

Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО, д-р техн. наук, О.В. КОЛЯДЕНКО, канд. техн. наук, Б.П. МУЛЯР

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ З ПОВТОРНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТ ДЛЯ СИСТЕМ КОГНІТИВНОГО РАДІО

Постановка задачі

Провівши аналіз використання радіочастотного спектру, регуляторні органи в ряді країн, зокрема в США і Великобританії, прийшли до висновку, що більша частина спектра використовується неефективно. Використання спектра залежить від місця і часу, і, крім цього, ліцензійні смуги частот не можуть використовуватися неліцензованими користувачами [1 – 6]. Тому використання спектра, наприклад, безпроводовими технологіями, пристроями малого радіусу дії, було дозволено за умови, що вони не створюють завад і не вимагають захисту від пристроїв, що працюють на первинній основі. У пошуках способу підвищення ефективності використання спектра, а також для забезпечення зв'язку, який змінюється в залежності від мережі і потреб користувачів, вирішено було звернутися до систем когнітивного зв'язку, які, як передбачається, будуть працювати, не створюючи завад і не вимагаючи захисту від інших РЕЗ.

Концепція когнітивного радіо може бути охарактеризована як радіо з вивченням можливостей, тобто як радіо, яке в змозі отримати знання про радіосередовище і коригувати свої експлуатаційні параметри і протоколи відповідно. Властивість когнітивності має на увазі здатність радіосистеми вирішувати такі завдання: перехід від одного стандарту до іншого; використання декількох стандартів; перебудову частоти; можливість участі в динамічному розподілі спектру; можливість до вторинного використання спектра; динамічну оптимізацію ємності; регулювання антен; реконфігурацію транспортної мережі [5, 6].

Відмінною особливістю таких систем, зважаючи на мобільність абонентських станцій (АС), є те, що електромагнітна обстановка (ЕМО) – принципово випадкова. Це вимагає статистичного підходу у вирішенні проблеми ЕМС в угрупованні радіоелектронних засобів.

Будучи системами з многостаніонарним доступом, мережі когнітивного радіо (МКР) використовують всі основні різновиди та методи цього доступу: FDMA – Frequency Division Multiple Access – багатостанційний доступ з частотним розподілом, TDMA – Time Division Multiple Access – багатостанційний доступ з часовим розподілом, CDMA – Code Division Multiple Access – багатостанційний доступ з кодовим розподілом.

При FDMA використовуються методи частотного розподілу ресурсу в залежності від сигнально-завадової обстановки (СЗО) в каналі зв'язку. Але при такому рішенні завдання ЕМС може виявитися, що частотний ресурс розподілений не оптимальним чином. На етапі функціонування МКР при розподілі частотного ресурсу між АС актуальною є задача мінімізації смуги частот. В умовах постійно зростаючого попиту на смуги частот постановка такого завдання обумовлена необхідністю підвищення ефективного використання радіочастотного спектру із застосуванням методів повторного використання частот (ПВЧ).

В роботі запропонований метод забезпечення ПВЧ, заснований на отриманні оцінок взаємних відстаней між АС в реальному масштабі часу.

Оцінка взаємних відстаней між АС

Для оцінки взаємних відстаней між АС необхідно визначити кути приходу сигналу до базової станції (БС) від АС, оцінити відстані між БС і АС і визначити координати місця розташування АС.

В роботі [7] запропоновано рекурсивну процедуру оцінки просторового спектра. Переходячи від одного просторового вікна до іншого, ми на кожному переході формуємо нулі

діаграми спрямованості, орієнтовані на інші напрямки приходу сигналів.

Процедура складається з трьох основних рекурсивних складових:

- виділення просторового вікна;
- подавлення сигналів, що приходять з усіх невиділених напрямків;
- рекурсивне визначення позначки відповідності амплітуди і просторової фази в виділеному вікні $P(k, \theta)$, де k – час, θ – кут приходу сигналу.

Оцінка відстаней між АС і БС може бути здійснена декількома способами [8].

У разі розташування АС поблизу БС оцінка відстаней визначається з рівняння передачі:

$$r_i = \frac{\lambda \sqrt{\frac{P_{nepi} G_{nepi} G_{np}}{P_{np} \eta_{nepi} \eta_{np}}}}{4\pi}, \quad (1)$$

де P_{nepi} – потужність передавача i -ї АС; P_{np} – потужність сигналу, що приймається; G_{nepi}, G_{np} – відповідно: коефіцієнти підсилення передавальної i -ї АС і приймальної БС антен; λ – довжина хвилі; η_{np}, η_{nepi} – коефіцієнти корисної дії приймального БС і передавального i -ї АС фідерів.

