

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗАВАДОДОСТІЙКІСТЮ ДЛЯ КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖ FH-OFDMA

Sayko V.H., Dikaryev O.V., Lysenko D.O., Hryshchenko L.M., Dakova L.V., Kravchenko V.I. **Determination of the optimal parameters of signals with high noise immunity for FH-OFDMA cognitive radio networks.** Based on the analysis of the next generation wireless communication systems adaptation mechanisms developed an advanced method that allows to determine the optimal parameters of signals with high noise immunity for the FH-OFDMA cognitive radio networks. In an improved method for determining the optimal value of frequency diversity in the subcarrier group are based on analysis of the measured values of the frequency and time dispersion in the channel and a given set of design values matching frequency and time dispersion values in the channel closest to the found frequency diversity in groups of subcarriers, which at fixed conditions in the channel corresponding to the minimum signal to noise ratio for the respective types of modulation. Due to this, in contrast to the known approaches, it is possible to improve the reliability of connection when sending a particularly valuable information OFDMA signals in conditions of extremely low signal-to-noise ratio, and when the number of frequency channels is limited and it is necessary to ensure the fastest possible data transfer with a minimum number of retries of missed packets. The comparison showed that the proposed simulation algorithm has provided a significant gain in noise immunity, namely, with an average value of the signal / noise ratio of 20 dB the probability of error is reduced by more than 8-10 times.

**Keywords:** wireless communication, cognitive radio networks, OFDMA signal, subcarriers of subchannel, frequency carried, antijammingness, signal-to-noise ratio

Сайко В.Г., Дікарев О.В., Лисенко Д.О., Грищенко Л.М., Дакова Л.В., Кравченко В.І. **Визначення оптимальних параметрів сигналів з підвищеною завадостійкістю для когнітивних радіомереж FH-OFDMA.** На основі аналізу адаптаційних механізмів, що відбуваються в системах безпроводового зв'язку нового покоління, розроблено вдосконалений метод, який дозволяє визначити оптимальні параметри сигналів з підвищеною завадостійкістю для когнітивних радіомереж FH-OFDMA. Метод забезпечує можливість суттєвого пониження ймовірності переривання зв'язку при передаванні особливо цінної інформації сигналами OFDMA в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум та обмеженої кількості частотних каналів.

**Ключові слова:** безпроводовий зв'язок, когнітивна радіомережа, сигнал OFDMA, підносійні підканалу, частотне рознесення, завадостійкість, відношення сигнал-шум

Сайко В.Г., Дікарев А.В., Лисенко Д.О., Грищенко Л.Н., Дакова Л.В., Кравченко В.І. **Определение оптимальных параметров сигналов с повышенной помехоустойчивостью для когнитивных радиосетей FH-OFDMA.** На основе анализа адаптационных механизмов, происходящих в системах беспроводной связи нового поколения, разработан усовершенствованный метод, который позволяет определить оптимальные параметры сигналов с повышенной помехоустойчивостью для FH-OFDMA когнитивных радиосетей. Метод обеспечивает возможность существенного понижения вероятности перерыва связи при передаче особо ценной информации сигналами OFDMA в условиях предельно низких отношений сигнал-шум и ограниченного количества частотных каналов.

**Ключевые слова:** беспроводная связь, когнитивная радиосеть, сигнал OFDMA, поднесущие подканала, частотное разнесение, помехоустойчивость, отношение сигнал-шум

**1. Вступ.** На сучасному етапі розвитку систем зв'язку найбільш перспективними є радіотехнології, основані на OFDMA, які використовуються в більшості систем радіодоступу нового покоління. У системі зв'язку OFDMA кожна підносійна схильна до впливу частотно-селективних завмирань. Внаслідок цього функція частотного відгуку каналу змінюється за частотою і може також змінюватися в часі, тобто значення комплексної огинаючої може істотно змінюватися від підносійної до підносійної, а також від одного часового символу OFDMA до іншого. Факт наявності нерівномірного каналного відгуку за підносійними може використовуватися для індивідуального вибору типу модуляції і схеми кодування для підносійної (або групи підносійних). Цей вибір може здійснюватися в залежності від

значення відношення сигнал-шум, яке забезпечується при передачі сигналу на певній підносійній в певному інтервалі часу.

