

УДК 621.391

В.П. Лисечко<sup>1</sup>, І.І Сопронюк<sup>1</sup>, Ю.О. Степаненко<sup>1</sup>, Н.О. Брюзгіна<sup>2</sup><sup>1</sup>Українська державна академія залізничного транспорту, Харків<sup>2</sup>Донецький інститут залізничного транспорту, Донецьк

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СПЕКТРУ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

У статті досліджуються методи спільного і локального аналізу спектру для виявлення первинного (ліцензованого) користувача в когнітивних радіомережах у каналах з Релеєвськими завмираннями, затінюваннями та адитивним білим шумом. Також було побудовано узагальнену модель когнітивної радіомережі і визначено основні поняття когнітивного радіо.

**Ключові слова:** когнітивне радіо, аналіз спектру, білий шум, Релеєвські завмирання, затінювання, функціональні характеристики приймача.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток безпроводових телекомунікаційних систем, таких як: системи стільникового і супутникового радіозв'язку, локальні безпроводові мережі та Інтернет, став причиною різкого збільшення навантаження на обмежені ресурси радіочастотного спектру. У наш час практично весь частотний діапазон розподілений та ліцензований, що в умовах обмеженості частотного ресурсу призводить до його істотного дефіциту. В результаті, впровадження та використання нових видів обслуговування, для роботи яких необхідна наявність вільних частотних діапазонів, стає досить складним, а в деяких випадках зовсім неможливим.

Впровадження технології радіозв'язку з використанням механізмів інтелектуального управління (когнітивне радіо) представляє собою один із підходів для забезпечення більш ефективного використання радіочастотного спектру за рахунок динамічного та гнучкого управління ним.

**Аналіз літератури.** У вітчизняній літературі проблему розгортання когнітивних радіомереж та побудови оптимальних алгоритмів аналізу спектру для точного виявлення первинних (ліцензованих) користувачів недостатньо розглянуто. Тому існує задача дослідження методів та алгоритмів спільного і локального аналізу спектру для виявлення первинного (ліцензованого) користувача в каналах з Релеєвськими завмираннями, затінюваннями та адитивним білим шумом.

**Мета статті** Звичайно, у когнітивних терміналах немає жодних, або є обмежені дані про первинні сигнали; отже оптимальна технологія аналізу спектру – виявлення енергії [1]. Технологія виявлення енергії для аналізу спектру в окремому когнітивному радіо КР (від англ. – *cognitive radio* CR), що описана у статті, відрізняється простотою, відносною легкістю виконання та низькою обчислювальною складністю [2].

Метою статті є побудова узагальненої моделі

когнітивної радіомережі, а також дослідження оптимальних алгоритмів аналізу спектру для виявлення первинного користувача.

### Основний матеріал

#### 1. Основні визначення

Технічною Робочою групою Когнітивного радіо було запропоновано визначення когнітивного радіо (КР) [3]: “Когнітивна система радіозв'язку – радіосистема, що використовує технології, які дозволяють їй отримувати знання про своє робоче та географічне середовище, встановлені правила на своєму внутрішньому становищі, а також динамічно і автономно коректувати свої робочі параметри і протоколи відповідно з отриманими даними для досягнення встановлених цілей, та навчатися по досягнутих результатам”.

Когнітивність означає здатність радіосистеми вирішувати наступні задачі:

- 1) оцінка шумової обстановки радіосередовища, виявлення частин спектру, які не використовуються в даний момент часу;
- 2) аналіз параметрів радіоканалу, оцінка каналної інформації, прогнозування стану радіоканалу;
- 3) контроль випромінюваної потужності та динамічне управління спектром.

Радіоелектронні засоби когнітивної радіомережі для виконання цих функцій повинні мати в своєму складі елемент, який забезпечує формування/обробку радіосигналів (радіоплатформу); елемент, який здійснює спостереження за радіочастотним спектром (моніторинг спектру); елемент, який здійснює аналіз результатів спостережень і навчання системи (когнітивний або інтелектуальний модуль); елемент, який забезпечує нормативну керуваність системи (відповідно до встановлених цілей, правил та методів управління спектром), і елемент, який накопичує знання та отримані дані (база даних). Структурна схема РЕЗ КР, яка виконує дані функції, приведена на рис. 1.

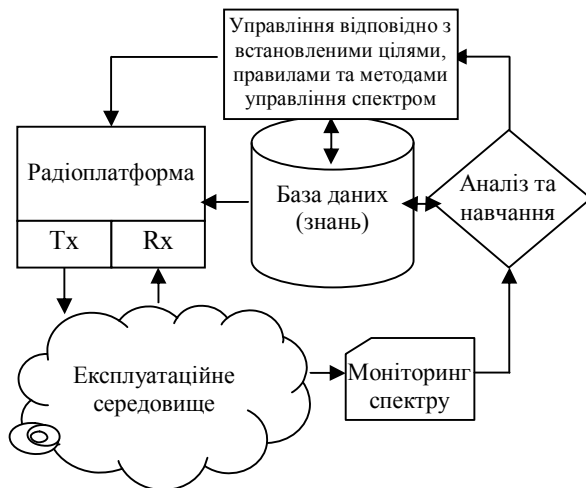


Рис. 1. Структурна схема РЕЗ КР

По методам аналізу робочого середовища системи КР діляться на дві категорії:

- 1) системи когнітивного радіо з пасивним аналізом експлуатаційного середовища;
- 2) системи когнітивного радіо з активним аналізом експлуатаційного середовища.

*Пасивний аналіз.* Перевагою пасивних методів є те, що вони можуть забезпечити зв'язок без завад для первинної системи, оскільки для неї використовується визначений априорі. Вторинна система використовує лише ті частоти, які надані первинною системою або повноважним органом. Проте метод пасивного аналізу збільшує кількість інформації, яка необхідна для управління системою. Значний об'єм інформаційного ресурсу системи, в цьому випадку, може бути відведений для передачі інформації про частоти. Крім того, пасивні підходи не сумісні з існуючими системами ліцензування. Вони можуть бути дуже корисні в майбутньому. Відзначимо також, що пасивні методи аналізу можуть бути об'єднані з методами використання спектру по можливості.

*Активний аналіз.* Активний аналіз є способом отримання інформації про поточне використання спектру в експлуатаційному середовищі. В основу метода активного аналізу покладений моніторинг спектру з метою виявлення смуг частот, які використовуються іншими системами. Метод вимагає постійного моніторингу експлуатаційного середовища для того, щоб нові первинні користувачі і можливі вакантні канали були своєчасно виявлені.

Залежно від набору функціональних параметрів, які враховуються при прийнятті рішення, можна виділити наступні типи когнітивних радіосистем (КРС):

- повне когнітивне радіо ("Mitola radio"): у якому всі можливі для спостереження параметри РЕЗ або безпроводової мережі прийняті до уваги;
- когнітивне радіо на основі аналізу спектру, в якому розглядається лише один параметр – зайнятість радіочастотного спектру.

## 2. Модель когнітивної радіомережі

Розглянемо когнітивну радіомережу з  $M$  користувачами ( $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ) та центром комбінування для аналізу частини спектру діапазону "W" з метою виявлення наявності первинного користувача, як показано на рис. 2. Кожний когнітивний радіоприймач обладнаний датчиком енергії і незалежно виконує локальний аналіз спектру. Кожен CR здійснює власне спостереження, опираючись на отриманому сигналі: або лише шум, або сигнал з шумом. Отже, проблему аналізу спектру можна розглядати як проблему аналізу з двома можливими гіпотезами  $H_0$  та  $H_1$ , визначену як [4]:

$$x_i(t) = \begin{cases} n_i(t), & H_0, \\ h_i S(t) + n_i(t), & H_1, \end{cases} \quad (1)$$

де  $S(t)$  є сигналом первинного користувача з рівномірним розподілом і нульовим середнім та дисперсією  $\sigma_S^2$ . Для  $i$ -го вторинного користувача прийнятий шум змодельований як  $n_i(t)$ , який є випадковим процесом з рівномірним розподілом і нульовим середнім та дисперсією  $\sigma_n^2$ , а  $h_i$  – коефіцієнт підсилення каналу між первинним користувачем та  $i$ -м вторинним користувачем.  $S(t)$  та  $n_i(t)$  незалежні один від одного. Потужність, передана первинним користувачем, отримується вторинним користувачем, а відношення отриманої потужності до потужності шуму вторинного користувача визначається як значення відношення сигнал/шум (SNR – від англ. Signal to Noise Ratio) у датчику енергії. Значення SNR на вході приймача у  $i$ -го вторинного користувача визначається як

$$Y_i \cong \frac{E[h_i^2] \sigma_S^2}{\sigma_n^2}. \quad (2)$$

Рис. 2 ілюструє два випадки моделі системи. У першому випадку передавач первинного користувача знаходиться далеко від когнітивної радіомережі, і, отже, у всіх вторинних користувачів на входах приймачів можуть бути прийняті приблизно однакові значення SNR.

У другому випадку первинний користувач знаходиться не далеко від  $M$  вторинних користувачів, і у кожного користувача на вході приймача різне значення SNR, яке залежить від відстані до первинного користувача та умов каналу.

## 3. Локальний аналіз спектру

Ефективність даної схеми аналізу спектру істотно обмежена каналом поширення радіохвиль. Як правило, втрати в радіоканалі можуть бути розділені на три групи: втрати на трасі, швидкі завмирання і повільні завмирання [5].

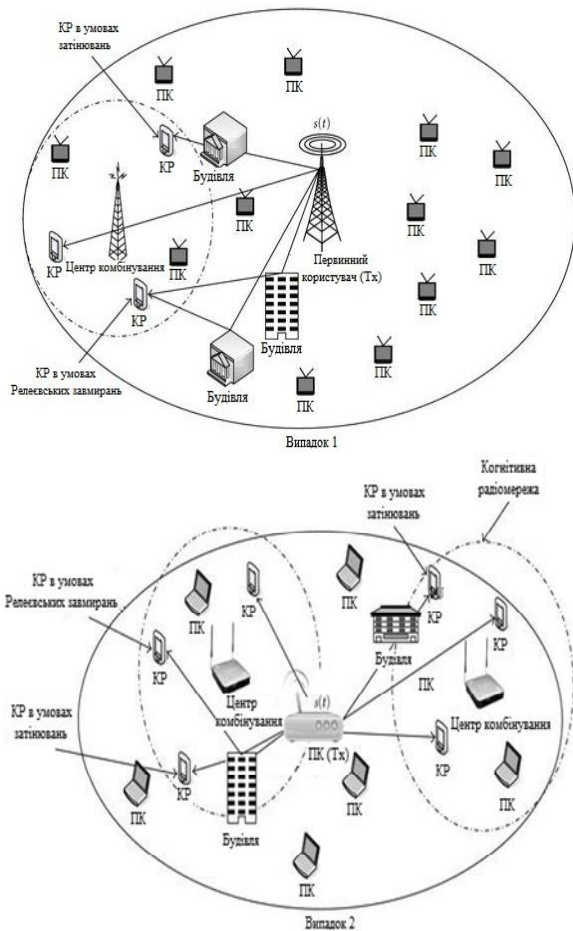


Рис. 2. Два випадки моделі когнітивної мережі

Втрати на трасі враховуються в отриманому значенні SNR в терміналі CR. Швидкі завмирання є випадковою зміною потужності сигналу на вході приймача CR і характеризуються Релеєвським розподілом. Повільні завмирання – повільна зміна потужності прийнятого сигналу. Повільні завмирання часто моделюється як нормальний розподілений випадковий процес із стандартною девіацією, яка залежить від навколишнього середовища [7].

**3.1. Аналіз спектру в каналі з AWGN**

У виявленні енергії, заснованому на аналізі спектру, прийнята радіочастотна енергія в даному каналі або діапазоні частот  $W$  вимірюється по часовому інтервалу  $T$  для визначення наявності сигналу  $S(t)$  первинного користувача. Добуток ширини смуги на час – ціле число і позначається  $N = TW$ . Статистична величина  $U_i$ , розрахована для  $i$ -го користувача:

$$U_i = \sum_{k=1}^N \left| x_i \left( \frac{k}{W} \right) \right|^2, \tag{3}$$

$U_i$  порівнюється із зумовленим порогом  $\lambda_i$  для отримання локального рішення

$$\begin{matrix} H_1 \\ U_i \geq \lambda_i \\ H_0 \end{matrix} \tag{4}$$

Вибір з двох альтернативних рішень позначається як  $D_i$ ;  $D_i = 1$ , при  $U_i > \lambda_i$ ; та  $D_i = 0$  у інших випадках.  $U_i$  – сума квадратів  $N$  Гауссівських випадкових змінних [6].  $U_i$  відповідає централізованому  $\chi^2$ -квдратному розподілу із ступенем  $2N$  згідно з гіпотезою  $H_0$  і децентралізованому  $\chi^2$ -квдратному розподілу із ступенем  $2N$  та параметри нецентрованості  $2N\gamma_i$  згідно гіпотезі  $H_1$ . Тому, щільність розподілу ймовірності випадкової змінної  $U_i$  згідно цим двом гіпотезам може бути визначена як:

$$f_{U_i}(U) = \begin{cases} \frac{U^{N-1} e^{-U/2}}{2^N \Gamma(N)}, & H_0, \\ \frac{1}{2} \left( \frac{U}{2N\gamma_i} \right)^{(N-1)/2} e^{-(U+2N\gamma_i)/2} I_{N-1}(\sqrt{2NU\gamma_i}), & H_1, \end{cases} \tag{5}$$

де  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функція, а  $I_{N-1}(\cdot)$  – змінена функція Бесселя першого вигляду. Для  $i$ -го користувача ймовірність сигналу помилки  $\Pr(H_1|H_0)$ , та виявлення  $\Pr(H_1|H_1)$ , можуть бути отримані з (5) та представлені як

$$P_f^i = \Pr\{U_i > \lambda_i | H_0\} = \frac{\Gamma(N, \lambda_i/2)}{\Gamma(N)}, \tag{6}$$

$$P_d^i = \Pr\{U_i > \lambda_i | H_1\} = Q_N(\sqrt{2N\gamma_i}, \sqrt{\lambda_i}), \tag{7}$$

де  $\Gamma(a, x)$  – неповна гамма-функція,  $Q_N(a, b)$  – узагальнена Q-функція Маркума.

Для спрощення (5) може бути побудована апроксимуюча модель для аналізу спектру. При  $N$ , який прагне до нескінченності (фактично, при  $N \geq 10$  [6]),  $\chi^2$ -квдратний розподіл, визначений в (5), сходиться до нормального розподілу, тобто:

$$U_i \sim \begin{cases} N(N\sigma_i^2, 2N\sigma_i^4), & H_0 \\ N((N + \gamma_i)\sigma_i^2, 2(N + 2\gamma_i)\sigma_i^4), & H_1 \end{cases}, \tag{8}$$

Так само  $P_f^i$  та  $P_d^i$ , визначені в (6) і (7), можуть бути апроксимовані як:

$$P_f^i = Q\left(\frac{\lambda_i - E[U_i | H_0]}{\sqrt{\text{var}[U_i | H_0]}}\right) = Q\left(\frac{\lambda_i - N\sigma_i^2}{\sqrt{2N}\sigma_i^2}\right), \tag{9}$$

$$P_d^i = Q\left(\frac{\lambda_i - E[U_i | H_1]}{\sqrt{\text{var}[U_i | H_1]}}\right) = Q\left(\frac{\lambda_i - (N + \gamma_i)\sigma_i^2}{\sqrt{2(N + 2\gamma_i)}\sigma_i^2}\right),$$

де  $E[\cdot]$  та  $\text{var}[\cdot]$  позначають очікування і дисперсію, відповідно.

**3.2. Аналіз спектру в каналах із завмираннями**

Коли вторинний користувач знаходиться в каналі із завмираннями, коефіцієнт підсилення каналу  $h_i$  для  $i$ -го користувача змінюється через завмирання, а  $P_d^i$  стає умовною ймовірність, що залежить від миттєвого значення відношення сигнал/шум  $Y_i$ . Середня ймовірність виявлення може бути отримана, усереднюючи миттєве значення  $P_f^i$  за статистикою завмирань, де  $f_V(x)$  – значення SNR на вході приймача.

$$P_{d,fading}^i = \int_V P_d^i(x) f_V(x) dx. \quad (10)$$

Якщо канал характеризується Релеєвськими завмираннями (Rayleigh fading), то  $Y_i$  розподілено експоненціально, а  $\bar{Y}_i$  – його середнє значення. Якщо канал характеризується затінюваннями (Shadow fading), то  $Y_i$  – розподілено логнормально, з середнім значенням  $\bar{Y}_i$  і характеризується дисперсією  $\sigma_{dB}$  [4]. Отже,

$$f_{V_i}(x) = \begin{cases} \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{x}{\bar{Y}_i}\right); & \text{Rayleigh\_Fading,} \\ \frac{\xi}{x\sigma_{dB}\sqrt{(2\pi)}} \exp\left(-\frac{10\log_{10}(x) - \mu_{x_{dB}}}{2\sigma_{dB}^2}\right); & \text{Shadow\_Fading,} \end{cases} \quad (11)$$

де  $\xi = 10/\ln(10)$ ,  $\mu_{x_{dB}}$  – середнє з  $x_{dB} = 10\ln(x)$ .

Перетворення від лінійного середнього до середнього логарифмічного (в дБ) може бути отримано як [7]:

$$\mu_{x_{dB}} = 10\log_{10}(\bar{Y}_i) - \frac{\sigma_{dB}^2}{2\xi}. \quad (12)$$

Замінюючи (7) та (11) в (10), для каналу з Релеєвськими завмираннями середня ймовірність виявлення  $i$ -го користувача може бути обчислена як [4]:

$$P_{d,rayl}^i = \int_V \frac{1}{x} Q_N(\sqrt{2N_x}, \sqrt{\lambda_i}) \exp\left(-\frac{x}{\bar{Y}_i}\right) dx = e^{-\lambda_i/2} \sum_{n=0}^{N-2} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_i}{2}\right)^n + \left(\frac{1+\bar{Y}_i}{\bar{Y}_i}\right)^{N-1} \times \left[ e^{-\lambda_i/2(1+\bar{Y}_i)} - e^{-\lambda_i/2} \sum_{n=0}^{N-2} \frac{1}{n!} \frac{\lambda_i \bar{Y}_i}{2(1+\bar{Y}_i)} \right]. \quad (13)$$

Для затінювань [7]:

$$P_{d,shadow}^i = \int_V Q_N(\sqrt{2N_x}, \sqrt{\lambda_i}) \frac{1}{x\sigma_{dB}\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{10\log(x) - \mu_{x_{dB}}}{2\sigma_{dB}^2}\right) dx = \frac{1}{\sigma_{dB}\sqrt{2\pi}} \sum_{x=x_0}^{x_f} Q_N(\sqrt{2N_x}, \sqrt{\lambda_i}) \times \exp\left(-\frac{10\log(x) - \mu_{x_{dB}}}{2\sigma_{dB}^2}\right) \frac{\Delta x}{x}, \quad (14)$$

де  $\Delta x$  та  $x_f$  – вибрані для мінімізації числової помилки апроксимації.

**3.3. Результати моделювання**

Ефективність локального аналізу спектру оцінюється використанням теоретичних результатів і результатів моделювання для побудови графіків функціональних характеристик приймача (графіки ROC – від англ. Receiver Operating Characteristic, графік залежності  $P_m = 1 - P_d$  від  $P_f$ ). У моделюванні ймовірність сигналу помилки і помилки виявлення обчислюється порівнянням результатів аналізу спектру із зумовленим порогом. Передбачається, що  $N = 5$ . Рис. 3 ілюструє графіки ROC для локального аналізу спектру в каналі з AWGN, Релеєвськими завмираннями і затінюваннями при різних значеннях  $\sigma_{dB}$ . Для порівняння представлені результати аналізу спектру в каналі з AWGN, результати моделювання перевірені порівнянням з аналітичними результатами. З рис. 3 видно, що Релеєвські завмирання і затінювання погіршують роботу аналізу спектру. Наприклад, у каналі з Релеєвськими завмираннями для досягнення  $P_m < 10^{-1}$ , де  $P_m = 1 - P_d$ , необхідно  $P_f > 0.4$ , що призводить до неефективного використання спектру і навпаки. Так само з рис. 3 видно, що локальний аналіз спектру є важчим при затінюваннях, а із збільшенням завмирань (або  $\sigma_{dB}$ ), робота датчика погіршується.

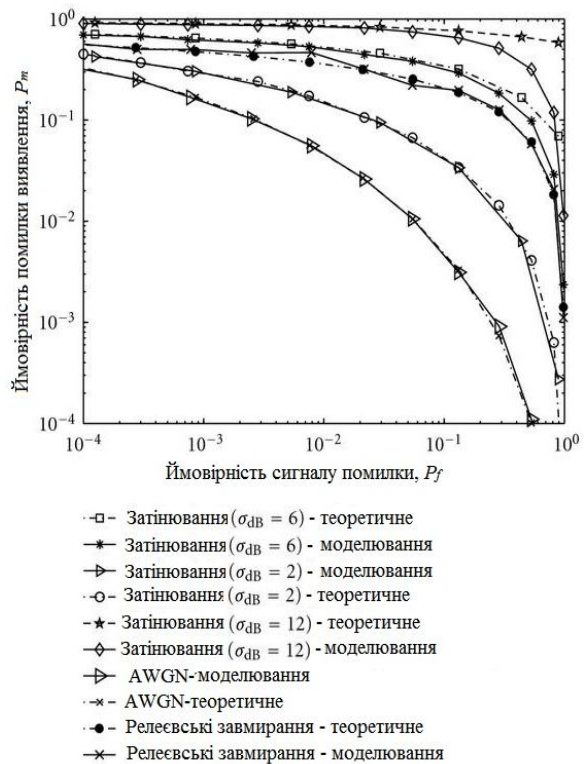


Рис. 3. ROC для локального аналізу спектру в каналах з Релеєвськими завмираннями і затінюваннями при  $Y = 5\text{dB}$ ,  $N=5$

Іншим важливим показником, що характеризує ефективність аналізу спектру, є мінімальне значення SNR, що можна виявити. Цей показник визначається як найнижче значення SNR, яке алгоритм моніторингу спектру здатний виявити з надійністю  $P_f$  та  $P_d$  для даного сигналу первинного користувача, умов поширення і часу спостереження. На рис. 4 представлено мінімальне значення SNR, що можна виявити, при різних умовах каналу для заданого  $P_f = 10^{-1}$ . З рис. 4 видно, що затінювання впливає на роботу датчика сильніше, ніж Релеєвські завмирання. Як показано на рис. 4, для досягнення  $P_f = 10^{-1}$  у даному сценарії, необхідне значення SNR – приблизно 10 дБ.

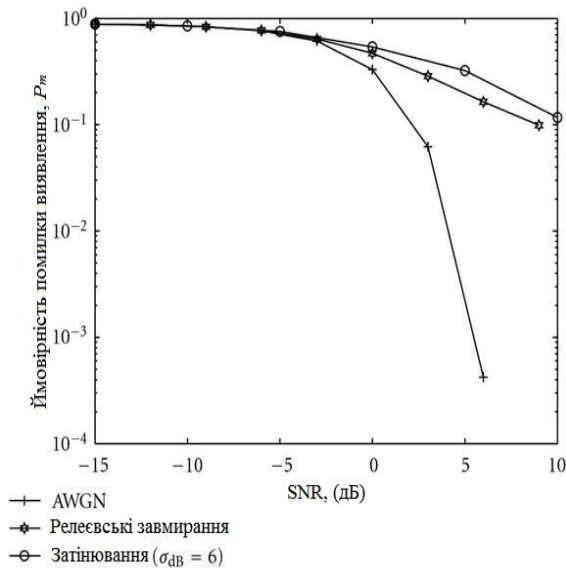


Рис. 4. Залежність ймовірності помилки виявлення від мінімального значення SNR, що можна виявити, в умовах затінювань, при  $P_f = 10^{-1}$ ,  $Y_{дБ} = 5$ ,  $N=5$

#### 4. Спільний аналіз спектру

Як було сказано вище, у локальному аналізі спектру є деякі обмеження, і для бажаного рівня роботи важко виявити сигнали з низьким значенням SNR. Однією з найважливіших проблем серед багатьох інших проблем реалізації когнітивних радіомереж (наприклад, див. [8]) являється проблема «прихованого вузла», коли CR-приймач знаходиться в затінюванні, або глибокому завмиранні [9]. Для вирішення цієї проблеми CR-приймачі повинні взаємодіяти один з одним, щоб прийняти спільне рішення про наявність первинного користувача. У [2] було показано, що спільний аналіз спектру може поліпшити роботу виявлення в каналах із завмираннями. У випадку спільного аналізу спектру кожен вторинний користувач здійснює власний моніторинг спектру, а також може приймати локальне рішення про наявність первинного користувача. Всі вторинні користувачі відправляють свої м'які (локальний ана-

ліз) (SDC) або жорсткі рішення (HDC) на спільний приймач, який часто називають центром комбінування або управління діапазоном. Центр комбінування може бути централізованим або розподіленим. При централізованому спільному аналізі спектру всі вторинні користувачі результати свого аналізу посилають центру комбінування, який може бути точкою доступу у безпроводовій мережі або базовою станцією когнітивної радіомережі. При розподіленому всі вторинні користувачі можуть поводитися як центри комбінування і отримувати інформацію аналізу від сусідніх вузлів. У обох випадках, центр комбінування комбінує зібрані дані про результати аналізу і приймає остаточне рішення про наявність первинних користувачів в спостережуваному діапазоні частот. Результати, представлені в [10, 11], показують, що SDC оптимальніше за HDC з точки зору ймовірності помилки виявлення, тоді як HDC оптимальніше за SDC при великій кількості спільних користувачів [9], а також для HDC необхідний канал управління з низькою пропускнуною спроможністю. При спільному аналізі спектру головним завданням є розділення інформації в межах когнітивної радіомережі і комбінування результатів різних вимірювань.

#### 4.1. Комбінування жорстких рішень HDC

При HDC центр комбінування збирає інформацію у окремих вторинних користувачів, ідентифікує доступний спектр, і потім передає цю інформацію іншим вторинним користувачам. Оптимальне рішення базується на критерії Неймана-Пірсона:

$$\frac{f(D|H_1)}{f(D|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \lambda, \quad (15)$$

де  $D = [D_1, D_2, \dots, D_M]^T$  позначає вибір рішень від  $M$  вторинних користувачів, і  $D \in \{0, 1\}$ ,  $\lambda$  – оптимальний пороговий вектор, а  $f(D|H_0)$  та  $f(D|H_1)$  представляє щільність розподілу ймовірності  $D$  згідно гіпотезі  $H_0$  і  $H_1$ , відповідно.

В центрі комбінування всі  $D_i$  комбінуються разом згідно наступного правила [2]:

$$Y_c = \begin{cases} \sum_{i=1}^M D_i \geq K, H_1, \\ \sum_{i=1}^M D_i \leq K, H_0. \end{cases} \quad (16)$$

Рис. 5 і рис. 6 ілюструють графіки ROC для першого випадку (представленого на рис. 2) з різним числом когнітивних приймачів в умовах рівномірних розподілених логнормальних затінювань з  $\bar{Y}_1 = \bar{Y}_2 = \dots = \bar{Y}_i = 5\text{dB}$  та  $N=5$ . Для порівняння представлені графіки для каналу з AWGN. З рис. 5

і рис. 6 видно, що спільний аналіз ефективно пом'якшує ефекти затінювань. Також з рис. 4 видно, що можна досягти більш кращої роботи користувачів у випадку AWGN. Це пояснюється тим, що зі збільшенням кількості вторинних користувачів збільшується ймовірність того, що у окремого користувача миттєве значення SNR буде вище середнього значення.

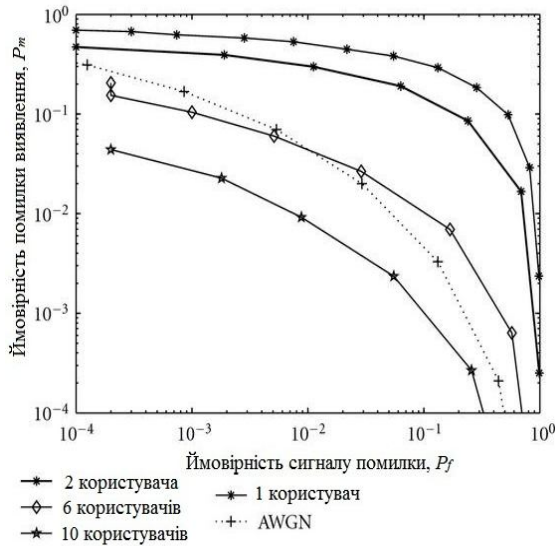


Рис. 5. ROC для спільного аналізу спектру в умовах затінювань, при  $\sigma_{dB} = 6$ ,  $N=5$

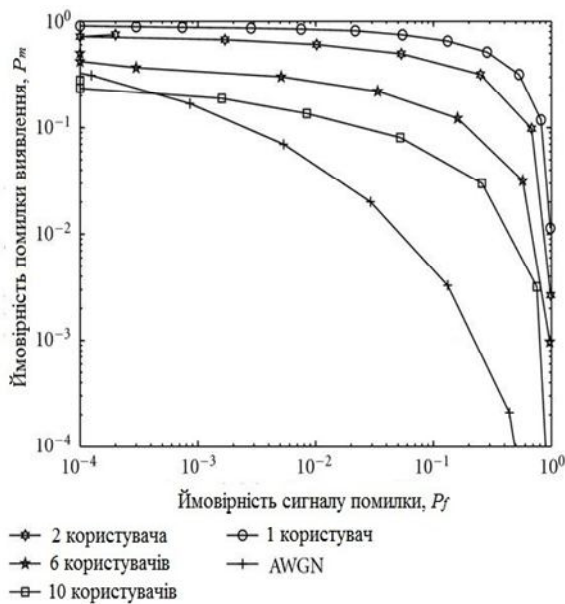


Рис. 6. ROC для спільного аналізу спектру в умовах затінювань, при  $\sigma_{dB} = 10$ ,  $N=5$

Як було відмічено вище, іншим важливим параметром для аналізу роботи алгоритму виявлення є мінімальне значення SNR, яке можна виявити. Прийнятна схема виявлення має бути в змозі виявити сигнали з низьким рівнем SNR. З рис. 7 видно, що при об'єднанні великої кількості користувачів можна досягти бажаної роботи навіть при низьких рівнях SNR. Порівнюючи рис. 4 і рис. 7, можна відмі-

тити, що в умовах затінювань ( $\sigma_{dB} = 6$ ) для прийнятної роботи, наприклад,  $P_f = 10^{-1}$  та  $P_d = 10^{-1}$ , локальний аналіз вимагає рівня отриманого сигналу принаймні у 10 dB, тоді як взаємодія 20 користувачів може виявити сигнал з рівнем SNR-15 dB.

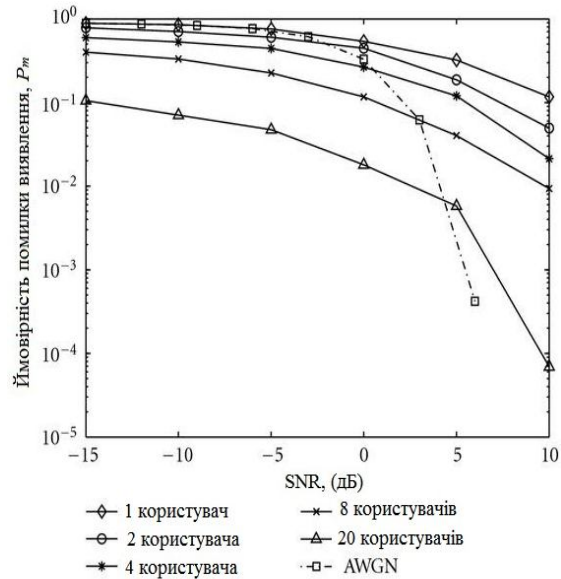


Рис. 7. Залежність ймовірності помилки виявлення від мінімального значення SNR, що можна виявити, в умовах затінювань, при  $P_f = 10^{-1}$ ,  $\sigma_{dB} = 6$ ,  $Y = 5dB$ ,  $N=5$

## 4.2. Комбінування м'яких рішень SDC

### 4.2.1. Рівноправне комбінування

Статистика локальних спостережень для  $i$ -го вторинного користувача після проходження через канал з коефіцієнтом посилення каналу  $g_i$  і шум  $n_i \approx N(0, \sigma_i^2)$ :

$$Y_i \sim \begin{cases} N(Ng_i\sigma_i^2, 2Ng_i^2\sigma_i^4 + \delta_i^2), & H_0, \\ N((N + \bar{Y}_i)g_i\sigma_i^2, 2(N + 2\bar{Y}_i)g_i^2\sigma_i^4 + \delta_i^2), & H_1, \end{cases} \quad (17)$$

де  $\sigma_i^2$  – дисперсія шуму  $i$ -го каналу. Для схеми комбінування м'яких рішень центр комбінування вибирає між  $H_0$  і  $H_1$ , порівнюючи суму окремих спостережень  $Y_c$  із спільним порогом  $\lambda_c$ :

$$Y_c = \sum_{i=1}^M Y_i \begin{matrix} H_1 \\ > \\ H_0 \end{matrix} \lambda_c. \quad (18)$$

### 4.2.2. Зважене комбінування

У зваженому комбінуванні загальна статистика обчислюється в центрі комбінування, призначаючи ваговий коефіцієнт  $W_i$  отриманому спостереженню від  $i$ -го користувача  $Y_i$ .

$$Y_c = \sum_{i=1}^M W_i \cdot Y_i = w^T y, \quad (19)$$

де  $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ , а отримані рішення в центрі комбінування визначаються як  $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_M]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ . Ваговий коефіцієнт  $W_i$  в центрі комбінування задовольняє  $\sum_{i=1}^M W_{i=1} \cdot 3$  (17) і

(19) розподіл  $Y_c$  визначається:

$$Y_c \sim \begin{cases} N \left( \sum_{i=1}^M N g_i G_i^2 w_i, \sum_{i=1}^M (2N g_i^2 \delta_i^4 w_i^2 + \delta_i^2 w_i^2) \right); & H_0, \\ N \left( \sum_{i=1}^M ((N + \bar{Y}_i) g_i \delta_i^2 w_i), \sum_{i=1}^M (2(N + 2\bar{Y}_i) g_i^2 \delta_i^4 w_i^2 + \delta_i^2 w_i^2) \right); & H_1. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Приймемо} \quad h &= [h_1, h_2, \dots, h_M]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \\ g &= [g_1, g_2, \dots, g_M]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \\ y &= [y_1, y_2, \dots, y_M]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \\ \sigma^2 &= [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_M^2]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}, \end{aligned}$$

$$\text{а } \delta^2 = [\delta_1^2, \delta_2^2, \dots, \delta_M^2]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1}$$

Крім того, визначимо матрицю  $\Sigma, \Delta, \Gamma$ , і  $G$ . Статистична величина  $Y_c$  в  $H_0$  і  $H_1$ , може бути визначена як:

$$\begin{aligned} E[Y_c | H_0] &= N g^T \Sigma w, \\ \text{var}[Y_c | H_0] &= w^T [2N G^2 \Sigma^2 + \Delta] w, \\ E[Y_c | H_1] &= g^T ((N I + \Gamma) \Theta \sigma), \\ \text{var}[Y_c | H_1] &= w^T [2(N I + 2\Gamma) G^2 \Sigma^2 + \Delta] w. \end{aligned} \quad (21)$$

Щоб прийняти рішення про наявність первинного передавача, статистична величина рішення  $Y_c$ , визначена в (21), порівнюється з пороговою величиною  $\lambda_c$ . Ймовірність сигналу помилки і виявлення в центрі комбінування, позначені як  $Q_f$  і  $Q_d$ , визначаються як:

$$\begin{aligned} Q_f &= Q \left( \frac{\lambda_c - N g^T \Sigma w}{\sqrt{w^T [2N G^2 \Sigma^2 + \Delta] w}} \right), \\ Q_d &= Q \left( \frac{\lambda_c - g^T ((N I + \Gamma) \Theta \sigma) w}{\sqrt{w^T [2(N I + 2\Gamma) G^2 \Sigma^2 + \Delta] w}} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

де  $Q(\cdot)$  – нормалізований Гауссівський розподіл.

### 5. Оптимізована схема взаємодії користувачів для НДС

Раніше було сказано, що взаємодія вторинних користувачів покращує роботу аналізу спектру.

У цьому розділі розглядається проблема комбінування жорстких рішень в центрі комбінування

при рівномірному розподілі завмирань. Раніше увага акцентувалася на спільному аналізі спектру, при якому у всіх користувачів на вході приймача є приблизно однакове значення SNR. У цьому розділі розглядається випадок, коли у користувачів на вході приймача є різне значення  $Y_i$  в умовах AWGN і логнормального розподілу завмирань. Тут розглядається три різні сценарії (залежно від місця розташування первинних і вторинних користувачів) другого випадку, зображеного на рис. 2. У першому сценарії всі вторинні користувачі відносно близько один до одного і, отже, мають приблизно подібні значення SNR. Другий сценарій зображує ситуацію, коли у половини взаємодіючих користувачів на вході приймача є високі значення SNR. У третьому сценарії лише у одного користувача є високе значення SNR в порівнянні з іншими взаємодіючими вторинними користувачами.