У разі розташування АС на межі обслуговування базових станцій оцінка відстаней визначається з рівнянь (рис.1):

$$\begin{aligned} r_1 &= r_0 \frac{\sin \theta_2}{\sin(180 - \theta_1 - \theta_2)}, \\ r_2 &= r_0 \frac{\sin \theta_1}{\sin(180 - \theta_1 - \theta_2)}, \end{aligned} \quad (2)$$

де r_0 – відстань між БС; θ_1 і θ_2 – кути приходу сигналу від АС до БС₁ і БС₂ відповідно.

Оцінка координат рухомого джерела сигналу АС_{*i*} (рис. 2) проводиться згідно з виразами:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + r_i \cos \theta_i, \\ y_i &= y_0 + r_i \sin \theta_i, \end{aligned} \quad (3)$$

де x_0, y_0 координати БС; r_i – відстань між АС_{*i*} і БС; θ_i – кут приходу сигналу від АС_{*i*}.

Оцінка взаємних відстаней $\|R_{ij}\|$ між АС проводиться згідно з

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i \neq j. \quad (4)$$

Метод оптимізації розподілу частотного ресурсу

Задача оптимізації смуги частот формулюється таким чином [8, 9]. Відомо на даний момент розташування в просторі АС в зоні обслуговування БС у вигляді матриці взаємних відстаней $\|R_{ij}\|, i, j = 1, 2, \dots, M$. Умови спільного використання АС в зоні обслуговування БС визначаються функцією частотно-територіального розносу (ЧТР), яка при розгляді тільки основних і позасмугових характеристик випромінювання і прийому являє собою монотонно

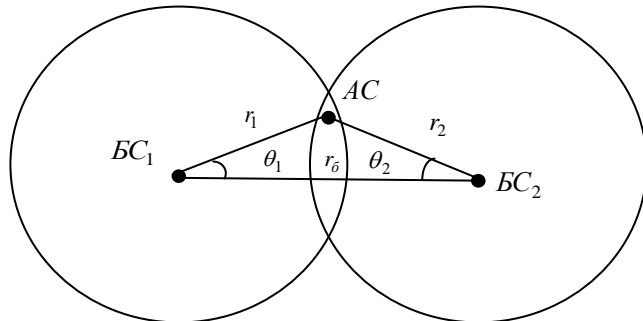


Рис. 1. До задачі визначення відстаней між АС і БС

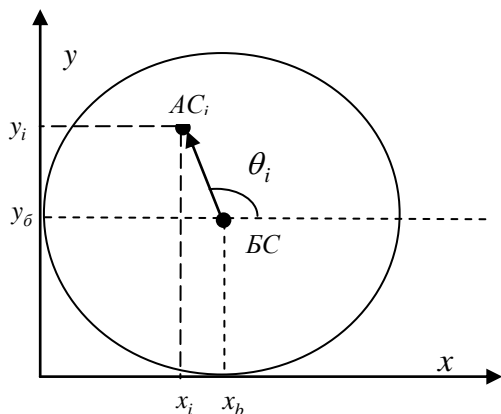


Рис. 2. До задачі визначення координат АС_{*i*}

спадну функцію допустимої розстройки робочих частот АС Δf від їх взаємного видалення R :

$$\Delta f = g(R). \quad (5)$$

Кожній i -й АС потрібно присвоїти робочу частоту $f_i, i=1,2,\dots,M$ так, щоб при виконанні умов ЕМС займана ними смуга частот

$$\Delta F = \max_{1 \leq i \leq M} f_i - \min_{1 \leq i \leq M} f_i \quad (6)$$

була мінімальною, а її мінімальне значення відповідало б заданій частоті:

$$f_{\min} = 2f_{\text{сеп}} - \max_{1 \leq i \leq M} f_i, \quad (7)$$

де $f_{\text{сеп}}$ – середнє значення частоти.

