Якщо частоти дискретизації на передавальному та приймальному боці каналу OFDM несинфазні, виникає помилка синхронізації символів яку загалом можна віднести до помилок тактової синхронізації. В цьому випадку вибірки на приймальному боці відрізняються від вибірок на приймальному боці, виникає фазовий зсув і як наслідок час дискретизації приймача і передавача не співпадає [9]. В цій ситуації на приймальному боці виникає певна часова затримка яка обумовлена відхиленням відліків від оптимальних значень. Графічно таку ситуацію можна представити рис. 9 на якому показаний ефект зсуву фази в тактовій частоті дискретизації.

Такий процес супроводжується зсувом фази який пропорційний зміщенню синхронізації і індексів піднесучих. Причиною виникнення помилки тактової синхронізації може бути невідповідність між частотами передавача і приймача внаслідок доплерівського зміщення тоді коли виникають МЗ.

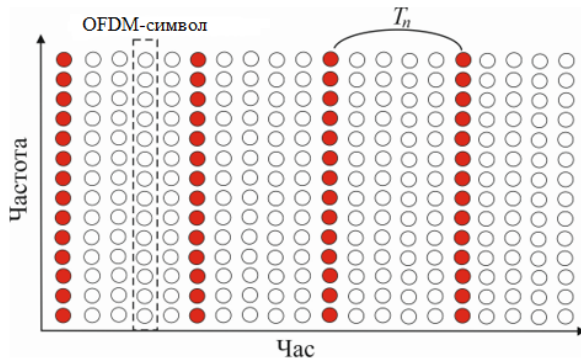


Рис. 4. Блок-структура OFDM-символів з ПТ

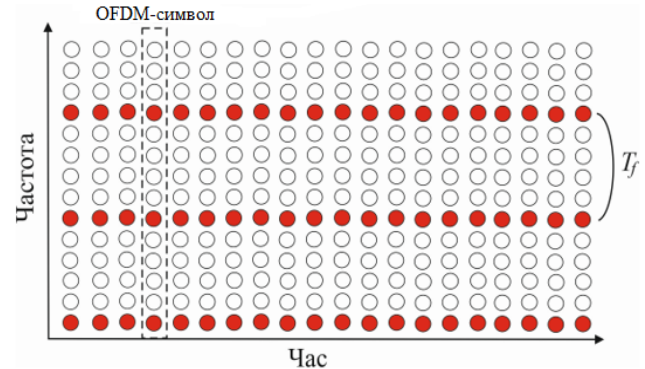


Рис. 5. Гребінчаста структура OFDM-символів з ПТ

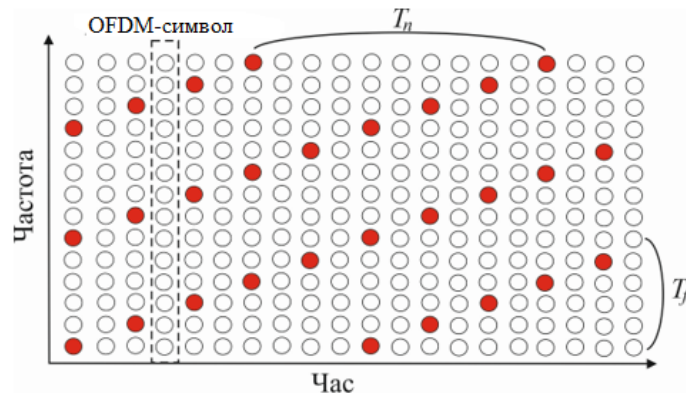
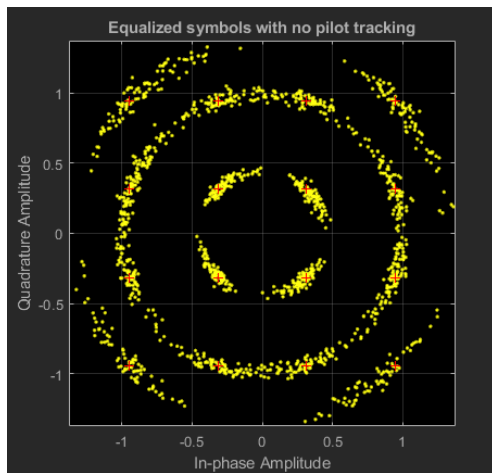


