

М.І. Кирик, В.Б. Янишин, І.Б. Стрихалюк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікацій

## МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КОГНІТИВНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ НА ОСНОВІ OFDM

© Кирик М.І., Янишин В. Б., Стрихалюк І.Б., 2014

У роботі запропоновано модель взаємодії когнітивної радіомережі з мережею GSM. Для когнітивної радіосистеми пропонується використовувати OFDM для покращення сканування радіочастотного спектра, формування спектра і формування огинаючої OFDM-сигналу в системі когнітивного радіо, а також визначено організацію структури даних вторинної мережі. Запропоновано математичну модель імітації мережі CR з первинною і вторинною радіокомірками та оцінки пропускної здатності системи. Модель імітує діяльність первинних користувачів системи GSM і роботу мережі CR, беручи до уваги умови радіосередовища, розташування CR користувачів та їх вимоги до якості для різних видів послуг.

Ключові слова: когнітивні радіомережі, OFDM, формування спектра.

M. Kyryk, V. Yanyshyn, I.B. Strykhalyuk  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Telecommunications

## EFFECTIVE CAPACITY EVALUATION MODEL FOR COGNITIVE RADIO NETWORKS USING OFDM

© Kyryk M., Yanyshyn V., Strykhalyuk I.B., 2014

In this paper considered the cognitive radio (CR) networks with the GSM network like primary network cooperation possibility. The cognitive radio system meant radio with a self-management mechanism with different levels of ability to adapt to the changing radio environment. The self-management mechanism is based on the principles of learning and artificial intelligence. In world practice, the frequency assigned to a particular entity in a certain area on a long term basis. However, most commonly frequency for this designated area not always used, and as necessary. In other words, many frequency bands are irregularly loaded in the space and time domains. Because of the shortage of frequency resources are limited to the cellular network to the data rate. The data rate of modern communication systems is also increasing due to the use high-level types of signal modulation, requiring more signal/noise ratio at the receiver input. Existing GSM network is almost completely satisfy the needs of users for voice services, but the data rate cannot compete with cellular networks based on UMTS and LTE technologies. Here proposed high speed data transmitting method in GSM based on the principles of cognitive radio. On the existing GSM network topology (primary/licensed network) complementary superimposed secondary/unlicensed network operating in the same frequency bands.

CR system must have ability to measure, sense, learn, and be aware of important operating conditions. It should be able to find and exploit the unused parts of the spectrum at the fastest and efficient way. The popular spectrum sensing algorithms such as matched filtering, energy detection, spectral correlation (cyclostationarity), radio identification based

sensing, waveform based sensing can provide awareness of CR system. Moreover, cooperation spectrum sensing can reduce the detection time and increase the agility, but also facilitate the problem of hidden terminal, shadowing or severe multipath fading. Here proposed to use OFDM for the CR system and discussed OFDM's advantages to allow better sensing and spectrum shaping capabilities, considered OFDM-symbol formation method in CR system and determined the data structure organization. The mathematical simulation model of CR network with one primary system and one secondary cell created for accurate capacity evaluation of selected system. Model simulates GSM primary users' activity and CR network operation scheme that taking into account the radio environment conditions, CR users location and their quality requirement for different type of services.

**Key words:** cognitive radio, cognitive networks, OFDM, spectrum shaping.

**Вступ.** Удосконалення телекомунікаційних систем призводить до постійного ускладнення методів контролю використання обмеженого частотного ресурсу. Перешкоди через одночасне використання в одному діапазоні частот декількох передавачів можуть призвести до значних спотворень переданої інформації, істотно ускладнити роботу телекомунікаційних систем різного призначення. Одне з можливих рішень цієї проблеми – упровадження систем когнітивного радіо [1].

Попит на використання радіочастотного діапазону спектра зростає, незважаючи на те, що більша його частина вже зайнята. У світовій практиці певний частотний діапазон призначений для певної галузі на довгостроковій основі. Проте частоти для чітко визначених областей не завжди ефективно використовуються, а здебільшого в міру необхідності. Інакше кажучи, багато діапазонів частот нерегулярно завантажуються в просторовій і часовій областях.

