

23. Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications, *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-section A*. New Delhi: Springer India, 1956, Vol. 44, No. 6, pp. 398-417. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03046095>.
24. Berry M.V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1984, Vol. 392, No. 1802, pp. 45-57. Available at: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1984.0023>.

**Семенihin Андрей Илларионович** – Южный федеральный университет; e-mail: anilsem@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89061831649; кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент; SPIN: 5609-3793.

**Семенихина Диана Викторовна** – Южный федеральный университет; e-mail: d\_semenikhina@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89094412058; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; SPIN: 8694-5179.

**Зыкина Анна Михайловна** – Южный федеральный университет; e-mail: a.zikina@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89615866362; магистрант.

**Semenikhin Andrey Illarionovich** – Southern Federal University; e-mail: anilsem@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79061831649; the department of A&RTD; associate professor; SPIN: 5609-3793.

**Semenikhina Diana Viktorovna** – Southern Federal University; e-mail: d\_semenikhina@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094412058; the department of A&RTD; professor; SPIN: 8694-5179.

**Zikina Anna Mihailovna** – Southern Federal University; e-mail: a.zikina@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79615866362; magister.

УДК 621.396.677.3

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-218-224

**В.О. Игнатович, Н.Н. Кисель**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПОЛОСКОВОЙ МИМО-АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ**

*Представлены результаты комплексного исследования характеристик микрополосковой МИМО-антенной системы, предназначенной для использования в телекоммуникационных средствах пятого поколения в диапазоне частот  $n79$  (4,4–5,0 ГГц). Целью исследования являлась разработка компактной антенной решётки конфигурации  $1 \times 2$  на единой диэлектрической подложке и оценка её электродинамических свойств с учётом факторов, способных оказывать влияние на параметры согласования и излучения в реальных условиях эксплуатации. Конструкция антенны включает два излучателя, четыре порта возбуждения и модифицированный слой заземления, обеспечивающий расширенную функциональность и устойчивость рабочих характеристик. В ходе численного моделирования установлено, что предложенная антенная система обеспечивает стабильные значения коэффициента стоячей волны, высокий коэффициент усиления и согласованные диаграммы направленности во всём рабочем диапазоне частот. Особое внимание уделено анализу влияния внешних воздействий, в частности попадания тонкой водяной плёнки на поверхность излучателя. Показано, что присутствие влаги приводит к росту КСВ более чем на 0,5, снижению КПД и ухудшению направленных свойств антенны на верхней границе диапазона, что подчёркивает необходимость использования защитных конструктивных решений при эксплуатации изделия. Дополнительно исследована корректность замены меди идеальным проводником при моделировании. Разница в значениях КСВ не превышает 0,006, что подтверждает возможность применения такого упрощения на этапах предварительного проектирования без существенной потери точности. Экспериментальный образец антенны был изготовлен и испытан в лабораторных условиях. Полученные экспериментальные данные продемонстрировали высокую степень совпадения с результатами численного моделирования, что подтверждает валидность предложенной математической модели и практическую применимость разработанной МИМО-антенной системы в инфраструктуре сетей связи нового поколения.*

*МИМО антенны; микрополосковые антенны; мобильная связь; 5G; антенные решетки; телекоммуникационные системы.*