З точки зору вдосконалення методів приймання і передавання сигналів для когнітивних мереж викликають інтерес схема стрибкоподібної зміни частоти (надалі звана як «FH»), тобто схема стрибкоподібної зміни підносійних, виділених для конкретного терміналу абонента, та схема FH-OFDMA, що є схемою, яка комбінує схему FH і схему OFDMA. Система, що використовує гібридний метод багатостанційного доступу FH-OFDMA (надалі звана як «система FH-OFDMA»), використовує схему FH в смугах частот з перескоком частоти підносійних, виділених для терміналу абонента. Отже, система FH-OFDMA також розподіляє всі підносійні, зокрема підносійні даних, що використовуються по всій смузі частот, таким чином, досягаючи збільшення частотного рознесення.

У системі множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів і стрибкоподібною зміною частоти (FH-OFDMA) смуга пропускання рівномірно розділяється на низку ортогональних підносійних. Кожному користувачеві виділяється певне число цих підносійних OFDMA. У системі FH-OFDMA користувачі також стрибкоподібно змінюють частоту (тобто, підбір носійних OFDM, призначених користувачеві, змінюється в часі) по всій смузі пропускання. Всі користувачі в рамках одного сектора або стільника є ортогональними щодо один одного і, отже, не викликають завад один одному.

У сучасних мобільних телекомунікаційних системах, що використовують сигнали OFDMA і які працюють, наприклад, в стандартах WI-MAX, LTE та інших, можливе забезпечення надійної транзакції цифрових даних за наявності багатопроблемності і замирань, що виникають внаслідок цього в каналі зв'язку, при середньому відношенні сигнал-шум, як правило, не менше 8-12 дБ, за межами якого приймання інформаційних повідомлень стає фактично неможливим завдяки відсутності синхронізації передавача і приймача в частотній області, а також корекції параметрів каналу передачі.

Проте, на практиці під час експлуатації систем зв'язку виникають ситуації, коли в зазначеному вище складному заводовому оточенні необхідно передати особливо цінну інформацію, наприклад, сигнали лиха і географічні координати об'єкту, що зазнало краху, сигнали запиту зв'язку по додатковому каналу і тому подібне.

**2. Аналіз механізмів адаптації в безпроводових високошвидкісних каналах радіозв'язку за наявності завад.** У [1] запропоновано простий алгоритм адаптації швидкості (Simple Rate Adaptive – SRA algorithm). SRA алгоритм використовує критерій забезпечення необхідної ймовірності помилки, не задаючись метою досягнення максимально можливої швидкості передавання для поточного значення відношення сигнал-шум в підносійній. Алгоритм SRA вимагає наявності інформації про частотний відгук каналу розповсюдження по всім підносійним в реальному масштабі часу. Автори алгоритму визначають пороги відношення сигнал-шум ( $SNR_{th}$ ), які використовуються для прийняття рішення про вибір відповідної схеми модуляції для кожної підносійної.

Істотним недоліком алгоритму [1] є те, що рішення про вибір швидкості передавання здійснюється тільки з використанням поточного відношення сигнал-шум. Точність оцінки відношення сигнал-шум є не завжди високою. В результаті вибір типу модуляції і схеми кодування може бути помилковим. Крім того, необхідне значення ймовірності помилки при деякій схемі кодування/модуляції може забезпечуватися при різних значеннях відношення сигнал-шум в залежності від умов розповсюдження сигналу (частота федингу, ширина інтервалу багатопроблемності і т. д.).

У [2] пропонується підхід, що полягає в підстроюванні значень порогів для покращення певних характеристик системи зв'язку, наприклад максимізації пропускної спроможності. При такому підході приймач OFDM сигналу розглядається як керована система, параметрами якої є значення порогів, а цільовою функцією характеристики системи (в даному випадку пропускна спроможність), які необхідно максимізувати.

Цей алгоритм має високу ефективність для досягнення максимальної середньої пропускної спроможності. З іншого боку, в модемі OFDM значення окремого відгуку каналу розповсюдження суттєво змінюється від підносійної до підносійної і від тимчасового символу OFDM до символу. Це призводить до необхідності передавання великого об'єму службової інформації, що містить значення оцінок відношення сигнал-шум для всіх підносійних в каналі зворотного зв'язку. Тому реалізація алгоритму [2] на практиці є ускладненою.

