УДК 621.391

А. О. Олійник[1]
Н. В. Грабчак[1]
Д. М. Нагорний[1]

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

[1] Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто підвищення спектральної ефективності когнітивних телекомунікаційних систем на основі інтелектуального налаштування робочих частот вторинних користувачів. Для цього здійснено оцінювання зайнятості спектра, що використовує адаптивний енергетичний детектор, а також алгоритм динамічного доступу до спектра, який враховує великі масиви даних (Big Data) та особливості розріджених матриць.

Досліджено прогнозування стану спектра на основі нейронної мережі LSTM, що дозволяє підвищити точність передбачення доступності радіоресурсів. Проведено порівняльний аналіз з існуючими моделями, який підтвердив вищу ефективність запропонованого підходу щодо точності прогнозування та швидкодії. Отримані результати демонструють можливість оперативної перебудови робочої частоти вторинних користувачів за умови появи сигналу первинного користувача, що знижує ймовірність створення перешкод та оптимізує використання радіочастотного ресурсу.

Ключові слова: когнітивне радіо, спектральна ефективність, штучні нейронні мережі, динамічний доступ до спектра, SDR, Big Data, прогнозування спектра.

Abstract

The paper considers the improvement of spectral efficiency of cognitive telecommunication systems based on intelligent tuning of secondary users' operating frequencies. For this purpose, the spectrum occupancy is estimated using an adaptive energy detector and a dynamic spectrum access algorithm that takes into account large data sets and features of sparse matrices.

The spectrum state prediction based on the LSTM neural network is investigated, which allows to increase the accuracy of predicting the availability of radio resources. A comparative analysis with existing models is carried out, which confirms the higher efficiency of the proposed approach in terms of forecasting accuracy and speed. The obtained results demonstrate the possibility of promptly reconfiguring the operating frequency of secondary users in the event of a primary user's signal, which reduces the likelihood of interference and optimises the use of radio frequency resources.

Keywords: cognitive radio, spectral efficiency, artificial neural networks, dynamic spectrum access, SDR, Big Data, spectrum forecasting

Вступ

В останні десятиліття активне впровадження нових технологій зв’язку, а також зростання обсягу користувацького трафіку та кількості абонентів призвели до високого рівня завантаженості радіочастотного спектра (РЧС). Цей факт спричинив проблему дефіциту частотного ресурсу, що, у свою чергу, призвело до зниження якості послуг зв’язку [1].

Очевидно, що сучасні та майбутні системи зв’язку не можуть і надалі ґрунтуватися на існуючому, стаціонарному методі використання РЧС, де розподіл діапазонів частот між організаціями здійснюється шляхом ліцензування та надання дозволів. З цього випливає, що під час впровадження нових систем зв’язку необхідно перейти до технології динамічного доступу до спектра (Dynamic Spectrum Access, DSA) [2].

Метою роботи є підвищення ефективності використання радіочастотного спектра за рахунок застосування інтелектуального методу динамічного налаштування робочих частот вторинних користувачів у системах когнітивного радіо.

Результати дослідження

Результати досліджень, спрямовані на аналіз завантаженості РЧС, показали, що первинні користувачі (ПК), які мають дозвіл на проведення сеансів зв'язку в наданому їм діапазоні частот, не завжди забезпечують повною мірою ефективне використання РЧС. Для деяких ділянок спектра було виявлено тривалі часові інтервали, протягом яких частотний ресурс не використовувався [1–3]. Усе це призвело до створення технології динамічного доступу до спектра (ДДС), заснованої на концепції використання вторинними користувачами (ВК), які не мають дозволу, тимчасово вільних частотних ресурсів ПК за умови дотримання їхніх прав і збереження якості зв'язку ПК [4–8]. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності використання частотного ресурсу та вирішенню проблеми нестачі РЧС.

Основними системами зв'язку, що використовують цю технологію, є системи когнітивного радіо (СКР) [4–6]. СКР нині активно розвиваються та користуються попитом серед світових виробників систем зв'язку й телекомунікацій. Відповідно до рекомендацій MCE-R M.2330-0 «Когнітивні системи радіозв'язку в наземній рухомій службі» радіопристрої з програмно-визначеними властивостями та характеристиками (Software Defined Radio, SDR) визнані передовою технологією для реалізації СКР [9]. SDR здатні здійснювати радіомоніторинг спектра, автономно й динамічно змінювати власні параметри роботи та адаптуватися до нових технологій, тим самим реалізуючи необхідні для розробки СКР функції: моніторинг, адаптацію, реконфігурацію [4, 5].

