

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКОЙ ЛИНЕЙНОЙ ГРАФЕНОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА БУМАЖНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Александр Григорьевич Черевко

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630106, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, тел. 8 (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru

Юрий Вячеславович Моргачев

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630106, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, инженер, тел. 8 (383) 269-39-23, e-mail: morgachev.yury@gmail.com

В статье представлен анализ гибких графеновых антенных решеток, который показал перспективность использования в качестве элемента таких решеток сложной дипольной антенны. Рассматривается структура гибкого сложного диполя, работающего на частоте 5,8 ГГц, на подложке из фотобумаги. С помощью моделирования получен коэффициент усиления 2,53 дБи с итоговым коэффициентом полезного действия 75% и модулем коэффициента отражения $-31,82$ дБ. Рассмотрено влияние скручивания на итоговую форму диаграммы направленности, а также значение и положение минимума модуля коэффициента отражения. Коэффициент усиления линейной трехэлементной графеновой гибкой антенной решеткой на основе сложного гибкого диполя составляет 5,78 дБи.

Ключевые слова: графен, антенны, печать, моделирование, зеленая электроника

SIMULATION OF A FLEXIBLE LINEAR GRAPHENE ANTENNA ARRAY ON A PAPER SUBSTRATE

Alexander G. Cherevko

Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 86 Kirova St., Novosibirsk, 630106, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of Physics Department, phone: 8 (383) 269-39-20, e-mail: cherevko@mail.ru

Yury V. Morgachev

Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 86 Kirova St., Novosibirsk, 630106, Engineer, phone: 8 (383) 269-39-23, e-mail: morgachev.yury@gmail.com

The article presents an analysis of flexible graphene antenna arrays, which has shown the promise of using a folded dipole antenna as an element of such array. The structure of the flexible folded dipole operating at a frequency of 5,8 GHz on a photo-paper substrate is considered. Simulation yields a gain of 2,53 dBi with a final efficiency of 75% and $|S_{11}| -31,82$ dB. The influence of bending on the final shape of the radiation pattern is considered, as well as the value and position of the minimum of the $|S_{11}|$. The gain of a linear three-element graphene flexible antenna array based on a folded flexible dipole is 5,78 dBi.

Keywords: graphene, antennas, print, simulation, green electronics

Введение

Гибкая электроника в настоящее время является активно развивающейся сферой. Разрабатывается множество гибких компонентов – антенны, датчики, дисплеи, транзисторы, аттенюаторы, фильтры и многое другое. Большинство элементов изготавливаются на основе чернил с наночастицами серебра из-за их высокой электропроводности и химической стабильности на открытом воздухе [1]. Однако очень высокая стоимость серебра ограничивает промышленное производство серебряных чернил. Другие, более дешевые проводящие чернила на основе наночастиц из обычных металлов, таких как медь и алюминий, требуют высокой температуры затвердевания для предотвращения окисления во время производства [2], что в значительной степени сужает выбор подложек.

Еще одна проблема, которую необходимо учитывать – это требования к экологичности разрабатываемых элементов гибкой электроники. Во многих странах уже установлены ограничения на выброс электронных устройств. Например, директива об утилизации электрического и электронного оборудования (WEEE), на основании которой 55% электронных отходов должны быть переработаны. Текущие тенденции позволяют сделать вывод об ожидаемом увеличении требований по экологичности к материалам, используемым в электронных устройствах.

Представленные выше проблемы решают чернила на основе графена. Данные чернила обладают высокой скоростью электронного переноса [3], экологичностью и низкой стоимостью, способствующими лучшей интеграции в системы, требующие гибкости. Кроме того, в отличие от металлических чернил или углеродных нанотрубок, графеновые чернила повышают надежность устройств к механическим деформациям [4]. На протяжении ряда лет интенсивно исследуются различные методы изготовления гибких электронных устройств на основе графена, в частности, реактивное распыление, струйная печать [5], центрифугирование [6], термическое напыление [7] и трафаретная печать [8]. Распыление и центрифугирование не позволяют создать рисунки с высоким разрешением, а термическое испарение требует очень высокой температуры, что делает его несовместимым с термочувствительными подложками [9]. Исследование возможностей струйной и трафаретной печати, проведенное различными авторами, например, [10], показало, что эти методы обладают такими преимуществами, как невысокая температура и простота процесса нанесения проводящего рисунка антенны, кроме того, они обеспечивают относительно низкое поверхностное сопротивление антенны. Исходя из этого активно исследуются графеновые антенные решетки (АР и ФАР), которые имеют лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с металлическими АР и ФАР.