За відомою матрицею взаємних відстаней $\|R_{ij}\|$ і заданою функцією частотно-територіального розносу (5) умови ЕМС АС в зоні обслуговування БС можна записати у вигляді матриці допустимих частотних розстроювань між АС $\|\Delta f_{ij}\|$, елементи якої обмежують вибір робочих частот за допомогою співвідношень:

$$|f_i - f_j| \geq \Delta f_{ij}, (\Delta f_{ij} = g(R_{ij}), i, j = 1, 2, \dots, M, i \neq j). \quad (8)$$

Тоді математичне формулювання даної задачі можна надати таким чином. В області, яка визначається обмеженнями (7) і (8), необхідно знайти такі значення змінних f_i , при яких цільова функція (6) приймає найменше значення.

В даному випадку умовою локальної оптимальності є те, що робоча частота, яка присвоюється черговій АС, повинна бути найближчою до присвоєної на попередньому кроці частоти за умови співвідношень (8).

Суть цього алгоритму полягає в наступному [9]. Нехай в результаті виконання k кроків алгоритму ($1 \leq k \leq M-1$) маємо такий розподіл частот $0 = f_{v_1} \leq f_{v_2} \leq \dots \leq f_{v_k}$, де v_i – номери АС, яким присвоєно частоти f_{v_i} ($i=1, \dots, k$). Тоді відповідно до умови локальної оптимізації номер v_{k+1} чергової АС на $k+1$ кроці алгоритму визначається зі співвідношення:

$$v_{k+1} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq v_1, \dots, v_k}} \max_{1 \leq l \leq k} (\Delta f_{iv_l} - f_{v_k} + f_{v_l}), \quad (9)$$

де Δf_{iv_l} – розстройка частот між i -ю АС (станція, якій не присвоєна частота) і v_l АС (станція, якій присвоєна частота); f_{v_k} – частота, яка присвоєна на k -му кроці; f_{v_l} – частота, яка присвоєна v_l -й станції.

Таким чином, визначаються максимальні елементи в кожному стовпці матриці частотних розстроювань $(\Delta f_{iv_l} - f_{v_k} + f_{v_l})$ між АС з уже присвоєною частотою і не присвоєною і потім знаходиться мінімальний елемент. Він і визначає номер v_{k+1} чергової АС.

Положення на частотній осі

$$f_{v_{k+1}} = f_{v_k} + \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq v_1, \dots, v_k}} \max_{1 \leq l \leq k} (\Delta f_{iv_l} - f_{v_k} + f_{v_l}). \quad (10)$$

В якості початкової точки вибирається довільний номер АС. Для виконання умови задачі оптимізації смуги частот необхідно всі отримані частоти збільшити на f_{\min} , що не порушить виконання співвідношень (8).

Структурна схема алгоритму розподілу частотного ресурсу надана на рис.3.

