



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0214

Inteligentné riadenie 5G komunikačných systémov na báze komplexného strojového a hlbokého učenia

Zodpovedný riešiteľ **doc. 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

-

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

Publikácie v zahraničných karentovaných časopisoch:

- [1] Ružička, M., Vološin, M., Gazda, J., Maksymyuk, T., Han, L., & Dohler, M. (2022). Fast and computationally efficient generative adversarial network algorithm for unmanned aerial vehicle-based network coverage optimization. International Journal of Distributed Sensor Networks, 18(3), 15501477221075544.,
- [2] Maksymyuk, T., Gazda, J., Bugár, G., Gazda, V., Liyanage, M., & Dohler, M. (2022). Blockchain-Empowered Service Management for the Decentralized Metaverse of Things. IEEE Access, 10, 99025-99037.
- [3] Kosarevych, R., O., Maksymyuk, T., & Gazda, J. (2022). Spatial point patterns generation on remote sensing data using convolutional neural networks with further statistical analysis. Scientific Reports, Nature, 12(1), 1-9.
- [4] HORVATH, Denis, et al. Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment. Entropy, 2019, 21.11: 1077.
- [5] HORVÁTH, Denis, et al. Evolutionary coverage optimization for a self-organizing UAV-based wireless communication system. IEEE Access, 2021, 9: 145066-145082.
- [6] RUŽIČKA, Marek, et al. Fast and computationally efficient generative adversarial network algorithm for unmanned aerial vehicle-based network coverage optimization. International Journal of Distributed Sensor Networks, Sage, 2022, 18.3: 15501477221075544.
- [7] ŠLAPAK, Eugen, et al. Cost-effective resource allocation for multitier mobile edge computing in 5G mobile networks. IEEE access, 2021, 9: 28658-28672.

- [8] GAZDA, Juraj, et al. Intelligent framework for radio access network design. *Wireless Networks*, Springer, 2020, 26.1: 759-774.
- [9] MAKSYMUK, Taras, et al. Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, 2020, 58.9: 86-92.
- [10] KHAN, Mubbashar A., et al. A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Wiley, , 2020.
- [11] BUGÁR, Gabriel, et al. Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, 2020, 97: 102007.
- [12] LUTSIV, Nazarii, et al. Deep semisupervised learning-based network anomaly detection in heterogeneous information systems. *Computers, Materials and Continua*, 2021, 70.1: 413-431.
- [13] GAZDA, Juraj, et al. Blockchain-Empowered Service Management for the Decentralized Metaverse of Things. *IEEE Access*, 2022, 10: 99025-99037.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky dosiahnuté počas realizácie projektu je možné lokalizovať do základného výskumu, prinášajúce fundamentálne nové poznatky, metódy a postupy do oblasti bezdrôtových komunikačných sietí. Ide predovšetkým o postupy integrujúce poznatky z oblasti progresívnych metód umelej inteligencie, distribuovaných databáz blockchain a nových optimalizačných metód v 6G sieťach. Na základe robustných počítačových simulácií je možné tvrdiť, že navrhované algoritmy prekonávajú prevádzkové vlastnosti referenčných algoritmov vo výraznej miere, čo potvrdzuje ich unikátnosť. Realizované výstupy majú charakter základného výskumu a preto boli publikované predovšetkým v prestížnych zahraničných časopisoch, pričom je na ne možné registrovať výrazný citačný ohlas.

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

Projektové výstupy publikované na viacerých platformách plne korešpondovali s navrhnutými projektovými balíkmi. Išlo predovšetkým o implementáciu vybraných algoritmov umelej inteligencie (strojové učenie, metaheuristické prístupy) vo vybraných scenároch fungovania 5G/6G sietí a to konkrétne a) mobilnú 5G infraštruktúru s podporou lietajúcich bázových staníc (dronov), b) výpočtami na hrane v 5G sieti a c) implementácie technológie blockchain v 5G sieti s podporou umelej inteligencie. V rámci týchto hlavných vedeckých smerov bolo publikovaných niekoľko unikátnych metód, ktoré výrazne rozšírili hranice poznania v týchto oblastiach. Je nevyhnutné poznamenať fakt, že navrhnuté metódy boli uverejnené v prestížnych karentovaných časopisoch a existuje na nich významný zahraničný citačný ohlas.

a) Mobilná 5G infraštruktúra s podporou lietajúcich bázových staníc

V rámci tejto oblasti bolo počas projektového obdobia publikovaných niekoľko významných príspevkov. V projekte sme sa venovali návrhu metódy pre samoorganizáciu letky UAV zariadení, ktorých cieľom bola maximalizácia pokrytia. V rámci výskumu sme navrhli unikátny prístup založený na Langevinovej dynamike, pričom riadená letka UAV zariadení vykazovala unikátne prevádzkové vlastnosti v porovnaní s existujúcimi referenčnými metódami.

b) Výpočty na hrane v 5G sieti využitím strojového učenia

Projektový kolektív v spolupráci so zahraničnými partnermi publikoval možnosti návrhu topológie 5G siete s integrovanými výpočtami na hrane využitím Bayesovskej optimalizácie, ktorá optimalizuje výkon siete v kontexte ekonomických možností operátora. Ďalší výskum v tejto oblasti diskutoval o implementácii vybraných algoritmov strojového učenia (K-means, SOM) v 5G sieti, pričom návrh umožnil efektívnu alokáciu výpočtových prostriedkov v priestore a čase operátorom s cieľom optimalizovať prevádzkové vlastnosti 5G siete.

c) implementácie technológie blockchain v 5G sieti s podporou umelej inteligencie

V rámci projektu bol navrhnutý unikátny technologický rámec integrujúci vybrané prvky hlbokého učenia, technológie blockchain a ekonomického rámca v 6G. Základnou myšlienkou je dynamická alokácia komunikačných prostriedkov operátora, ako aj samotného operátora v reálnom čase. Jednotlivé transakcie sú proaktívne zamenávané v distribuovanej databáze blockchain, pričom optimalizácia komunikačných prostriedkov je realizovaná využitím hlbokého učenia na báze LSTM učenia. V rámci projektu bola rovnako

navrhnutná unikátna metóda distribúcie komunikačných prostriedkov využitím umelej inteligencie, trade-and-floor pravidla a technológie blockchain v 6G sieťach. Robustné simulačné experimenty naznačili výhodnosť navrhnutého modelu, pričom na článku sa spolupodieľali aj kolegovia z prestížnej univerzity v USA. Na tieto výskumy plynule nadväzuje ďalší výskum smerujúci do možnosti dynamickej voľby operátora v reálnom čase využitím učenia s posilňovaním. Je nevyhnutné poznamenať fakt, že na tieto príspevky existuje mimoriadne bohatý zahraničný citačný ohlas.

Z pohľadu naplnenia projektových cieľom je možné konštatovať, že počet výstupov v prestížnych zahraničných časopisoch, ako aj zaznamenaný citačný ohlas vo významnej miere prekročil pôvodné projektové očakávania. Tento fakt je mierne negovaný menším počtom konferenčných príspevkov a to z toho dôvodu, že konferenčné príspevky boli kvôli pandémie COVID výrazne obmedzené. Pôvodne navrhnuté projektové balíky boli zrealizované v plnej miere, čo dokumentuje aj mimoriadne plodná publikačná aktivita riešiteľského kolektívu.

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

The project outputs published on several platforms fully corresponded with the proposed project working packages. It was primarily about the implementation of selected artificial intelligence algorithms (machine learning, metaheuristic approaches) in selected scenarios of the functioning of 5G/6G networks, namely a) mobile 5G infrastructure with the support of flying base stations (drones), b) edge processing in the 5G network, and c) implementation of blockchain technology in the 5G network with the support of artificial intelligence. Within these main research directions, several unique methods were published, which significantly expanded the boundaries of knowledge in these areas. It is necessary to note the fact that the proposed methods were published in prestigious peer-reviewed journals and there is a significant foreign citation response to them.

a) Mobile 5G infrastructure with the support of flying base stations

Several important papers were published in this area during the project period. In the working package, we focused on the design of a method for the self-organization of a squadron of UAV devices, the goal of which was to maximize coverage. As part of the research, we proposed a unique approach based on Langevin dynamics, while a controlled squadron of UAV devices showed unique performance characteristics compared to existing state-of-the-art methods.

b) Computing at the edge in the 5G network using machine learning

The project team, in cooperation with foreign partners, published the possibilities of designing a 5G network topology with integrated edge computing platform using Bayesian optimization, which optimizes network performance in the context of the economic possibilities of the operator. Further research in this area discussed the implementation of selected machine learning algorithms (K-means, SOM) in the 5G network, while the proposal enabled the efficient allocation of computing resources in space and time by operators in order to optimize the operational properties of the 5G network.

c) Implementation of blockchain technology in the 5G network with the support of artificial intelligence

As part of the project, a unique technological framework was designed integrating selected elements of deep learning, blockchain technology and the economic framework in 6G. The basic idea is the dynamic allocation of communication resources of the operator in real time. Individual transactions are proactively recorded in the distributed blockchain database, while the optimization of communication resources is implemented using deep learning based on LSTM learning. As part of the working package, a unique method of communication resource distribution based on the blockchain technology in 6G networks was also proposed. Robust simulation experiments indicated the usefulness of the proposed model. These researches are continuously followed by further research aimed at the possibility of dynamic operator selection in real time using reinforcement learning. It is necessary to note the fact that there is an rich foreign citation response to these contributions.

From the point of view of fulfilling the project goals, it can be concluded that the number of outputs in prestigious foreign journals, as well as the recorded citation response, significantly exceeded the original project expectations. This fact is slightly negated by the smaller number of conference contributions, and that is because conference contributions

were significantly limited due to the COVID pandemic. The originally designed project packages were fully successfully realized.