

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТАКТИЛЬНОГО ТРАФІКУ У ТЕЛЕОПЕРАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ МЕРЕЖІ 6G

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;

²Шосткинський фаховий коледж ім. Івана Кожедуба Сумського державного Університету

Анотація

Запропоновано модель аналізу, що забезпечує важливу інформацію про відомості о статистичні необхідного інтернет-трафіку у перспективних мережах 6G. Робота запропонованої моделі ґрунтується на тактильному Інтернеті.

Ключові слова: мережа 6G, тактильний Інтернет, телеопераційна система, швидкість передачі пакетів.

Abstract

An analysis model is proposed that provides important information about the required statistics of Internet traffic in perspective 6G networks. The work of the proposed model is based on the Tactile Internet.

Keywords: 6G network, tactile Internet, teleoperating system, packet speed.

Вступ

Останнім часом широкого поширення набувають сучасні методи обробки інформації за допомогою поляризаційної обробки [1-14] та за допомогою мереж безпроводного зв'язку 5G та 6G [15-25]. До технологій цих мереж відносять взаємодію між абонентами D2D [26-31], взаємодію між пристроями M2M [32-35], ортогональне рознесення OFDM [36-43], поляризаційна обробка [44-53], інтелектуальна обробка у антенних решітках [54-58], взаємодія у сенсорних безпроводних гетерогенних мережах [59-68], та технології тактильного Інтернету [69-72].

Метою роботи є удосконалення методу зменшення великих потоків даних у гетерогенній мережі за рахунок зменшення затримки та покращення якості обслуговування.

Результати дослідження

Тактильний Інтернет в 6G передбачає передачу у реальному часі інформації для віддаленого керування фізичними або віртуальними об'єктами через Інтернет. Тактильний Інтернет дозволяє використовувати дистанційну роботу на основі тактильного зв'язку.

На рис. 1 наведена схема типової двобічної телеопераційної системи взаємодії із комунікаційною мережею. Із рис. 1 видно, що система взаємодіє через пристрій HSI, що відображає тактильну взаємодію із віддаленим тактильним оператором TOR для людського оператора НО. На основі сприймаємої зони нечутливості скорочення даних може бути розгорнуте із втратами механізму стискання. Це можливо оскільки люди не можуть розрізнити досить малі відмінності в тактильних стимулах. Людське сприйняття тактильної чутливості можна використовувати для зниження швидкості тактильних пакетів. Закон Вебера визначає лише помітну різницю (JND), тобто мінімальну зміну величини стимулу, що може бути виявлений. В результаті цей закон є причиною кодування зони нечутливості. В цій методиці тактильний зразок передається лише у випадку його зміни відносно раніше переданої тактильної вибірки, що перевищує задане граничне значення.

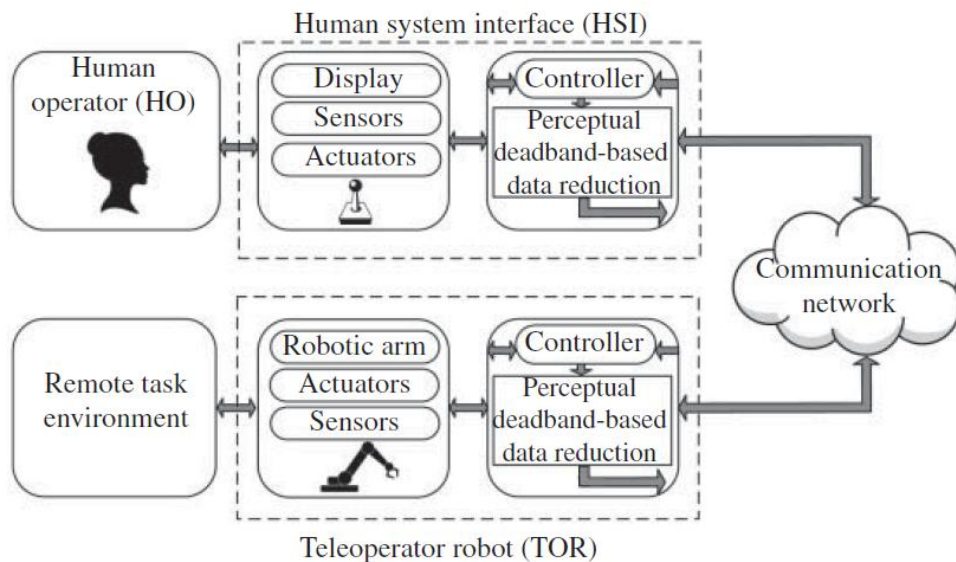


Рис. 1. Схема двобічної телеопераційної системи взаємодії із комунікаційною мережею

Розглянемо характеристики тактильного Інтернету для набору тактильних слідів, що отримані у результаті телеопераційних дослідів за участі TOR. На рис. 2 наведена гістограма експериментального часу взаємодії пакетів для шляху команди (рис. 2 а) та шляху зворотного зв'язку (рис. 2. б).

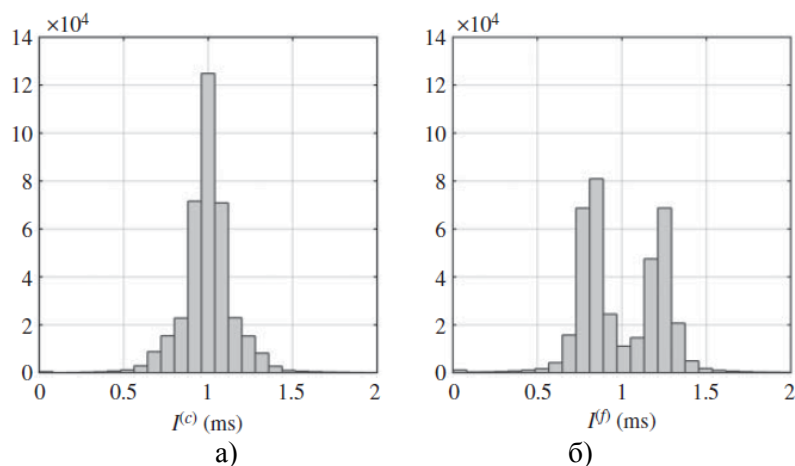


Рис 2. Гістограма експериментального часу взаємодії пакетів для шляху команди та шляху зворотного зв'язку

На рис. 2 а зображена гістограма часу взаємодії пакетів $I(c)$ у командному шляху, отриманому зі слідів телеоперації 6-DoF, причому час найбільш частого взаємодії пакетів, як очікується, буде центрований на 1 мс через частоту дискретизації за замовчуванням 1 кГц. Гістограма часу взаємодії пакетів $I(f)$ на шляху зворотного зв'язку (від TOR до HO) показана на рис. 2 б. Відзначимо, що шлях зворотного зв'язку відрізняється від шляху команди тим, що він демонструє два піки. Один знаходиться приблизно на 0,75 мс, а інший знаходиться на 1,25 мс. Отже два піки існують, оскільки датчики сили та рухомого моменту TOR працюють з двома дещо різними частотами дискретизації вище і нижче 1 кГц.

На рис. 3 показаний додатній вплив кодування зони нечутливості на пониження швидкості тактильних пакетів в тракті зворотного зв'язку та в тракті команд.