Системи, що побудовані за принципом когнітивного радіо, використовують на вторинній основі не зайняті в цей час частини спектра (так звані “мертві зони” спектра) або враховують особливості сигналу від первинної мережі для співпраці з нею. Крім того, основним критерієм для таких систем є відсутність перешкод для первинної мережі.

Підхід до побудови системи когнітивного радіо, яку ще називають смарт-радіо, є передовою технологією для забезпечення ефективного використання радіочастотного спектра. Відмінними рисами когнітивного радіо є здатність усіх прийомо-передавачів адаптивно приймати і передавати сигнал у разі зміни радіочастот, а також зміни типу модуляції, типу кодування та інших параметрів системи [2].

Комп'ютерна система, що використовується в системі когнітивного радіо, повинна збирати інформацію про радіосередовище і розвивати різні стратегії на основі наявної інформації для роботи системи зв'язку. Когнітивна система радіозв'язку в ході навчання повинна враховувати особливості використовуваних смуг частот і допустимих конфігурацій наявного устаткування. Когнітивні радіостанції мають можливість динамічно визначати і використовувати діапазон частот для доступу до мережі.

Когнітивна радіосистема – це система з механізмом самоврядування з різними рівнями здатності адаптуватися до мінливих умов радіосередовища. Механізм самоврядування ґрунтується на принципах навчання і штучного інтелекту.

До особливостей систем когнітивного радіо належать [3]:

1. Можливість отримання інформації про середовище радіозв'язку.
2. Здатність виконувати інтелектуальний аналіз інформації про стан радіосередовища.
3. Здатність адаптивно змінювати параметри системи телекомунікацій у разі зміни параметрів радіосередовища, щоб забезпечити ефективне функціонування системи зв'язку.

При взаємодії з системою радіозв'язку для когнітивної системи найважливішими критеріями є налаштування прийомо-передавачів (тип модуляції, параметри модуляції, діапазон частот тощо) та аналіз результатів вимірювань.

**Принципи побудови когнітивної радіомережі на основі OFDM.** Розглядаючи когнітивне радіо (CR), значну увагу приділяють використанню OFDM мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів. OFDM є методом модуляції сигналу кодування цифрових даних на декількох несучих частотах, які можуть вирішити багато проблем, що виникають з високошвидкісними системами комунікацій. Бажано використовувати OFDM-технологію для побудови вторинної/неліцензійної системи передачі даних [6]. Це дозволяє гнучко управляти смугою пропускання сигналу, що передається, залежно від кількості частот, що зайняті первинною/ліцензованою мережею в певному місці, й поліпшити ефективність приймання даних в умовах багатопробеневого поширення.

Переваги використання OFDM в системах когнітивного радіо:

- висока спектральна ефективність завдяки майже прямокутному спектру частот для великої кількості піднесучих;
- надійність проти вузькосмугових перешкод;
- проста цифрова реалізація з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ);
- зменшення ефекту дисперсії багатопробеневого поширення каналів, з якими стикаються системи із високими швидкостями передавання даних;
- масштабованість;
- відносна простота приймачів;
- гнучке програмне впровадження виділення спектральних піднесучих OFDM.

Недоліки:

- високий пік-фактор (відношення піка до середньої потужності) вимагає застосування високолінійних підсилювачів;
- істотний вплив фазового шуму, викликаного недосконалістю передавача і приймача системи;
- потрібно забезпечити точну часову і частотну синхронізацію.

Отже, завдяки своїм можливостям для сканування та вибору спектра, разом із гнучкістю та адаптивністю, OFDM безумовно визнається як найкраща технологія передачі для систем CR [4].

