

УДК 621.391

СВЕРГУНОВА Ю.О., студент,  
 ЛИСЕЧКО В.П., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту),  
 ЛЕГКА Д.О., магістрант (Національний технічний університет «ХПІ»)

## Метод квазіортогонального частотного мультиплексування на піднесних частотах

У статті вперше запропоновано загальні принципи реалізації методу, заснованого на елементах квазіортогонального частотного мультиплексування каналів. Сутність методу квазіортогонального частотного мультиплексування каналів полягає у використанні індивідуального розподілу частотних піднесних між різними частотними планами в спільній смузі частот, яке дозволяє збільшити пропускну спроможність системи.

**Ключові слова:** квазіортогональне частотне мультиплексування на піднесних частотах, спектральні діри, частотні колізії, смуга частот, частотний план, ансамбль, пропускну здатність каналу.

### Постановка проблеми

Відмінністю систем когнітивного радіо від систем, що експлуатуються в нинішній час є можливість повторного використання частотного ресурсу при низькій ефективності його експлуатації за рахунок застосування інтелектуальних алгоритмів навчання таких систем [5, 7, 8]. При впровадженні та експлуатації систем когнітивного радіо вирішення потребує задача реалізації спільного використання багатьма користувачами когнітивної радіомережі спектральних дір [4, 5]. При одночасному призначенні вторинних користувачів в одній і тій же вільній смузі частот може виникнути явище частотних колізій, що, в свою чергу, може призвести у тому числі і до появи високого рівня внутрішньо системних завад [1, 9]. Для вирішення такої задачі пропонується використати розроблений метод квазіортогонального частотного мультиплексування каналів (Quasiorthogonal frequency-division multiplexing - QOFDM).

### Аналіз літератури

Метод ортогонального частотного мультиплексування каналів (Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM) дозволяє значно підвищити пропускну спроможність системи безпроводового зв'язку [6]. Однак, при динамічній зміні навантаження в когнітивних радіомережах можливе явище частотних колізій, тобто одночасного зайняття різними абонентами однієї й тієї ж частотної смуги, що викликає збільшення рівня внутрішньосистемних завад [1, 5].

Аналіз літературних джерел показав, що методи боротьби з частотними колізіями в когнітивних радіосистемах недостатньо досліджені, тому існує необхідність вирішення задачі протидії та запобігання таких явищ [3].

### Мета статті

Метою статті є розробка методу, заснованого на елементах квазіортогонального частотного мультиплексування каналів, який вирішує задачу спільного використання багатьма користувачами когнітивного радіо одних і тих же спектральних смуг, що дозволить значно знизити імовірність виникнення частотних колізій та дозволить підвищити пропускну здатність каналу.

### Основний матеріал

Запропоновано метод квазіортогональної частотної модуляції (QOFDM) на основі використання індивідуального рознесення піднесних частот для кожного частотного плану. Цей метод дозволяє підвищити пропускну спроможність системи зв'язку за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі неоднакових варіантів розподілу піднесних частот.

Для кожної пари абонентів пропонується використати схему розподілу частот, організовану наступним чином: кількість піднесних для кожної пари абонентів не є сталою, тобто

$$N_1 \neq N_2 \neq \dots \neq N_i \neq \dots \neq N_k. \quad (1)$$

Таким чином, для окремих каналів призначається окрема модуляція з індивідуальним рознесенням піднесних частот:

$$\Delta f_1 \neq \Delta f_2 \neq \dots \neq \Delta f_i \neq \dots \neq \Delta f_k. \quad (2)$$

Аналітичний вираз, який описує квазіортогональне частотне мультиплексування каналів на піднесних частотах, являє собою вдосконалену формулу формування OFDM сигналу [1, 6] і буде мати вигляд

$$S_i(\Delta f_i) = Re \left\{ e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \Delta f_i} \cdot \sum_{k=-\Delta F/2}^{\Delta F/2} C_k \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\Delta f_i - T_s)} \right\}, \quad (3)$$

де  $\Delta f_i$  - інтервал рознесення  $i$ -го частотного плану,

$Re$  - дійсна частина комплексного числа;

$f_0$  - нульова піднесна;

$\Delta F$  - полоса частот;

$C_k$  - комплексне представлення символу QAM;

$T_s$  - період сигналу.

Алгоритм формування ансамблю зображено на рис. 1. Він включає виконання таких операцій:

1. Визначення вихідних даних:

-  $\Delta f$  - інтервал рознесення піднесних частот;

-  $\Delta F$  - смуга частот;

-  $N$  - кількість піднесних частот на заданій смузі частот  $\Delta F$ ;

2. Формування всіх частотних планів з заданими параметрами:

інтервал рознесення піднесних частот для кожного сигналу буде визначатись як відношення ширини спектру  $\Delta F$ , який займає лінійний сигнал до кількості піднесних частот у кожному каналі  $N_i$ . Інтервал рознесення розраховується за виразом

$$\Delta f_i = \frac{\Delta F}{N_i}, \text{ Гц}; \quad (4)$$

відстань між піднесними частотами буде різною. Якщо окремо розглядати сигнали, то кожний сигнал формується за технологією OFDM, зі своїм частотним інтервалом. Але, якщо розглядати одразу всю сукупність сигналів, то всі сигнали в ансамблі будуть мати різні значення інтервалу рознесення піднесних частот  $\Delta f$  та  $N$ , але передаватися в однаковій смузі частот  $\Delta F$ .

3. Попарне порівняння частотних планів для знаходження частотних позицій, які співпали.

4. Визначення кількості частотних позицій, які співпали в кожному частотному плані:

визначення частотних позицій, які співпали шляхом порівняння частотних планів один з одним.

При цьому, порівнюючи два частотних плана один з одним, співпадає хоча б одна частотна позиція;

$K$  - кількість частотних планів в ансамблі,

$d_{ij}$  - кількість частотних позицій, які співпали.

5. Якщо  $d_{ij} \geq K$ , то відбувається видалення з ансамблю  $i$ -ого частотного плану, при порівнянні з яким виникло більше всього співпадінь, після чого знову відбувається попарне порівняння частотних планів.

6. Якщо  $d_{ij} < K$ , то  $i$ -ий частотний план вноситься до ансамблю.

7. Частотний план вноситься до ансамблю.

8. Ансамбль приймається для синтезу сигналів.

Отримані частотні плани використовуються для формування ансамблю, останній приймається для синтезу сигналів.

В результаті неоднакових варіантів розподілу піднесних частот виникає задача визначення частотних позицій для різних частотних планів ансамблю. Для вирішення такої задачі було використано вирази (5),(6),(7).

Коефіцієнт співпадіння визначається на проміжку смуги частот від  $F_i$  до  $F_j$  добутку  $i$ -го та  $j$ -го частотних планів з кроком між позиціями в  $j$ -ому частотному плані  $\Delta_j$ , із врахуванням [2, 3]

$$B_{ij}(\Delta f) = \int_{F_i}^{F_j} S_i(\Delta f_i) \cdot S_j(\Delta f_i - \Delta_j) d\Delta f, \quad (5)$$

де  $B_{ij}(\Delta f)$  - функція взаємної кореляції;

$\Delta_j$  - крок між позиціями в  $j$ -ому частотному плані.

При цьому, для планів з неоднаковою кількістю частотних позицій повинна виконуватись умова [2]

$$B_{ij} \leq \frac{1}{\sqrt{N_i \cdot N_j}}, \quad (6)$$

Якщо умова (6) виконується, то одночасно буде співпадати не більше ніж по одній позиції у кожній із двох порівнюваних послідовностей.

Роботоздатність запропонованого методу ілюструється прикладом, в якому використано чотири частотних плана з різною кількістю піднесних частот  $N_1 = 241$ ,  $N_2 = 247$ ,  $N_3 = 251$ ,  $N_4 = 255$  та інтервалами між ними в частотній області для кожного плану відповідно:  $\Delta f_1 = 20700 \text{ Гц}$ ,  $\Delta f_2 = 20240 \text{ Гц}$ ,  $\Delta f_3 = 19920 \text{ Гц}$ ,  $\Delta f_4 = 19600 \text{ Гц}$ , визначеними на смузі частот  $\Delta F = 5 \text{ МГц}$ .