Рис. 6. Решітчаста структура OFDM-символів з ПТ



а

б

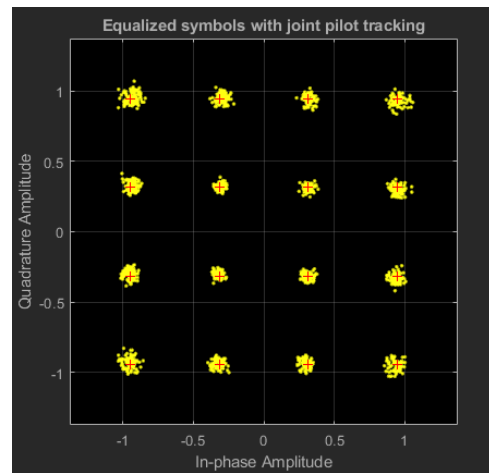


Рис. 7. Констеляційні діаграми сигналів 16QAM у складі OFDM-символів без ПТ – а та з ПТ – б

На рис. 8 а, представлено конструкцію OFDM-символу у випадку фіксованого положення ПТ і б - у випадку блукаючої структури ПТ.

На рис. 9 показаний ефект зсуву частоти в тактах дискретизації між передавачем і приймачем внаслідок невідповідності між генераторним обладнанням під впливом доплерівського зміщення частоти.

Математично представити прийнятий сигнал в цьому випадку можна наступним чином:

$$\hat{S}[k] = S[k] \frac{\sin(\pi\theta k)}{\sin(\frac{\pi\theta k}{N})} e^{\frac{-j\pi\theta k(N-1)}{N}} + \xi_{M3}[k] \quad (7)$$

де $\theta = \frac{T_c - T'_c}{T_r}$.

У формулі (7) доданок $\xi_{M3}[k]$ представляє собою складову обумовлену МЗ в наслідок частотної помилки, а перші два доданки відповідно описують спотворення сигналу за амплітудою та фазою.

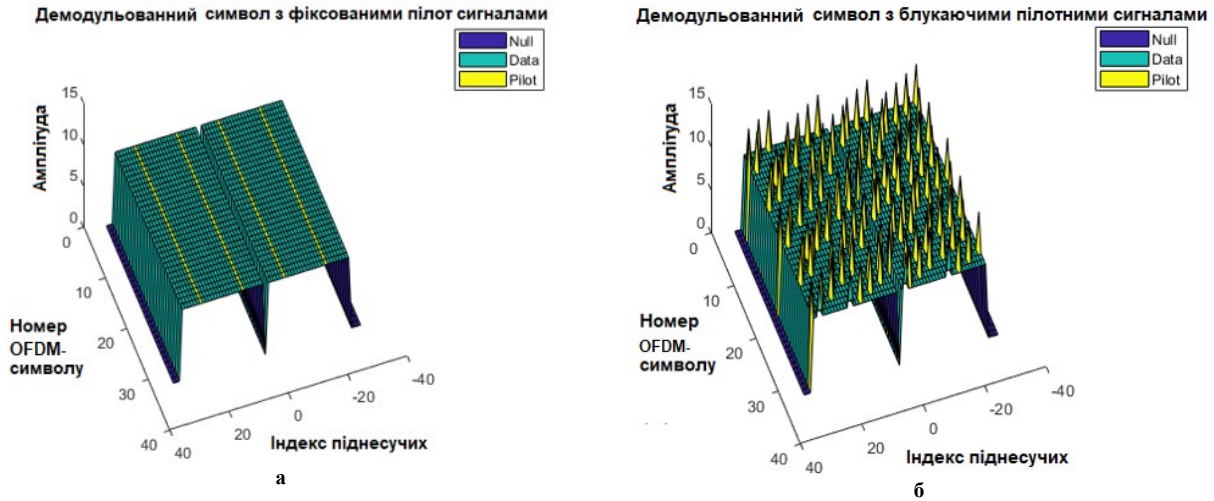


Рис. 8. Розміщення фіксованих пілотів – а та б- блукаючих пілотів по структурі OFDM-символу