Основою системи CR повинна бути можливість вимірювання, тобто можливість відчувати, вчитися і знати про важливі зміни і стани у радіосередовищі. Система повинна могла знайти і використовувати незайняті частини спектра швидким і ефективним способом. Популярні алгоритми сканування спектра, такі як алгоритми узгодженої фільтрації, виявлення енергії, спектральної кореляції, сканування на основі форми сигналу, повинні забезпечити обізнаність системи CR [5]. Крім того, кооперативне сканування спектра може не тільки зменшити час виявлення, збільшити гнучкість, але і вирішити проблему прихованого терміналу, затінення або важкого багатопробеневого завмирання сигналу [6]. У системах OFDM перетворення з часової області в частотну досягається за рахунок використання ШПФ. Всі точки в частотно-часовій площині робочого діапазону системи OFDM можуть бути відскановані без будь-яких додаткових апаратних засобів або розрахунку завдяки повторному використанню апаратних ядер ШПФ. Використовуючи частотно-часову площину, вибір доступних частин спектра для експлуатації (мертвих зон спектра) може здійснюватися за допомогою простої перевірки гіпотез [9–12]. У цих алгоритмах сканування спектра наявність схеми ШПФ у системі з OFDM полегшує вимоги до обладнання. Крім того, вимоги до обчислювальних ресурсів для алгоритму сканування спектра знижуються, оскільки приймач вже використовує ШПФ для прийнятого сигналу, щоб перетворити його в частотній області для виявлення даних.

Розглянемо приклад виключення заборонених частот загального діапазону первинної мережі. OFDM-символ – це група піднесучих, що являють собою цифровий паралельний потік бітів. Комплексна огинаюча  $\mathcal{A}(t)$  одного OFDM-символу, який починається в момент часу  $t_k$ , має такий вигляд [7]:

$$\mathcal{A}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} d_i e^{j2\pi \frac{i(t-t_k)}{T}}; t_k \leq t \leq t_k + T, \quad (1)$$

де  $d_i$  – комплексне число, що представляє амплітуду і початкову фазу  $i$ -ї піднесучої OFDM-сигналу;  $n$  – кількість піднесучих коливань в OFDM-символі. Схема формування комплексних огинаючих OFDM-символів на прикладі восьми піднесучих і спектральна щільність відповідного OFDM-сигналу з  $N = 8$  показана на рис. 2.

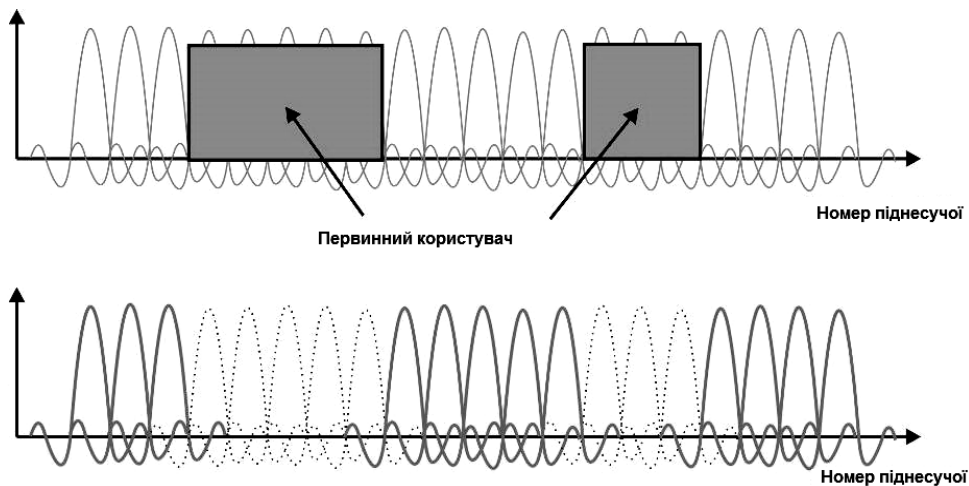


Рис. 1. Формування спектра з використанням OFDM

Якщо відомо, які діапазони частот використовуються первинною мережею і там неможливо передавати дані вторинної мережі, необхідно виключити передавання на тих піднесучих, що збігаються із забороненими частотами. Якщо для цього потрібно виключити передачу на  $i$ -й частоті первинної мережі, відповідно до (1), під час формування OFDM-символу  $d_i$  потрібно прирівняти до нуля. Наприклад, якщо потрібно виключити передачу на 2, 3 і 5-й частотах, тоді відповідно потрібно  $d_2 = d_3 = d_5 = 0$ .

