

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0055**

Inteligentné dynamické riadenie frekvenčného spektra pre nastupujúce kognitívne komunikačné systémy

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Juraj Gazda, PhD.**

Príjemca **Technická univerzita v Košiciach - Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Katedra počítačov a informatiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Dept. of Computer Convergence Software, Korea University, South Korea, prof. Minho Jo
Aalto University, Finland, prof. Heikki Hammainen
Lviv Polytechnic University, Ukraine, Dr. Taras Maksymyuk

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

[1] GAZDA, Juraj - KOVÁČ, Viliam - TÓTH, Peter - DROTÁR, Peter - GAZDA, Vladimír: Tax optimization in an agent-based model of real-time spectrum secondary market / - 2017. In: Telecommunication Systems. Vol. 64, no. 3 (2017), p. 543-558. - ISSN 1018-4864 (IF = 1.7)

[2] GAZDA, Juraj - BUGÁR, Gabriel - VOLOŠIN, Marcel - DROTÁR, Peter - HORVÁTH, Denis - GAZDA, Vladimír: Dynamic spectrum leasing and retail pricing using an experimental economy / - 2017. In: Computer Networks. Vol. 121 (2017), p. 173-184. - ISSN 1389-1286 (IF = 3.03)

[3] GAZDA, Juraj - ŠLAPAK, Eugen - BUGÁR, Gabriel - HORVÁTH, Denis - MAKSYMUK, Taras - JO, Minho: Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network / - 2018. In: IEEE Access. Vol. 6 (2018), p. 39807-39819. - ISSN 2169-3536 (IF = 4.1)

[4] GAZDA, Juraj - ŠIMOŇÁK, Slavomír - PIETRIKOVÁ, Emília - CHOVANEC, Martin - CHOVANCOVÁ, Eva - ÁDÁM, Norbert - SZABÓ, Csaba - BALÁŽ, Anton - MADOŠ, Branislav: Agent-based model of the spectrum auctions with sensing imperfections in dynamic spectrum access networks / - 2017. In: Computing and Informatics. Roč. 36, č. 5 (2017), s. 1041-1062. - ISSN 1335-9150 (IF = 0.524)

[5] VOLOŠIN, Marcel - GAZDA, Juraj - DROTÁR, Peter - BUGÁR, Gabriel - GAZDA, Vladimír: Spatial real-time price competition in the dynamic spectrum access markets / -

2017. In: Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) volume 10207 : EUMAS 2016. - Cham : Springer, 2017 P. 217-229. - ISBN 978-3-319-59293-0 - ISSN 0302-9743
- [6] DROTÁR, Peter - ŠIMOŇÁK, Slavomír - PIETRIKOVÁ, Emília - CHOVANEC, Martin - CHOVANCOVÁ, Eva - ÁDÁM, Norbert - SZABÓ, Csaba - BALÁŽ, Anton - BIŇAS, Miroslav: Comparison of filter techniques for two-step feature selection / - 2017. In: Computing and Informatics. Roč. 36, č. 3 (2017), s. 597-617. - ISSN 1335-9150 (IF = 0.524)
- [7] GALAJDA, Pavol - GALAJDOVÁ, Alena - SLOVÁK, Stanislav - PEČOVSKÝ, Martin - DRUTAROVSKÝ, Miloš - SUKOP, Marek - SAMANEH, I.B.A.: Robot vision ultra-wideband wireless sensor in non-cooperative industrial environments / - 2018. In: International Journal of Advanced Robotic Systems. Vol. 15, no. 4 (2018), p. 1–12. - ISSN 1729-8814 (IF = 1.223)
- [8] GALAJDA, Pavol – SLOVAK, S. – SOKOL, M., et.al.: Integrated M-Sequence Based Transceiver for UWB Sensor Networks / - 2019. In: Radioengineering. Vol. 28, no. 1(2019), p.1-8 (IF = 0.967)
- [9] GAZDA, Juraj - VOLOŠIN, Marcel - BUGÁR, Gabriel - GAZDA, Vladimír: Frequency spectrum as the investment: an agent-based approach for modeling operator's strategies / - 2017. In: Joint CTTE and CMI conference 2017. - Copenhagen : Aalborg University, 2017 P. 1-2.
- [10] BUGÁR, Gabriel - MAKSYMUK, Taras - GAZDA, Juraj: Techno-Economic Framework for Dynamic Operator Selection in a Multi-Tier Heterogeneous Network, Ad Hoc Networks (2. recenzné kolo) (IF = 3.6)
- [11] GAZDA, Juraj, et.al. "Dynamické zdieľanie frekvenčného spektra v 5G sieťach", Elfa,Košice, ISBN

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky dosiahnuté v projekte je možné realizovať v nastupujúcej 5G mobilných komunikačných systémoch, resp. v ich ďalšej evolúcií. Praktickou aplikáciou navrhnutých metód je možné výrazne zlepšiť prevádzkové vlastnosti bezdrôtových komunikačných systémov. Vyvinuté metódy sú založené na aplikácií strojového učenia a heuristických prístupov, ktorých uplatnenie vo vysoko-dynamických systémov vykazuje vynikajúce výsledky. Tieto predpoklady boli potvrdené aj v dynamických modeloch vyvinutých v rámci projektu. Navrhnuté metódy sa orientujú na optimalizáciu dynamickej distribúcie frekvenčného spektra medzi participujúcimi operátormi (optimalizácia cien a prevádzkových vlastností siete) a na optimalizáciu RAN topológie operátorov. V rámci projektu bol navrhnutý unikátny realistický model vybraných svetových veľkomiest, realistických prenosových kanálov (vrátane mnohocestného šírenia), ako aj realistickej RAN topológie operátorov, čo výrazne zvyšuje dôveryhodnosť navrhnutých metód. Návrhy jednotlivých metód boli publikované v prestížnych svetových časopisoch, čo potvrdzuje akceptáciu jednotlivých metód vo svetovom meradle.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Projekt APVV15-0055 riešil mimoriadne aktuálne témy v oblasti 5G komunikačných systémov. Cieľom projektu bolo analyzovať a) možnosti dynamickej distribúcie frekvenčného spektra medzi rozličnými druhmi operátorov a v reálnom čase; b) možnosti zvýšenia efektivity pokrytia 5G sietí využitím strojového učenia; c) možnosti experimentálneho overenia monitorovania spektra v licencovanom/nelicencovanom pásme. Je nutné poznamenať, že tieto výskumné smery tvoria diskutovanú oblasť v procese vývoja 5G a Beyond5G sietí a náš výskum bol silne korelovaný s výskumom na popredných svetových inštitúciách. Prvá etapa projektu bola venovaná najmä výskumu v oblasti dynamickej distribúcie frekvenčného spektra. V rámci tejto etapy boli navrhnuté viaceré modely analyzujúce možnosti zdieľania frekvenčného spektra medzi tradičnými operátormi, virtuálnymi operátormi, ako aj operátormi vlastniami infraštruktúru malých bazových staníc. Navrhnuté modely sú škálovateľné, vyukazujú vysokú mieru realistickosti a vysoko-paralelizované. Okrem iného umožňujú dynamický výber simulovaného prostredia, možnosť výberu realistickej infraštruktúry operátora (polôh bazových staníc, vysielaceho výkonu a pod.). Na základe výsledkov dosiahnutých v rámci projektu je možné tvrdiť, že dynamická distribúcia frekvenčného spektra umožňuje zlepšenie prevádzkových vlastností 5G siete, no

súčasne môže ohrozovať relatívne stabilné zisky tradičných operátorov. Tieto relatívne protiídúce faktory je nutné ďalej analyzovať, pričom v budúcnosti očakávame nevyhnutnú reguláciu tradičného licencovaného využívania dostupného frekvenčného spektra napr. zákonnými zásahmi narodných telekomunikačných úradov. Výsledky v tejto výskumnej téme boli v rámci projektu publikované na viacerých významných konferenciách (napr. EUMAS), ale aj v časopisoch svetového významu (okrem iných Computer Networks (kvartil Q1), Telecommunication Systems (kvartil Q2), či Ad-Hoc Networks (2. recenzné kolo, kvartil Q1)). Dosiahnuté výsledky plne korešponujú s výzvami uvedenými v pracovných balíkoch PB1, PB3, PB6, PB7, PB8 či PB14 a preto je možné považovať za výskumné výzvy v týchto pracovných balíkoch ako splnené. Využitelnosť strojového učenia za účelom zlepšenia prevádzkových vlastností 5G siete bol analyzovaný v pracovných balíkoch PB9 a PB11. Z dôvodu neustáleho zvyšovania zložitosti telekomunikačných sietí sú tradičné formy plánovania RAN siete operátora veľmi neefektívne. S nástupom pohyblivých bázových staníc (drony, autá) je nevyhnutné využívať algoritmy strojového učenia, resp heuristické algoritmy, ktoré umožnia dosiahnuť optimalizáciu parametrov RAN siete operátora (napr poloha bázových staníc malého rozsahu, či ich vysielací výkon). V rámci projektu bola navrhnutá celá sada algoritmov strojového učenia (supervised, unsupervised a reinforcement learning), ktoré umožňovali optimalizáciu polôh malých bázových staníc, či trajektórií lietajúcich dronov. Výsledky boli experimentálne overené v realistických modeloch veľkých miest v RAN sieti operátora T-Mobile a AT&T. Významné úspechy dosiahnuté v rámci tohto výskumného smeru boli publikované v prestížnom karentovanom časopise IEEE Access (kvartil Q1) a ďalšie sú momentálne v recenzných konaniach. Téma experimentálneho overenia monitorovania spektra v licencovanom, resp v nelicencovanom pásme umožnila aplikáciu vybraných smerov teoretického výskumu v praktických scenároch. V rámci tejto výskumnej etapy boli navrhnuté spektrálne efektívne modulácie QAM určené pre vojenské účely, resp prostredie IoT, či HW návrh antén pre senzorové systémy, ktoré spadajú pod PB 11.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The project APVV15-0055 dealt with the most current topics in the field of 5G communication systems. The aim of the project was to analyze a) possibilities of dynamic distribution of the spectrum between different types of operators and in real time; b) possibilities to increase the efficiency of coverage of 5G networks by using machine learning; c) possibilities for experimental verification of spectrum monitoring in the licensed / unlicensed band. It should be noted that these research directions form the area under discussion in the process of developing 5G and Beyond5G networks, and our research has been strongly correlated with research at the world's leading institutions. The first phase of the project was devoted mainly to research in the field of dynamic distribution of spectrum. Within this phase, several models have been proposed analyzing the possibilities of spectrum sharing between traditional operators, virtual operators as well as operators owning infrastructure of small base stations. Designed models are scalable, show a high degree of realism and highly parallelized. Among other things, they allow dynamic selection of the simulated environment, the possibility of selecting the realistic infrastructure of the operator (positions of base stations, transmit power, etc.). Based on the results of the project, it can be argued that the dynamic distribution of the spectrum makes it possible to improve the operational characteristics of the 5G network, but at the same time it may jeopardize the relatively stable profits of traditional operators. These relatively backward factors need to be further analyzed, and in the future we expect the necessary regulation of the traditional licensed use of the available spectrum, for example. statutory interventions of the telecommunications authorities. The results of this research topic have been published within the project at several important conferences (e.g. EUMAS), but also in magazines of world importance (among others Computer Networks (quartil Q1), Telecommunication Systems (quartil Q2), or Ad-Hoc Networks (2 review round, quartil Q1)). The results achieved fully correspond to the challenges presented in the work packages WP1, PB3, W6, WP7, WP8 or WP14 and can therefore be considered as research challenges in these work packages as fulfilled. The usability of machine learning to improve the operational features of the 5G network has been analyzed in the WP9 and WP11 work packages. Due to the ever increasing complexity of telecommunication networks, traditional forms of RAN network

planning are very ineffective. With the advent of mobile base stations (drones, cars), it is necessary to use machine learning algorithms, or heuristic algorithms, which will enable the optimization of RAN parameters of the operator network (eg position of small stations or their transmit power). Within the project, a whole set of machine learning algorithms (supervised, unsupervised and reinforcement learning) was designed to optimize the positions of small base stations or trajectories of flying drones. The results were experimentally verified in realistic models of large cities in the T-Mobile and AT&T RAN network. Significant achievements in this field of research have been published in the prestigious, IEEE Access journal (quartil Q1), and others are currently under review. The topic of experimental verification of spectrum monitoring in the licensed or unlicensed band enabled the application of selected directions of theoretical research in practical scenarios. Spectral effective modulations of QAM design for military purposes, IoT environment or HW antenna design for sensor systems were designed within this research phase (WP11).