Для вдосконалення механізмів адаптації до каналу при передаванні мультимедійної інформації особливий інтерес викликає алгоритм вибору оптимальних значень параметрів сигналу OFDMA в залежності від стану радіоканалу, тобто алгоритм вибору схеми модуляції і завадостійкого кодування, розглянутого в [3] і частково в [4] і [5]. У розробленому алгоритмі [3] запропонована ітераційна процедура полягає в поступовому відключенні підносійних з малими коефіцієнтами підсилення (великими потужностями ефективного шуму), адаптивному розподілі потужності між активними підносійними з метою вирівнювання передаточної характеристики каналу та виборі коригувального коду, що забезпечує найменшу ймовірність помилкового приймання. Після цього запас за завадостійкістю обмінюється на зменшення загальної потужності випромінювання передавача (тобто потужність зменшується до тих пір, поки ймовірність помилки  $P_{ном}$  не буде дорівнювати допустимому значенню  $P_{ном} \leq P_{ном, доп}$ ). Процедура відключення підносійних продовжуватиметься до тих пір, поки відключення ще однієї підносійної не призведе до збільшення значення ймовірності помилкового приймання в системі.

Вищенаведений алгоритм не є досконалим. По-перше, для цього алгоритму властиві всі недоліки, вказані для алгоритму [1]. Більш того, алгоритм [3] розроблено на основі використання оцінювання частотного відгуку каналу розповсюдження. У деяких системах, що, приміром, використовують диференціальні типи модуляції, немає необхідності використання оцінювання каналу розповсюдження, і відповідні пілот сигнали в структурі сигналу OFDM просто відсутні. Це призводить до складності отримання необхідного оцінювання. У роботі [3] оцінювання характеристик пропускної спроможності виконано для певної моделі каналу розповсюдження. Таким чином, залишається незрозумілим, чи можна цей же підхід використовувати для інших типів каналів розповсюдження. Зазначимо також, що в цьому алгоритмі для прийняття рішення не використано зворотний зв'язок від приймальної сторони до передавальної. В цьому випадку заявлена якість приймання сигналу не може бути гарантованою.

*Метою статті є синтез алгоритму для підвищення надійності зв'язку під час передавання особливо цінної інформації сигналами OFDMA в умовах граничних низьких відношень сигнал-шум багаточастотної системи радіозв'язку та забезпечення необхідної якості приймання.*

**3. Вдосконалений метод визначення оптимальних параметрів сигналів OFDMA в радіомережах FH-OFDMA.** Сутність методики полягає у визначенні значень параметрів сигналу OFDMA засобів радіозв'язку нового покоління для забезпечення надійного зв'язку між приймачем і передавачем сигналів OFDMA під час функціонування в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум багаточастотної системи радіозв'язку та забезпечення необхідної якості приймання.

*Постановка задачі.* Задано: параметри передавального пристрою і каналу зв'язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ ,  $i = 1, 10$  ( $\psi_1 \dots \psi_{10}$  – кількість підносійних), потужність корисного сигналу, відношення сигнал/шум в каналі, робоча частота, вид модуляції, швидкість передавання інформації (необхідна пропускна спроможність), смуга пропускання каналу зв'язку, набір коригувальних кодів з відповідними параметрами: довжина кодової комбінації, швидкість коригувального коду, величина кодової відстані, граничне значення відношення сигнал/шум

в каналі, при якому коригувальний код починає давати вигоду порівняно з модуляцією без кодування Початковий режим роботи, який забезпечує необхідну швидкість передавання інформації  $v_{i, \text{доп}}$  передбачає використання усіх підносійних та найменш швидкісного коригувального коду.

*Необхідно:* визначити оптимальні значення параметрів сигналу (кількість активних підносійних та їх номери, коригувальний код, потужність передавача та її розподіл між підканалами), за яких забезпечується надійний зв'язок між приймачем і передавачем сигналів OFDMA під час функціонування в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум, при виконанні обмежень на значення ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом доп}}$  та швидкість передавання в каналі  $v_i \geq v_{i, \text{доп}}$ .

*Обмеження:* вигляд коригувального коду – згортальні коди зі швидкістю  $R = 0,5 - 0,9$ ; вигляд сигналу – ФМ-2, 4; кількість підносійних  $N = 2048$ ; максимально допустима ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом доп}} = 10^{-5}$  [3].