Одним из направлений является создание графеновых микрополосковых антенных решеток, которые широко используются в таких приложениях как радиолокация, спутниковое телевидение, передача данных и медицина. Микрополосковая фазированная антенная решетка (1x2), созданная с помощью струйной печати графеновыми чернилами на каптоновой подложке [11] имела КПД 47,7 %; АР для диапазона сотовых операторов 5G (26 ГГц) [12] обладала коэффициентом

усиления (КУ) 11,05 дБи при коэффициенте отражения (-20,98 дБ), в последней использовался гибкий ламинат, плакированный графеном.

Для диапазона 4,6-7,9 ГГц, (WiFi) струйным принтером напечатана микрополосковая антенная решетка [13] с КУ 4,5 дБи на частоте 5,8 ГГц и полным КПД антенны 73% (рис. 1).

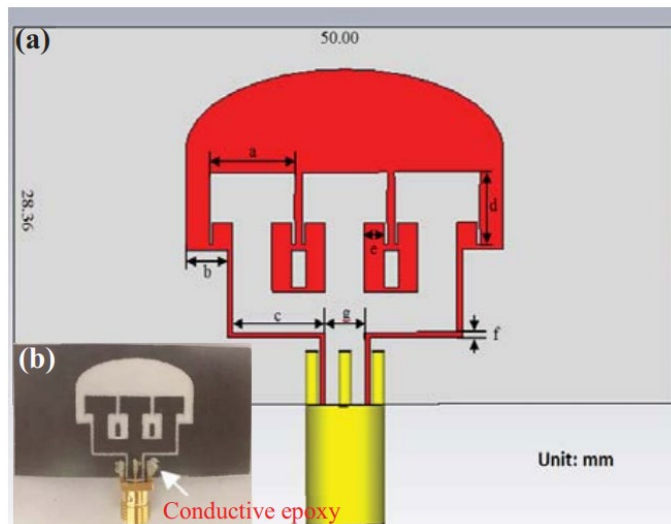


Рис. 1. Графеновая микрополосковая антенная решетка [13]
а) компьютерная модель, б) изготовленный экспериментальный образец

Анализ литературы и приведенные примеры показывают, что многие исследователи считают именно микрополосковые элементы наиболее перспективными для создания гибких антенных решеток. При этом не всегда учитывается заметная зависимость КПД микрополосковых антенн от типа и характеристик подложек и проводимости материала, из которого изготавливается микрополосковая антенна и заземляющая пластина, что значительно ограничивает выбор подложки и дизайна антенны. Например, в статье [13] для достижения высокого КПД пришлось отказаться от эффективного дизайна с высокими массогабаритными характеристиками на базе двухсторонней печати и перейти к односторонней печати, что снизило массогабаритные характеристики почти вдвое. В этой работе антенная решетка и заземляющая пластина напечатаны на одной стороне подложки, что значительно увеличило итоговые размеры.

Нами предлагается рассмотреть возможную альтернативу микрополосковым АР – антенную решетку на базе сложенных диполей. Такие антенны будут иметь более высокий КПД, а их характеристики будут более устойчивы к изгибам.

Результаты и их обсуждение

В качестве подложки взята фотобумага HP Premium Plus Photo Paper с диэлектрической проницаемостью 5,2 и тангенсом диэлектрических потерь 0,11 [14]. В качестве материала использовался графен, в соответствии с эксперимен-

тальными результатами: толщина наносимого слоя – 7 мкм, проводимость 41667 См/м [15]. Дизайн единичного элемента представлен на рис. 2.