Отже, для формування OFDM-символів з можливим виключенням частот початкову схему потрібно змінити, встановивши нульові символи в заданих положеннях. Це можна зробити під час послідовно-паралельної трансформації потоку QAM-символів, знаючи кількість і номери частот, що вилучаються з передачі. На рис. 2 показано модифіковану схему формування комплексних огинаючих OFDM-символів, за винятком зайнятих частот (в цьому випадку другої, третьої та п'ятої).

У цьому випадку загальна швидкість передавання даних вторинної мережі зменшується пропорційно до кількості виключених піднесучих. Щоб уникнути втрати інформації в процесі обнулення піднесучих, потокова бітова швидкість на вході QAM-модулятора має бути узгоджена з наявними частотними ресурсами. Відповідно до моделі OSI завдання управління бітовим потоком швидкості вирішується на транспортному рівні [8].

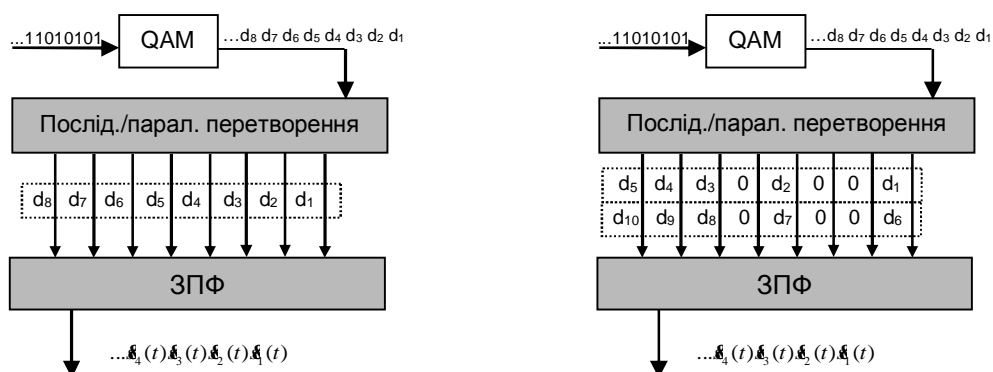


Рис. 2. Схема формування комплексних огинаючих OFDM-символів

**Модель когнітивної радіосистеми для оцінки пропускної здатності.** У цій роботі пропонується така модель когнітивної мережі. За первинну мережу взято радіомережу GSM (первинна/ліцензійна мережа), яка накладається з вторинною/неліцензійною мережею, що працює в тих самих смугах частот – 900 та 1800 МГц (рис. 3, 4).