*Допущення:* стан передавальної характеристики каналу зв'язку  $H_{\text{ЗАГ}}$  перед передаванням чергового символу OFDMA є відомим та не змінним під час передавання символу:

$H_{\text{ЗАГ}} = H_1, H_2, \dots, H_N = \sum_{i=1}^N H_i$ , де  $H_i$  – передавальна характеристика  $i$ -го підканалу;

амплітудна характеристика підсилувача потужності передавача лінійна – нелінійні спотворення сигналу відсутні.

Завдання визначення значень параметрів сигналу OFDMA з максимальними показниками надійності зв'язку  $P_3$  зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд

$$\begin{cases} P_3 = F_1(v_i, \Delta F, M, n, R, d, P_c, N_A) \rightarrow \max; \\ P_{\text{пом}} = F_2(P_c, M, n, R, d, N_A) \leq P_{\text{пом доп}} \\ v_i = F_3(M, R, N_A) \geq v_{i, \text{доп}} \end{cases},$$

де  $n$  – довжина кодової комбінації,  $P_c$  – потужність сигналу,  $M$  – розмірність ансамблю сигналів,  $R$  – швидкість коригувального коду ( $R = k / n$ ),  $k$  – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною  $n$ ,  $d$  – величина кодової відстані,  $N_A$  – кількість активних підносійних,  $\Delta F$  – ширина спектра сигналу.

**Методика визначення оптимальних значень** параметрів сигналу OFDMA, блок-схему алгоритму реалізації якої представлено на Рис. 1, складається з наступних етапів.

*Введення вихідних даних.* Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ , а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом доп}}$  та мінімально необхідної інформаційної швидкості передавання  $v_{i, \text{доп}}$ .

*Оцінка профілю радіоканалу і відношення сигнал/шум.* На даному етапі за допомогою методики, запропонованої в [7], оцінено стан багатопробеневого каналу зв'язку та визначено його передавальну характеристику. Особливості оцінювання імпульсної характеристики (ІХ) каналу на цьому етапі полягають в тому, що при цьому використовується метод напівсліпого оцінювання радіоканалу. Як відомо, включення пілот-символів до потоків даних, що передаються, в значній мірі спрощує завдання оцінювання каналу, але неминуче знижує спектральну ефективність систем зв'язку [7]. Але при цьому сліпі методи оцінювання каналів зовсім не використовують пілот-символи, які є корисними на практиці, так як вони схильні до впливу неоднозначності. Використання пілот-символів в комбінації зі сліпими алгоритмами дозволяє отримати напівсліпі методи з підвищеною точністю оцінювання.

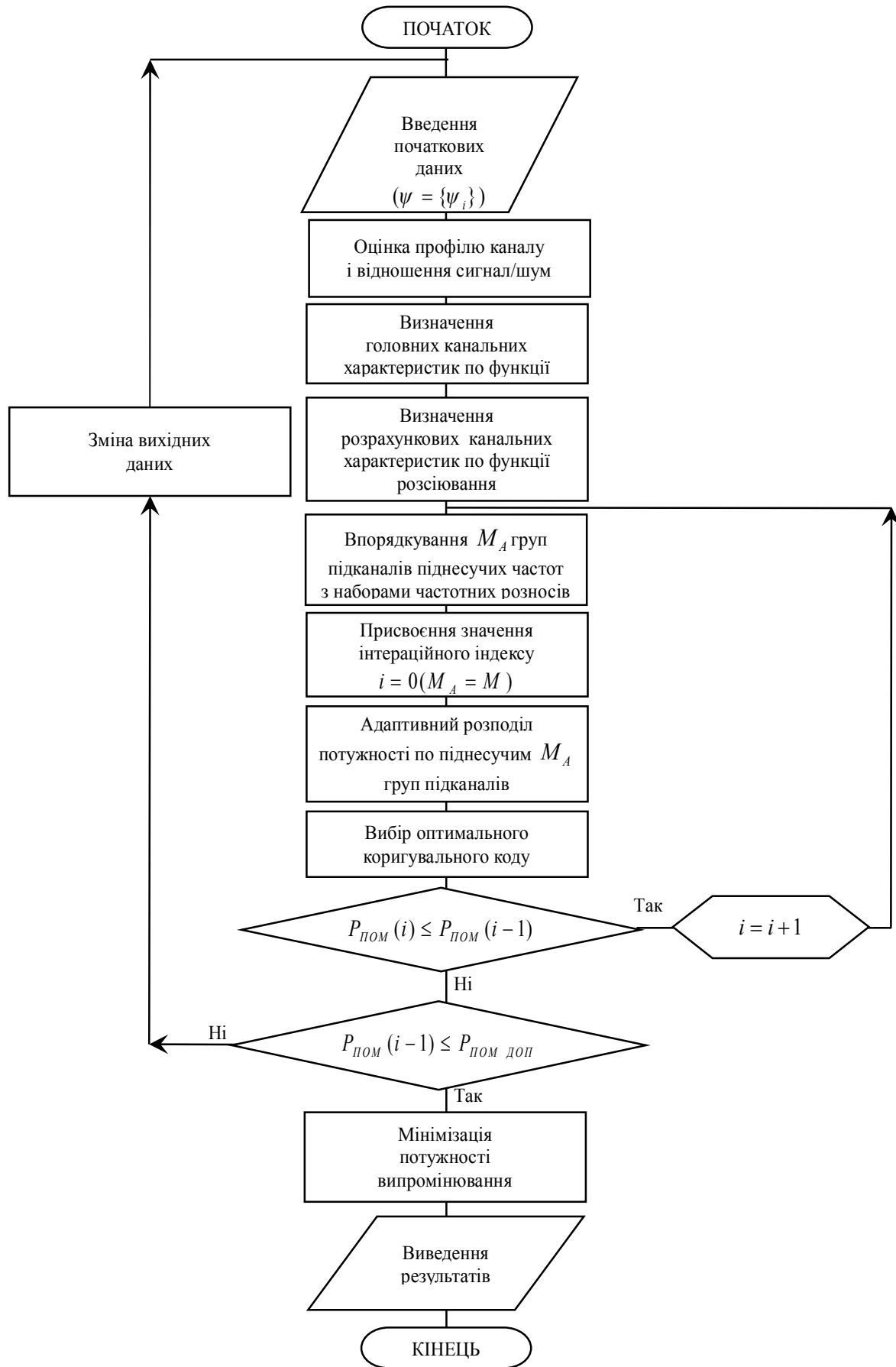


Рис. 1. Блок-схема реалізації алгоритму визначення оптимальних значень параметрів сигналу OFDMA

Блок визначення відношення сигнал-шум для кожного взаємного положення приймальної і передавальної станцій багаточастотної системи радіозв'язку формує оцінювання відношення сигнал-шум, приклад отримання якого описано в [8]. Технічна особливість запропонованого технічного рішення полягає в реалізації попереднього очищення сигналу від адитивного шуму з подальшим оцінюванням реалізацій корисного сигналу в двох паралельних каналах вимірювання, в одному з яких здійснюється оцінювання вхідної реалізації інтервалів сигналу, де рівень сигналу забезпечує стійкий зв'язок, а в іншому – інтервалів завмирання вхідного сигналу з застосуванням процедури «склеювання» розривів оцінювання результуючого сигналу.

*Визначення основних каналних характеристик за функцією розсіювання радіоканалу.*

Функція розсіювання каналу (ФРК) узагальнює в собі властивості доплерівського спектру та спектру затримки і визначає імовірність їх знаходження в заданих інтервалах значень. До основних каналних характеристик відносяться: розширення за величиною часу групового запізнювання, розширення за частотою доплерівського зсуву і відношення сигнал/шум.

Для визначення ФРК спочатку здійснюється оцінювання імпульсної характеристики каналу (етап 2), а далі проводиться знаходження двовимірною перетворення Фур'є. Ця операція виконується з метою визначення ФРК, яка є двовимірною площиною в параметрах (частотне розсіювання, часове розсіювання).

На наступному етапі визначаються розширення в частотній і часовій областях на основі виділеного сигналу. Ці параметри визначаються за допомогою аналізу профілю потужності затримки [9] (профіль інтенсивності багатопробежності) – рис. 2б

$$P_{\tau}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, F_d) dF_d$$

і профілю доплерівської потужності (рис. 2а)

$$P_{F_d}(F_d) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, F_d) d\tau,$$

які визначаються за даними формулами під час інтеграції за відповідними координатами очищеної ФРК (де,  $\tau$  – час запізнювання,  $F_d$  – доплерівський зсув).

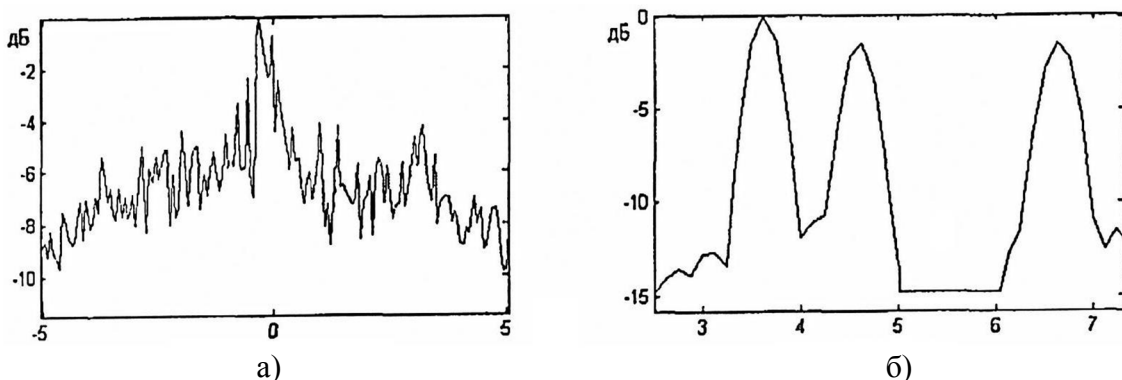


Рис. 2. Профілі потужності: а) доплерівський зсув, Гц; б) затримки, мс

Далі в пропозиції гауссового розподілу розкиду значень проводиться оцінювання шуканих параметрів. Так, розширення за затримкою визначається як

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\tau_k - \bar{\tau})^2 P_{\tau}(\tau_k)}{\sum_{k=1}^M P_{F_d}(F_{dk})}}, \text{ а розширення за Доплером} - \Delta F_d = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (F_{dk} - \bar{F}_d)^2 P_{F_d}(F_{dk})}{\sum_{k=1}^M P_{F_d}(F_{dk})}},$$

де  $N$  та  $M$  – кількість відліків в профілі затримки та в доплерівському профілі відповідно,  $\bar{\tau}$  – середнє значення затримки,  $\bar{F}_d$  – середнє значення доплерівського зсуву.

Визначення розрахункових основних канальних характеристик за функцією розсіювання радіоканалу. На цьому етапі знаходять розрахункове значення частотного і часового розсіювання в радіоканалі як елемент заданої безлічі розрахункових значень відповідності значень частотного і часового розсіювання в радіоканалі, найбільш близьким до знайдених частотних рознесень в групах підносійних, яким за фіксованих умов в каналі відповідає мінімальне відношення сигнал/завада для відповідних видів модуляції. Ці залежності заздалегідь отримують методом комп'ютерного моделювання багаточастотної системи радіозв'язку або аналітично. Приклад таких залежностей, отриманих методом комп'ютерного моделювання, наведено в [10].

Впорядкування  $M_A$  груп підканалів підносійних частот з наборами частотних рознесень. На цьому етапі за результатами оцінювання розрахункових канальних характеристик функції розсіювання каналу проводиться присвоєння порядкових номерів групам підносійних, тобто формується безліч підканалів з різною кількістю підносійних і частотними рознесеннями між ними.

Присвоєння значення ітераційного індексу  $i = 0 (M_A = M)$ . Вибір оптимальних значень параметрів сигналу OFDMA являє собою ітераційну процедуру для позначення номерів кроків, за якої вводиться індекс ітерації  $i$ .

Адаптивний розподіл потужності між активними підносійними. На цьому етапі, в першу чергу, визначається середнє значення  $Q_{cp}^2$  всіх активних підносійних.

Вибір оптимального коригувального коду. На цьому етапі зі скінченої кількості коригувальних кодів, що визначаються вихідними даними, спочатку відбираються ті, що задовольняють вимогам за необхідною інформаційною швидкістю та для яких середнє значення відношення сигнал/шум в каналі перевищує граничне значення  $Q_{cp}^2$ , за якого код починає давати виграш. Потім, шляхом послідовного перебирання за формулою визначається код, який забезпечує найкращу завадостійкість приймання:

$$\begin{cases} v_i(k) \geq v_{i\_доп}, Q_{cp}^2 < Q_{cp}^2(k); \\ P_{ном}(k) = \min. \end{cases}$$

Перевірка умов виконання ітераційної процедури. При цьому розрахункову ймовірність пакетної помилки визначають через залежності ймовірності пакетної помилки від відношення сигнал-шум при різних елементах заданої безлічі розрахункових значень відповідності значень частотного і часового розсіювання в радіоканалі, найбільш близьких до знайдених частотних рознесень в групах підносійних, яким за фіксованих умов в каналі відповідає мінімальне відношення сигнал/завада для відповідних видів модуляції.

Мінімізація потужності випромінювання. На цьому етапі здійснюється зниження сумарної потужності випромінювання передавача до певного порогового значення, за якого ймовірність помилки дорівнює максимально допустимій.

Отже, в результаті виконання вище наведеного алгоритму визначаються оптимальні значення параметрів чергового сигналу OFDMA:  $N_A, K_i, n, k, d, P_c$ , інформація про значення яких у складі службової інформації передається до зустрічної станції.

У відомих методах і методиках [3-5, 10] на основі оцінювання передавальної характеристики каналу зв'язку розподіл підносійних за підканалами, так само як і число підносійних на один підканал, здійснюється тільки з використанням поточного відношення сигнал-шум в порядку зменшення відношення сигнал-шум. У пропонованому вдосконаленому методі визначення оптимального значення частотного рознесення в групі підносійних знаходять на основі аналізу вимірних значень частотного і часового розсіювання в радіоканалі і заданої множини розрахункових значень відповідності значень частотного і часового розсіювання в радіоканалі, найбільш близьких до знайдених частотних рознесень в групах підносійних, яким за фіксованих умов в каналі відповідає мінімальне

відношення сигнал/завада для відповідних видів модуляції. Провівши такі імітаційні вимірювання для всіляких сигнальних конструкцій, використовуваних в багатопробному каналі зв'язку, і маючи дані про частотне і часове розсіювання, отримані за наслідками практичних вимірювань, наприклад як в [11], можна, не змінюючи швидкості передавання, працювати в ширших межах частотного і часового розсіювання в порівнянні з можливостями використання пристроїв з фіксованими параметрами. Це обумовлено тим, що інтегрована характеристична поверхня пристрою, який використовує цей вид адаптації за частотним рознесенням між підносійними, займає в декілька разів більшу площу, чим характеристична поверхня пристрою прототипу. Вибір оптимальної робочої групи підносійних з відповідним частотним рознесенням можна здійснити генетичним методом, приклад розробленого алгоритму на основі якого описано в [6].

Побудовано імітаційну модель системи передавання даних, функціонуючої за алгоритмом багато параметричної адаптації для систем FH-OFDMA в середовищі SystemView [12]. Параметри моделі є такими: вид модуляції - QPSK, число підносійних - 512, тривалість символу OFDMA  $tc = 48$  мкс, тимчасовий дуплекс, канал із завмираннями огинаючої сигналу з розподілом Накагамі. Швидкість стрибків частоти дорівнює 100 перескок/с. Затримка сигналу  $T$  - від 150 до 250 мкс. Тривалість завмирань  $\phi = 0,4 - 4$  мс, тобто, виконано умову  $T + tc \ll \phi$  і огинаюча сигналу практично не піддавалася змінам за час передачі символу. Проведено порівняння ймовірності помилки від середнього відношення сигнал/шум (ОСШ) для випадку комплексування FH-OFDMA на основі розробленого способу і випадку використання OFDMA. Порівняння показало, що запропонований алгоритм забезпечив істотний вииграш завадостійкістю, а саме, при середньому значенні ОСШ 20 дБ ймовірність помилки зменшується більш, ніж в 8-10 разів.

**4. Висновки.** Розроблений вдосконалений метод, на відміну від раніше відомих методів [3,5, 10], дозволяє підвищити надійність зв'язку (зривів зв'язку) при передаванні особливо цінної інформації сигналами OFDMA в умовах гранично низьких відношень сигнал-шум, обмеженої кількості частотних каналів і необхідності забезпечення максимально швидкого передавання даних з мінімальним числом перезапиту неприйнятих пакетів. Зменшення числа перезапиту викликає збільшення сукупної швидкості передавання повідомлення в порівнянні з системою з постійними параметрами сигналу.

Пристрої і комплекси, побудовані за даним методом, можуть застосовуватися в будь-яких системах OFDMA, що функціонують в багатопробневих каналах, наприклад, в системах зв'язку LTE, IEEE 802.16 n та ін.

### Література

1. Arash T. Toyserkani. Sub-carrier based adaptive modulation in HIPERLAN/2 system / Arash T. Toyserkani, Siddharth Naik, Joubran Ayan, Yann Made, Omar Al-Askary // ICC 2004 – IEEE International Conference on Communications. – June 2004. – No. 1. – PP. 3460-3464.
2. Clive Tang. An adaptive learning approach to adaptive OFDM / Clive Tang, Victor Stolpman // WCNC 2004 – IEEE Wireless Communications and Networking Conference. – March 2004. – No. 1. – PP. 1394-1398.
3. Кувшинов О. В. Методика вибору сигнально-кодових конструкцій в системах рухомого радіозв'язку / О.В. Кувшинов // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 30- 34.
4. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія / В.Г. Сайко. – Київ : ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.
5. Сайко В.Г. Адаптивний розподіл підносійних підканалів систем OFDM / В.Г. Сайко // Зв'язок. – 2012. – № 1. – С. 13-17.
6. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.



7. Карташевский В.Г. Оценка импульсной характеристики канала в условиях многолучевого распространения сигналов в беспроводных системах связи нового поколения: методическое пособие / В.Г. Карташевский. – Волгоград : Волгоградский государственный университет, 2013. – 51 с.

8. Патент на корисну модель 108734, Україна, Н 04 В 7/165. Пристрій для вимірювання відношення сигнал/шум в приймальних комплексах адаптивного мобільного радіозв'язку / Сайко В.Г., Наритник Т.М., Грищенко М.М., Бреславський В.О., Лисенко Д.Р., Дакова Л.В. Заявник і патентовласник Державний університет телекомунікацій; заявл.17.02.2016; опубл. 25.07.2016 // Бюл. № 14.

9. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учебное пособие / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – Москва : Эко-Трендз, 2005. – С. 235-274.

10. Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Исследование характеристик OFDM-систем радиосвязи с адаптивным отключением поднесущих / А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Радиопизика. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2007. – № 5. – С. 43-49.

11. Захаров П.Н. Передача информации в условиях многолучевого распространения радиоволн : автореф. дис. на соискание научной степени кандидата физико-математических наук; спец. 01.04.03 – Радиопизика / П.Н. Захаров. – Москва, 2010. – 27 с.

12. Saiko Vladymyr. Multiparameter Adaptation in Cognitive Radio Networks / Saiko Vladymyr // XII науково-практична конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії». Матеріали міжнародної конференції TCSET 2014, присвяченої 170-річчю заснування Національного університету «Львівська політехніка» Львів-Славське, Україна 25 лютого – 1 березня 2014 р. Львів, видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2014. – С. 456.

#### *Автори статті*

**Сайко Володимир Григорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Дікарев Олександр Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (99) 935 23 92. E-mail: dikarev35@list.ru.

**Лисенко Дмитро Олександрович** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (67) 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua.

**Грищенко Людмила Миколаївна** – науковий співробітник кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Дакова Лариса Валеріївна** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (99) 905 31 23. E-mail: l\_dakova@gmail.com.

**Кравченко Владислав Ігорович** – кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

#### *Authors of the article*

**Saiko Volodymyr Hryhorovych** – doctor of sciences (technical), professor, head of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Dikaryev Oleksandr Viktorovych** – candidate of sciences (technical), associate professor of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +38 044 275 86 34. E-mail: dikarev35@list.ru.

**Lysenko Dmytro Oleksandrovych** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (67) 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua.

**Hryshchenko Lyudmyla Mykolayivna** – research assistant of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Dakova Larysa Valeriyivna** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (99) 905 31 23. E-mail: l\_dakova@gmail.com.

**Kravchenko Vladyslav Ihorovych** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel. +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

Дата надходження  
в редакцію: 29.07.2016 р.

Рецензент:  
доктор технічних наук, професор М.М. Климаш  
Національний університет «Львівська політехніка»