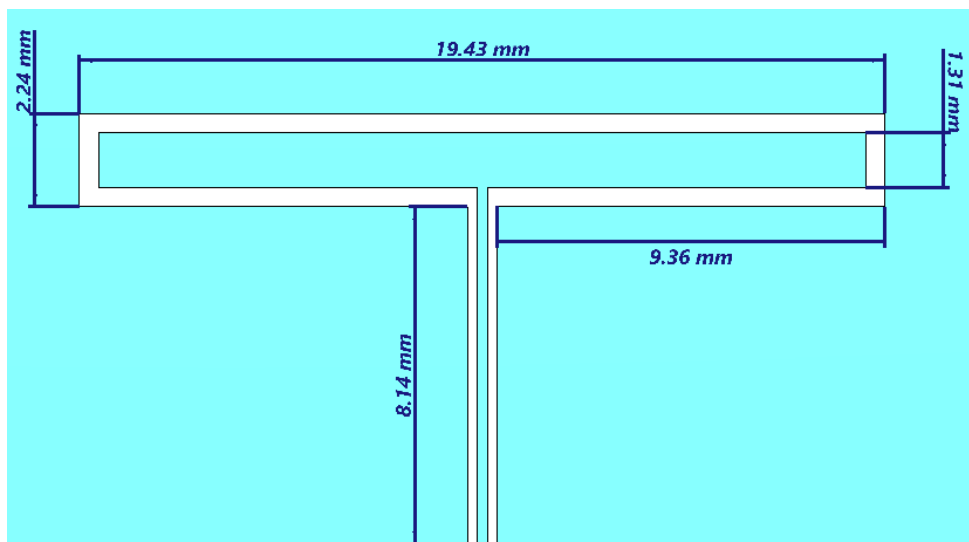


Рис. 2. Дизайн сложенного диполя, работающего на частоте 5,8 ГГц

Частотная характеристика модуля коэффициента отражения графенового сложенного диполя представлена на рис. 3.

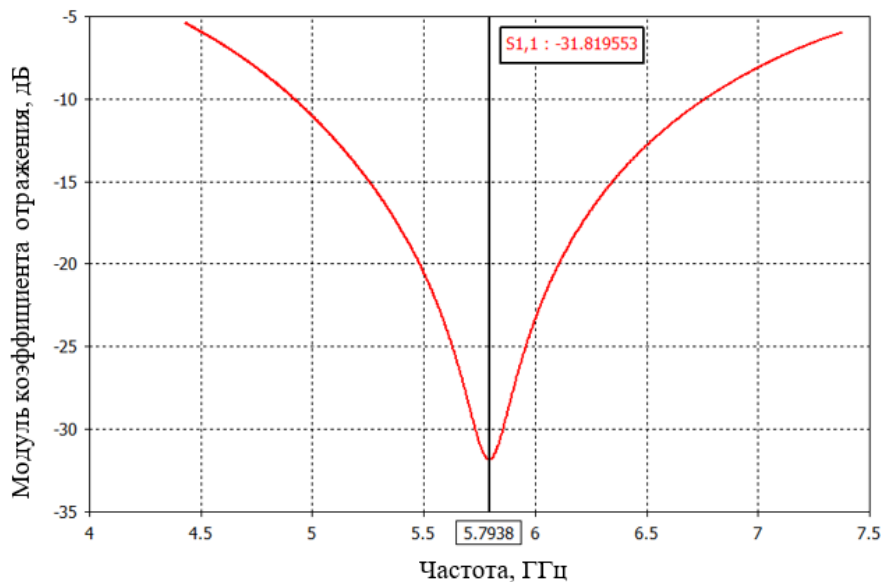


Рис. 3. Модуль коэффициента отражения графенового сложенного диполя

КПД полученной антенны составляет 73%, с КУ 2,53 дБи. Форма диаграммы направленности графенового сложенного диполя в двух плоскостях представлена на рис.4.

Как можно заметить, сложенная дипольная антенна обладает сравнительно низким модулем коэффициента отражения, при высоком значении коэффициента усиления и КПД.

Влияние скручивания сложенной дипольной антенны на ее характеристики изучалось при деформациях антенны, представленных на рис. 5 (скриншоты компьютерной модели сложеного диполя при различных радиусах кривизны).

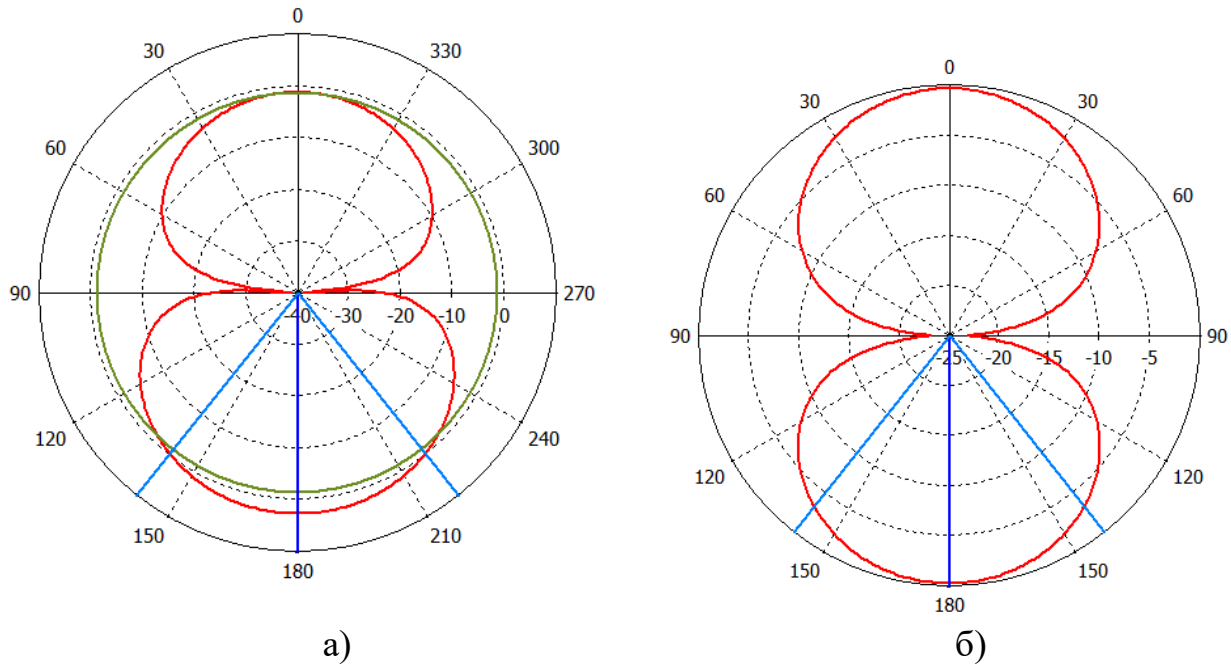


Рис. 4. Диаграмма направленности графенового сложенного диполя на частоте 5,8 ГГц в двух плоскостях:
а) *E*-плоскость; б) *H*-плоскость

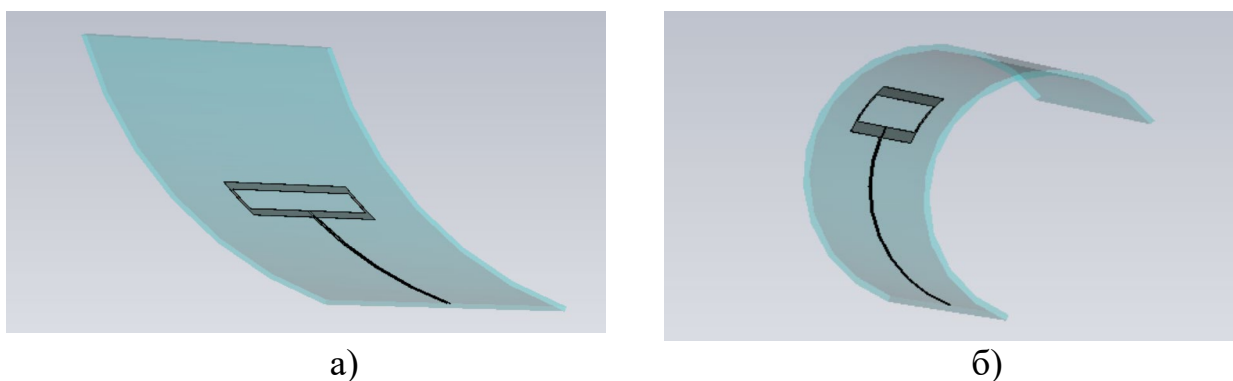


Рис. 5. 3D модель графенового сложенного диполя при разных радиусах кривизны:
а) 40 мм б) 10 мм

На рис. 6 представлены зависимости модуля коэффициента отражения и диаграммы направленности в E -плоскости от радиуса кривизны.

Можно заметить, что при увеличении радиуса изгиба происходит смещение минимума модуля коэффициента отражения до частоты 6 ГГц. Однако, даже при достижении радиуса изгиба 10 мм значение модуля коэффициента отражения на частоте 5,8 ГГц составляет $-15,78$ дБ, что является удовлетворительным. Диаграмма направленности, напротив, почти не меняется вплоть до радиуса изгиба, равного 10 мм, что подтверждает тот факт, что сложенный диполь хорошо подходит в качестве единичного модуля линейной графеновой антенной решетки.

Полученная диаграмма направленности линейной трехэлементной графеновой антенной решетки на частоте 5,8 ГГц представлена на рис. 7. Итоговый коэффициент усиления составил 5,78 дБи.

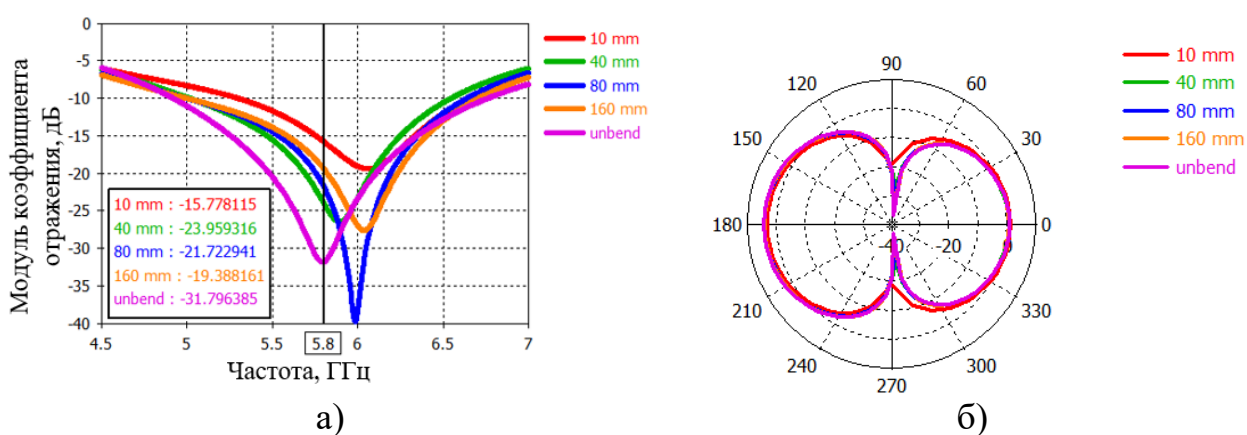


Рис. 6. Характеристики графенового сложенного диполя при различных радиусах изгиба:

а) модуль коэффициента отражения б) диаграмма направленности в E -плоскости

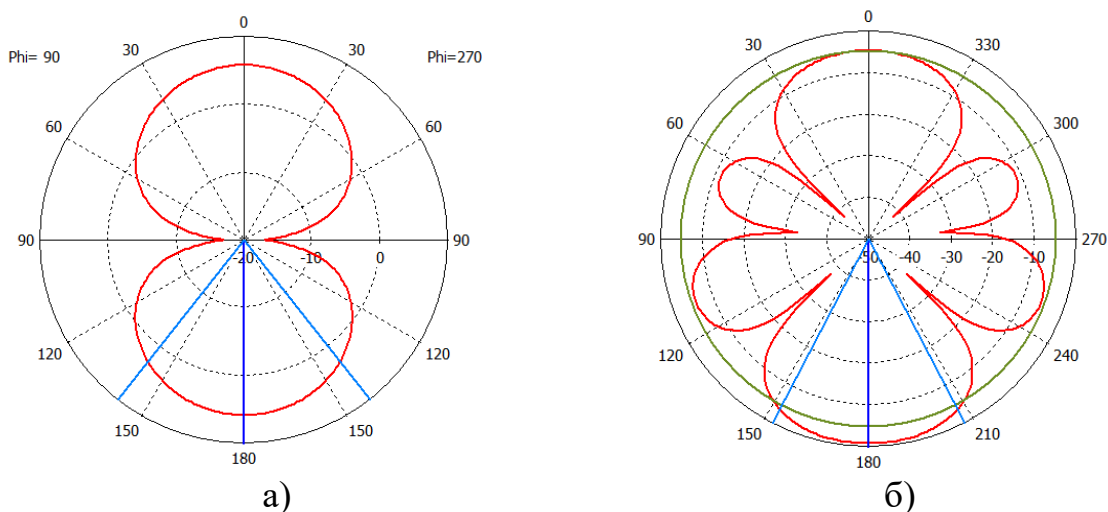


Рис. 7. Диаграмма направленности линейной трехэлементной графеновой антенной решетки на частоте 5,8 ГГц в двух плоскостях:

а) E -плоскость; б) H -плоскость

Заключение

В работе представлена оценка характеристик гибкого графенового сложенного диполя при различных радиусах кривизны. Установлено, что изменение формы диаграммы направленности до радиуса кривизны 10 мм не является значимым. Таким образом, использование таких элементов эффективно для создания гибких графеновых антенных решеток с высоким КПД. Представленная линейная трехэлементная графеновая антенная решетка на частоте 5,8 ГГц (WiFi) позволила реализовать коэффициент усиления 5,78 дБи с итоговым КПД 75%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Z. et al. Synthesis of monodisperse silver nanoparticles for ink-jet printed flexible electronics // *Nanotechnology*. 2011. V. 22. № 42. P. 425601.
2. Kamyshny A., Magdassi S. Conductive Nanomaterials for Printed Electronics // *Small*. 2014. V. 10. № 17. P. 3515–3535.
3. Taioli S., Umari P., De Souza M.M. Electronic properties of extended graphene nanomaterials // *Physica status solidi (b)*. 2009. V. 246. № 11–12. P. 2572–2576.
4. Yamada T. et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection // *Nature Nanotechnology*. 2011. V. 6. № 5. P. 296–301.
5. Saeed S. M., Balanis C. A., Birtcher C. R. Inkjet-Printed Flexible Reconfigurable Antenna for Conformal WLAN/WiMAX Wireless Devices // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016. V. 15. P. 1979–1982.
6. Tyona M. D. A comprehensive study of spin coating as a thin film deposition technique and spin coating equipment // *Advances in materials research*. 2013. V. 2. № 4. P. 181–193.
7. Graz I. M., Cotton D. P. J., Lacour S. P. Extended cyclic uniaxial loading of stretchable gold thin-films on elastomeric substrates // *Applied Physics Letters*. 2009. V. 94. № 7. P. 071902.
8. Anagnostou D. E. и др. A Direct-Write Printed Antenna on Paper-Based Organic Substrate for Flexible Displays and WLAN Applications // *Journal of Display Technology*. 2010. V. 6. № 11. P. 558–564.
9. Namiki K. C., Cheng X., Takahashi H. Indirectly Reactive Sputtering Coater for High Quality Optical Coatings // *IEICE Transactions on Electronics*. 2008. V. E91-C. № 10. P. 1673–1674.
10. Khaleel H. R. et al. A Compact Polyimide-Based UWB Antenna for Flexible Electronics // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2012. V. 11. P. 564–567.
11. Monne M. A. et al. Inkjet-Printed Graphene-Based 1×2 Phased Array Antenna // *Micromachines*. 2020. V. 11. № 9. P. 863.
12. Song R. et al. Sandwiched Graphene Clad Laminate: A Binder-Free Flexible Printed Circuit Board for 5G Antenna Application // *Advanced Engineering Materials*. 2020. V. 22. № 10. P. 2000451.
13. Zhou X. et al. Graphene Printed Flexible and Conformal Array Antenna on Paper Substrate for 5,8 GHz Wireless Communications // *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2020.
14. Beisteiner C., Zagar B. G. Dielectric Permittivity Measurement of Paper Substrates Using Commercial Inkjet Printers // *Procedia Engineering*. 2016. V. 168. P. 995–998.
15. Cherevko A. G. et al. Graphene Antenna on a Biodegradable Substrate for Frequency Range of Cellular Operators // *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. 2018.

© А. Г. Черевко, Ю. В. Моргачев, 2021