Для реалізації технології ДДС необхідно вирішити дві задачі: отримати інформацію про використання спектра ПК і розробити метод надання ВК вільної ділянки спектра. Таким чином, найбільш перспективним напрямом для вирішення проблеми дефіциту РЧС є розробка алгоритмів оцінювання стану зайнятості спектра ПК та надання частотного ресурсу ВК за умови збереження прав і якості зв'язку ПК [5].

Термін «когнітивне радіо» (Cognitive radio) вперше був запропонований Джозефом Мітолою у 1998 році, а опублікований у 1999 році в статті Д. Мітоли та Джеральда К. Магуайра [6]. Однак дослідження щодо вимірювання спектра для кількісної оцінки його використання як у ліцензійному, так і в неліцензійному діапазоні проводилися ще у 1995 році. Тому перші роботи, присвячені технології динамічного доступу до спектра (ДДС), з'явилися наприкінці 90-х років минулого століття.

Значний внесок у вирішення завдань ефективного використання радіочастотного спектра, а також у розробку та розвиток інтелектуальних бездротових систем зв'язку, мереж наступного покоління та програмно-визначених радіосистем зробили результати досліджень, отримані вченими J. Mitola, A. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, S. Haykin, E. Hossain [6-8].

У разі спектрального зондування пристрій вторинного користувача (ВК) аналізує навколишню електромагнітну обстановку, після чого налаштовується на несучу частоту радіоканалу, де відсутній первинний користувач (ПК). Однак цей підхід має низку недоліків, основним з яких є необхідність частого моніторингу спектра, що призводить до стрімкого зростання обчислювальних витрат [9].

Оскільки завдання реалізації технології динамічного доступу до спектра (ДДС) можна вирішувати як для мережі когнітивного радіо загалом, так і на різних рівнях її розробки (фізичному або мережевому), у цій роботі прийнято, що задача вирішується в межах радіоканалу конкретного ВК у діапазоні частот існуючих і перспективних систем зв'язку. Отже, якщо ВК створює перешкоди для іншого ВК, ця проблема надалі вирішується на мережевому рівні [10]. Тому реалізацію ДДС слід розглядати як комплекс таких підзадач: виявлення сигналів ПК для формування статистики зайнятості спектра; розробка методу надання доступу до спектра для ВК.

Для кожної з поставлених підзадач існує низка методів. При цьому для досягнення більшої ефективності використання радіочастотного спектра різні методи можуть застосовуватися як окремо, так і в поєднанні. З огляду на вимогу безумовного пріоритету доступу ПК до РЧС, а також необхідність запобігання створенню перешкод для ПК з боку ВК, стає очевидним, що СКР має володіти розвиненою системою прийняття рішень. Тобто для найбільш ефективного розв'язання поставлених задач СКР необхідно використовувати технології інтелектуального аналізу даних [11].

У роботі під інтелектуальною перебудовою робочих частот (ІПРЧ) мається на увазі метод передавання інформації радіоканалом, особливістю якого є зміна несучої частоти із застосуванням процесу інтелектуального аналізу даних. На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що в сучасних наукових джерелах відсутній алгоритм ІПРЧ, який дозволяє зменшити ймовірність створення пристроєм ВК перешкод для ПК і скоротити час, необхідний для надання доступу ВК до вільного радіоканалу, а також не потребує використання когнітивного пілот-каналу чи впровадження нових центрів

управління, при цьому здатний адаптуватися до існуючих систем зв'язку [12].

Теоретична значимість роботи полягає в дослідженні інтелектуального налаштування робочих частот вторинних користувачів у системах когнітивного радіо з використанням штучних нейронних мереж і технологій Big Data. Це дозволяє знизити ймовірність створення перешкод для первинного користувача пристроями вторинних користувачів, скоротити час доступу до вільного радіоканалу та, відповідно, підвищити ефективність використання радіочастотного спектра.