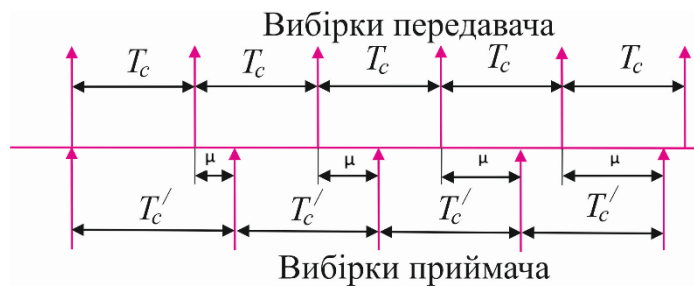


Рис. 9. Ілюстрація частотної помилки тактової синхронізації

На приймальному боці OFDM-приймач здійснює вибірку прийнятого неперервного сигналу в моменти часу які визначаються тактовою синхронізацією. В залежності від механізму керування тактовою частотою можна виділити дві схеми компенсації тактової частоти дискретизації. Перша схема ґрунтується на синхронному форматі дискретизації, а друга на несинхронному. Синхронну схему синхронізації (рис. 10) можна представити схемою яка керує моментами часу взяття вибірок аналогового сигналу за допомогою генератора керованого напругою (ГКН) і кола цифрового фазового автопідстроювання частоти (ФАП) [13, 14].

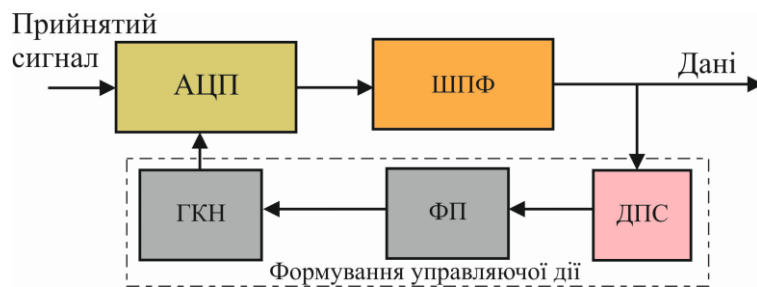


Рис. 10. Структурна схема системи тактової синхронізації OFDM-сигналів синхронного формату: АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ШПФ – блок проведення операції швидкого перетворення Фур’є; ДПС – детектор помилки синхронізації; ФП – фільтруючий пристрій; ГКН – генератор керований напругою

Друга схема компенсує зміщення тактової частоти вибірки у цифровій формі після автономного відбору вибірки (рис. 11).

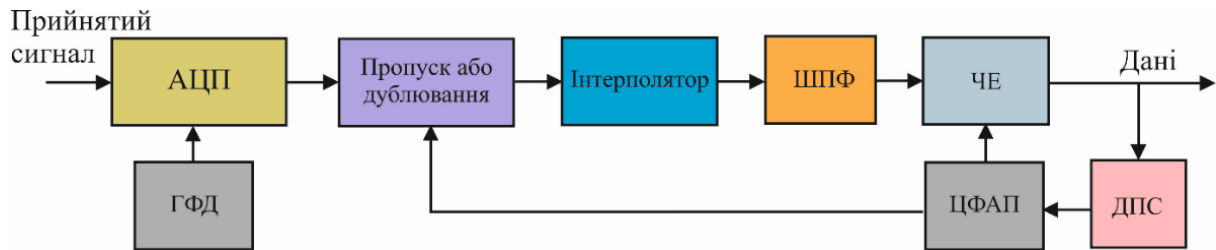


Рис. 11 - Структурна схема системи тактової синхронізації OFDM-сигналів несинхронного формату: АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ШПФ – блок проведення операції швидкого перетворення Фур’є; ДПС – детектор помилки синхронізації; ЦФАП – схема цифрового кола фазового автопідстроювання; ГФД – генератор фіксованої дискретизації; ЧЕ – частотний еквалайзер

Таким чином у схемі на рис. 10 зміну (чередування) фаз ПТ вимірює детектор помилок синхронізації (ДПС), тобто визначає поворот фази на ПТ, і далі керує генератором керованим напругою (ГКН) по колу фазового автопідстроювання з метою узгодження тактових імпульсів приймача з тактовими імпульсами передавача [15].

В схемі на рис. 11, яка уособлює роботу системи несинхронного взяття вибірки, частота дискретизації є фіксованою, а часовий зсув дискретизації компенсується за допомогою цифрових пристроїв (інтерполятор, частотний еквалайзер). Така схема конструктивно простіша так як не вимагає сигналу керування по колу зворотного зв’язку для зміни частоти дискретизації АЦП. Однак, така схема більш чутлива до помилки тактової синхронізації. Важливо акцентувати на тій обставині, що внаслідок того, що вибірка може бути додана або втрачена в символи OFDM під дією МЗ, схема на рис.11 може виконувати операцію “пропуску/дублювання” перед інтерполяцією і виконанням ШПФ, а компенсація фазового зсуву (рис. 11) реалізується з допомогою частотного еквалайзера.

На рис. 12 проілюстровано процес спрацювання системи синхронізації з метою компенсації спотворень в каналі.