V.O. Ignatovich, N.N. Kisel

**MODELLING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF MICROSTRIP MIMO-ANTENNA SYSTEM'S CHARACTERISTICS**

*The paper presents the results of a comprehensive study of the characteristics of a microstrip MIMO antenna system intended for application in fifth-generation communication equipment operating within the n79 frequency band (4.4–5.0 GHz). The purpose of the research was to develop a compact 1×2 antenna array on a single dielectric substrate and to evaluate its electrodynamic properties, taking into account factors capable of influencing matching and radiation parameters under real operating conditions. The proposed design incorporates two radiating elements, four excitation ports, and a modified ground plane, which provides enhanced functional stability and improved operational characteristics. Numerical modelling demonstrated that the developed antenna system ensures stable standing-wave ratio values, high antenna gain, and consistent radiation patterns across the entire operating frequency band. Particular attention was devoted to assessing the influence of external environmental effects, especially the formation of a thin water film on the radiating surface. The study revealed that the presence of moisture results in an SWR increase of more than 0.5, a decrease in antenna efficiency, and degradation of radiation characteristics at higher frequencies, highlighting the necessity of employing protective structural solutions when operating under humidity-prone conditions. Additionally, the feasibility of replacing copper with an ideal conductor in electromagnetic simulations was examined. The difference in SWR between the realistic and idealized models did not exceed 0.006, confirming that such a simplification may be applied during early design stages without significant loss of accuracy. An experimental prototype of the antenna was fabricated and tested under laboratory conditions. The obtained measurements demonstrated a high degree of agreement with the modelling results, validating the proposed mathematical model and confirming the practical applicability of the developed MIMO antenna system in next-generation communication infrastructures.*

*MIMO antennas; microstrip patch antenna; network; 5G; antenna arrays; telecommunication systems.*

**Введение.** В настоящее время активно развиваются системы связи 5G, использующие частотный диапазон до 6 ГГц (макросоты), которые позволяют реализовать показатели систем связи на порядок лучшие по сравнению со стандартом 4G. Микрополосковые антенны являются наиболее подходящими антеннами для мобильных объектов, поскольку имеют ряд преимуществ, такие как компактность, технологичность изготовления, а использование технологии ММО позволяет увеличить скорость передачи данных и качество сигнала за счет большего количества антенн. Наиболее удобным диапазоном для 5G связи следует отнести диапазон n79: 4,4–5,0 ГГц. Требования к антеннам, диапазонам частот и мощности излучения меняется, что связано с многоэтапным процессом внедрения стандарта 5G.

**Исследование влияния внешних воздействий на характеристики ММО-антенны.** В [1] приведены результаты моделирования основных характеристик ММО-антенной решетки 1×2 в диапазоне 4,4–5,0 ГГц и исследованы чувствительности характеристик антенны к изменениям ее геометрических и электрофизических параметров подложки: Rogers RO3006 [2], Arlon TC600 [3], FSD615T (углеродородный материал с нанокерамикой и стекловолокном) [4], проанализировано влияние фазовых соотношений в системе питания на диаграммы направленности антенной решетки. В литературе [5–24] так же рассматривались вопросы применения различных видов антенных систем, в том числе, микрополосковых, в современных системах мобильной связи. В рассмотренных материалах так же уделялось внимание технологии ММО, отмечался высокий потенциал данной технологии в современных системах беспроводной связи.

В продолжении исследований, проведенных в [1], было проанализировано влияние на направленные и частотные свойства антенны попадания влаги на поверхности излучателя. Для этого рассматривался однородный слой водяной пленки толщиной 0.035 мм на поверхности излучателя.

График зависимости коэффициента отражения от частоты и диаграмма направленности антенны при наличии и отсутствии воды на поверхности представлены на рис. 1.

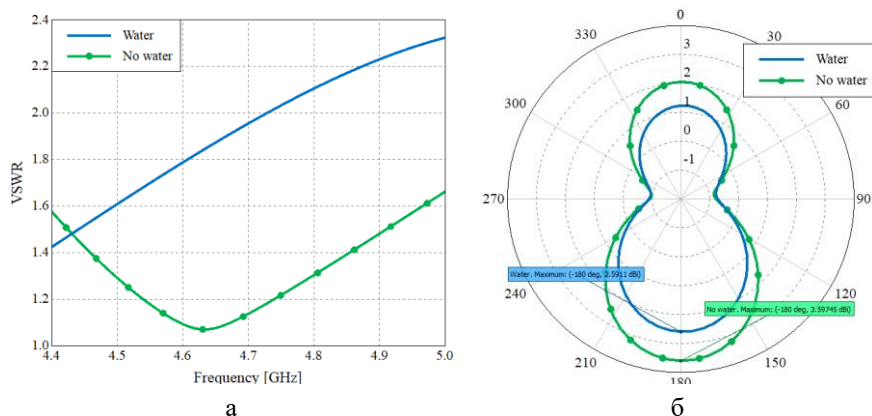


Рис. 1. Частотная зависимость КСВ (а) и диаграмма направленности на фиксированной частоте при наличии и отсутствии воды на поверхности излучателя

КСВ антенны увеличивается, с ростом частоты наблюдается практически линейный его рост с 1,4 для 4,4 ГГц до 2,3 на 5,0 ГГц. В верхней части спектра значение КПД антенны при наличии водяной пленки становится меньше 0,7 и наблюдается снижение коэффициента усиления.

**Экспериментальное исследование МММО-антенной системы.** На основе модели [1] был создан образец МММО-антенны с четырьмя SMA-разъемами (рис. 2). Габаритные размеры антенны 27 мм x 27 мм.

Экспериментальные исследования были проведены в Центре инженерных разработок «Микроволновые технологии электродинамических структур» Южного федерального университета. В рамках исследования МММО-антенной системы были проведены измерения КСВ антенны в зависимости от частоты. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей. Фотография изготовленной антенны с подключенными SMA-разъемами (вид сверху) представлена на рис. 2.

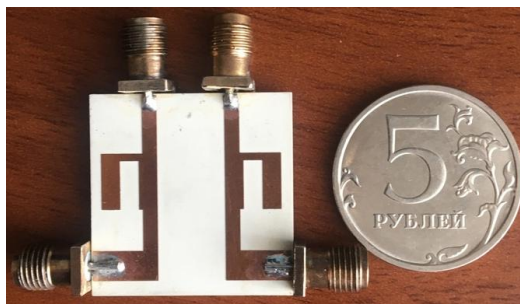


Рис. 2. Фотография изготовленной антенны с подключенными SMA-разъемами (вид сверху)

Так как антенна имеет два порта питания, для измерений задействованы оба порта генератора. Режимы измерений –  $S_{11}$  для порта №1,  $S_{22}$  для порта №2. Результаты измерений коэффициента отражения в сравнении с результатами моделирования представлены на рис. 3.

Экспериментальная и расчетная характеристика коэффициента отражения полностью согласованы, минимальные значения коэффициента отражения наблюдаются на частоте 4,65 ГГц. Во всем диапазоне частот 4,4–5,0 ГГц коэффициент отражения ниже 12 дБ. Наблюдаемые отличия можно объяснить возможным разбросом параметров диэлектрической подложки, отсутствием учета частотной дисперсии электрофизических параметров подложки, наличием паразитных емкостей в области SMA-разъемов.

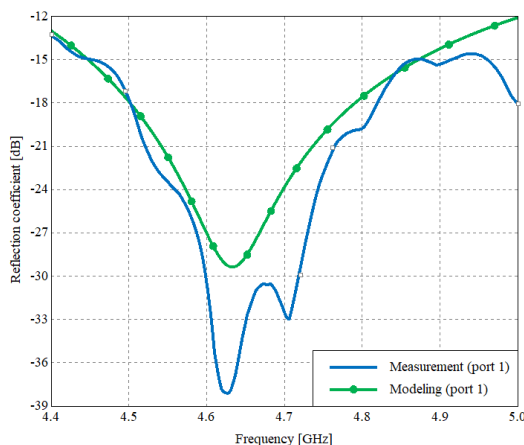


Рис. 3. График зависимости коэффициента отражения ММО-антенны от частоты (результаты моделирования и результаты измерения параметров изготовленного образца)

Графики зависимости КСВ ММО-антенны от частоты, полученные при измерении и при компьютерном моделировании, представлены на рис. 4.

Результаты количественно хорошо согласуются друг с другом, что можно рассматривать как верификацию результатов, полученных с использованием САПР Altair FEKO и как корректность математической модели антенны.

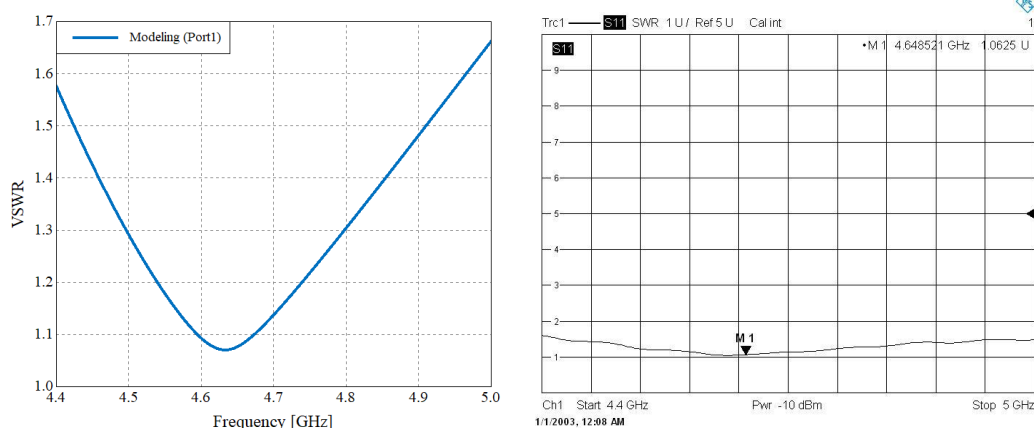


Рис. 4. Графики зависимости КСВ ММО-антенны от частоты, полученные в ходе моделирования и в ходе измерения

На рис. 5 приведены результаты исследования диаграммы направленности ММО-антенны. Измерение проводилось в безэховой камере.

Диаграммы направленности в плоскости  $xOz$ , полученные в ходе моделирования и в процессе измерения, представлены на рис. 5. Обе диаграммы были получены при равноамплитудном и синфазном возбуждении. Антенна была размещена на поворотном устройстве коннекторами питания вниз.

Как видно из приведенных результатов, значения максимумов излучения и их направления приблизительно совпадают. Имеются те же два максимума излучения, уровень сигнала в которых отличается менее чем на 1 дВ. В экспериментальной диаграмме направленности наблюдаются небольшие осцилляции, что, по-видимому, можно объяснить наличием нескольких SMA-разъемов и кабелей от них, которые при угловом повороте антенны меняются свое положение, которое затруднительно контролировать в ходе эксперимента.

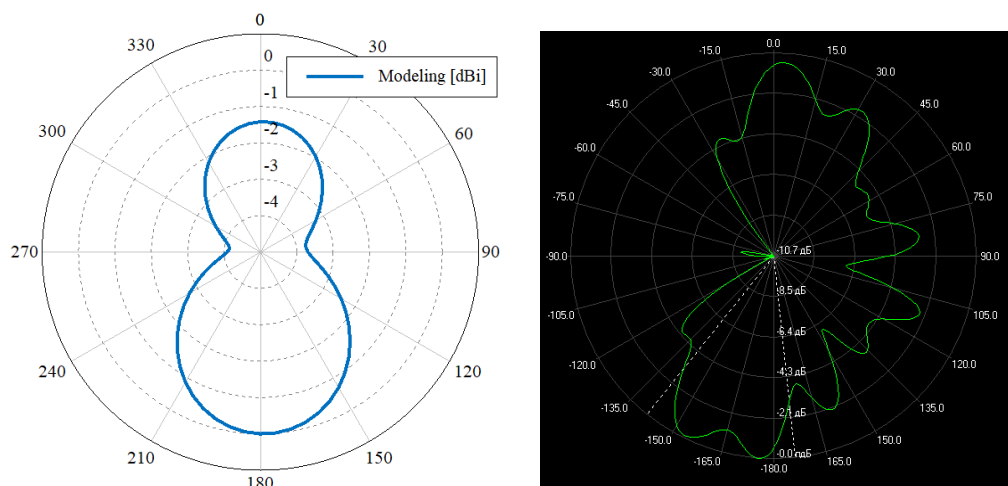


Рис. 5. Диаграммы направленности в плоскости  $xOz$ , полученные в ходе моделирования и в ходе измерения (нормированные к максимуму)

**Заключение.** Таким образом, в работе приведены результаты анализа влияния водяной пленки на поверхности излучателя. Моделирование показало, что КСВ антенны возрастает более чем на 0.5, по сравнению с результатами модели без водяной пленки. Одновременно с этим снижается КПД антенны, ухудшаются ее направленные и частотные свойства. В связи с этим требуется обязательное использование обтекателя для снижения воздействия внешних факторов на характеристики антенны.

Экспериментальное исследование разработанного реального образца антенны показало хорошее согласование полученных характеристик с результатами численного моделирования. Сравнивались коэффициент отражения, КСВ и диаграмма направленности антенной решетки. Измерения проводились в диапазоне  $\pi 9$ , который соответствует принятому в РФ диапазону для 5G.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатович В.О., Кисель Н.Н.* Моделирование характеристик микрополосковых антенн при применении в технологиях MIMO и beamforming // Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко (КомТех-2024). Таганрог, 5–7 июня 2024. – Т. 1. – С. 220-227. – ISBN 978-5-9275-4718-0.
2. RO3000® Series Circuit Materials. Rogers Corporation. – URL: [https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Rogers\\_RO3000.pdf](https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Rogers_RO3000.pdf) (дата обращения: 27.04.2024).
3. Arlon TC600: Enhanced Thermal Conductivity Ceramic Filled PTFE/Woven Fiberglass Laminate for Microwave Printed Circuit Boards. Arlon LLC. – URL: [https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Arlon\\_TC600.pdf](https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Arlon_TC600.pdf) (дата обращения: 27.07.2024).
4. FSD615T – прямой аналог материала RO4360G2. ООО «Элтех-М». – URL: <https://elmt.ru/svch-materialy-fsd.html/nid/2099> (дата обращения: 15.03.2024).
5. *Stallings W.* 5G Wireless: A Comprehensive Introduction. – Boston: Addison-Wesley, 2021. – 672 p.
6. *Тонг Вэнь, Чжу Пейин.* Сети 6G: путь от 5G к 6G глазами разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 624 p. – ISBN: 978-5-97060-995-8.
7. *Cui T.J., Qi M.Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials // Light: Science & Applications. – 2014. – Vol. 3, No. 10. – e218.
8. NTT DoCoMo. DOCOMO conducts world's first successful trial of transparent dynamic metasurface. – Tokyo, 2020. – URL: <https://www.nttdocomo.co.jp> (дата обращения: 20.04.2024).
9. *Suzuki D., Oda S., Kawano Y.* A flexible and wearable terahertz scanner // Nature Photonics. – 2016. – Vol. 10, No. 12. – P. 809-813.
10. *Suzuki D., Ochiai Y., Kawano Y.* Thermal device design for a carbon nanotube terahertz camera // ACS Omega. – 2018. – Vol. 3, No. 3. – P. 3540-3547.
11. *Zhang M., Yeow J.T.* A flexible, scalable, and self-powered midinfrared detector based on transparent PEDOT:PSS/graphene composite // Carbon. – 2020. – Vol. 156. – P. 339-345.

12. Grzyb J., Heinemann B., Pfeiffer U.R. Solid-state terahertz super-resolution imaging device in 130-nm SiGe BiCMOS technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2017. – Vol. 65, No. 11. – P. 4357-4372.
13. Grzyb J., Heinemann B., Pfeiffer U.R. A 0.55 THz near-field sensor with  $\mu\text{m}$ -range lateral resolution fully integrated in 130 nm SiGe BiCMOS // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2016. – Vol. 51, No. 12. – P. 3063-3077.
14. Hillger P., Jain R., Grzyb J. et al. A 128-pixel system-on-a-chip for real-time super-resolution terahertz near-field imaging // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2018. – Vol. 53, No. 12. – P. 3599-3612.
15. Grzyb J., Pfeiffer U.R. THz direct detector and heterodyne receiver arrays in silicon nanoscale technologies // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Vol. 36, No. 10. – P. 998-1032.
16. Filipovic D.F., Gearhart S.S., Rebeiz G.M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1993. – Vol. 41, No. 10. – P. 1738-1749.
17. Park S.-G., Choi Y., Oh Y.-J., Jeong K.-H. Terahertz photoconductive antenna with metal nanoislands // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, No. 23. – P. 25530-25535.
18. Tanoto H., Teng J., Wu Q., et al. Nano-antenna in a photoconductive photomixer for highly efficient continuous-wave terahertz emission // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. – P. 2824.
19. Polat E.O., Mercier G., Nikitskiy I., et al. Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring // *Science Advances*. – 2019. – Vol. 5, No. 9.
20. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. – 1112 p.
21. Антупов С.А., Ищенко Е.А., Кострова В.Н. и др. Исследование влияния расстояния между антеннами в ММО-антенной решетке для сетей пятого поколения // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 91-96.
22. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ*. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
23. Tian R., Lau B.K., Ying Z. Multiplexing efficiency of MIMO antennas // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2011. – Vol. 10. – P. 183-186.
24. Lamri I.E., Mansoul A., Nakmouche M.F., Belattar M. Design of Novel UWB 4-element MIMO Microstrip Patch Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications // *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*. – 2021. – P. 7-12.

#### REFERENCES

1. Ignatovich V.O., Kisel' N.N. Modelirovanie kharakteristik mikropoloskovykh antenn pri primenении v tekhnologiyakh MIMO i beamforming [Modelling of microstrip antenna characteristics for MIMO and beamforming technologies], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko (KomTekh-2024)* [Proceedings of the Russian Scientific-Technological Conference named after Prof. O.N. Pyavchenko (ComTech-2024)]. Taganrog, June 5–7, 2024, Vol. 1, pp 220-227. ISBN 978-5-9275-4718-0.
2. RO3000® Series Circuit Materials. Rogers Corporation. Available at: [https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Rogers\\_RO3000.pdf](https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Rogers_RO3000.pdf) (accessed 27 April 2024).
3. Arlon TC600: Enhanced Thermal Conductivity Ceramic Filled PTFE/Woven Fiberglass Laminate for Microwave Printed Circuit Boards. Arlon LLC. Available at: [https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Arlon\\_TC600.pdf](https://rezonit.ru/upload/spetsifikatsii/Arlon_TC600.pdf) (accessed 27 July 2024).
4. FSD615T – pryamoy analog materiala RO4360G2. OOO «Eltekh-M» [FSD615T – direct analogue of RO4360G2. ELTM Co]. Available at: <https://eltm.ru/svch-materialy-fsd.html/nid/2099> (accessed 15 March 2024).
5. Stallings W. *5G Wireless: A Comprehensive Introduction*. Boston: Addison-Wesley, 2021, 672 p.
6. Tong Ven', Chzhu Peyin. Seti 6G: put' ot 5G k 6G glazami razrabotchikov [6G Networks: From 5G to 6G Through Developer's Perspective]. Moscow: DMK Press, 2022, 624 p. ISBN: 978-5-97060-995-8.
7. Cui T.J., Qi M.Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials, *Light: Science & Applications*, 2014, Vol. 3, No. 10, e218.
8. NTT DoCoMo. DOCOMO conducts world's first successful trial of transparent dynamic metasurface. Tokyo, 2020. Available at: <https://www.nttdocomo.co.jp> (accessed 20 April 2024).
9. Suzuki D., Oda S., Kawano Y. A flexible and wearable terahertz scanner, *Nature Photonics*, 2016, Vol. 10, No. 12, pp. 809-813.
10. Suzuki D., Ochiai Y., Kawano Y. Thermal device design for a carbon nanotube terahertz camera, *ACS Omega*, 2018, Vol. 3, No. 3, pp. 3540-3547.

11. Zhang M., Yeow J.T. A flexible, scalable, and self-powered midinfrared detector based on transparent PEDOT:PSS/graphene composite, *Carbon*, 2020, Vol. 156, pp. 339-345.
12. Grzyb J., Heinemann B., Pfeiffer U.R. Solid-state terahertz super-resolution imaging device in 130-nm SiGe BiCMOS technology, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, Vol. 65, No. 11, pp. 4357-4372.
13. Grzyb J., Heinemann B., Pfeiffer U.R. A 0.55 THz near-field sensor with  $\mu\text{m}$ -range lateral resolution fully integrated in 130 nm SiGe BiCMOS, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, Vol. 51, No. 12, pp. 3063-3077.
14. Hillger P., Jain R., Grzyb J. et al. A 128-pixel system-on-a-chip for real-time super-resolution terahertz near-field imaging, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, Vol. 53, No. 12, pp. 3599-3612.
15. Grzyb J., Pfeiffer U.R. THz direct detector and heterodyne receiver arrays in silicon nanoscale technologies, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, Vol. 36, No. 10, pp. 998-1032.
16. Filipovic D.F., Gearhart S.S., Rebeiz G.M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, Vol. 41, No. 10, pp. 1738-1749.
17. Park S.-G., Choi Y., Oh Y.-J., Jeong K.-H. Terahertz photoconductive antenna with metal nanoislands, *Optics Express*, 2012, Vol. 20, No. 23, pp. 25530-25535.
18. Tanoto H., Teng J., Wu Q., et al. Nano-antenna in a photoconductive photomixer for highly efficient continuous-wave terahertz emission, *Scientific Reports*, 2013, Vol. 3, pp. 2824.
19. Polat E.O., Mercier G., Nikitskiy I., et al. Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring, *Science Advances*, 2019, Vol. 5, No. 9.
20. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016, 1112 p.
21. Antipov S.A., Ishchenko E.A., Kostrova V.N. i dr. Issledovanie vliyaniya rasstoyaniya mezhdru antennami v MIMO-antennoy reshetke dlya setey pyatogo pokoleniya [Study of the influence of antenna spacing in a MIMO antenna array for fifth-generation networks], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 91-96.
22. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Microwave Antennas and Devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 432 p.
23. Tian R., Lau B.K., Ying Z. Multiplexing efficiency of MIMO antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 183-186.
24. Lamri I.E., Mansoul A., Nakmouche M.F., Belattar M. Design of Novel UWB 4-element MIMO Microstrip Patch Antenna for Sub-6 GHz 5G Applications, *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 2021, pp. 7-12.

**Игнатович Владислав Олегович** – Южный федеральный университет; e-mail: vignatovich@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185530267; преподаватель Научно-образовательного центра «Перспективные решения в образовании».

**Кисель Наталья Николаевна** – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78632184000, доб. 30020; к.т.н.; доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств.

**Ignatovich Vladislav Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: vignatovich@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +7918553-0267; teacher, Scientific and Educational Center "Perspective Decisions in Education".

**Kisel Natalia Nikolaevna** – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78632184000, add. 30020; cand. of eng. sc.; assistant professor, Department of Antennas and Radio Transmitting Devices.