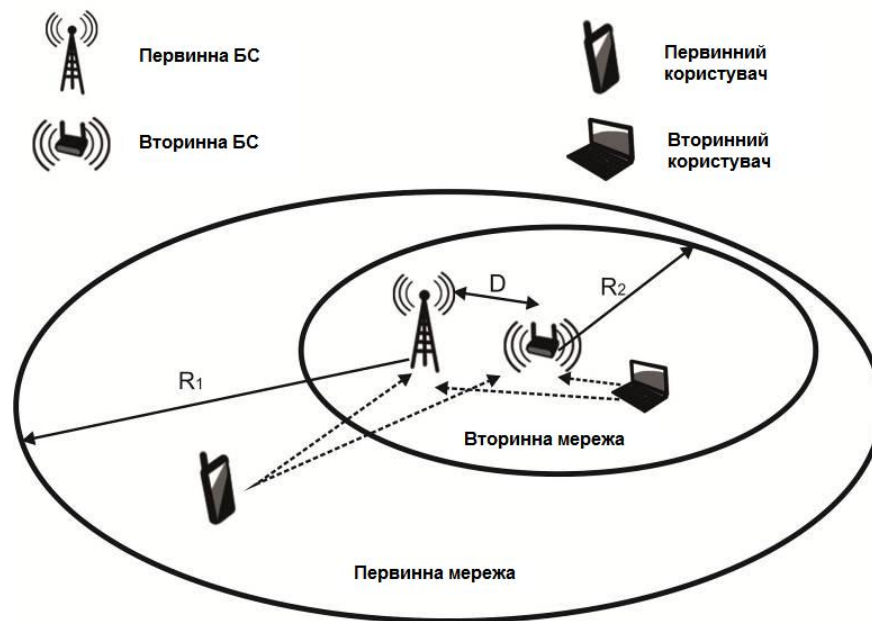


Рис. 3. Структура взаємодії первинної та вторинної когнітивної мережі

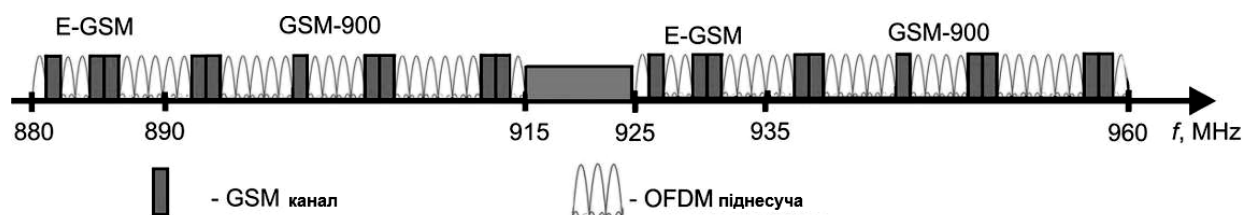


Рис. 4. Схематичне зображення розподілу частотного спектра між первинною і вторинною мережами

Для розрахунку ємності базової станції CR, що входить у первинну мережу та використовує OFDM, спочатку потрібно визначити структуру організації даних. У часовій області є організовані комірки (кадри) тривалістю 10 мс. Кожна з цих комірок складатиметься з десяти субкомірок (підкадрів) тривалістю 1 мс, які, своєю чергою, розділені на два слоти по 0,5 мс. В частотній області дані згруповані в групи по 12 частот, кожна з яких займає частотний діапазон в 15 кГц, що дає загалом смугу 180 кГц. Група з дванадцяти піднесучих частот тривалістю в один слот називається ресурсним блоком (РБ). Найменша одиниця ресурсу – одна піднесуча тривалістю в один слот, називається ресурсним елементом (РЕ). Залежно від типу захисного інтервалу (префіксу) – нормального або розширеного один ресурсний блок складається з 84 або 72 ресурсних елементів, відповідно. Один ресурсний елемент, залежно від способу модуляції, може містити два біти для QPSK, чотири біти для 16QAM і шість бітів для 64QAM.

На підставі цих даних можна обчислити максимальну теоретичну ємність однієї базової станції CR, розташованої в первинній мережі GSM. Оскільки ширина смуги частот одного ресурсного блока OFDM відповідає пропускній здатності одного частотного каналу GSM, то загальна кількість ресурсних блоків дорівнює загальній кількості частотних каналів:

$$N_{\max} = N_{\text{GSM-900}} + N_{\text{GSM-1800}} + N_{\text{EGSM}} = 124 + 374 + 50 = 548 \text{ каналів.} \quad (2)$$

Якщо ми припустимо, що використовується 64QAM модуляція зі стандартним захисним інтервалом, швидкість передавання даних можна розрахувати так: кожен з 548 блоків ресурсів складається з 84 ресурсних елементів, у кожному з них 6 бітів інформації. Тривалість елемента ресурсів – 0,5 мс. Отже, швидкість передавання даних:

$$C_{\max} = N_{RB} * N_{RE} * n_{\text{mod}} / t_{\text{slot}} = 548 * 84 * 6 / 0.5 * 10^{-3} = 552,384 \text{ Мбіт/с.} \quad (3)$$

Проте обчислена пропускна здатність буде значно вищою, ніж ефективна, оскільки таке обчислення враховує всі передані біти, зокрема контрольні біти корекції помилок системи (FEC), біти контролю інформації, передані базовою станцією, і не береться до уваги кількість частотних каналів, зайнятих первинним користувачем.

Таблиця 1

### Пропускна здатність у разі використання QPSK 1/2

	C <sub>max</sub> , Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	86.678	85.556	84.435	83.313	82.191	81.07
Nop=2	85.556	83.313	81.07	78.827	76.584	74.341
Nop=3	84.435	81.07	77.705	74.341	70.976	67.612

Таблиця 2

### Пропускна здатність у разі використання 16QAM 3/4

	C <sub>max</sub> , Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	260.033	256.668	253.304	249.939	246.574	243.21
Nop=2	256.668	249.939	243.21	236.481	229.752	223.022
Nop=3	253.304	243.21	233.116	223.022	212.929	202.835

Таблиця 3

### Пропускна здатність у разі використання 64QAM 4/5

	C <sub>max</sub> , Мбіт/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	416.052	410.669	405.286	399.902	394.519	389.136
Nop=2	410.669	399.902	389.136	378.369	367.603	356.836
Nop=3	405.286	389.136	372.986	356.836	340.686	324.536

**Імітаційне моделювання роботи когнітивної радіомережі.** У попередньому розділі проведено наближену оцінку пропускної здатності когнітивної радіомережі, яка працює одночасно з мережею GSM. Але в такому розрахунку вважалось, що всі робочі частоти в первинній мережі операторів мобільного GSM постійно зайняті первинними користувачами і не беруться до уваги умови радіосередовища і вимоги користувачів CR. Пропонується створити математичну імітаційну модель наявної системи, щоб визначити ефективну ємність вибраної системи.

Ця модель являє собою спільну роботу первинної GSM мережі та вторинної когнітивної мережі. Первинна мережа представлена однією GSM коміркою, де співпрацюють три мобільні оператори з різною кількістю робочих частот. Первинні користувачі завантажують первинну систему викликами і бажають отримати відповідні послуги. Нові первинні користувачі з'являються випадково і відповідають експоненціальному розподілу з  $\lambda = N_{\max \text{ PU}} / T_{\text{PU}}$ , де  $N_{\max \text{ PU}}$  – очікувана максимальна кількість первинних користувачів,  $T_{\text{PU}}$  – середня тривалість виклику. Кожен первинний користувач належить одному з трьох операторів мобільного зв'язку, відповідно займає частотний канал  $N_{\text{ch} i}$  на час  $T_{\text{ac} i}$ .

Вторинна когнітивна мережа працює за такою схемою:

1. Спочатку відбувається сканування спектра для виявлення доступних радіочастотних каналів і визначення їх параметрів якості. У цій моделі вважається ідеальним сканування з нульовими ймовірностями помилкової тривоги і виявлення помилок.

2. Потім визначається наявність однієї або кількох подій:

– поява первинного користувача: коли первинний користувач з'являється в певній смузі, всі користувачі CR, що використовували цю частину спектра, повинні переміститися до нових смуг;

– поява CR користувача: коли новий користувач CR з'являється в мережі CR, йому повинна бути призначена нова смуга спектра для його передавання;

– погіршення якості каналу: коли стан каналу погіршується, користувач CR повинен перемкнутися на діапазон спектра з кращою якістю.

3. Коли хоча б одна подія виявлена, тоді мережа CR переналаштовує свій розподіл ресурсів для підтримки якості обслуговування. У разі короткострокових змін каналу, таких як різке завмирання, мережа CR перерозподілить ресурси в межах діапазону спектра за допомогою механізму розподілу використання спектра. Якщо основний користувач рееструється або поточна смуга спектра не може забезпечити задану якість обслуговування на довгостроковий період з урахуванням поточних умов спектра, менеджер ресурсів визначає, чи мережа CR приймає нового вхідного користувача CR, чи ні. Якщо новому користувачу CR дозволено передавати, йому присвоюються відповідні смуги під час вибору спектра.

4. Відбувається передавання даних користувачами CR.

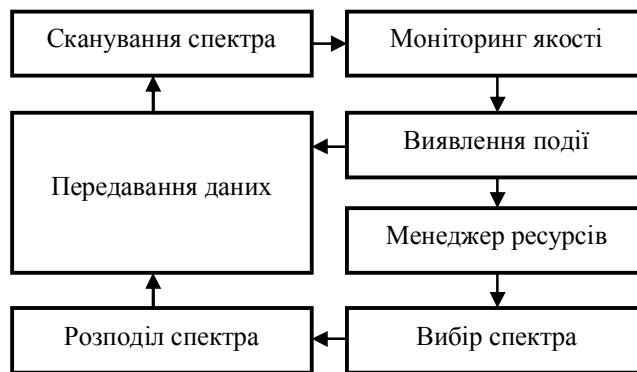


Рис. 5. Алгоритм роботи моделі когнітивної мережі

Таблиця 4

**Параметри якості моделювання для різних типів послуг**

Тип трафіку	Пріоритет	Ймовірність генерування $P_{tr\ gen}$	Сер. час передачі $T_{av}, c$	Сер. швидкість передавання $C_{av}, Kбіт/c$
Service	1	0.5	1	64
Real-Time	2	0.15	300	2048
Best Effort	3	0.35	60	512

Таблиця 5

**Параметри якості для різних типів модуляції**

Тип модуляції	FEC	SINR, дБ	ІМ, дБ	$D_{max}, км$
QPSK	1/2	2	2,5	3
16QAM	3/4	12,2	3	1,4
64QAM	4/5	18,6	4	0,7

Відношення сигнал/шум і рівень перешкод розраховується для кожного вторинного користувача залежно від їхнього місця розташування. Тоді визначаються техніка модуляції, тип корекції помилок (FEC) (табл. 5 [13]) і кількість та номери частотних каналів, що призначаються кожному вторинному користувачу на момент передавання. Завершальний етап – розрахунок загальної пропускної здатності для всіх користувачів. Моделювання було проведено для різної кількості частот в одному секторі з наявністю первинних користувачів одного, двох або трьох операторів мобільного зв'язку. Експериментальні результати моделювання відображено в табл. 6 і графічно на рис. 6.

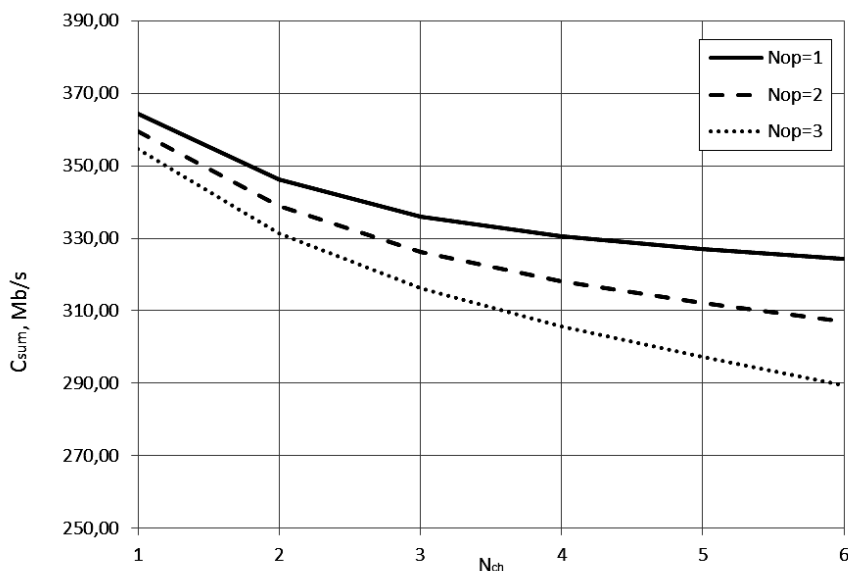


Рис. 6 Отримана за результатами моделювання залежність пропускної здатності мережі для різної кількості операторів мобільного зв'язку від кількості робочих частот

Таблиця 6

#### Пропускна здатність за різної кількості робочих частот

	C, Мб/с					
	Nch=1	Nch=2	Nch=3	Nch=4	Nch=5	Nch=6
Nop=1	364,31	346,2	335,99	330,49	327,15	324,36
Nop=2	359,57	338,88	326,16	318,13	312,26	306,95
Nop=3	354,69	331,42	316,19	305,64	297,23	289,42

**Висновки.** У роботі проведено оцінку пропускної здатності когнітивної радіомережі, що працює на основі первинної GSM мережі. Проблеми низької швидкості передавання даних та неефективного використання дозволеного ліцензованого діапазону частот мережі GSM вирішуються організацією вторинної когнітивної радіомережі. Для покращення цих показників запропоновано використовувати технологію передавання OFDM. Завдяки своїм можливостям для сканування та вибору спектра, разом із гнучкістю та адаптивністю, OFDM безумовно визначається як найкраща технологія передавання для систем CR. Отже, теоретично розраховану пропускну здатність системи можна збільшити до понад 400 Мб/с, з використанням цифрових модуляцій високих порядків. Запропоновано модель взаємодії первинної мережі GSM та вторинної CR мережі, що складається з первинної та вторинної радіокомірок. Здійснено математичне імітаційне моделювання для точнішої оцінки пропускної здатності системи за одночасної роботи абонентів



трьох мобільних операторів із різною кількістю робочих частот первинної мережі. На основі результатів моделювання визначено, що у разі максимальної завантаженості абонентами первинної мережі середня пропускна здатність когнітивної радіомережі може становити 290 Мбіт/с.

1. Mitola J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio* // Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000. 2. Haykin S. *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications* // IEEE JSAC, vol. 23, no. 2, Feb. 2005, pp. 201–20. 3. Akyildiz I.F., Lee W.-Y., Vuran M. C., Shantidev M. *A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks* // IEEE Communications Magazine, vol. 46, April 2008. – P. 40–48. 4. Tang H. *Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems* // in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Nov. 2005, pp. 151–159. 5. Tefvik Y., Huseyin A. *A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications* // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 11, Issue 1, pp. 116 – 130, 2009. 6. Nee R. van, Prasad R. *OFDM for wireless multimedia communications*. – N.Y.: Artech House, 2000. 7. Volkov L.N., Nemirovsky M.S., Shinakov Y.S. *Digital radio: basic methods and characteristics*. – M.: Eco-Trendz, 2005. 8. ISO / IEC 7498-1-99. *Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Part 1. The basic model*. – M.: Standartinform, 2006. 9. Wylie-Green M. *Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation* // in First IEEE International Symposium on DySPAN 2005, 2005, pp. 619–625. 10. Weiss T., Hillenbrand J., Jondral F. *A diversity approach for the detection of idle spectral resources in spectrum pooling systems* // in Proc. of the 48th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, Sep. 2003. 11. Hillenbrand J., Weiss T.A., and Jondral F.K. *Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems* // IEEE Commun. Lett., vol. 9, no. 4, pp. 349–351, 2005. 12. Yucek T., Arslan H. *Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems* // Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), pp. 1–6, 2006. 13. Sessia S. I. Toufic, M. Baker *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice* // A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009. – 522 p. Recommendation ITU-R BS.1387.