

УДК 621.391

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ЧАСТОТНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДЕМОДУЛЯТОРА OFDM СИГНАЛУ

Перекрестов І.С.

*Одеська національна академія зв'язку імені О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
perekrestov_igor@ukr.net*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЕМОДУЛЯТОРА OFDM СИГНАЛА

Перекрестов И.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
perekrestov_igor@ukr.net*

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM FREQUENCY SYNCHRONIZATION IN OFDM SIGNAL DEMODULATOR

Perekrestov I.S.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa 65029, Ukraine.
perekrestov_igor@ukr.net*

Анотація. У статті проведено дослідження точності оцінювання частотного зсуву OFDM сигналу за пілотними підносійними коливаннями (обробка у частотній області), також проаналізовано міру впливу залишкового частотного зсуву на завадостійкість демодуляції.

Ключові слова: сигнал, оцінка, демодуляція, частотна синхронізація, OFDM

Аннотация. В статье проведено исследование точности оценки частотного сдвига OFDM сигнала по пилотным поднесущим (обработка в частотной области), также проанализирована степень влияния остаточного частотного сдвига на помехоустойчивость демодуляции.

Ключевые слова: сигнал, оценка, демодуляция, частотная синхронизация, OFDM

Abstract. Research of estimation accuracy of frequency offset OFDM signal by the pilot subcarriers (processing in the frequency domain) is performed in the paper, also analyzed the influence residual frequency shift on noise immunity demodulation

Key words: signal, estimation, demodulation, frequency synchronization, OFDM

Зростання попиту на високошвидкісні безпроводові канали доступу обумовило широке застосування технології OFDM [1...5], що ефективно використовує багатопробієві радіоканали з частотно-селективними завмираннями [3, 4], але при цьому виникає проблема забезпечення високої точності функціонування усіх систем синхронізації: символної, частотної та фазової, а також корекції завмирань [6...12].

Першими виконуються процедури символної (мова йде про OFDM символи) та частотної синхронізації. Від їх точності, загалом, залежить можливість ефективного виконання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) – виокремлення інформації, що передається різними підносійними коливаннями. Кінцева точність систем символної та частотної синхронізації OFDM символів, що здійснюють обробку в часовій області, призводить до появи певних спотворень детектованих каналних символів окремих підносійних коливань. Такі спотворення через наявність не повністю компенсованого частотного зсуву мають назву «шуми неортогональності» [6], що відображає їх фізичну суть. Проявляються шуми неортогональності у вигляді суми комплексних множників, які отримує кожне підносійне коливання внаслідок частотних зсувів інших підносійних коливань. Однозначність між величиною частотного зсуву та шумами неортогональності

дозволяє додатково більш точно здійснювати компенсацію частотного зсуву сигналу, що її демодулюють. Очевидно, що за наявності пілотних підносійних коливань, передбачуваних усіма сучасними стандартами систем безпроводового доступу [1, 5], аналіз шумів неортогональності здійснюється саме за ними.

Отже, частотна синхронізація у системах за технологією OFDM виконується двома етапами [9]:

- «груба» синхронізація при обробці сигналу у часовій області на основі повторення форми сигналу у вигляді циклічного префікса [7...9];
- «точна» синхронізація при обробці сигналу у частотній області на основі аналізу фазових зсувів пілотних підносійних коливань [10, 11].

У літературі можна знайти окремі результати аналізу точності другого етапу синхронізації [7...12], проте вони більшою мірою стосуються випадку цифрового телевізійного мовлення, а не систем безпроводового доступу, що до того ж функціонують на основі радіоканалів інших моделей [4, 14].

Метою даної статті є отримання як якісних, так і кількісних характеристик систем частотної синхронізації, що засновані на аналізі сигналу у частотній області, для випадку систем передавання за стандартом *IEEE 802.16e* [15] та моделей радіоканалів, рекомендованих Міжнародним союзом електрозв'язку для систем безпроводового доступу [14].

У статті було проаналізовано закон розподілу помилки оцінювання частотного зсуву та її середньоквадратичне відхилення за різних параметрів модульованого сигналу та в різних умовах його поширення. Для об'єктивної оцінки міри впливу на якість роботи системи передавання в цілому, було визначено як неповністю компенсований частотний зсув через неточність оцінювання відображається на завадостійкості демодуляції.

МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Модель сигналу. Кожний OFDM символ з урахуванням часового захисного інтервалу для усунення спотворень обумовлених багатопроменевим поширенням, може бути поданий наступним чином:

$$s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} X_i e^{j\omega_i(t-T_g)}, 0 \leq t < T_i + T_g, \quad (1)$$

де X_i – комплексна амплітуда i -го підносійного коливання, ω_i – її частота; T_i – тривалість інформаційної частини OFDM символу; N – кількість підносійних коливань, T_g – тривалість захисного інтервалу.

Сигнал на вході приймача в умовах каналу з АГБШ може бути поданий як

$$r(t) = s(t - \tau) e^{j(\Delta\omega t + \Delta\phi)} + n(t) = s(t - \tau) e^{j((n_\omega + \delta_\omega)\omega_\Delta t + \Delta\phi)} + n(t),$$

де τ – затримка поширення; $\Delta\omega$ і $\Delta\phi$ – частотний і фазовий зсуви відповідно між опорними коливаннями модемів; n_ω – ціла, δ_ω – дробова частини відносного частотного зсуву вираженого в одиницях відстані між підносійними коливаннями ω_Δ ; $n(t)$ – шум каналу.

При багатопроменевому поширенні сигналу в каналі сигнал, що його демодулюють, описується виразом

$$r(t) = \sum_i \alpha_i s(t - \tau_i) e^{j(\Delta\omega_i t + \phi_i)} + n(t), \quad (2)$$

де α_i і τ_i – ослаблення і затримка відповідно в i -у промені; $\Delta\omega_i$ і φ_i – початкова фаза і частотний зсув копії переданого сигналу, що поширюється i -м променем.

Для виділення підносійних коливань в демодуляторі використовується ДПФ, в результаті якого отримують спектральне подання сигналу, що його демодулюють

$$X_r(l, k) = \beta(\delta_\omega) H(k) X_i(l, k) e^{j\left(-2\pi\delta_i(l)\frac{k}{N_{FFT}} + \varphi(l)\right)} + N(l, k),$$

$$\beta(\delta_\omega) = \frac{\sin(\pi\delta_\omega)}{\pi\delta_\omega}, \quad N(l, k) = N_\tau(l, k) + N_\omega(l, k) + N_n(l, k), \quad -\frac{N-1}{2} \leq k \leq \frac{N-1}{2}, \quad (3)$$

де l – номер OFDM символу; k – номер підносійного коливання у символі; $X_i(l, k)$ – комплексна амплітуда k -го підносійного коливання в l -му переданому символі; $H(k)$ – відліки комплексної передатної функції каналу; $\delta_i(l)$ – зсув у часі вікна ДПФ та інформаційної частини l -го символу, віднесений до періоду дискретизації; N_{FFT} – кількість точок ДПФ; $\varphi(l)$ – набіг фази, обумовлений $\Delta\omega$; $N_n(l, k)$ – відліки білого гауссового шуму.

Складова $N_\tau(l, k)$ відображає міжсимвольну інтерференцію, що з'являється внаслідок неточності символної синхронізації та багатопроменевого поширення. Складова $N_\omega(l, k)$ відображає шуми неортогональності, обумовлені неточністю частотної синхронізації. Відхилення частот підносійних коливань від номінальних значень також призводить до появи множника $\beta(\delta_\omega)$, що призводить до ослаблення корисної складової сигналу.

Оцінка частотного зсуву. Набіг фази між двома послідовними символами пропорційний частотному зсуву:

$$\Delta\varphi(l) = \varphi(l) - \varphi(l-1) = 2\pi \frac{\Delta\omega(l-1)}{\omega_\Delta} (1 + \Delta_g), \quad (4)$$

де $\Delta\omega(l-1)$ – частотний зсув $(l-1)$ -го символу; Δ_g – відносна довжина часового захисного інтервалу.

Для оцінки частотного зсуву необхідно знайти різницю фаз між відповідними пілотними підносійними коливаннями двох послідовних символів:

$$\hat{\varphi}_\omega = \arg\left(\sum_{k \in I} X_r'^*(l-1, k) X_r'(l, k)\right), \quad (5)$$

де риска біля X_r означає його попередню корекцію системами синхронізації, що функціонують у часовій області – до ДПФ. З виразу можна бачити, що суттєво ослаблені підносійні коливання роблять малий внесок у суму, що дозволяє ефективно застосовувати таку оцінювання в умовах завмирань.