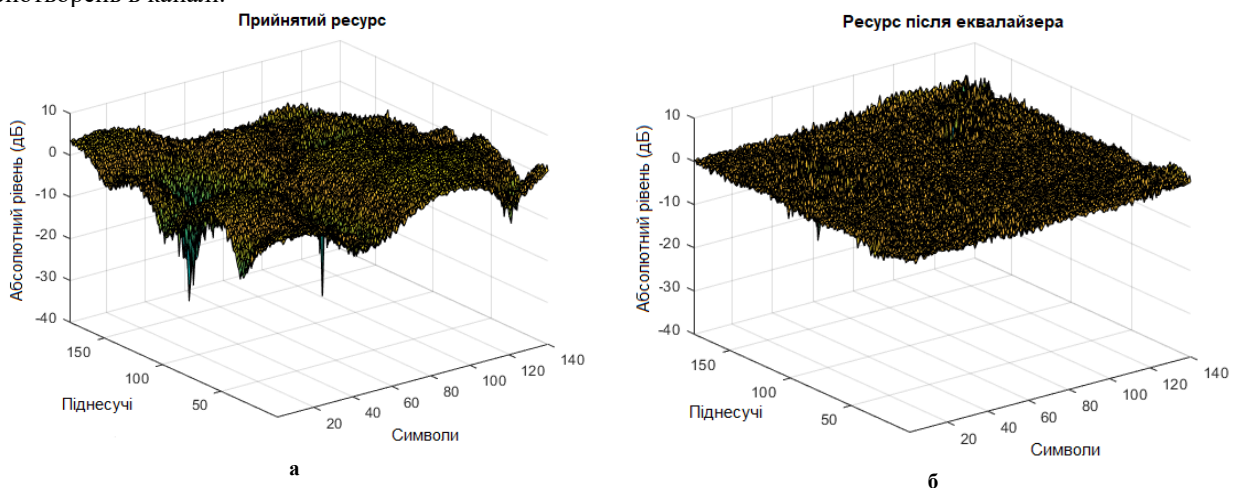


Рис. 12. Графік до пояснення процесу компенсації спотворень оцінювання каналу: а - прийнятий ресурс (з спотвореннями); б - вирівняний ресурс (без спотворень)

Отримана сітка ресурсів OFDM-символів порівнюється з еталонною сіткою ресурсів. Після цього розраховується помилка між переданою і вирівняною сітками. Практично створюються дві матриці які містять помилки для кожного символу. Бачимо на рис. 12, б наочно ефект виконання вирівнювання каналу і зменшення помилок в прийнятій сітці ресурсів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

В статті проведено дослідження умов забезпечення ортогональності піднесучих при синхронізації OFDM-сигналів. Досліджено проблему забезпечення ортогональності піднесучих OFDM-сигналів в умовах реального комплексу завад для отримання усіх переваг таких сигналів. Встановлено можливі випадки часового зміщення символу OFDM у випадку завад. Отримано математичні моделі OFDM-сигналів в умовах міжсимвольної і міжканальної інтерференції в багатопроменевому каналі. Проведено оцінку міжканальних завад у телекомунікаційних технологіях з OFDM. Досліджено схемотехнічні особливості системи синхронізації сигналів OFDM. Сформовано структурну схему системи синхронізації. Досліджено умови мінімізації помилки СКО в каналі з OFDM-сигналами при використанні трьох схем синхронізації:

варіюванням довжини ЦП; додавання до OFDM-символу преамбули; використання конструкції OFDM-символу з ПТ. Перспективи подальшого розвитку у даному напрямі пов'язані із дослідженнями спрямованими на оцінку завадостійкості каналів з OFDM і завадостійким кодуванням в умовах наявності в каналі зв'язку ефекту вибіркового завмирань. Буде проведена оцінка впливу типів сигнально-кодових конструкцій їх структури на показники ефективності каналів зв'язку з OFDM.

Література

1. Hwang W. Performance analysis of OFDM on the shadowed multipath channels / W. Hwang, K. Kim // IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE. – 1998. – Vol. 44, no.4. – P. 1323-1328.
2. Бойко Ю. М. Оцінка ефективності каналного кодування у телекомунікаціях з OFDM [Текст] / Ю. М. Бойко, Д. В. Новіков // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 5. – С. 150-159.
3. Zheng S. Estimation of Echo Amplitude and Time Delay for OFDM-Based Ground-Penetrating Radar / S. Zheng, X. Pan, A. Zhang, Y. Jiang and W. Wang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2015. – Vol. 12, no. 12. – P. 2384-2388.
4. Boiko J. Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko // 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), (Kyiv, 15-17 December 2022). – Kyiv: IEEE, 2022. - P. 14-18
5. Zhou S. OFDM Basics / S. Zhou, W. Zhaohui // OFDM for Underwater Acoustic Communications: Wiley Telecom, 2014, P.23-38.
6. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems. London: Artech House, Inc., 2004, P. 292.
7. Boiko J. Analysis of Signal Synchronization Conditions in 5G Mobile Information Technologies / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko // 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), (Lviv-Slavske, 22-26 February 2022). - Lviv-Slavske: IEEE, 2022. - P. 01-06.
8. Hanzo L. L. OFDM System Design / Lajos L. Hanzo, M. Münster, B. J. Choi // OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting. Wiley-IEEE Press, 2003, P. 21-21.
9. Бойко Ю. Оцінювання впливу зміщення несучих частот на завадостійкість телекомунікацій з OFDM / Ю. Бойко, І. Пятін, О. Єрмоєнко, Д. Шаюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № 3. – С. 19-26.
10. 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. –V. 1. –no. 9-109. –P. 66–76.
11. Hofbauer C. Pilot Tone Insertion and Utilization in Unique Word OFDM / C. Hofbauer, W. Haselmayr and M. Huemer // 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), (Atlanta, GA, USA, 26-29 May 2020). – Atlanta: IEEE, 2020. P. 1-5.
12. Boiko J. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, I. Parkhomey // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2019. – Т. 1. – №. 34. – С. 5-15.
13. 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.
14. Boiko J. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate / J. Boiko, I. Pyatin, L. Karpova, O. Eromenko // Data-Centric Business and Applications. – Springer, Cham, 2021. – С. 79-103
15. Jawad H. M. Improvement of the Methodology of Building a System of Phase Synchronization of Coherent Demodulators in Telecommunication Control Systems and Distance Learning / H. M. Jawad, M. J. Abu-AlShaer, S. Yevseiev, V. Kornienko and O. Turovsky // 2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), (Ankara, Turkey, 20-22 October 2022). – Ankara: IEEE, 2022. - P. 1013-1016.

References

1. Hwang W. Performance analysis of OFDM on the shadowed multipath channels / W. Hwang, K. Kim // IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE. – 1998. – Vol. 44, no.4. – P. 1323-1328.
2. Boiko J.M. Evaluation of channel coding efficiency in OFDM telecommunications / J.M. Boiko, D.V. Novikov // Herald of Khmelnytskyi national university. – 2021. – №5. - S.150–159.
3. Zheng S. Estimation of Echo Amplitude and Time Delay for OFDM-Based Ground-Penetrating Radar / S. Zheng, X. Pan, A. Zhang, Y. Jiang and W. Wang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE. – 2015. – Vol. 12, no. 12. – P. 2384-2388.

4. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM," 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 14-18.
5. Zhou S. OFDM Basics / S. Zhou, W. Zhaohui // OFDM for Underwater Acoustic Communications: Wiley Telecom, 2014, P.23-38.
6. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems. London: Artech House, Inc., 2004, P. 292.
7. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "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), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 01-06.
8. Hanzo L. L. OFDM System Design / Lajos L. Hanzo, M. Münster, B. J. Choi // OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting. Wiley-IEEE Press, 2003, P. 21-21.
9. Boiko J.M. Estimation the effect of carrier frequency offset on the noise immunity of telecommunications with OFDM / J.M. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, D. Shayuk // Measuring and computing devices in technological processes. – 2022. – №3. – S.19–26.
10. 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. –V. 1. –no. 9-109. –P. 66–76.
11. C. Hofbauer, W. Haselmayr and M. Huemer, "Pilot Tone Insertion and Utilization in Unique Word OFDM," 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Atlanta, GA, USA, 2020, pp. 1-5.
12. Boiko J. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. Boiko, I. Pyatin, O Eromenko, I. Parkhomey // Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia. – 2019. – T. 1. – №. 34. – S. 5-15.
13. 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.
14. Boiko J. et al. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate //Data-Centric Business and Applications: ICT Systems—Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – S. 79-103.
15. H. M. Jawad, M. J. Abu-AlShaer, S. Yevseiev, V. Kornienko and O. Turovsky, "Improvement of the Methodology of Building a System of Phase Synchronization of Coherent Demodulators in Telecommunication Control Systems and Distance Learning," 2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2022, pp. 1013-1016.