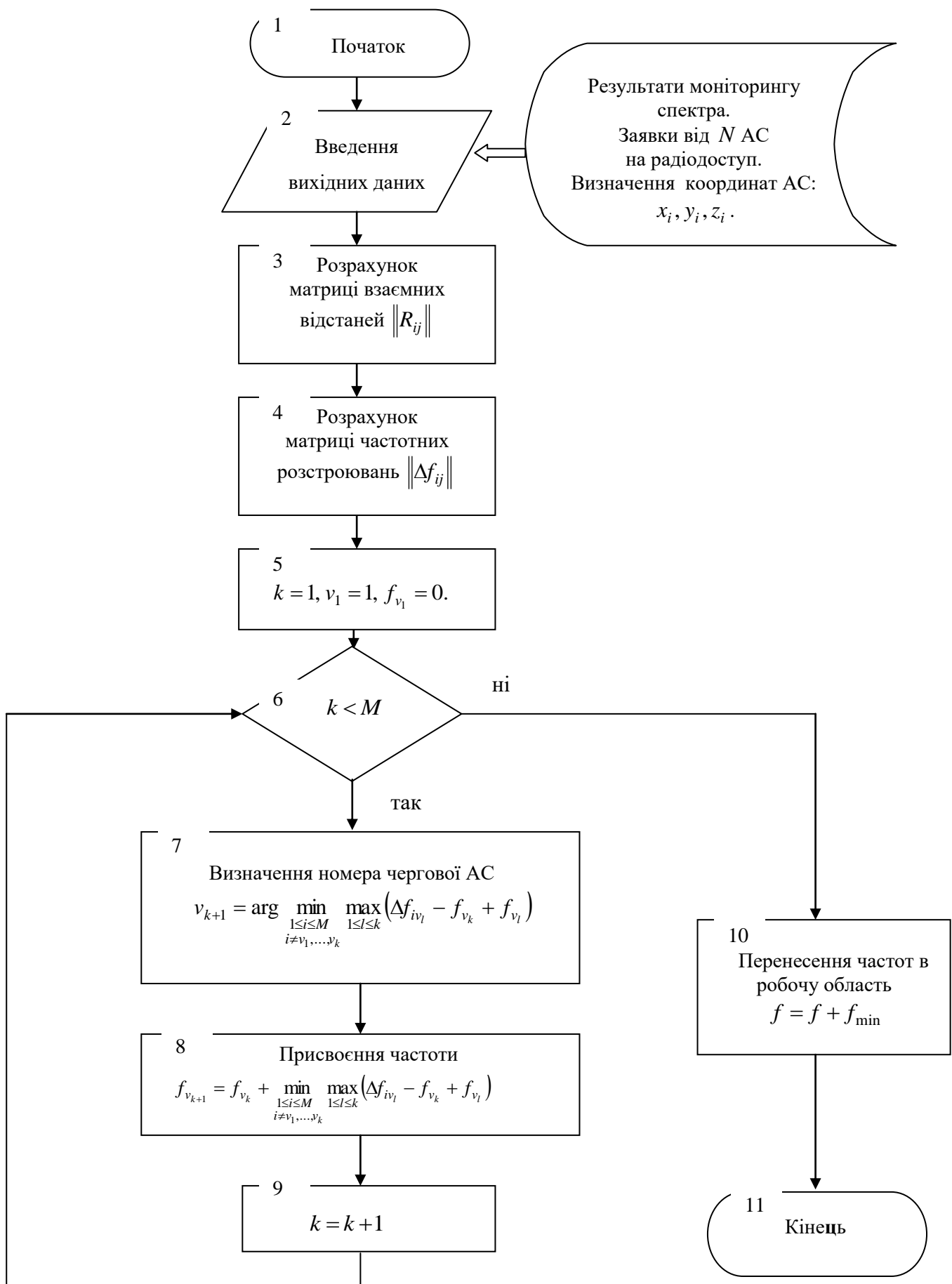


Рис. 3. Структурна схема алгоритму розподілу частотного ресурсу з повторним використанням частот

Аналіз ефективності методу оптимізації розподілу частотного ресурсу

Для аналізу ефективності методу оптимізації розподілу частотного ресурсу використано мережу LTE. Мережі LTE використовують технологію OFDM. Вилучення заборонених частот із загальної смуги частот мережі відбувається наступним чином. Символ OFDM – це група піднесійних частот, яка в даний момент переносить біти паралельних цифрових потоків. Комплексна огинаюча одного OFDM-символу тривалістю T , який починається в момент часу $k\Delta t$, має вигляд [14]:

$$\dot{U}_{ck} = \dot{U}_c(k\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \dot{U}_i e^{j i k \frac{2\pi}{N}}, \quad (11)$$

де \dot{U}_i – комплексний символ, який визначає амплітуду і початкову фазу i -ї піднесійної OFDM-сигналу; N – число піднесійних в OFDM-символі.

У разі, коли відомо, на яких частотах не можна вести передачу даних в мережі, треба вилучити випромінювання на цих частотах, попередньо перерахувавши, які піднесійні збігаються з забороненими частотами. Якщо потрібно вилучити випромінювання на i -й частоті мережі, то при формуванні OFDM-символу потрібно \dot{U}_i прирівняти до нуля. Рознос між піднесійними частотами становить 15 кГц.

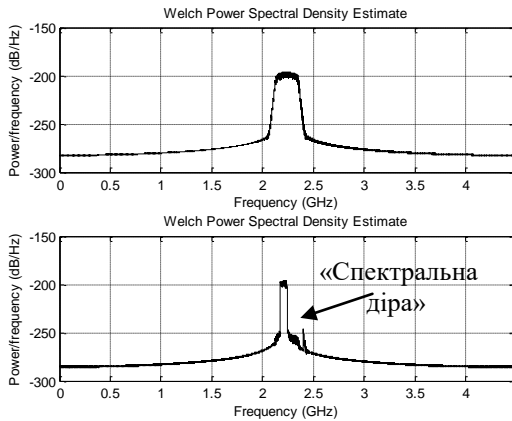


Рис. 4. Результат моніторингу спектра мережі LTE

Для оцінки ефективності алгоритму (10) проведено обчислювальний експеримент на ЕОМ. Нехай в результаті моніторингу спектра не зайнятою смугою частот виявилася смуга від 2,25 ГГц до 2,5 ГГц виділена для передачі АС в напрямку БС. Смуга в межах від 2,1 ГГц до 2,2 ГГц виявилася зайнятою. Таким чином, в діапазоні від 2,25 ГГц до 2,5 ГГц з'явилася так звана «спектральна діра». Результати моніторингу надано на рис. 4. Вгорі на рис. 4 відображена повністю зайнята смуга.

за гаусівським законом розподілу. Приклад розташування АС показано на рис.5.

Розрахунок матриці взаємних відстаней $\|R_{ij}\|$ між АС проводився згідно виразу:

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2},$$

де x_i , y_i , z_i – координати розташування i -ї АС.

Матриця допустимих частотних розстроювань формувалася за допомогою матриці взаємних відстаней $\|R_{ij}\|$ і функції частотно-територіального рознесення:

Для математичного моделювання координати розташування АС вибиралися випадковим чином

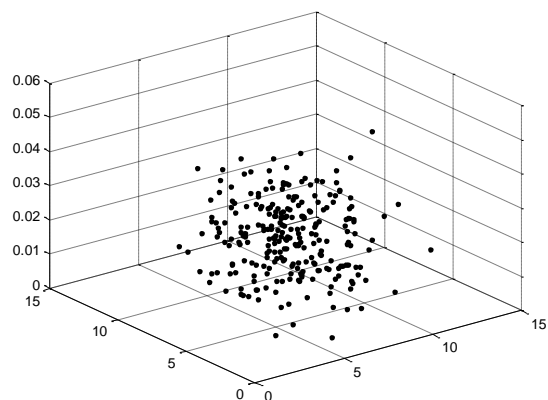


Рис. 5. Розташування АС в зоні обслуговування БС мережі LTE

$$\Delta f_{ij}(d) = \begin{cases} 15 \text{ кГц}, & 0 < R_{ij} < 0.2 \text{ км}; \\ 6 \sqrt{\frac{0,25}{d_{ij}^2} - 1} \text{ кГц}, & 0,2 \leq R_{ij} < 0,5 \text{ км}; \\ 0, & R_{ij} > 0,5 \text{ км}. \end{cases} \quad (12)$$

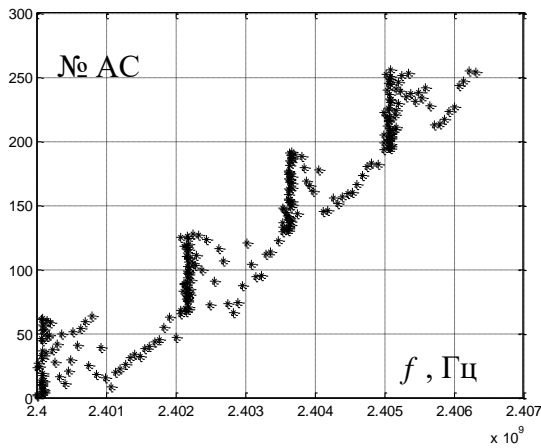


Рис. 6. Результат присвоєння частот АС мережі LTE

ких станцій мережі LTE. Верхня крива на даному рисунку відповідає випадку розподілу частотного ресурсу без використання запропонованого методу, а нижня крива – з використанням методу повторного використання частот. При цьому як видно з рис. 7, при розподілі частот між 64 АС смуга частот зменшується на 2,6623 МГц. При розподілі частот між 128 АС смуга частот зменшується на 5,2996 МГц. При розподілі частот між 192 АС смуга частот зменшується на 9,0163 МГц. А при розподілі частот між 256 АС смуга частот зменшується на 11,92 МГц. Таким чином, можна зробити висновок про те, що з ростом числа одночасно обслуговуваних АС ефективність методу підвищується.

Висновки

Запропоновано алгоритм розв'язання задачі оптимізації розподілу частотного ресурсу для мережі когнітивного радіо з повторним використанням частот. В основі алгоритму лежить метод локальної оптимізації – один з наближених методів дискретного програмування. В даному випадку умовою локальної оптимальності є те, що робоча частота, яка присвоюється черговій АС, повинна бути найближчою до присвоєної на попередньому кроці частоти.

За допомогою імітаційного моделювання проведено аналіз ефективності алгоритму оптимізації розподілу частотного ресурсу для мережі LTE. Отримано залежності ширини смуги частот від кількості АС, що обслуговуються. Аналіз показав, що використання даного алгоритму дозволяє в два-три рази скоротити смугу частот. Також можна зробити висновок про те, що з ростом числа АС, які одночасно обслуговуються, ефективність алгоритму підвищується.

Відповідно з розглянутим алгоритмом і функцією частотно-територіального рознесення, розташованих випадковим чином АС в просторі (рис. 5), проведено розподіл частотного ресурсу між АС в діапазоні від 2,5 до 2,5072 ГГц з відповідним присвоєнням їм частот.

Приклад такого присвоєння частот показано на рис. 6. При цьому, як видно з рис. 6, в межах вільного частотного діапазону виділено 256 додаткових каналів, що дозволяє значно збільшити кількість АС, що обслуговуються.

На рис. 7. надана залежність ширини смуги частот від кількості обслуговуваних абонентсь-

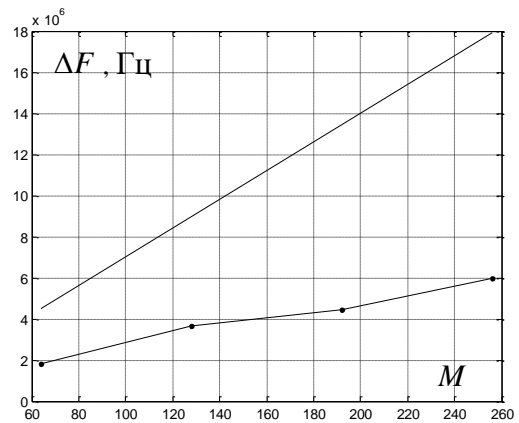


Рис. 7. Залежність ширини смуги частот ΔF від кількості абонентських станцій M мережі LTE

Список літератури:

1. Tafazolli R. (ed) (2006): Technologies for the Wireless Future, volume DOI:<https://doi.org/10.1002/0470030453>
2. Wireless World Research Forum, (WWRF), John Wiley & Sons, Chichester, England. 2. Burns P. SDR For 3G. Boston, Artech House, 2003. 279 p.
3. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowers wireless communications // IEEE Journal Selected Areas in Communication, vol. 23, no. 2, February 2005. DOI:<https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
4. Стандарты ETSI TR 102 682 V1.1.1 (2009-07), ETSI TR 102 683 V1.1.1 (2009-09), ETSI TR 102 745 V1.1.1 (2009-10), ETSI TR 102 838 V1.1.1 (2009-10).
5. Mitola J. III and Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // IEEE Personal Communications. Vol. 6. No. 4. Aug. 1999. P. 13–18. DOI:<https://doi.org/10.1109/98.788210>
6. Mitola J. III. Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications // Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99). IEEE International Workshop, San Diego, CA, USA, Nov. 1999. P. 3–10.
7. Коляденко Ю.Ю. Рекурсивная процедура оценки пространственного спектра сигналов в задачах управления базисом наблюдения для сотовых систем связи // Радиотехника. 2004. Вып. 138. С. 20–24.
8. Коляденко Ю.Ю. Оптимизация распределения частотного ресурса в системах сотовой подвижной связи // Праці УНДІРТ. Теоретичний та наук.-практ. журнал радіозв'язку, радіомовлення і телебачення. 2005. № 3 (43). С.80-85.
9. Поповский В. В. Метод обеспечения электромагнитной совместимости при когнитивном распределении частотного ресурса в мобильных системах связи / В. В. Поповский, А. В. Коляденко // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Сер. "Радіоелектроніка та телекомунікації". 2017. №874. С. 25–30.

Надійшла до редколегії 05.02.2021

Відомості про авторів:

Коляденко Юлія Юріївна – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: yuliia.koliadenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0247-2736>

Коляденко Олексій Вадимович – канд. техн. наук, iOS Software Engineer, ФОП Коляденко, Україна; e-mail: kolyadenko.kks@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6374-1664>

Муляр Богдан Петрович – аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: bohdan.muliar@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2204-7091>