Висновки

Дослідження підтвердило, що використання систем когнітивного радіо з технологією динамічного доступу до спектра підвищує ефективність використання радіочастотного ресурсу. Одним із перспективних напрямів реалізації цієї технології є застосування SDR-пристроїв. Проведено аналіз існуючих методів динамічного доступу до спектра для вторинних користувачів, на основі якого сформовано перелік ключових завдань для досягнення поставленої мети. Відповідно до цього переліку запропоновано схему інтелектуального налаштування робочої частоти в системах когнітивного радіо. Встановлено, що при появі сигналу первинного користувача всі пристрої коректно перебудовують робочу частоту, а отримані дані підтверджують ефективність методу. Таким чином, поставлене наукове завдання вирішене, а мета дослідження досягнута в повному обсязі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wyglinski, A.M. Memory Enabled Bumblebee-Based Dynamic Spectrum Access for Platooning Environments / A. M. Wyglinski, K. S. Gill, P. Kryszkiewicz, P. Sroka, A. Kliks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 72. – Iss. 5. – P. 5612–5627.

2. Haykin, S. Coordinated Cognitive Risk Control for Bridging Vehicular Radar and Communication Systems / S. Haykin, S. Feng // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23. – Iss. 5. – P. 4135–4150.

3. Bokobza, Y. Deep Reinforcement Learning for Simultaneous Sensing and Channel Access in Cognitive Networks / Y. Bokobza, R. Dabora, K. Cohen // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2023. – Vol. 22. – Iss. 7. – P. 4930–4946.

4. Kim, S. Multi-Agent Learning and Bargaining Scheme for Cooperative Spectrum Sharing Process / S. Kim // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 47863–47872.

5. Liu, X. Reinforcement learning based dynamic spectrum access in cognitive Internet of Vehicles / X. Liu, C. Sun, M. Zhou, B. Lin and Y. Lim // China Communications. – 2021. – Vol. 18. – Iss. 7. – P. 58–68.

6. Mosavat-Jahromi, H. Prediction and Modeling of Spectrum Occupancy for Dynamic Spectrum Access Systems / H. Mosavat-Jahromi, Y. Li, L. Cai, J. Pan // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2021. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 715–728.

7. Li, X. Deep Learning for Spectrum Prediction from Spatial–Temporal–Spectral Data / X. Li, Z. Liu, G. Chen, Y. Xu, T. Song // IEEE Communications Letters. – 2021. – Vol. 25. – Iss. 4. – P. 1216–1220.

8. Alipour-Fanid, A. Multiuser Scheduling in Centralized Cognitive Radio Networks: A Multi-Armed Bandit Approach / A. Alipour-Fanid, M. Dabaghchian, R. Arora, K. Zeng // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2022. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 1074–1091.

9. Han, H. Primary-User-Friendly Dynamic Spectrum Anti-Jamming Access: A GAN-Enhanced Deep Reinforcement Learning Approach / H. Han // IEEE Wireless Communications Letters. – 2022. – Vol. 11. – Iss. 2. – P. 258–262.

10. Baldesi, L. ChARM: NextG Spectrum Sharing Through Data-Driven Real-Time O-RAN Dynamic Control / L. Baldesi, F. Restuccia, T. Melodia // IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. – 2022. – P. 240–249.

11. Ubom, E. Comparative evaluation of spectrum occupancy of the broadcasting bands in urban, suburban and rural environments / E. Ubom, U. Ukommi // Nigerian Journal of Technology. – 2023. – Vol. 41. – Iss. 6. – P. 1008–1016.

12. Engiz, B.K. Spectrum Occupancy Measurements in Cellular Frequency Band in Samsun / B. K. Engiz, Y. A. Rajab // Balkan journal of electrical and computer engineering. – 2021. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 138–143.

Олійник Андрій Олегович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Грабчак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Нагорний Дмитро Максимович — студент групи ПЗТ-23мс, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: muhaoleksandr35@gmail.com

Науковий керівник: ***Васильківський Микола Володимирович*** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Oliinyk Andrii O. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: w0lfend00@gmail.com

Hrabchak Nazarii V. — graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Nahornyi Dmytro M. - student of group TSS-23mc, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: muhaoleksandr35@gmail.com

Supervisor: ***Vasylkivskyi Mykola V.*** — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia