

М. М. Климах, М. І. Кирик, В. Б. Янишин
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікації

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ПЕРЕМИКАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ ВИБОРУ СПЕКТРА У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

© Климах М. М., Кирик М. І., Янишин В. Б., 2017

Розглянуто методи вибору спектра для когнітивного радіо, що дають змогу вторинним користувачам обирати кращі доступні частотні канали і перемикатися на них. Проведено аналіз і класифікацію цих методів. Запропоновано аналітичну модель системи когнітивного радіо для порівняння алгоритмів перемикання каналів за критерієм мінімізації загального часу роботи системи. Розглянуті алгоритми на основі балансування навантаження можуть розподіляти навантаження від вторинних користувачів декількома каналами, на відміну від алгоритму без балансування навантаження, за яким для передавання вибирається перший канал з найменшою ймовірністю зайнятості.

Ключові слова: когнітивне радіо, перемикання каналів, вибір спектра, теорія масового обслуговування, загальний системний час.

M. Klymash, M. Kyryk, V. Yanyshyn
National University “Lviv Polytechnic”,
Department of Telecommunications

CHANNEL SELECTION ALGORITHMS PERFORMANCE EVALUATION FOR SPECTRUM DECISION IN COGNITIVE RADIO

© Klymash M., Kyryk M., Yanyshyn V., 2017

Different spectrum decision methods in a Cognitive radio network were analyzed in this paper. The technology of Cognitive Radio networks needs to make a decision which spectrum band is the best among the available free bands. Spectrum decision is closely related to all operational parameters, channel characteristics and any activity of primary users. Also, spectrum decision depends on all cognitive users inside network activities. The process of spectrum decision is not based only on cognitive users' local observations but also on primary network channels statistical information, such as interference, path loss, wireless link errors, link layer delay. After the definition of available spectrum bands had been held, the most corresponding band of spectrum with considering channel characteristics and QoS requirements should be chosen. Spectrum decision methods can be classified as: non-load-balancing, probability-based and sensing-based spectrum decision.

An analytical system model is proposed to compare channel selection algorithms by main operational parameters to minimize total system selection time. The considered methods, which are based on balancing traffic load, can distribute secondary users load to multiple channels, in contradistinction to non-load-balancing methods that choose the first channel with the lowest busy probability. When the secondary users traffic load is low, the probability-based method shows a reduce of total system time, otherwise, when traffic load is high the sensing-based method can improve system performance.

Key words: cognitive radio, channel selection, spectrum decision, queuing theory, total system time.

Вступ

Когнітивні радіомережі (КР) потребують можливості порівнювати і вирішувати, які з доступних радіочастотних каналів є найкращими відповідно до вимог щодо якості (QoS). Цей процес називається вибором спектра і є надзвичайно важливою темою для дослідження в мережах КР. Вибір спектра тісно пов'язаний з характеристиками каналу і діяльністю первинних користувачів. Крім того, вибір спектра залежить від діяльності інших користувачів КР у мережі.

Методи когнітивного радіо покращують ефективність використання спектра, що дає змогу низькопріоритетним вторинним користувачам тимчасово використовувати високопріоритетні ліцензовані частини спектра первинних користувачів, які на цей момент простоюють (рис. 1) [1, 4]. Проте, вторинні користувачі повинні звільнити займаний канал, щойно первинні користувачі сформували дані для передавання саме цими каналами, оскільки первинні користувачі мають вищий пріоритет доступу до каналу передавання. Для того, щоб забезпечити надійне передавання для вторинних користувачів, стартує процедура передачі обслуговування спектра, яка повинна допомогти вторинному користувачу повернути займаний канал первинному користувачу, а самому відновити передавання на іншому каналі або на тому самому каналі, але вже після завершення передавання даних первинного користувача [2, 5].

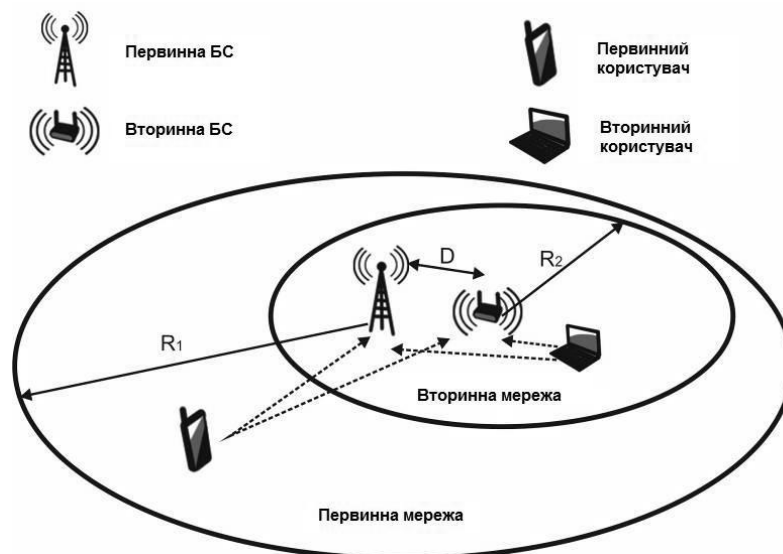


Рис. 1. Структура взаємодії первинної та вторинної когнітивної мереж

Вибір спектра є важливим процесом у мережах когнітивного радіо, який надає можливість вторинному користувачеві вибрати якнайкращий канал з доступних на певний момент каналів-кандидатів для передавання даних (рис. 2). Для того, щоб рівномірно розподілити навантаження трафіку від вторинних користувачів цими каналами-кандидатами, система прийняття рішень і вибору спектра повинна ефективно опрацьовувати статистику завантаження кожного каналу як первинними, так і вторинними користувачами [3].

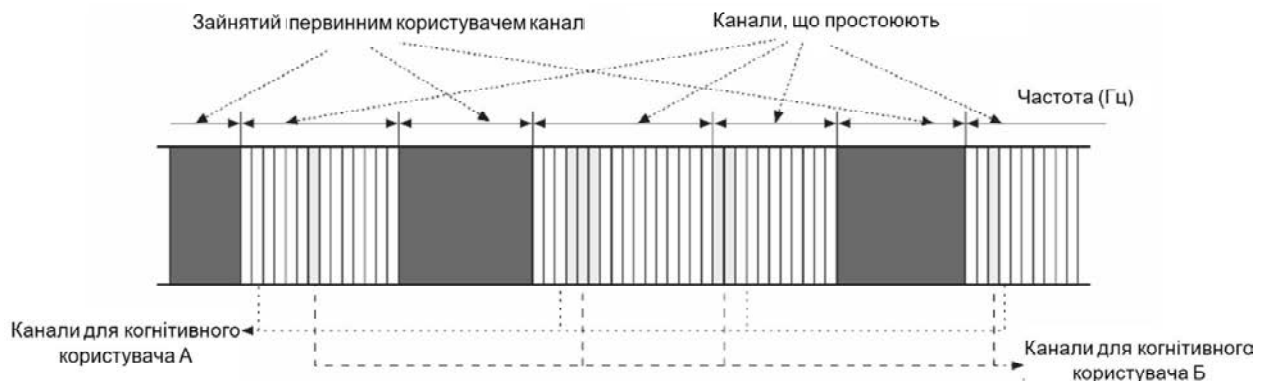


Рис.2. Приклад вибору спектра у когнітивних радіомережах

У статті введено основний показник продуктивності для оцінювання різних схем вибору спектра – загальний системний час вторинного з’єднання, яке визначається як тривалість від моменту передачі даних до моменту повного завершення передачі.

Загальний системний час вторинного з’єднання залежить від кількості переривань, створених первинними користувачами, від кількості помилок сканування, таких як невиявлення або помилкове виявлення первинного користувача, і від продуктивності самого каналу. Тому за час одного вторинного з’єднання, може відбуватися декілька передач обслуговування спектра через переривання від первинних користувачів. Очевидно, що велика кількість перемикачів каналу призведе до збільшення загального системного часу системи [6]. Водночас, помилкова тривога виникає, коли детектор помилково повідомляє про наявність первинного користувача. У цій ситуації загальний системний час з’єднання вторинного користувача зростає, тому що вторинні користувачі не можуть передавати дані навіть при неактивному каналі, оскільки помилково вважається, що цей канал зайнятий. Коли ж первинного користувача помилково не виявлено, відбувається колізія даних основного користувача і вторинного користувача, що призводить до повторної передачі і, звичайно, до зростання загального системного часу з’єднання вторинних користувачів. Крім того, різні канали можуть мати різну продуктивність і швидкість передавання даних, що призводить до різного часу обслуговування і безпосередньо впливає на загальний системний час для вторинних користувачів.

Методи вибору спектра

Методи вибору спектра можна класифікувати на дві категорії: методи без балансування навантаження і методи з балансуванням навантаження. Методи з балансуванням навантаження можна поділити також на два варіанти: метод на основі ймовірності та метод на основі сканування.

- Вибір спектра без балансування навантаження – метод, за якого вторинний користувач може вибрати свій робочий канал, за одним або декількома параметрами каналу, наприклад: завантаженість каналу, ймовірності того, що канал перебуває в режимі простою, час очікування, час перебування в режимі простою або продуктивність каналу [7, 8].

- Вибір спектра на основі ймовірності – цей метод працює за балансу навантаження вторинних користувачів одразу в декількох каналах когнітивної радіомережі за параметрами ймовірності заняття каналу, ймовірності вибору каналу, ймовірності переривання у каналі і т. д.

- Вибір спектра на основі сканування – цей метод потребує попереднього сканування всіх каналів-кандидатів, щоб знайти найпридатніший робочий канал [9, 16]. За цим методом основним параметром, що впливає на тривалість системного часу, є кількість робочих каналів.

Системна модель

Спочатку вторинні користувачі повинні розпочати процес сканування спектра для виявлення первинних користувачів. Якщо поточний часовий слот каналу порожній, то вторинний користувач може займати його для передавання даних. В іншому випадку, якщо канал знаходиться в зайнятому стані, вторинний користувач має почати процес передавання обслуговування спектра [10].

Модель оцінювання ефективності методів вибору спектра для різних алгоритмів перемикачів каналу показано на рис. 3. Запропонована модель основана на спрощеній загальній моделі когнітивної радіомережі, описаній у [11, 12]. Загальний системний час вторинного з’єднання буде оцінено з використанням цієї моделі для різних алгоритмів перемикачів каналу. Кожне первинне і вторинне з’єднання являють собою процес надходження пакетів з різною інтенсивністю, розподіленою за законом Пуассона [13]. Отже, позначимо середню інтенсивність надходження пакетів для k -го каналу первинного з’єднання як $\lambda_p^{(k)}$, а λ_s – середня інтенсивність надходження пакетів вторинного з’єднання когнітивної радіомережі. $L_p^{(k)}$ – розмір даних у бітах на пакет для k -го каналу первинного з’єднання, а його функція розподілу ймовірності $f_p^{(k)}(l)$. L_s – розмір даних для вторинного з’єднання із функцією розподілу ймовірності $f_s(l)$.

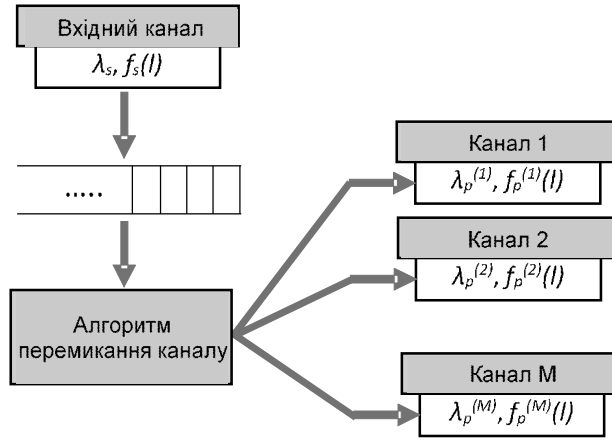


Рис. 3. Загальна запропонована модель оцінювання ефективності методів вибору спектра для різних алгоритмів перемикування каналу

Загальний час системи (позначається як S) є важливою метрикою якості обслуговування (QoS) для оцінювання ефективності з'єднання вторинних користувачів. Він складається з часу очікування (позначимо через W) і тривалості доставки даних (позначимо як T). Отримаємо [14]:

$$E[S] = E[W] + E[T], \quad (1)$$

де $E[x]$ є функцією очікування. Тут час очікування визначають як тривалість від моменту, коли запит на передавання даних надходить до системи, до початку передавання даних. Тривалість часу очікування залежить від алгоритму переключення каналу, що вибраний вторинними користувачами. Тривалість доставки даних визначається як тривалість від початку пересилання даних з першим часовим інтервалом до завершення передавання даних з останнім часовим інтервалом. Очевидно, що кількість подій передавання обслуговування значно впливає на тривалість часу доставки даних. Відповідно до (1), загальний системний час для алгоритму вибору каналу на основі ймовірності визначається як:

$$E[S_{pb}] = E[W_{pb}] + E[T_{pb}]. \quad (2)$$

А для алгоритму вибору каналу на основі сканування як:

$$E[S_{sb}] = E[W_{sb}] + E[T_{sb}]. \quad (3)$$

Проблему мінімізації системного часу для алгоритму вибору каналу на основі ймовірності можна вирішити так [9]:

$$p = \arg \min E[S_{pb}(p_{pb})]; \quad (4)$$

$$0 \leq p_{pb}^{(k)} \leq 1, \quad \forall k \in \Omega, \quad (5)$$

де $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$ набір каналів кандидатів; $E[S_{pb}]$ – загальний час системи для вторинного з'єднання.

$$\sum_{k \in \Omega} p_{pb}^{(k)} = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} = 1; \quad (6)$$

$$p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_s^{(k)} < 1, \quad (7)$$

де $p^{(k)}$ – ймовірність зайнятості k -го каналу; $p_p^{(k)}$ – ймовірність заняття k -го каналу первинним користувачем; $p_s^{(k)}$ – ймовірність заняття k -го каналу вторинним користувачем [13]:

$$p_p^{(k)} = l_p^{(k)} E[X_p^{(k)}], \quad (8)$$

$$p_s^{(k)} = l_s^{(k)} E[X_s^{(k)}]. \quad (9)$$

$T^{(k)}$ – тривалість доставки даних для k -го каналу вторинним користувачем [12].

$$E[T^{(k)}] = E[X_s^{(k)}] + E[N^{(k)}]E[Y_p^{(k)}], \quad (10)$$

де

$$E[N^{(k)}] = l_p^{(k)} E[X_s^{(k)}] \quad (11)$$

$$E[Y_p^{(k)}] = \frac{E[X_p^{(k)}]}{1 - l_p^{(k)} E[X_p^{(k)}]} \quad (12)$$

Середня тривалість доставки даних для алгоритму вибору каналу на основі ймовірності можна розрахувати як:

$$E[T_{pb}] = \sum_{k=1}^M p_{pb}^{(k)} E[T^{(k)}]; \quad (13)$$

$$E[W_{pb}^{(k)}] = \frac{E[R^{(k)}]}{(1 - p_p^{(k)})(1 - p_p^{(k)} - p_s^{(k)})}, \quad (14)$$

де $E[R^{(k)}]$ означає час простою системи, коли з'єднання завершено в k -му каналі. За [14] можна отримати:

$$E[R^{(k)}] = \frac{1}{2} l_p^{(k)} E[(X_p^{(k)})^2] + \frac{1}{2} p_{pb}^{(k)} l_s E[(X_s^{(k)})^2]. \quad (15)$$

Для алгоритму вибору каналу на основі сканування середній час доставки даних становить [15]:

$$E[T_{sb}] = \sum_{k=1}^M p_{sb}^{(k)} E[T^{(k)}]; \quad (16)$$

$$E[W_{sb}] = nt + \Pr\{e^c\} \times E[W_{sb}'], \quad (17)$$

де e – подія, коли хоча б один з каналів у цей момент простоює; e^c – комплементарне значення події.

$$\begin{aligned} \Pr\{e\} &= \sum_{k=1}^n [\Pr\{e \mid k_{idle}\} \times \Pr\{k_{idle}\}] = \\ &= \sum_{k=1}^n [(1 - (P_F)^k) \times \\ &\sum_{\mathfrak{S} \subseteq \Omega, |\mathfrak{S}|=k} \left[\prod_{i \in \mathfrak{S}} (1 - p^{(i)}) \prod_{j \in \Omega - \mathfrak{S}} p^{(i)} \right], \end{aligned} \quad (18)$$

де $p^{(k)} = p_p^{(k)} + p_{pb}^{(k)}$ ймовірність помилкової тривоги.

$$\Pr\{e^c\} = 1 - \Pr\{e\} \quad (19)$$

Якщо всі канали зайняті, то ймовірність того, що вторинний користувач може використати певний канал, дорівнює $1/n$ [17, 18].

Оцінювання ефективності для різних алгоритмів перемикавання каналів

Порівняємо алгоритм без балансування навантаження із запропонованими алгоритмами перемикавання каналів на основі ймовірності та на основі сканування. Порівнюватимемо за тривалістю загального системного часу для кожного алгоритму залежно від інтенсивності вхідного навантаження.

Результати розрахунку загального системного часу зображено на рис. 4, 5. На наведених графіках можна побачити залежності загального системного часу $E[S]$ від середньої швидкості надходження вторинних з'єднань λ_s для трьох різних алгоритмів перемикавання каналів: алгоритм без балансування навантаження, алгоритм на основі ймовірності і алгоритм на основі сканування. Оскільки в алгоритмі без балансування навантаження всі вторинні з'єднання обиратимуть канал з найменшою ймовірністю зайнятості, то порівнявши його з двома іншими алгоритмами балансування навантаження, можна переконатися: для алгоритму перемикавання каналів на основі сканування загальний час системи є найкоротшим, коли τ є низьким, навіть за високих навантажень, оскільки цей алгоритм за допомогою широкосмугового сканування може доволі

істотно скоротити час очікування. Але коли τ високий і $\lambda_s < 0,025$, то найнижчий загальний системний час показує алгоритм на основі ймовірності, оскільки за ним можна вибрати нижчу ймовірність переривання каналів. Отже, за допомогою методів балансування навантаження можна мінімізувати загальний системний час на 20 % і навіть більше ніж 50 % за високого вхідного навантаження.

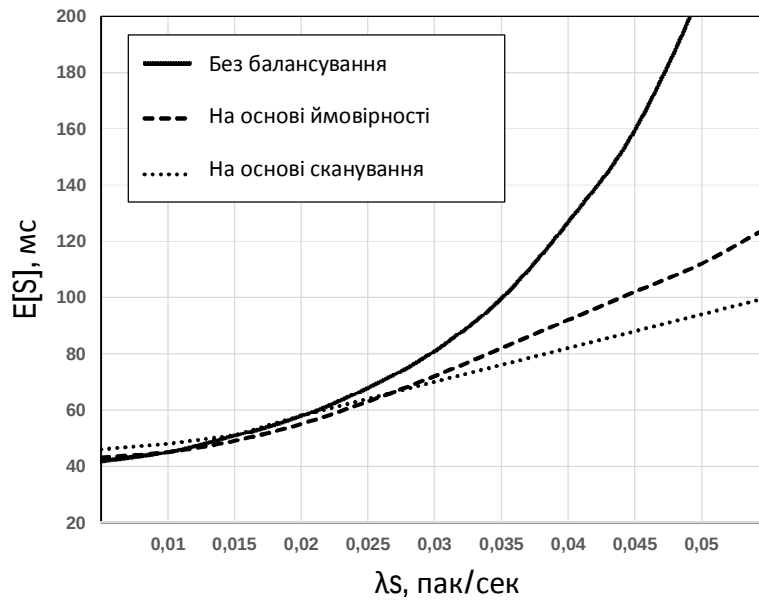


Рис. 4. Залежність тривалості загального системного часу від інтенсивності вхідного навантаження для $\tau=5$, $P_M=0.1$, $P_F=0.1$, $E[Xs]=10$;

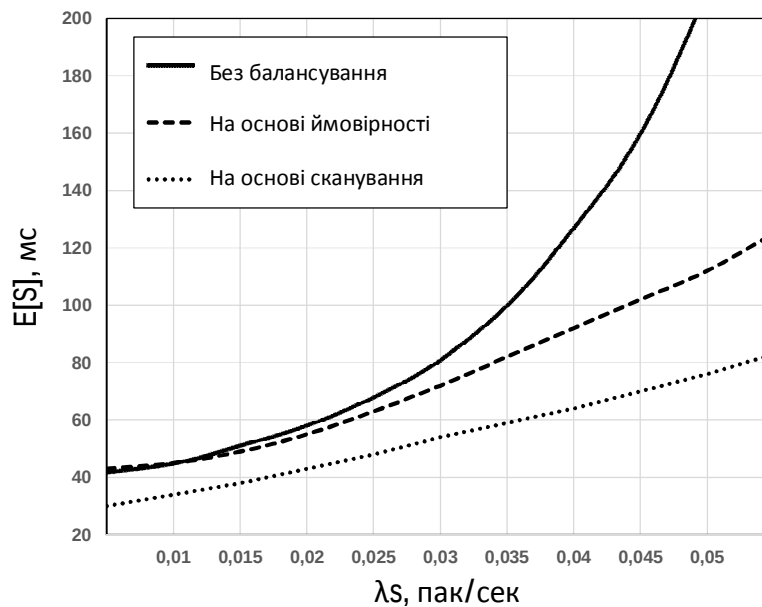


Рис. 5. Залежність тривалості загального системного часу від інтенсивності вхідного навантаження для $\tau=10$, $P_M=0.1$, $P_F=0.1$, $E[Xs]=10$;

Висновки

Оцінено ефективність роботи системи когнітивного радіо в процесі вибору кращого частотного каналу відповідно до вимог до якості (QoS). Розглянуто і проаналізовано методи вибору спектра для когнітивного радіо, що дають змогу вторинним користувачам обирати і перемикатися в

кращі доступні частотні канали. Методи класифіковано на дві основні категорії: методи без балансування та методи з балансуванням вхідного навантаження.

Розглянуто алгоритми на основі балансування навантаження, що можуть розподіляти навантаження від вторинних користувачів декількома каналами, на відміну від алгоритму без балансування навантаження, за яким для передавання вибирається перший канал з найменшою ймовірністю зайнятості.

Введено новий показник продуктивності системи – загальний системний час, що складається з суми часу очікування передавання і тривалості самого передавання. Запропоновано аналітичну модель системи когнітивного радіо для порівняння трьох алгоритмів перемикання каналів за критерієм мінімізації загального часу роботи системи: алгоритм без балансування навантаження, алгоритм на основі ймовірності та алгоритм на основі сканування.

За результатами розрахунку визначено, що за низького навантаження вторинних користувачів когнітивної радіомережі алгоритм на основі ймовірності показує найменший системний час порівняно з алгоритмом на основі сканування, проте за високих навантажень цей алгоритм покращує загальний системний час від 20 % аж до 50 %, на відміну від решти алгоритмів. Коли навантаження від вторинних користувачів мережі є порівняно низьке, алгоритм на основі ймовірності показує менший системний час порівняно з алгоритмом на основі сканування, проте за високих навантажень цей алгоритм покращує загальний системний час на відміну від решти алгоритмів.

1. Akyildiz I. F., Lee W., Vuran M. C. "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Communications Magazine*, Apr. 2008, pp. 43.
2. Lee W.-Y., Akyildiz I. F., "A spectrum decision framework for cognitive radio networks", *IEEE Trans. Mobile Computing*, Feb. 2011, pp. 161–174.
3. Кирик М. І., Янишин В. Б., Стрихалюк І. Б. Модель оцінки пропускної здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", "Радіoeлектроніка та телекомунікації"*, 2014. – No. 796. – С. 104–112.
4. Gromakov Y. A. "The concept of development of mobile and wireless public", *Telecommunication* No. 12, 2008, pp. 51–57.
5. Kyryk M., Yanyshyn V. Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio. – 3rd International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology", *IEEE PIC S&T 2016*, 4–6 October, Kharkiv, Ukraine. – pp. 18–20.
6. Wang C.-W., Wang L.-C. and Adachi F. "Performance Gains for Spectrum Utilization in Cognitive Radio Networks with Spectrum Handoff", *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Sep. 2009.
7. Liu H.-J, Wang Z.-X., Li S.-F. and Yi M. "Study on the Performance of Spectrum Mobility in Cognitive Wireless Network", *IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Jun. 2008.
8. 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.
9. Volkov L. N., Nemirovsky M. S., Shinakov Y. S. "Digital radio: basic methods and characteristics", *Eco-Trendz*, Moscow, 2005.
10. Yao Y., Erman D., Popescu A. P. "Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks", *10th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (ADHOC)*, Sweden, May 2011.
11. Kyryk M., Matiishyn L., Yanyshyn V. Performance comparison of cognitive radio networks spectrum sensing methods TCSET'2016, Feb. 2016, pp. 597–600.
12. Kyryk M., Yanyshyn V. "Cooperative Spectrum Sensing Performance Analysis in Cognitive Radio Networks" *AICT 2015*, Oct. 2015.
13. Ng C. and Soong B. "Queueing Modelling Fundamentals with Applications" *Communication Networks*, 2nd. John Wiley & Sons Inc., 2008.
14. Song Y., Xie J. "Common Hopping Based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2010.
15. Wang L., Wang C., Adachi F. "Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, May, 2011.
16. Jiang H., Lai L., Fan R. "Optimal Selection of Channel Sensing Order in Cognitive Radio", *IEEE Trans. Wireless Communication*, vol. 8 Jan. 2009.
17. Wang C., Wang L. "Modeling and Analysis for

Proactive-decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2009. 18. Banaei A. and Georghiades C. N. “Throughput Analysis of a Randomized Sensing Scheme in Cell-based Ad-hoc Cognitive Networks”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2009.

References

1. I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, “A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Communications Magazine*, Apr. 2008, pp. 43.
2. W.-Y. Lee, I. F. Akyildiz, “A spectrum decision framework for cognitive radio networks”, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Feb. 2011, pp. 161–174.
3. M. Kyryk, V. Yanyshyn, “Effective capacity evaluation model for cognitive radio networks using OFDM” *Academic Journals of L’viv Polytechnic National University, Series of Radio Electronics and Telecommunication*, 2014. – No. 796. – pp. 104–112.
4. Y. A. Gromakov, “The concept of development of mobile and wireless public”, *Telecommunication* No. 12, 2008, pp. 51–57.
5. M. Kyryk, V. Yanyshyn. *Proactive spectrum handoff performance evaluation model for cognitive radio. – 3rd International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology”, IEEE PIC S&T 2016, 4-6 October, Kharkiv, Ukraine. – pp. 18-20.*
6. C.-W. Wang, L.-C. Wang, and F. Adachi, “Performance Gains for Spectrum Utilization in Cognitive Radio Networks with Spectrum Handoff”, *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Sep. 2009.
7. H.-J. Liu, Z.-X. Wang, S.-F. Li, and M. Yi, “Study on the Performance of Spectrum Mobility in Cognitive Wireless Network,” *IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Jun. 2008.
8. H. Tang, “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.
9. L. N. Volkov, M. S. Nemirovsky, Y. S. Shinakov, “Digital radio: basic methods and characteristics,” *Eco-Trendz*, Moscow, 2005.
10. Y. Yao, D. Erman, A. P. Popescu, “Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks”, *10th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (ADHOC)*, Sweden, May 2011.
11. M. Kyryk, L. Matiishyn, V. Yanyshyn, “Performance comparison of cognitive radio networks spectrum sensing methods” *TCSET’2016*, Feb. 2016, pp. 597–600.
12. M. Kyryk, V. Yanyshyn, “Cooperative Spectrum Sensing Performance Analysis in Cognitive Radio Networks” *AICT 2015*, Oct. 2015.
13. C. Ng and B. Soong, “Queueing Modelling Fundamentals with Applications” *Communication Networks*, 2nd. John Wiley & Sons Inc., 2008.
14. Y. Song, J. Xie, “Common Hopping Based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, *IEEE Global Communications Conference*, Dec. 2010.
15. L. Wang, C. Wang, F. Adachi “Load-Balancing Spectrum Decision for Cognitive Radio Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, May, 2011.
16. H. Jiang, L. Lai, R. Fan, “Optimal Selection of Channel Sensing Order in Cognitive Radio”, *IEEE Trans. Wireless Communication*, vol. 8 Jan. 2009.
17. C. Wang, L. Wang, “Modeling and Analysis for Proactive-decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2009.
18. A. Banaei and C. N. Georghiades, “Throughput Analysis of a Randomized Sensing Scheme in Cell-based Ad-hoc Cognitive Networks”, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2009.