За оцінками фазових зсувів можна отримати оцінку частотного зсуву

$$\hat{\delta}_\omega(l) = \frac{\Delta\hat{\varphi}(l)}{2\pi(1 + \Delta_g)}. \quad (6)$$

Такі оцінки можна використати для підстроювання опорного коливання в демодуляторі (у часовій області), щоб зменшити потужність шумів неортогональності.

Комп'ютерна модель дослідження. Для проведення дослідження була розроблена імітаційна комп'ютерна модель у середовищі Matlab [13], яка реалізує формування послідов-

ності декількох OFDM символів, що отримує в лінії зв'язку частотний зсув та спотворення адитивним білим гауссовим шумом (АБГШ) і частотно-селективними завмираннями. Ця модель передбачає відомим залишковий частотний зсув після його оцінювання та компенсації у часовій (був отриманий шляхом моделювання в окремому дослідженні). Для отримання статистичного результату, для кожного значення відношення сигнал/шум процес моделювання передавання декількох OFDM символів здійснюється 1000 разів.

Вихідні дані. Дослідження проводились за наступних параметрів сигналу та каналу:

– моделі каналу з різними наборами затримок та ослаблень у променях: pA та pB – для пішоходів, умовно кращий і гірший випадки, νA – для транспортних засобів, умовно кращий випадок [14];

– кількість підносійних коливань: 128, 512, 1024, 2048 [15];

– швидкість руху мобільного користувача: [3, 6, 30, 60, 120] км/год.

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Об'єктивними характеристиками оцінювання є середнє значення та середньоквадратичне відхилення (СКВ) його помилки, а також закон розподілу цієї помилки. Ці характеристики були проаналізовані в залежності від відношення сигнал/шум у каналі.

Густина ймовірності помилки оцінювання. За допомогою спеціалізованого додатку середовища Matlab було отримано гістограми помилки оцінювання частотного зсуву та результат їх досить точної апроксимації гауссовою залежністю. Як видно з рис. 1, закон не залежить від відношення сигнал/шум. Також було визначено, що він не залежить від перерахованих вище значень вихідних даних.

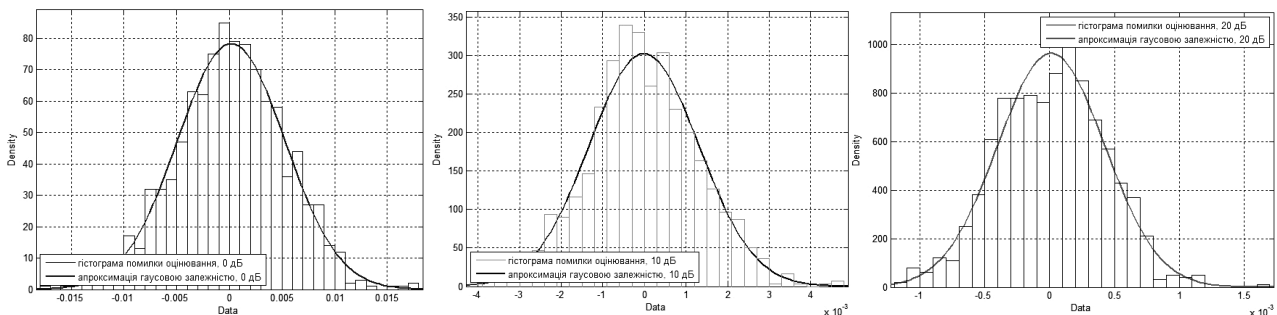


Рисунок 1 – Результати дослідження закону розподілу помилки оцінювання

Власна помилка оцінювання. При нульовому частотному зсуві нормовані на величину рознесення підносійних коливань середнє значення помилки оцінювання та середньоквадратичне відхилення (СКВ) склали $-1,37 \cdot 10^{-20}$ та $1,74 \cdot 10^{-18}$ та асимптотично прямують до нуля, відповідно, тобто є настільки малими, що ними далі можна знехтувати.

Аналіз впливу величини оцінюваного частотного зсуву. На рис. 2, а наведено графіки нормованих середнього значення та СКВ помилки оцінювання в залежності від величини частотного зсуву не повністю компенсованого при обробці сигналу у часовій області (значення відповідають відношенням сигнал/шум від нуля з кроком 5 дБ, значення нормовані на величину відстані між підносійними коливаннями). З рисунку можна бачити, що помилка оцінювання прямо пропорційно залежить від величини оцінюваного зсуву. Якщо нормувати ці залежності на величину оцінюваного частотного зсуву, то отримуємо залежності, подані на рис. 2, б, що свідчать про майже незмінність відносної помилки оцінювання.

Аналіз впливу структури каналу. Аналіз проведений в умовах різних моделей радіоканалу, вказаних у вихідних даних, подано на рис. 3, а. З рисунку можна бачити, що точність оцінювання частотного зсуву майже не залежить від моделі багатопроменевого радіоканалу, що є важливим результатом, оскільки в такому випадку в терміналі мобільного користувача немає необхідності здійснювати відповідний та досить неоднозначний аналіз.

Аналіз впливу кількості підносійних коливань. Необхідно зауважити, що стандартом *IEEE 802.16e* [15] величина рознесення підносійних коливань за частотою однакова за різної їх кількості, тобто їх збільшення/зменшення прямо пропорційно впливає на ширину смуги частот модульованого сигналу. Результати моделювання для кількості підносійних коливань 128 (ширина смуги частот сигналу – 1,25 МГц), 512 (5 МГц), 1024 (10 МГц) та 2048 (20 МГц), наведені на рис. 3, б. З рисунку можна бачити, що точність оцінювання збільшується при збільшенні кількості підносійних коливань у декілька разів. Цей факт можна пояснити тим, що відповідно до методу оцінювання – у більше число разів буде ослаблений вплив шуму за рахунок усереднення значень більшого обсягу вибірки.

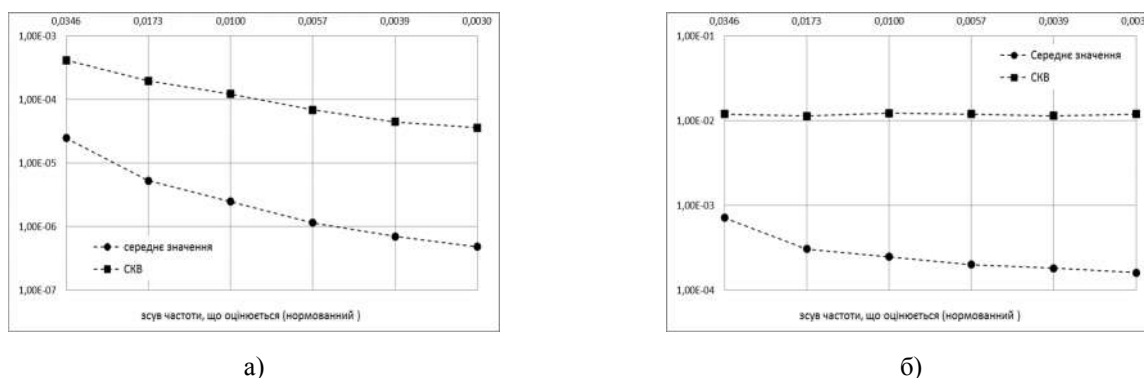


Рисунок 2 – Залежність характеристик цінювання від величини оцінюваного зсуву

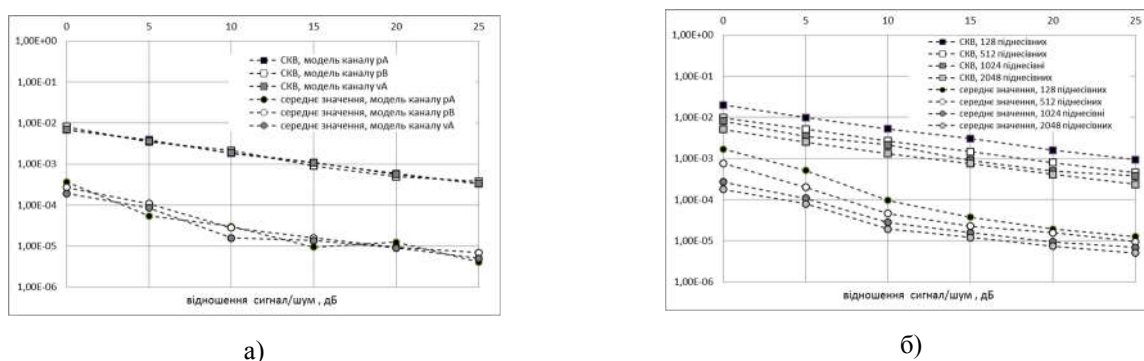


Рисунок 3 – Залежність характеристик цінювання від моделі радіоканалу (а) та кількості підносійних коливань (б)

Аналіз впливу суміщення результатів обробки декількох OFDM символів. Як це показано на рис. 4, а, точність оцінювання може бути підвищена за рахунок суміщення результатів обробки пілотних підносійних коливань декількох пар OFDM символів, наприклад, з парними та непарними номерами (позиції пілотних підносійних коливань в них відрізняються [15]). Збільшення кількості оброблюваних OFDM символів буде забезпечувати пропорційне покращення точності оцінювання.