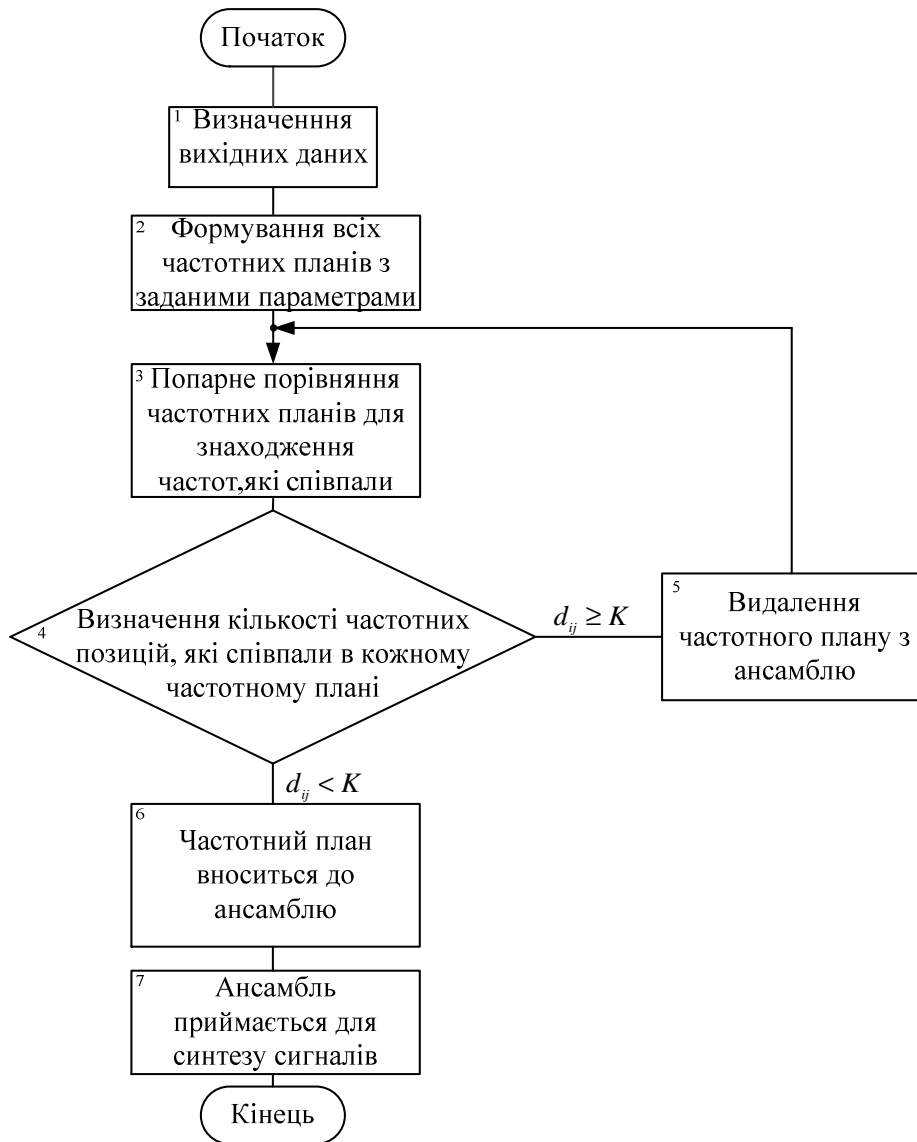


Рис. 1. Алгоритм формування ансамблю

Ілюстрацію ансамблю з 4-х частотних планів наведено на рис. 2. Ці частотні плани передаються в каналі в спільній смузі частот. Якщо розглядати кожен частотний план окремо, то він формується за технологією OFDM, тобто частотний план має однакове значення частотного інтервалу між позиціями піднесних частот. Але, в межах всього ансамблю, кількість частотних позицій для кожного плану є різною, тоді можна казати, що частотні плани будуть формуватися за технологією QOFDM.

Частотні позиції, які співпали при порівнянні першого та другого, першого та третього, першого та четвертого сигналів позначаються вертикальними стрілками відповідно.

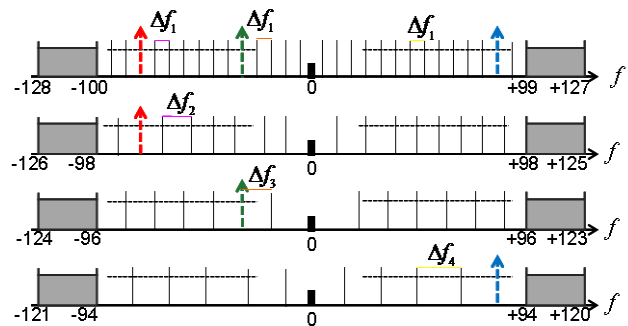


Рис. 2. Схема частотного розподілу піднесних

Результати моделювання чотирьох частотних планів занесені до табл. 1.

Таблиця 1

**Приклад розподілу піднесних**

Параметр	Значення			
Ширина полоси частот, МГц	5	5	5	5
Кількість захисних інтервалів	53	55	55	56
Кількість пілотних частот	8	8	8	8
Кількість піднесних частот	241	247	251	255
Інтервал рознесення піднесних частот, Гц	20700	20240	19920	19600

Результати моделювання у вигляді структури системи, яка складається з чотирьох сигналів QOFDM представлена у вигляді трьохвимірного графіку, зображеного на рис. 3. Графік представляє собою залежність сигналів  $S(f, N)$  від частоти  $f$  та від кількості піднесних частот в кожному частотному плані  $N$ . На рисунку позначено відповідні інтервали рознесення між піднесними  $\Delta f_i$  на всіх частотних планах. Кожен з  $\Delta f_i$  задовольняє виразу (3).

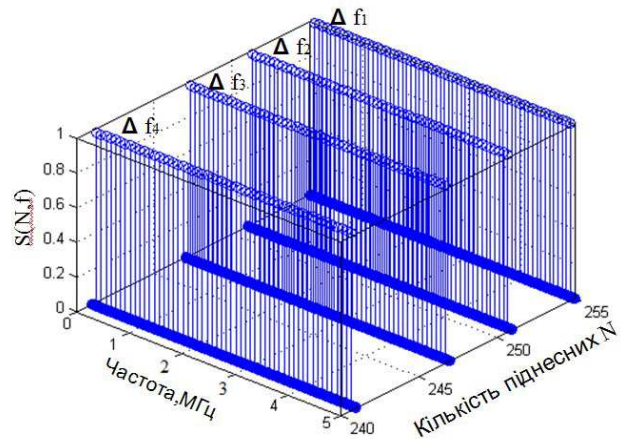


Рис. 3. Структура системи, яка складається з чотирьох сигналів QOFDM

З метою перевірки кількості співпадінь було побудовано залежність коефіцієнтів взаємної кореляції (КВК) від кількості піднесних частот в кожному частотному плані, наведена на рис. 4. З рисунку видно, що ця залежність задовольняє вимозі (6), тобто одночасно співпадає не більше ніж по одній позиції у кожній із двох порівнюваних послідовностей.

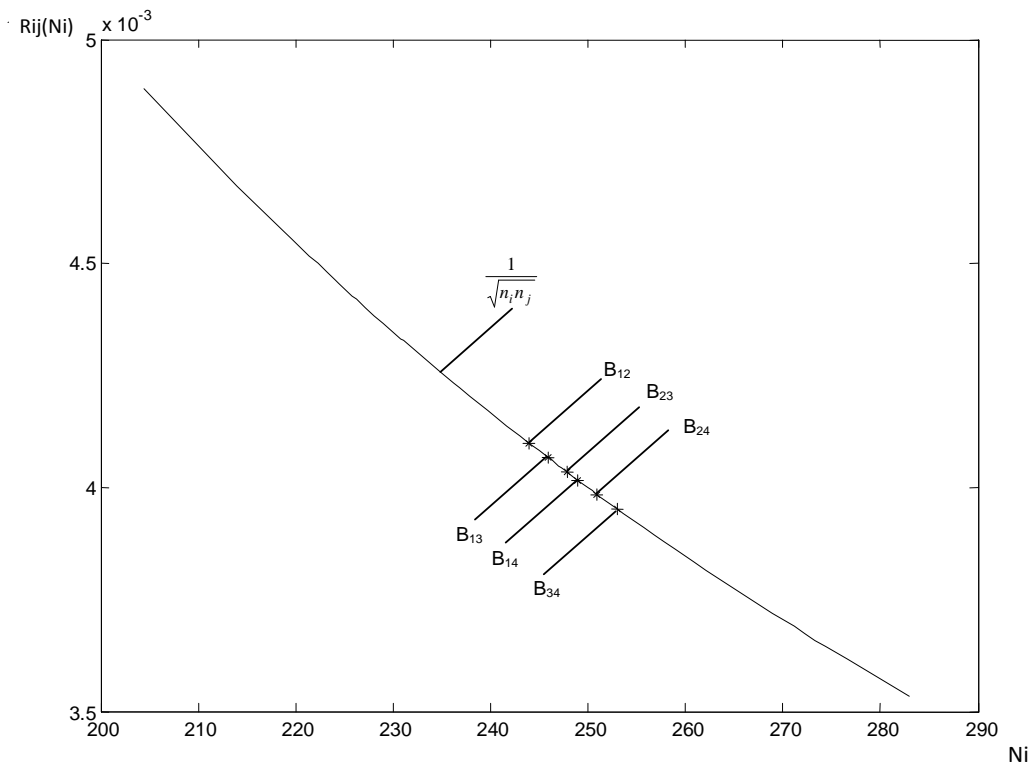


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів взаємної кореляції від кількості піднесних частот в кожному частотному плані ансамблю

**Висновки**

Метод квазіортогонального мультиплексування на піднесних дозволяє збільшити пропускну здатність системи зв'язку за рахунок паралельного використання різними абонентами однієї мережі одних і тих же смуг частот при застосуванні неоднакових варіантів розподілу піднесних частот у різних частотних планах. Подальших досліджень також вимагає визначення потенційної пропускну здатності системи зв'язку при застосуванні такого методу, його складності, швидкодії, ефективності використання вільних частотних смуг в системах когнітивного радіо, результати яких планується оприлюднити в наступних публікаціях.

**Література**

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст]: – М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
2. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения [Текст] : – ISBN 978-5-94836-128-4, М.:Техносфера, 2007. – 488 с.
3. Лисечко В.П., Харченко В.Н. Метод борьбы с внутрисистемными радиопомехами [Текст]: Список научных работ, Харків, ХВУ, 2004. –232-237 с.
4. Лисечко В.П. Метод формирования ансамблей сложных сигналов на основе последовательностей с минимальным энергетическим взаимодействием. Системы озброєння і військова техніка. [Текст] : - Х.: ХУПС – Вип.. № 1 (1). 2005. – с.65-68.
5. Лисечко В.П., Корнілова С.Ю., Ухова Є.А. Дослідження методів розподілу частотних ресурсів в когнітивних радіомережах [Текст] : / В.П. Лисечко, С.Ю. Корнілова, Є.А. Ухова / Збірник наукових праць. – Х.: Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба– Вип. 1 (31) –2012. – 137-145 с.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] : Пер. с англ. / Б.Скляр. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
7. J. Mitola III and G.Q. Maguire Jr., "Cognitive Radio [Text] : Making Software Radios More Personal," IEEE Pers. Commun., vol. 6, no. 4, Aug. 1999. - 13-185 pp..
8. Шимків М.В. Метод моніторингу спектру на основі цифрової узгодженої фільтрації [Текст]: Вісник Національного технічного університету //М.В. Шимків, В.П. Лисечко, О.М. Прогонний, А.В. Гуменюк // Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. :НТУ «ХП». - №60 (1033). – 2013. - 127 - 135 с.
9. Cherneva G., Dimkina E. An Invariance of the Performance of Noise-Resistance of Spread Spectrum Signals [Text]: Proceedings of the 9th International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol.5,N 2, . ISSN 2083-6473, Poland - 2011p. - 183-186 pp.

**Свергунова Ю.А., Лысечко В.П., Лёгкая Д.А. Метод квазиортогонального мультиплексирования на поднесущих частотах.** В статье впервые предложены общие принципы реализации метода, основанного на элементах квазиортогональных частотного мультиплексирования каналов. Сущность метода QOFDM заключается в применении индивидуального распределения частотных поднесущих между частотными планами, которое позволяет увеличить пропускную способность системы.

**Ключевые слова:** квазиортогональное мультиплексирование на поднесущих частотах, спектральные дыры, частотные коллизии, полоса частот, частотный план, ансамбль, пропускная способность канала.

**Svergunova Y.A., Lysechko V.P., Lehka D.O. Method of quasiorthogonal frequency division multiplexing on subcarrier frequencies.** The article describes the general principles for the implementation of a method based on the elements of the quasiorthogonal frequency division multiplexing (QOFDM). The essence of QOFDM method lies in the use individual frequency distribution among frequency plans, which can improve the throughput of the system.

**Key words:** quasiorthogonal frequency division multiplexing on subcarrier frequencies, spectrum holes, frequency collision, frequency band, frequency plan, ensemble, channel throughput.

Рецензент д.т.н., професор Альошин Г.В. (УкрДУЗТ)

*Поступила 20.03.2015г.*