#### 5.1. Рівномірно розподілені затінювання

##### 5.1.1. Математична модель

Спільна ймовірність виявлення  $Q_d$  і ймовірність сигналу помилки  $Q_f$  в центрі комбінування можуть бути виражені як функція ймовірності виявлення (або сигналу помилки) кожного вторинного користувача, і таким чином отримуємо об'єднану ймовірність  $M$  незалежних подій як:

$$\begin{aligned} Q_d &= R(D) \prod_{S_0} (1 - P_d^i) \prod_{S_1} P_d^i, \\ Q_f &= R(D) \prod_{S_0} (1 - P_f^i) \prod_{S_1} P_f^i. \end{aligned} \quad (23)$$

$S$  представляє кількість всіх вторинних користувачів з  $S = S_0 \cup S_1$ , де  $S_0$  – група вторинних користувачів, яка вирішила, що сигнал первинного користувача (ПК) відсутній, тоді як  $S_1$  – група вторинних користувачів, яка вирішила, що сигнал первинного користувача присутній;  $R(D)$  – правило комбінування рішень в центрі комбінування. Величина  $R(D)$  залежить від того, яке правило комбінування використовується в центрі комбінування. Так для даного формулювання, правило К-з-М може бути сформульовано як:

$$R(D) = \begin{cases} 1 (\text{ПК присутній}) \text{ при } \sum_{i=1}^M D_i \geq K, \\ 0 (\text{ПК відсутній}) \text{ при } \sum_{i=1}^M D_i < K. \end{cases} \quad (24)$$

Для правил комбінування, що розглядається в цьому розділі,  $K$  визначається як:

$$K = \begin{cases} 1, \text{ "АБО"}, \\ M, \text{ "І"}, \\ \left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil, \text{ "Голосування"}, \end{cases} \quad (25)$$

де  $[\cdot]$  – функція, що перекирається.

Правило для одного користувача:

$$R(D) = \begin{cases} 1, & \text{if } D_i = 1, \\ 0, & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad (26)$$

де  $i$ -й користувач вибирається як

$$i = \arg \max_j \{Y_j\}. \quad (27)$$

5.1.2. Результати моделювання

Рис. 8 ілюструє роботу спільного аналізу спектру, коли 5 вторинних користувачів взаємодіють один з одним і приймають спільне рішення; також представлені аналітичні результати, що підтверджують результати моделювання. Якщо у всіх користувачів є приблизно подібне значення SNR (перший сценарій) у каналі з AWGN, тоді оптимальне правило комбінування рішень – правило «Голосування», як видно з рис. 8.

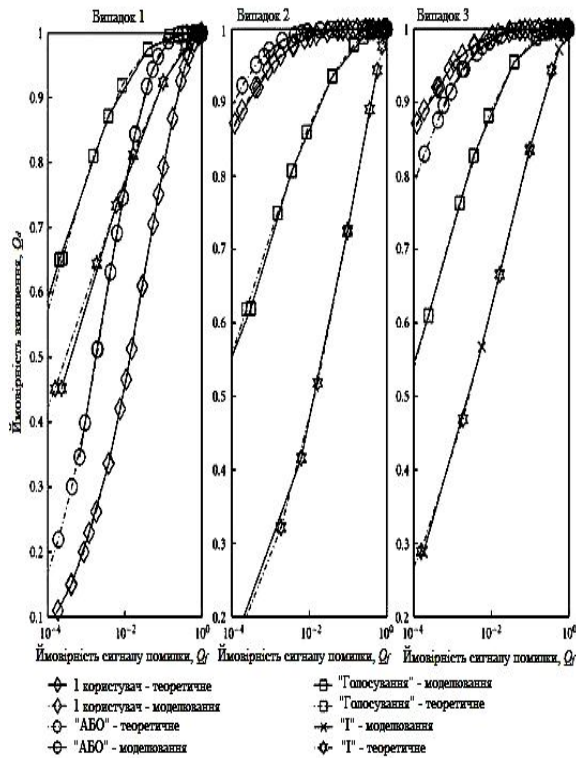


Рис. 8. ROC для 5 взаємодіючих користувачів в каналі з AWGN в 3 випадках:

Випадок 1 (у всіх користувачів є подібне SNR),  
Випадок 2 (у половини користувачів є високе SNR),  
Випадок 3 (лише у одного користувача є високе SNR)

Якщо у половини користувачів є високе значення SNR, а у іншій половині присутнє низьке значення SNR (другий сценарій), тоді оптимальне правило рішення – АБО. У третьому випадку, якщо лише у одного користувача є високе значення SNR, ефективність спільного аналізу спектру нижча, ніж єдиного вузла. З цього виходить, що взаємодія користувачів не завжди підвищує ефективність аналізу спектру. Локальне SNR може бути визначене при

використанні випробувальної статистики, визначеної в (5) як:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z U_i - X, \quad (28)$$

де  $\bar{Y}$  – визначене SNR,  $Z$  – кількість статистичних випробувань, а  $X \in (U_i | H_0)$ .

В умовах Релеєвських завмирань і затінювань, спільний аналіз спектру – ідеальне рішення, оскільки взаємодія ефективно компенсує шкідливі ефекти завмирань. Рис. 9 і рис. 10 представляють роботу виявлення в умовах Релеєвських завмирань і затінювань в трьох випадках, які розглядаються у цьому розділі. Із збільшенням рівня затінювань, ефективність аналізу спектру двох взаємодіючих користувачів з найвищим значенням SNR краща, ніж при взаємодії всіх користувачів. Можна прийти до висновку, що в умовах завмирань або затінювань в центрі комбінування для прийняття рішення необхідно точно знати значення SNR користувачів.

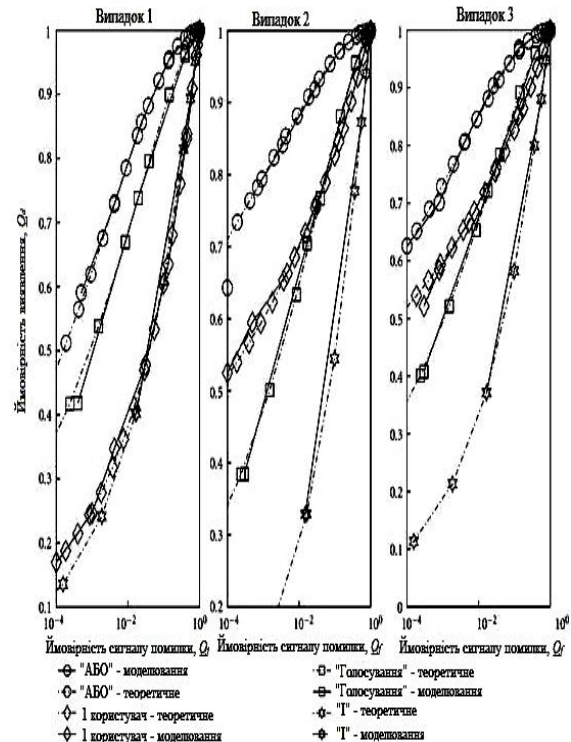


Рис. 9. ROC для 5 взаємодіючих користувачів в каналі з Релеєвськими завмираннями в 3 випадках:  
Випадок 1 (у всіх користувачів є подібне SNR),  
Випадок 2 (у половини користувачів є високе SNR),  
Випадок 3 (лише у одного користувача є високе SNR)

**Висновки**

Розгортання когнітивних радіомереж головним чином залежить від здатності інтелектуальних терміналів точно виявити ліцензованих користувачів, і, отже, мінімізувати внутрішньосистемні завади. Тому моніторинг спектру є ключовою функціональною можливістю когнітивного радіо. Оскільки результати моніторингу єдиного когнітивного радіотерміна-



лу не завжди достовірні, то взаємодія когнітивних приймачів підвищує рівень виявлення первинних користувачів. В даній статті були проаналізовані алгоритми оптимізації для комбінування жорстких та м'яких рішень при спільному аналізі спектру. Для отримання оптимального правила комбінування, центр комбінування повинен точно знати, значення SNR у взаємодіючих користувачів, а також умови каналу. Був також проаналізований алгоритм зваженого спільного аналізу спектру, який покращує спільний аналіз з точки зору функціональних характеристик приймача. Результати моделювання показують, що проаналізовані алгоритми покращують роботу аналізу спектру з точки зору загальної ймовірності помилки виявлення.

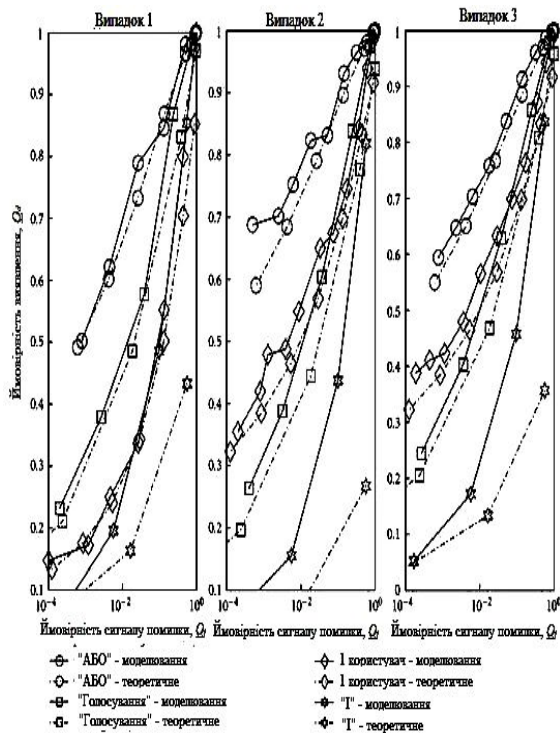


Рис. 10. ROC для 5 взаємодіючих користувачів в умовах затінювань ( $\beta = 6$  дБ) в 3 випадках:

Випадок 1 (у всіх користувачів є подібне SNR),  
Випадок 2 (у половини користувачів є високе SNR),  
Випадок 3 (лише у одного користувача є високе SNR)

## Список літератури

1. *Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals / H. Urkowitz // IEEE Proceedings. – 1967. – Vol. 55, no. 4. – P. 523-531.*
2. *Ghasemi A. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing / A. Ghasemi, E.S. Sousa // IEEE Journal of Communications. – 2007. – Vol. 2, no. 2. – P. 71-81.*
3. *Cognitive Radio Definition, Virginia Tech Cognitive Radio Work Group Wiki. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://support.mprg.org/dokuwiki/doku.php?id=cognitive\\_radio:definition](http://support.mprg.org/dokuwiki/doku.php?id=cognitive_radio:definition).*
4. *Digham F.F. On the energy detection of unknown signals over fading channels / F.F. Digham, M.S. Alouini, M.K. Simon // IEEE Transactions on Communications. – 2007. – Vol. 55, no. 1. – P. 21-24.*
5. *Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications / S. Haykin // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2005. – Vol. 23, no. 2. – P. 201-220.*
6. *Varshney P.K. Distributed Detection and Data Fusion / P.K. Varshney. – Springer, Secaucus, NJ, USA, 1996.*
7. *Goldsmith A. Wireless Communications / A. Goldsmith // Cambridge University Press. – New York, NY, USA, 2005.*
8. *Akyildiz I. A survey on spectrum management in cognitive radio networks / I. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran, S. Mohanty // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 46, no. 4. – P. 40-48.*
9. *Visser F.E. Multinode spectrum sensing based on energy detection for dynamic spectrum access / F.E. Visser, G.J. M. Janssen, P. Pawelczak // Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '08), June 2008. – P. 1394-1398.*
10. *Visotsky E. On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing / E. Visotsky, S. Kuffner, R. Peterson // Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05), December 2005. – P. 338-345.*
11. *Weiss T. A diversity approach for the detection of idle resources in spectrum pooling systems / T. Weiss, J. Hillenbrand, F. Jondral // Proceedings of the 48th International Scientific Colloquium, September 2003. – P. 37-38.*

Надійшла до редколегії 27.07.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СПЕКТРА В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ

В.П. Лысечко, И.И. Сопронюк, Ю.Г. Степаненко, Н.А. Брюзгина

В статье исследуются методы общего и локального анализа спектра для определения наличия первичного (лицензированного) пользователя в когнитивных радиосетях в каналах с Рэлеевскими замираниями, затенениями и аддитивным белым шумом. Также была построена обобщенная модель когнитивной радиосети и определены основные понятия когнитивного радио.

**Ключевые слова:** когнитивное радио, анализ спектра, белый шум, Рэлеевские замирания, затенения, функциональные характеристики приемника.

### RESEARCH OF METHODS OF SPECTRUM SENSING IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

V.P. Lysechko, I.I. Sopronyuk, J.G. Stepanenko, N.O. Briuzgina

In the article the methods of global and local analysis of spectrum are investigated for determination of presence of primary (licensed) user in cognitive radio networks in channels with Rayleigh fading, shadowing and additive white noise. The generalized model of cognitive radio network was also built and the basic concepts of cognitive radio are certain.

**Keywords:** cognitive radio, the spectrum analysis, white noise, Rayleigh fading, shadowing, receiver operating characteristics.