Аналіз впливу швидкості переміщення мобільного користувача. Наявність взаємного руху між передавальним та приймальним обладнанням (в нашому випадку руху мобільного користувача) та багатопроточне поширення в умовах міської забудови і ненаправлених антен призводить до ефекту доплерівського розширення спектра [3, 4]. Через цей ефект в кожний момент часу (кожний OFDM символ) різні спектральні складові сигналу отримують різні частотні зсуви і, відповідно, за певний інтервал часу (тривалість одного або декількох OFDM символів) різні підносійні коливання отримують різні прирости фази.

Оскільки визначення частотного зсуву відповідно до методу, що розглядається, здійснюється саме на основі оцінок величин приросту фази пілотних підносійних коливань, то

очевидно, що швидкість руху мобільного користувача є одним з найвагоміших факторів, що впливають на точність, це підтверджують результати моделювання наведені на рис. 4. б. З рисунку видно, що за великої швидкості руху, точність оцінювання практично не залежить від відношення сигнал/шум у каналі, оскільки повністю визначається ефектом доплерівського розширення спектра.

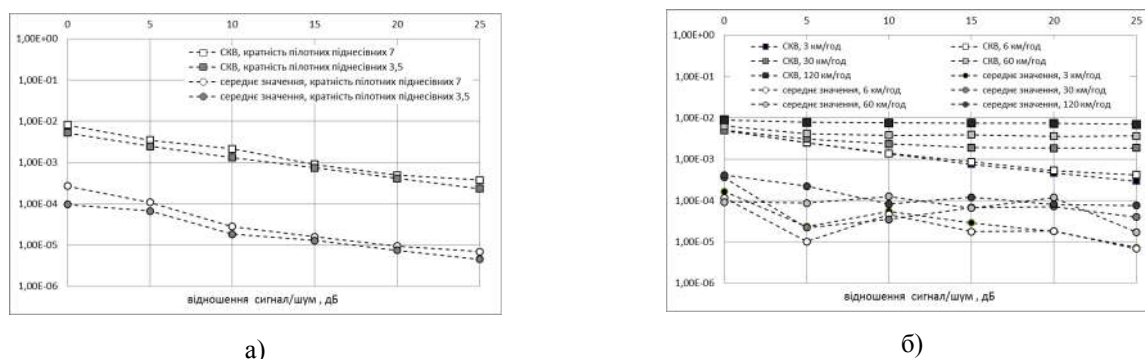


Рисунок 4 – Залежність характеристик цінювання від збільшення кількості оброблюваних OFDM символів (а) та швидкості руху (б)

ВПЛИВ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ ДЕМОДУЛЯЦІЇ

Очевидно, що неточність оцінювання та, відповідно, компенсації частотного зсуву призводить до погіршення завадостійкості, яка є найбільш об'єктивним критерієм при аналізі якості роботи системи передачі в цілому. Тому в цьому розділі був здійснений аналіз залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум з урахуванням залишкового фазового зсуву, що обумовлений неповністю компенсованим частотним зсувом.

Як можна було очікувати, результати були ідентичними за різних моделей каналу та покращувались пропорційно кількості підносійних коливань та кількості OFDM символів, що використовуються для отримання кожної оцінки. Найбільш суттєве погіршення завадостійкості мало місце при збільшенні швидкості руху мобільного користувача, відповідні результати подані на рис. 5 (модель каналу νA , кількість підносійних коливань 1024).

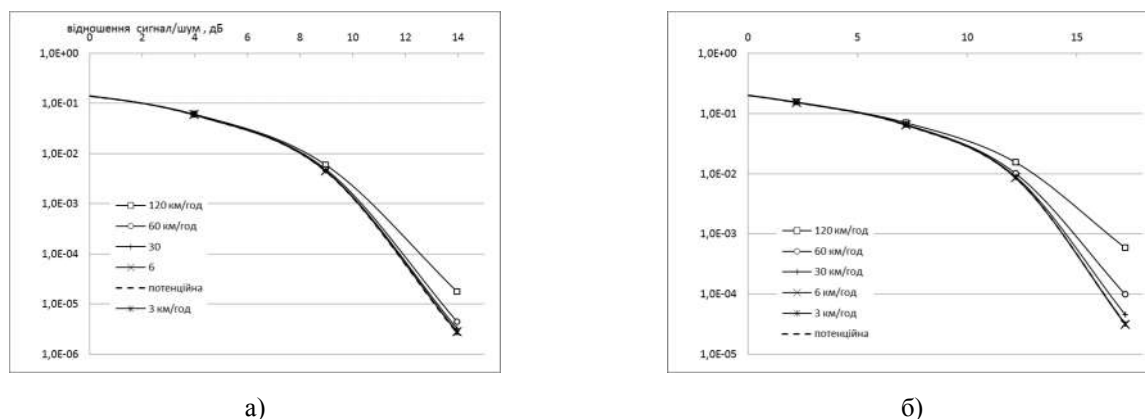


Рисунок 5 – Завадостійкість демодуляції з урахуванням неточності синхронізації сигналів KAM-16 (а) та KAM-64 (б)

Аналогічні результати для випадку модуляції ФМ-4 не наведені, оскільки погіршення було таким, що можна знехтувати. Як бачимо з рисунку більш чутливою до неповністю компенсованого частотного зсуву є модуляція KAM-64, що є цілком очікуваним.

Отже, розглядаючи, наприклад, випадок швидкості руху до 60 км/год бачимо, що на рівні ймовірності помилки 10^{-3} необхідне додаткове відношення сигнал/шум через неточ-

ність частотної синхронізації становитиме у випадку КАМ-16 не більше 0,25 дБ, у випадку КАМ-64 – 0,5 дБ. За графіками для довільного відношення сигнал/шум або рівня ймовірності помилки можна конкретне значення погіршення завадостійкості.

Результати, отримані у статті, дозволяють дійти наступних **висновків**:

– характеристики методу частотної синхронізації у частотній області є наступними:

1) закон розподілу миттєвих значень помилки оцінювання є гауссовим з нульовим середнім та дисперсією пропорційною відношенню сигнал/шум у каналі, він не залежить від параметрів сигналу та каналу;

2) відносна похибка оцінювання є незмінною – абсолютна пропорційна величині зсуву, що оцінюється;

3) точність оцінювання не залежить від структури багатопроменевого радіоканалу;

4) точність оцінювання прямо пропорційна кількості підносійних коливань;

5) точність оцінювання суттєво погіршується зі збільшенням швидкості руху мобільного користувача;

6) точність оцінювання може бути збільшена за рахунок об'єднання результатів оцінювання за декількома послідовними парами OFDM символів (при цьому необхідно враховувати можливу зміну оцінюваного зсуву у часі);

– аналіз впливу неточності оцінювання частотного зсуву на завадостійкість показав, що суттєве погіршення завадостійкості має місце лише за дуже великих швидкостей руху мобільного користувача, які не можуть мати місце в реальних умовах.

Значення характеристик оцінювання та міри погіршення завадостійкості для конкретних комбінацій вихідних даних можна визначити за графіками наведеними у статті.

Оскільки при дослідженні виконувалось моделювання максимально наближене до реальних умов і, враховуючи той факт, що на сьогодні обробка сигналів виконується в цифровому виді, можна стверджувати, що отримані результати будуть мати місце в практичних додатках, отже в якості рекомендацій можна запропонувати їх використання при проектуванні відповідного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / [Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В.]. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с
2. Іващенко П.В. Теорія зв'язку: Модуль 1. Сигнали електров'язку: навч. посіб. [для студ., що навчаються за напрямом вищої освіти 6.050903 – Телекомунікації]/ П. В. Іващенко, І. С. Перекрестов. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013. – 145 с. з іл.
3. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – [Изд. 2-е, испр.]: [пер. с англ.] / Склад Б. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.: ил.
4. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособ. / Волков Л.Н., Немировский М.С. Шинаков Ю. С.; – М.: Око-Трендз, 2005. – 392 с.: ил
5. Вишнеvський В.М. Енциклопедія WiMax. Путь к 4G / Вишнеvський В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с
6. Перекрестов І. С. Мощність шумов неортогональності в системах передачі с OFDM(A) и мобільним користувачем / І. С. Перекрестов, П. В. Іващенко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2011. – № 2. – С. 128–134.
7. Fusco T. Synchronization techniques for OFDM-systems // Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni (XVIII ciclo) 2004–2005.
8. Sandell M., Van de Beek J.J., Borjesson P. O. ML Estimation of timing and frequency offset in multicarrier systems. Research Report TULEA 1996:09. Division of Signal Processing, Lulea University of Technology, 1996.
9. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: учеб. пособ. / [Б.И. Шахтарин, А.А. Иванов, П.И. Кобылкина и др.]. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 256 с.
10. McNair B., Cimini L. J.Jr, Sollenberger N.A robust timing and frequency offset estimation scheme for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. // Proceedings of the Vehicular Technology Conference (VTC'99-Spring), pp. 690–694, Houston, Texas, USA, 1999.

11. Muller-Weinfurter S. Frequency-domain frame synchronization for optimum frequency-differential demodulation of OFDM // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '99), Rio de Janeiro, Brazil, pp. 857– 862, December 1999.
12. ETSI , “Digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, EN 300 744 V1.1.2, Aug. 1997.
13. Кетков Ю.Л. Matlab 7: программирование, численные методы / А.Ю. Кетков, М.М. Шульц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с
- 14 ITU-R M.1225 – Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000: Rec. ITU-R M.1225. – [Чинний від 1997-02]. – Женева: International Telecommunication Union, 1997. – 60 с. – (міжнародний стандарт)
- 15 IEEE 802.16-2009. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems: IEEE 802.16-2009. – [Чинний від 2009-05-13]. – Нью Йорк: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009. – 2082 с. – (міжнародний стандарт).

REFERENCES

1. Vishnevskij, V. M., A. I. Ljahov, S. L. Portnoj, and I. V. Shahnovich. Broadband Wireless Data Transmission Network. Moscow: Tehnosfera, 2005. Print.
- 2 Ivashchenko, P. V., and I. S. Perekrestov. Theory of Communication: Module 1. Telecommunication Signals. Odesa: O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, 2013. Print.
3. Skljjar, B. Digital Communication. Theoretical Bases and Practical Application. 2nd ed. Moscow: Izdatel'skij Dom «Vil'jams», 2003. Print.
4. Volkov, L. N., M. S. Nemirovskij, and Ju. S. Shinakov. Digital Radio Systems: The Basic Methods and Characteristics. Moscow: Oko-Trendz, 2005. Print.
5. Vishnevs'kij, V. M., S. L. Portnoj, and I. V. Shahnovich. *Encyclopedia WiMax. Path to 4G*. Moscow: Encyclopedia WiMax. Path to 4G, 2009. 472. Print.
6. Perekrestov, I. S. "The Power of Non-orthogonality Noise in Communication Systems with OFDM(A) and a Mobile User." *Proceedings O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications 2* (2011): 128-34. Print.
7. FUSCO, TILDE. Synchronization Techniques for OFDM-systems. Diss. UNIVERSITA DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II, 2005. N.p.: n.p., n.d. Print.
8. Sandell, M., J. J. Van De Beek, and P. O. Borjesson. *ML Estimation of Timing and Frequency Offset in Multicarrier Systems*. Rep. no. TULEA 1996:09. N.p.: Lulea U of Technology, 1996. Print.
9. Ivanov, A. A., and P. I. Kobylkina. Sync in Radio Communication and Radio Navigating. By B. I. Shahtarin. Moscow: Gelios, 2007. Print.
10. McNair, B., L. J. Cimini, Jr., and N. Sollenberger. *Estimation Scheme for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Systems*. Proc. of Proceedings of the Vehicular Technology Conference, Texas, USA, Houston. Houston: n.p., 1999. 690-94. Print.
11. Muller-Weinfurter, S. "Frequency-domain Frame Synchronization for Optimum Frequency-differential Demodulation of OFDM." *Proceedings Title*. IEEE Global Telecommunications Conference. N.p.: n.p., 1999. 857-62. Print.
12. EN 300 744. Digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (Ver. 1.1.2). Aug. 1997.
13. Ketkov, Ju. L., A. Ju. Ketkov, and M. M. Shul'c. *Matlab 7: Programming, Numerical Methods*. SPb: BHV-Peterburg, 2005. Print.
- 14 ITU-R Recommendations, Recommendation ITU-R M. 1225, 'Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000', 1997.
- 15 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004) , vol., no., pp.1,2080, May 29 2009.