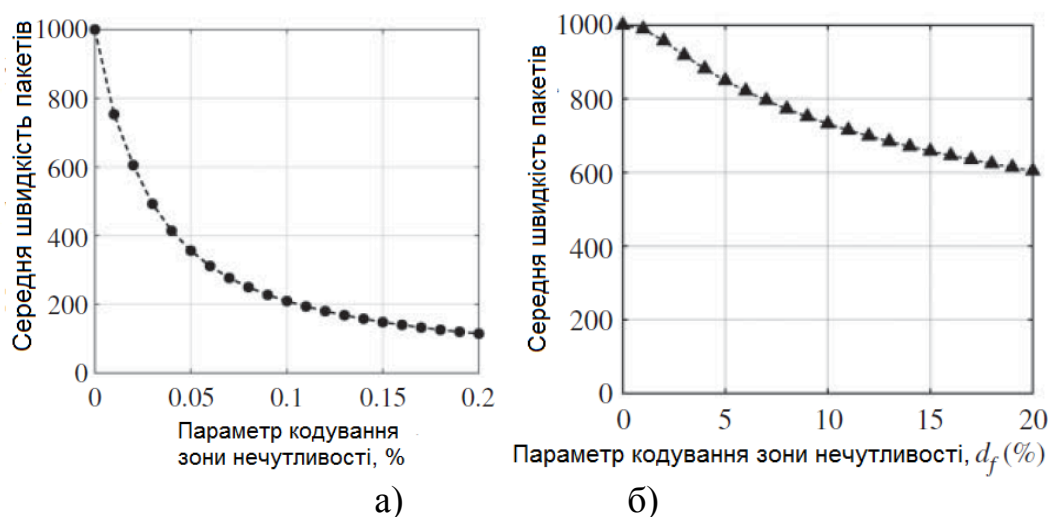


Рис 3. Залежність швидкості передачі пакетів від параметру кодування зони нечутливості

У командному тракті параметр зони нечутливості лише $dc=0,02\%$ зменшує середню швидкість передачі пакетів $\lambda c(dc)$ приблизно до 600 пакетів/с, що веде до зменшення швидкості тактильних пакетів на 39,5% порівняно із випадком без кодування зони нечутливості ($dc = 0$). Із рис. 3 а, $\lambda c(dc)$ додатково зменшується при збільшенні постійного струму та вирівнюється за постійного струму більше 0,1%. Із рис. 3 б бачимо, що кодування зони нечутливості менше ефективно у тракті зворотного зв'язку, де для зменшення середньої швидкості передачі пакетів $\lambda f(df)$ необхідний високий параметр зони нечутливості, як $df = 20\%$ приблизно до 600 пакетів/с.

Висновки

Отже, проведений аналіз шляху дає важливу інформацію про відомості о статистиці тактильного інтернет-трафіка. Більш систематичний підхід, спрямований на вивчення додаткових тактильних шляхів різноманітних типів дослідів телеоперації, буде сприяти точній перевірці розподілу часу між прибуттями пакетів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stutzman W.L. Polarization in Electromagnetic Systems / W.L. Stutzman // Artech House, Norwood 2018, 352.
2. Wang L. Excess loss reduction in low cost wide waveguide gap polarization mode converter / L. Wang, Y. Zhao, Y. Xu, T. Zhou, W. Liu, Z. Chen, W. Liu // IEEE Photonics Technology Letters. – 2013. – Vol. 25. – pp. 741-744. DOI: 10.1109/LPT.2013.2246861.
3. Piltyay S.I. Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems / S.I. Piltyay, O.Yu. Sushko, A.V. Bulashenko, I.V. Demchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2020. – Vol. 79, no. 19. – pp. 1673–1690. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
4. Bulashenko A.V. Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2020. – Vol. 12, no. 6. – pp. 06026-1–06026-5. DOI: 10.21272/jnep.12(6).06026.
5. Piltyay S. Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts / S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, O. Bulashenko // Path of Science. – 2020. – Vol. 6, No 11. – pp. 5001–5010. <http://doi.org/10.22178/pos.55-1>.
6. Piltyay S. FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers / S. Piltyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, O. Bulashenko // IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory, 25-27 November 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 132-137. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
7. Piltyay S. New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems / S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, O. Bulashenko // IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory, 25-27 November 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 342-348. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.

8. Bulashenko A. Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers / A. Bulashenko, S. Piltyay, Ye. Kalinichenko, O. Bulashenko // *IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 25-27 November 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 330-336. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
9. Bulashenko A.V. Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*. – 2020. – Vol. 83. – pp. 17–28. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28>.
10. Piltyay S.I. Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simulation of waveguide polarizers / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, Y.Y. Herhil // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*. – 2021. – Vol. 84. – pp. 11–21. DOI:10.20535/RADAP.2021.84.11-21.
11. Bulashenko A.V. Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // *Science-Based Technologies*. – 2020. – Vol. 47, No. 3. – pp. 287–297. (in Ukrainian). <http://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14878>.
12. Bulashenko A.V. Waveguide polarizer with three irises for antennas of satellite television systems / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, H.S. Kushnir, O.V. Bulashenko // *Science-Based Technologies*. – 2020. – Vol. 49, No. 1. – pp. 39–48. (in Ukrainian). <http://doi.org/10.18372/2310-5461.49.15290>.
13. Piltyay S.I. Analytical synthesis of waveguide iris polarizers / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, I.V. Demchenko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2020. – Vol. 79, No 18. – pp. 1579–1597. <http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10>.
14. Bulashenko A.V. Analytical technique for iris polarizers development / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, 8-10 October 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 464–469.
15. Ghosh A. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 / A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, D. Chandramouli // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – pp. 127639-127651. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939938.
16. Naqvi S.H.R. 5G NR mmWave indoor coverage with massive antenna system / S.H.R. Naqvi, P.H. Ho, L. Peng // *Journal of Communications and Networks*. – 2021. – Vol. 23, No. 1. – pp. 1-11. DOI: 10.23919/JCN.2020.000031.
17. Piltyay S.I. Wireless sensor network connectivity in heterogeneous 5G mobile systems / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, I.V. Demchenko // *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 8-10 October 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 508–513.
18. Mahmood N.H. Six key features of machine type communication in 6G / N.H. Mahmood, H. Alves, O.A. Lopez, M. Shehab, D.P.M. Osorio, M. Latva-Aho // *IEEE 2nd 6G Wireless Summit*, 17-20 March 2020, Levi, Finland. DOI: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794.
19. Naqvi S.H.R. 5G NR mmWave indoor coverage with massive antenna system / S.H.R. Naqvi, P.H. Ho, L. Peng // *Journal of Communications and Networks*. – 2021. – Vol. 23, No. 1. – pp. 1-11. DOI: 10.23919/JCN.2020.000031.
20. G. Liu. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030 system / G. Liu, Y. Huang, N. Li, J. Dong, J. Jin, Q. Wang, N. Li // *China Communications*. – 2021. – Vol. 17, No. 9. – pp. 92-104. DOI: 10.23919/JCC.2020.09.008.
21. Abbou A.N. A software-defined queuing framework for QoS provisioning in 5G and beyond mobile systems / A.N. Abbou, T. Taleb, J. Song // *IEEE Network*. – 2021. – Vol. 35, No. 2. – pp. 168-173. DOI: 10.1109/MNET.011.2000441.
22. Weerasinghe N. A novel blockchain-as-a-service (BaaS) platform for local 5G operators / N. Weerasinghe, T. Hewa, M. Liyanage, S.S. Kanhere, M. Ylianttila // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2021. – Vol. 2. – pp. 575-6013. DOI: 10.1109/OJOMS.2021.3066284.
23. Antonioli R.P. Decentralized joint Beamforming, user scheduling, and QoS management in 5G and Beyond system / R.P. Antonioli, G. Fodor, P. Soldati, T.F. Maciel // *IEEE Communications Standards Magazine*. – 2021. – Vol. 5, No. 1. – pp. 62-69. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.2000029.
24. Ali K. Review and implementation of resilient public safety networks: 5G, IoT, and emerging technologies / K. Ali, H.X. Nguyen, Q.-T. Vien, P. Shah, M. Raza, V.V. Paranthaman, B. Er-Rahmadi, M. Awais // *IEEE Network*. – 2021. – Vol. 35, No. 2. – pp. 18-25. DOI: 10.1109/MNET.011.2000418.
25. Hayat S. Edge computing in 5G for drone navigation: what to offload / S. Hayat, R. Jung, H. Hellwagner, C. Bettstetter, D. Emini, D. Schnieders // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – pp. 2571-2578. DOI: 10.1109/LRA.2021.3062319.

26. Bulashenko A.V. Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G networks / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, 8-10 October 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 324–329.
27. Piltyay S.I. Wireless sensor network connectivity in heterogeneous 5G mobile systems / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, I.V. Demchenko // *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 8-10 October 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 508–513.
28. Bulashenko A. New traffic model of M2M Technology in 5G wireless sensor networks / A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishchuk, O. Bulashenko // *IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 25-27 November 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125–131. <http://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349305>.
29. Bulashenko A.V. Evaluation of D2D Communications in 5G networks / A.V. Bulashenko // *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*. – 2020. – Vol. 81. – pp. 21–29. (in Ukrainian). <http://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.21-29>.
30. Bulashenko A.V. Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology / A.V. Bulashenko // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2021. – Vol. 1. – pp. 7–13. (in Ukrainian). <http://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-1>.
31. Bulashenko A.V. Data upload system using D2D technology in the unlicensed frequency range as part of the 5G communication system / A.V. Bulashenko // *Technical Engineering*. – 2020. – Vol. 86, No. 2. – pp. 103–107. (in Ukrainian). [http://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-103-107](http://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-103-107).
32. Barki A. M2M security: challenges and solutions / A. Barki, A. Bouabdallah, S. Gharout, Y. Traore // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2016. – Vol. 18, No. 2. – pp. 1241-1254. DOI: 10.1109/COMST.2016.2515516.
33. Bulashenko A.V. Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks / A.V. Bulashenko // *KPI Science news*. – 2020. – Vol. 3. – pp. 7–13. (In Ukrainian). <http://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.203863>.
34. He Y. Spatial group based access class barring for massive access in M2M / Y. He, G. Ren, S. Liang // *IEEE Communications Letters*. – 2020. – Vol. 25, No. 3. – pp. 812-816. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3039193.
35. Bulashenko A. New traffic model of M2M Technology in 5G wireless sensor networks / A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishchuk, O. Bulashenko // *IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 25-27 November 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125–131. <http://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349305>.
36. Myronchuk O. Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, 25-29 Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine. DOI:10.1109/TCSET49122.2020.235385.
37. Myronchuk A.Y. Channel frequency response estimation method based on pilot's filtration and extrapolation / A.Y. Myronchuk, O.O. Shpylka, S.Y. Zhuk // *Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2019. – Vol. 78. – pp. 36-42. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.36-42.
38. Myronchuk O.Y. Two-Stage Method for Joint Estimation of Information Symbols and Channel Frequency Response in OFDM Communication Systems / O.Y. Myronchuk, A.A. Shpylka, S.Y. Zhuk // *Radioelectronics Communications System*. – 2020. – Vol. 63. – pp. 418–429. <https://doi.org/10.3103/S073527272008004X>.
39. Myronchuk O. Two-stage channel frequency response estimation in OFDM systems / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // *Path of Science*. – 2020. – Vol. 6, No. 2. – pp. 1001-1007. DOI: 10.22178/pos.55-1.
40. Zhuk S.Y. Estimation of stochastic processes with random structure and Markov switches in discreet time / S.Y. Zhuk // *Radioelectronics Communications System*. – 2020. – Vol. 63, No. 10. – pp. 505–520. <https://doi.org/10.3103/S0735272720100015>.
41. Vishnevyy S.V. Two-stage joint non-causal filtering and segmentation of nonuniform images / S.V. Vishnevyy, S.Y. Zhuk // *Radioelectronics Communications System*. – 2011. – Vol. 54, No. 10. – pp. 554–565. <https://doi.org/10.3103/S07352727211100050>.
42. Вишневий С.В. Алгоритм объединения результатов одномерной оптимальной фильтрации при обработке изображений / С.В. Вишневий, С.Я. Жук // *Вісник НТУУ «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2010. – Vol. 40. – pp. 55–60. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2010.40.55-60>.

43. Vishnevyy S. Two-stage segmentation of SAR images distorted by additive noise with uncorrelated samples / S. Vishnevyy // *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology*, 16-18 April 2019, Kyiv, Ukraine. DOI:10.1109/ELNANO.2019.8783707.
44. Bulashenko A.V. Analytical technique for iris polarizers development / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // *IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. – Kharkiv, Ukraine, 2020. – pp. 471-476.
45. Piltyay S.I. Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, I.V. Demchenko // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2020. – Vol. 12, No. 5. pp. 05024-1–05024-5. [http://doi.org/10.21272/jnep.12\(5\).05024](http://doi.org/10.21272/jnep.12(5).05024).
46. Bulashenko A.V. Simulation of compact polarizers for satellite telecommunication systems with the account of irises' thickness / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, I.V. Demchenko // *KPI Science news*. – 2021. – Vol. 1. – pp. 25–33. <http://doi.org/10.20535/kpi-sn.2021.1.203863>.
47. Bulashenko A.V. Compact waveguide polarizer with three antiphase posts / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, H.S. Kushnir, O.V. Bulashenko // *Visnyk VPI*. – 2020. – Vol. 5. – pp. 97–104. [In Ukrainian]. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
48. Bulashenko A.V. Tunable square waveguide polarizer with irises and posts / A.V. Bulashenko, S.I. Piltyay, Y.I. Kalinichenko, O.V. Bulashenko // *Technical Engineering*. – 2020. – Vol. 86, no 2. – pp. 108–116. [In Ukrainian]. DOI: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
49. Piltyay S.I. High performance waveguide polarizer for satellite information systems / S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko, Ye.I. Kalinichenko, O.V. Bulashenko // *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. – 2020. – Vol. 4. – pp. 14–26. [In Ukrainian]. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129.
50. Dubrovka F. Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides / F. Dubrovka, S. Piltyay // *Information and Telecommunication Science*. – 2014. – Vol. 5, no. 1. – pp. 48–61. DOI: 10.20535/2411-2976.12014.48-61.
51. Naydenko V. Evolution of radiopulses radiated by Hertz's dipole in vacuum / V. Naydenko, S. Piltyay // *IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic*, 1-2 July 2008, Odessa, Ukraine. DOI: 10.1109/MMET.2008.4580972.
52. Piltyay S.I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer / S.I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*. – 2014. – Vol. 58. – pp. 27–34. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2014.58.27-34>.
53. Dubrovka F. Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides / F. Dubrovka, S. Piltyay // *IEEE International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 21-24 February 2012, Lviv, Ukraine.
54. Bulashenko A.V. Beamforming principals of smart antennas / A.V. Bulashenko // *Visnik Sumy State University. Seriiia Technical sciences*. – 2010. – Vol. 1. – pp. 111-120.
55. Булашенко А.В. Живлення антенних решіток на основі лінз Ротмана (огляд) / А.В. Булашенко, Ф.Ф. Дубровка // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. - 2010. - №3, Т.2. - С. 113-120.
56. Bulashenko A.V. Multibeam arrays on the basis of Rotman lenses / A.V. Bulashenko // *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*. – 2010. – Vol. 42. – pp. 178–186. <http://doi.org/10.20535/RADAP.2010.42.178-186>.
57. Imbert M. Assessment of LTCC-based dielectric flat lens antennas and switched-beam arrays for future 5G millimetre-wave communication systems / M. Imbert, J. Romeu, M. Baquero-Escudero, M.-T. Martinez-Ingles, J.-M. Molina-Garcia-Pardo, L. Jofre // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2017. – Vol. 65, No. 12. – pp. 6453–6473. <http://doi.org/10.1109/TAP.2017.2767821>.
58. Nightingale J. 5G-QoE modeling for ultra-HD video streaming in 5G networks / J. Nightingale, P. Salva-Garcia, J.M.A. Calero, Q. Wang // *IEEE Transactions on Broadcasting*. – 2018. – Vol. 64, no. 2. – pp. 621–634. DOI: 10.1109/TBC.2018.2816786.
59. Alghamdi S.A. Cellular V2X with D2D communications for emergency message dissemination and QoS assured routing in 5G environment / S.A. Alghamdi // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – pp. 56049–56065. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071349.
60. Dong R. Deep learning for radio resource allocation with diverse quality-of-service requirements in 5G / R. Dong, C. She, W. Hardjawana, Y. Li, B. Vucetic // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – Vol. 20, No. 4. – pp. 2309–2324. DOI: 10.1109/TWC.2020.3041319.

61. Al-Saadi A. Routing Protocol for Heterogeneous Wireless Mesh Networks / A. Al-Saidi, R. Setchi // IEEE Transaction on Vehicular Technology. – 2016. – Vol. 65, No. 12. – pp. 9773-9786. DOI:10.1109/TVT.2016.2518931.
62. Helmi M. Utilization of aerial heterogeneous cellular networks: Signal-to-interference ratio analysis / M. Helmi, H. Arslan // Journal of Communication and Networks. – 2018. – Vol. 20, No. 5. – pp. 484-495. DOI:10.1109/JCN.2018.000073.
63. Гнитецький В.А. Забезпечення дуже низьких затримок у стільниковій системі 5G на базі MEC / В.А. Гнитецький, А.В. Булашенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 18 – 24 листопада 2019 р — Київ, 2019. — С. 153 – 155.
64. Гладун В.В. Забезпечення високої якості мережі 5G за допомогою технології D2D / В.В. Гладун, А.В. Булашенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 18 – 24 листопада 2019 р — Київ, 2019. — С. 57 – 59.
65. Ляшко Д.Г. Спільне використання ресурсів D2D та мобільного зв'язку / Д.Г. Ляшко, А.В. Булашенко // Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 170 –171.
66. Булашенко А.В. Побудова векторних діаграм за допомогою математичного пакету MathCAD / А.В. Булашенко // Науково-методична конференція викладачів, співробітників і студентів: тези доповідей, 27 квітня 2010 року. — Суми : СумДУ, 2010. — Ч.2. — С. 10-13.
67. Гладун В.В. Система вигризки на основі D2D / В.В. Гладун, А.В. Булашенко // Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 166 –167.
68. Булашенко А.В. Конструкція портативного цифрового мегометра та вимірювача струму витоку / А.В. Булашенко, І.В. Забегалов // Вісник ВПІ. – 2020. – Вип. 3. – с. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-37-42>.
69. Aijaz A. The tactile Internet for industries: a review / A. Aijaz, M. Sooriyabandara // Proceedings of the IEEE. – 2019. – Vol. 107, No. 2. – pp. 414-435. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2878265.
70. Simsek M. 5G-enabled tactile internet / M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, G. Fettweis // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2016. – Vol. 34, No. 3. – pp. 460-473. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525398.
71. Aazam M. Fog computing for 5G tactile industrial internet of things: QoE-aware resource allocation model / M. Aazam, K.A. Harras, S. Zeadally // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 5. – pp. 3085-3092. DOI: 10.1109/TII.2019.2902574.
72. Saddik A.E. Multimedia and the tactile internet / A.E. Saddik // IEEE MultiMedia. – 2020. – Vol. 27, No. 1. – pp. 5-7. DOI: 10.1109/MMUL.2020.2980098.

Діхтярук Іван Іванович — студент групи РС-п91, радіотехнічного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, e-mail: kotovan99@i.ua;

Забегалов Ігор Вікторович — викл. електротехнічного відділення, Шосткинський фаховий коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету, м. Шостка, e-mail: igor_zabegalov@meta.ua.

Пільтяй Степан Іванович — канд., техн. наук, доцент кафедри теоретичних основ радіотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», e-mail: piltyay_stepan@ua.fm.

Булашенко Андрій Васильович — ст. викл. кафедри теоретичних основ радіотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ.

Diktyaruk Ivan I. — student of Department of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, e-mail: kotovan99@i.ua;

Zabegalov Igor V. — lecturer of Electromechanical Department, Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University, Shostka, Sumy region, e-mail: igor_zabegalov@meta.ua.

Piltyay Stepan Ivanovich — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», e-mail: piltyay_stepan@ua.fm.

Bulashenko Andrew V. — senior lecturer of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv.