

## Раздел II. Связь, навигация и наведение

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-74-83

А.А. Ваганова, Н.Н. Кисель, А.И. Паньчев

### НАПРАВЛЕННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МИКРОПОЛОСКОВОЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ АНТЕННЫ, ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ПО ЧАСТОТЕ И ПОЛЯРИЗАЦИИ

*Реконфигурируемой антенной называется антенна, параметры которой могут изменяться в соответствии с требованиями, предъявляемыми конкретной ситуацией. Изменяемыми параметрами могут быть диапазон частот с наилучшим согласованием, диаграмма направленности, поляризация, а также различные комбинации этих параметров. В данной работе предложена конструкция реконфигурируемой микрополосковой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации, и исследованы ее диаграмма направленности и поляризационные свойства. Антенна имеет компактные размеры и может быть использована в беспроводных системах связи, работающих в диапазоне 2–7 ГГц. В конструкции антенны имеется 5 рпн-диодов, в зависимости от состояния которых изменяется резонансная частота и поляризация излучения антенны. Выполнено моделирование предлагаемой антенны в программе FEKO и получены ее основные параметры. Анализ результатов моделирования показал, что для нижней части исследуемого диапазона частот (2,05, 2,45 и 3,7 ГГц) поляризация линейна. При работе в более высоком поддиапазоне (5,4, 5,6 и 5,75 ГГц) антенна имеет круговую поляризацию, направление вращения которой изменяется в зависимости от состояния диодов. Возможность переключения поляризации на ортогональную на одной и той же частоте позволяет улучшить условия приема сигнала в условиях многолучевого распространения.*

*Микрополосковая антенна; реконфигурируемая антенна; поляризация; диаграмма направленности; коэффициент эллиптичности.*

A.A. Vaganova, N.N. Kisel, A.I. Panychev

### DIRECTIONAL AND POLARISATION PROPERTIES OF A MICROSTRIP RECONFIGURABLE ANTENNA WITH TUNABLE FREQUENCY AND POLARISATION

*A reconfigurable antenna is an antenna with parameters that can be varied according to the requirements of a particular situation. Under variable parameters we can understand the operating frequency range, radiation pattern, polarization, as well as various combinations of these parameters. In this paper, we propose the design of a reconfigurable microstrip antenna with tunable frequency and polarization, and investigate its radiation pattern and polarisation properties. The antenna has compact dimensions and can be used in wireless communication systems operating in the 2–7 GHz range. 5 pin diodes are included into the antenna design to change the resonant frequency and polarization of the antenna by turning the diodes on and off. The simulation of the proposed antenna was performed in the FEKO program and the main parameters of the antenna were obtained. The analysis of the simulation results showed that for the lower part of the studied frequency range (2.05, 2.45 and 3.7 GHz), the polarization is linear. When operating in the higher sub-range (5.4, 5.6 and 5.75 GHz), the antenna is circularly polarized, and the direction of the polarisation vector rotation depends on the connection of the diodes. This ability to switch polarization to orthogonal at the same frequency allows to perform efficient signal reception in the conditions of multipath propagation.*

*Microstrip antenna; reconfigurable antenna; polarization; radiation pattern; axial ratio.*

**Введение.** Реконфигурируемой антенной называется антенна, параметры которой могут изменяться в соответствии с требованиями, предъявляемыми конкретной ситуацией. Изменяемыми параметрами могут быть диапазон частот с наилучшим согласованием, диаграмма направленности, поляризация, а также различные комбинации этих параметров. Наиболее распространенным способом построения реконфигурируемой антенны является соединение различных частей ее конструкции с помощью радиочастотных переключателей, включение и выключение которых направляет ток по требуемому пути, за счет чего меняются характеристики антенны. При этом в качестве переключателей используются либо полупроводниковые элементы (рpn-диоды, варакторы, полевые транзисторы), либо MEMS (микроэлектромеханические системы). Выбор конкретной элементной базы и топологии зависит от решаемой проблемы, но в общем случае при выборе переключателя следует учитывать такие характеристики, как импеданс, нормальное состояние (включен или выключен), полосу частот, допустимую мощность и время срабатывания [1]. В настоящее время наиболее часто используется реконфигурирование с целью настройки по частоте [2–14]. Реконфигурируемые антенны с переключаемой поляризацией описаны в работах [15–25].

При проектировании антенны необходимо определить условия ее функционирования, сформулировать требования к ее характеристикам и создать конструкцию, позволяющую осуществить реконфигурацию в соответствии с этими требованиями. Целью данной статьи является моделирование антенны для устройств беспроводной связи (2–7 ГГц), способной перестраиваться по частоте и поляризации, что повысит эффективность приема сигнала в условиях множественных отражений [26–28].

**Конструкция антенны.** В основу разработки конструкции предложенной микрополосковой реконфигурируемой антенны положены результаты, описанные в статье [14], где предложена антенна, перестраиваемая по частоте, и способная работать в трех значительно отдаленных друг от друга частотных диапазонах беспроводной связи, и в статье [20], где рассмотрена антенна, перестраиваемая по поляризации. Выбор именно этих антенн обоснован их конструктивными и геометрическими параметрами, позволяющими создать на их основе единую конструкцию, исследованию свойств которой посвящена данная работа.

Модель антенны создана в САПР ФЕКО. В результате конструкционной оптимизации линии питания и геометрии излучающего элемента базового эскизного проекта, составленного на основе рекомендаций, приведенных в [14, 20], сформирована конструкция антенны, показанная на рис. 1 (основные размеры приведены в миллиметрах). Антенна расположена на подложке из диэлектрика FR4 с параметрами  $\epsilon = 4,7$ ,  $\text{tg}\delta = 0,018$ . Общий размер антенны равен 20x29x1,6 мм. Излучающая часть антенны (рис. 1,а) представляет собой ромб, к которому с двух сторон может поступать сигнал из единственного порта. При этом в обе ветви, по которым может передаваться сигнал, встроены рpn-диоды (D1 и D2). В зависимости от режима работы диодов симметрия конструкции антенны может быть нарушена, и за счет этого может изменяться ее поляризация.

Заземляющая плоскость предлагаемой антенны показана на рис. 1,б. С помощью переключения трех рpn-диодов D3, D4 и D5 конструкция заземляющей плоскости может изменяться, что позволяет скачкообразно изменять резонансную частоту в диапазоне от 2 до 7 ГГц [14].

Поскольку разработка электрической принципиальной схемы переключения режимов работы антенны не проводилась, то с целью упрощения процесса моделирования учитывались лишь наиболее важные свойства элементов. Так, поскольку

ку pin-диоды имеют два состояния ON (+) и OFF (-), в данной модели они заменяются наличием или отсутствием металлического элемента (D1 – D5), создающего электрический контакт в рассматриваемом участке антенны.

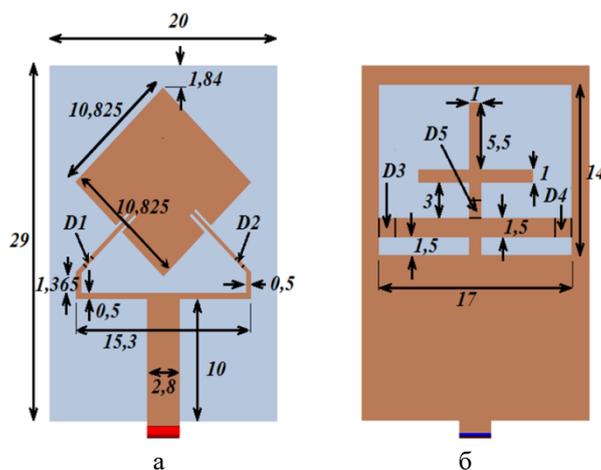


Рис. 1. Конструкция антенны: а – излучающая сторона, б – заземляющая плоскость

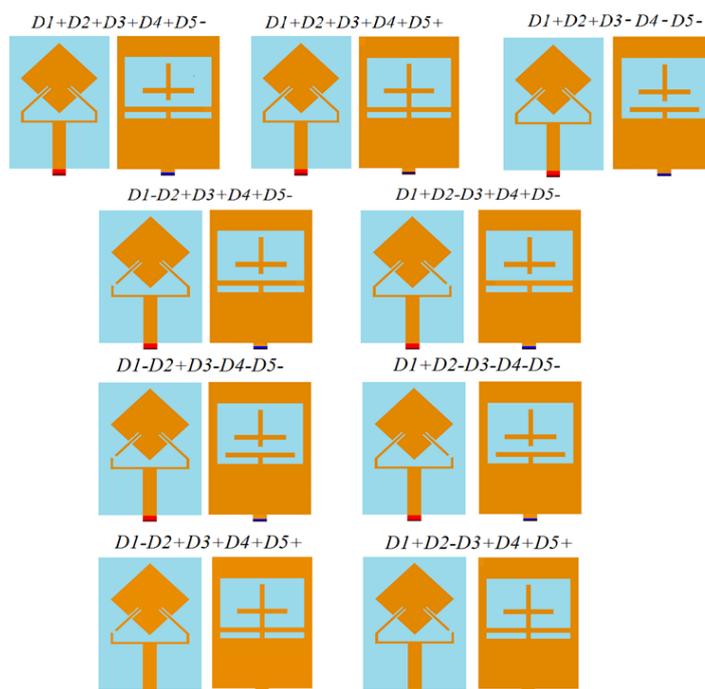


Рис. 2. Варианты конструкции антенны, соответствующие разным вариантам переключения диодов

На рис. 2 показано, как меняется геометрия антенны в зависимости от подключения тех или иных pin-диодов. Эти состояния соответствуют различным режимам работы антенны, которые будут проанализированы далее.

**Расчет и анализ характеристик антенны.** Для каждого варианта переключения была рассчитана зависимость параметра  $S_{11}$  от частоты, соответствующие графики приведены на рис. 3. Видно, что в зависимости от включения/выключения диодов резонансная частота антенны меняется в пределах от 2 до 7 ГГц.

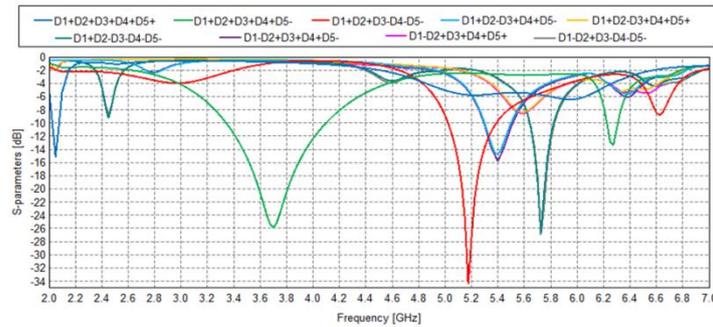


Рис. 3. Зависимость параметра  $S_{11}$  от частоты

Сравнение полученных результатов с данными, приведенными в статьях [14] и [20], показывает, что при объединении в одну конструкцию точные значения резонансных частот изменились, однако все они по-прежнему лежат в диапазоне, используемом для беспроводной связи, что является достаточным результатом в рассматриваемом случае. Оптимизация конструкции антенны для приведения ее в соответствие с каким-либо конкретным стандартом беспроводной связи представляется принципиально возможной и является задачей следующего этапа исследования.

Зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) по напряжению для различных режимов от частоты показана на рис. 4. Видно, что для каждого варианта достигаются минимальные значения КСВ (см. также табл. 1), но при этом ширина полосы частот, в которой  $КСВ < 3$ , существенно различается для разных режимов работы и достигает от  $\pm 50$  МГц до  $\pm 600$  МГц от резонансной частоты.

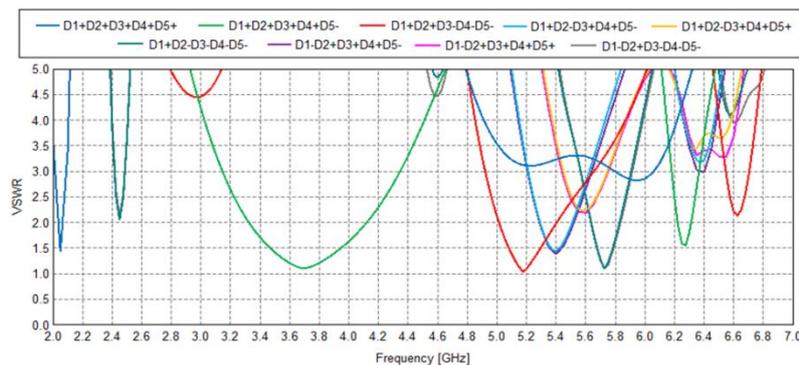


Рис. 4. Зависимость КСВН от частоты

При подключении одновременно двух pin-диодов D1 и D2 излучающая часть антенны является симметричной и антенна имеет линейную поляризацию. При этом резонансная частота антенны зависит от состояния остальных диодов

(D3 – D5). На рис. 5 показаны объемные диаграммы направленности антенны для случая, когда включены все диоды, кроме D5. Диаграммы приведены для двух частот, на которых достигается минимальное значение S11. На рис. 6 приведены графики коэффициента эллиптичности антенны на этих частотах. Графики построены в двух перпендикулярных вертикальных плоскостях (считаем, что антенна расположена горизонтально и центр сферической системы координат совмещен с геометрическим центром подложки). При этом в качестве коэффициента эллиптичности (*Axial ratio*) взято отношение максимального радиуса эллипса поляризации к минимальному, то есть он равен 0 дБ в случае идеально круговой поляризации и стремится к бесконечности в случае идеально линейной поляризации. Рис. 6 показывает, что при использовании данной комбинации диодов антенна обладает линейной поляризацией на частоте 3,7 ГГц. Кроме того, КСВ антенны имеет приемлемое значение также на более высокой частоте (6,25 ГГц), но при этом ее поляризация линейна только в нескольких узких секторах углов, что позволяет говорить об эллиптической поляризации.

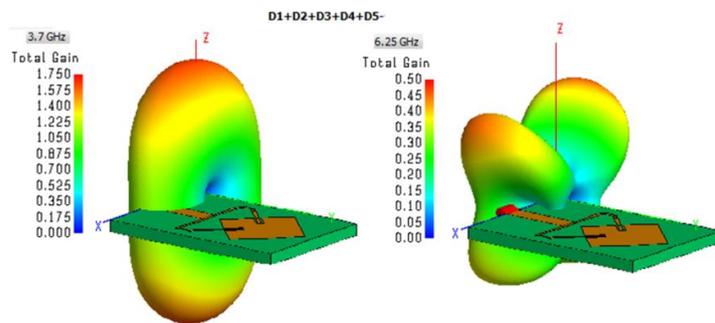


Рис. 5. Диаграмма направленности антенны в режиме  $D1+D2+D3+D4+D5-$

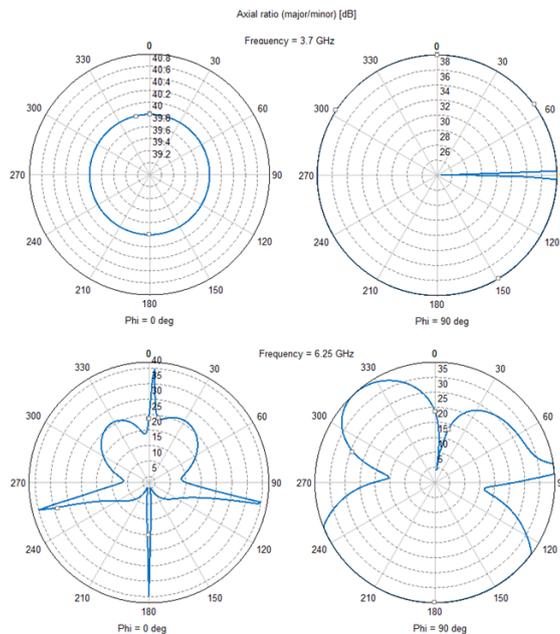


Рис. 6. Коэффициент эллиптичности антенны в режиме  $D1+D2+D3+D4+D5-$

При подключении только одного из диодов D1 или D2 симметрия излучающей части нарушается. При этом резонансная частота по-прежнему определяется комбинацией диодов D3 — D5, а поляризация меняется на ортогональную в зависимости от того, какой из диодов (D1 или D2) подключен. Для иллюстрации этого явления на рис. 7, рис. 9 и рис. 11 показаны объемные диаграммы направленности антенн, а на рис. 8, рис. 10 и рис. 12 соответствующие им графики коэффициента эллиптичности.

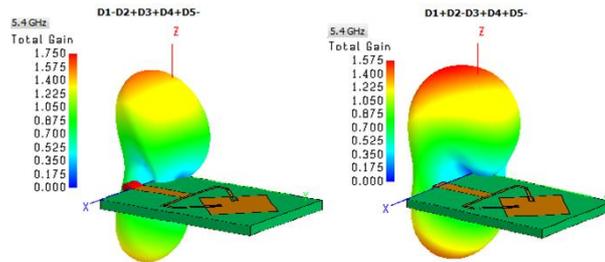


Рис. 7. Диаграммы направленности антенны в режимах  $D1-D2+D3+D4+D5-$  и  $D1+D2-D3+D4+D5-$

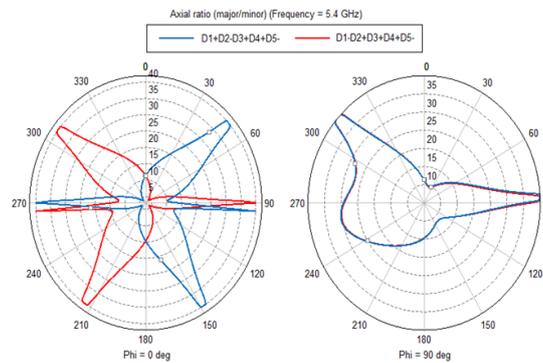


Рис. 8. Коэффициент эллиптичности антенны в режимах  $D1-D2+D3+D4+D5-$  и  $D1+D2-D3+D4+D5-$

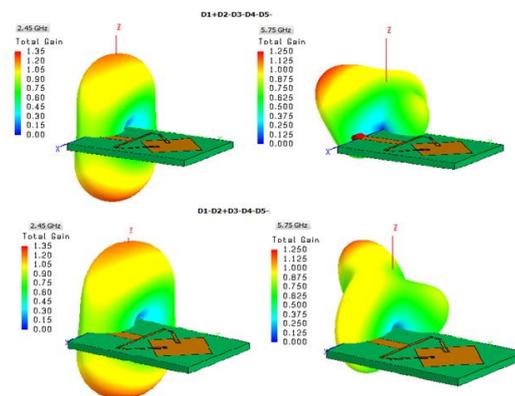


Рис. 9. Диаграммы направленности антенны в режимах  $D1-D2+D3-D4-D5-$  и  $D1+D2-D3-D4-D5-$

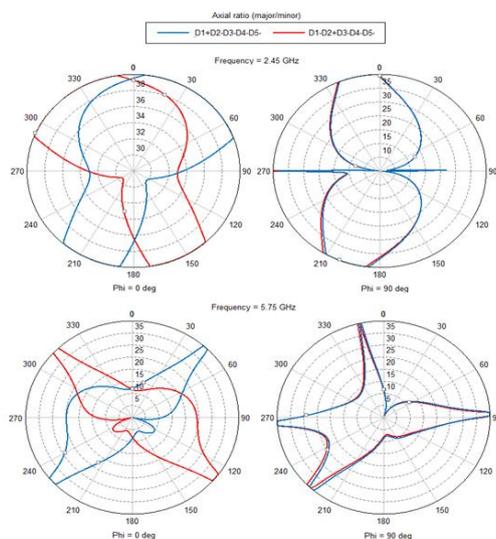


Рис. 10. Коэффициент эллиптичности антенны в режимах  $D1-D2+D3-D4-D5-$  и  $D1+D2-D3-D4-D5-$

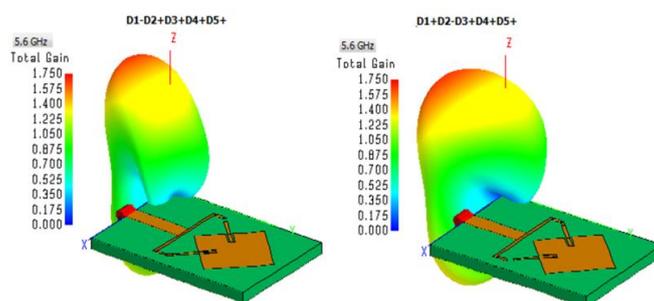


Рис. 11. Диаграммы направленности антенны в режимах  $D1-D2+D3+D4+D5+$  и  $D1+D2-D3+D4+D5+$

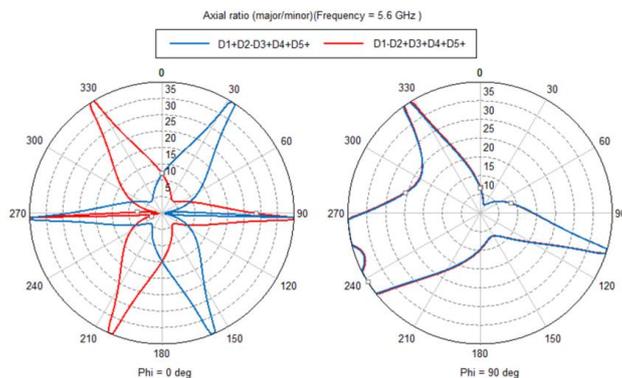


Рис. 12. Коэффициент эллиптичности антенны в режимах  $D1-D2+D3+D4+D5+$  и  $D1+D2-D3+D4+D5+$

По приведенным рисункам видно, что антенна в рассмотренных режимах, то есть в частотном диапазоне 5–6 ГГц, имеет круговую поляризацию везде, кроме узких секторов углов. Также на рис. 10 показан случай, где антенна при той же комбинации диодов может работать и на более низкой частоте 2,45 ГГц, но здесь обеспечивается линейная поляризация. Для каждой рассматриваемой пары режимов графики коэффициента эллиптичности одинаковы по форме, но противоположно ориентированы, что говорит о противоположном направлении вращения вектора поляризации. Таким образом видно, что выбор включения одного из диодов D1 или D2 позволяет изменить поляризацию антенны на одной частоте с правой на левую.

Полученные при моделировании параметры антенны для комбинаций pin-диодов, обеспечивающих минимальный КСВ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры антенны в различных режимах работы**

Комбинация pin-диодов	Резонансная частота	КСВ	S11	Поляризация	Axial ratio (max/min)
D1+D2+D3+ D4+D5-	3,7 ГГц	1,1	-26 дБ	Линейная	40 дБ
	6,25 ГГц	1,6	-13 дБ	Эллиптическая	5 дБ
D1+D2+D3+ D4+D5+	2,05 ГГц	1,5	-15 дБ	Линейная	29 дБ
D1+D2+D3- D4-D5-	5,2 ГГц	1,1	-27 дБ	Эллиптическая	18 дБ
	6,65 ГГц	2,2	-9 дБ	Эллиптическая	6 дБ
D1-D2+D3+ D4+D5-	5,4 ГГц	1,5	-16 дБ	Левая круговая	1,7 дБ
D1+D2-D3+ D4+D5-			-15 дБ	Правая круговая	1,7 дБ
D1-D2+D3- D4-D5-	2,45 ГГц	2	-9 дБ	Линейная	29 дБ
D1+D2-D3- D4-D5-					30 дБ
D1-D2+D3-D4- D5-	5,75 ГГц	1,2	-27 дБ	Левая круговая	0,5 дБ
D1+D2-D3- D4-D5-				Правая круговая	0,5 дБ
D1-D2+D3+ D4+D5+	5,6 ГГц	2,2	-9 дБ	Левая круговая	1 дБ
D1+D2-D3+ D4+D5+			-9 дБ	Правая круговая	1 дБ

**Заключение.** В данной работе предложена конструкция реконфигурируемой микрополосковой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации, и исследованы ее диаграммы направленности и угловые зависимости коэффициента эллиптичности. Антенна имеет компактные размеры и может быть использована в бес-

проводных системах связи, работающих в диапазоне 2–7 ГГц. В конструкции антенны имеется 5 рin-диодов, в зависимости от состояния которых изменяется резонансная частота и поляризация антенны. Так, для нижней части исследуемого частотного диапазона (2,05, 2,45 и 3,7 ГГц) антенна имеет линейную поляризацию. При работе в более высоком поддиапазоне (5,4, 5,6 и 5,75 ГГц) антенна имеет круговую поляризацию, направление вращения которой изменяется в зависимости от подключения диодов. Эта возможность переключения поляризации на ортогональную на одной и той же частоте позволяет принимать сигнал в условиях отражений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Haupt R. L., Lanagan M. Reconfigurable antennas, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2013, Vol. 55 (1), pp. 49-61.
2. Hassan. M.M., Zahid Z., Khan A.A., Rashid I., Rauf A., Maqsood M. Two element MIMO antenna with frequency reconfigurable characteristics utilizing RF MEMS for 5G applications, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2020, Vol. 34, Issue 9: Massive MIMO Toward 5G, pp. 1210-1224.
3. Purisima M.C.L., Salvador M., Agustin S.G.P., Cunanan M.T. Frequency and pattern reconfigurable antennas for community cellular applications, *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 22-25 Nov. 2016, Singapore.
4. Constantine J., Tawk Y., Barbin S.E., et al. Reconfigurable antennas: design and applications, *Proc. IEEE*, 2015, Vol. 103 (3), pp. 424-437.
5. Wright M.D., Baron W., Miller J., et al. MEMS reconfigurable broadband patch antenna for conformal applications, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, Vol. 66 (6), pp. 2770-2778.
6. Han L., Wang C., Chen X., et al. Compact frequency-reconfigurable slot antenna for wireless applications, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2016, Vol. 15, pp. 1795-1798.
7. Rajagopalan H., Kovitz J. M., Rahmat-Samii Y. MEMS reconfigurable optimized E-shaped patch antenna design for cognitive radio, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2014, Vol. 62 (3), pp. 1056-1064.
8. Abdulraheem Y., Oguntala G. A., Abdullah A. S., et al. Design of frequency reconfigurable multi-band compact antenna using two pin diodes for WLAN/WiMAX applications, *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 2017, Vol. 11 (8), pp. 1098-1105.
9. Pandit S., Mohan A., Ray P. Compact frequency-reconfigurable MIMO antenna for microwave sensing applications in WLAN and WiMAX frequency bands, *IEEE Sens Lett.*, 2018, No. 2 (2), pp. 1-4. Doi: 10.1109/LSENS.2018.2822598.
10. Zhao X., Riaz S. A dual-band frequency reconfigurable MIMO patch-slot antenna based on reconfigurable microstrip feedline, *IEEE Access.*, 2018, Vol. 6, pp. 41450-41457.
11. Hussain R., Sharawi M.S., Shamim A. 4-element concentric pentagonal slot-line-based ultra-wide tuning frequency reconfigurable MIMO antenna system, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, Vol. 66 (8), pp. 4282-4287.
12. Hussain R., Khan M.U., Sharawi M.S. Design and analysis of a miniaturized meandered slot-line-based quad-band frequency agile MIMO antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, Vol. 68 (3), pp. 2410-2415.
13. Hussain R., Sharawi M.S. A cognitive radio reconfigurable MIMO and sensing antenna system, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2014, Vol. 14, pp. 257-260.
14. Borhani M., Rezaei P., Valizade A. Design of a Reconfigurable Miniaturized Microstrip Antenna for Switchable Multiband Systems, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, Vol. 15, pp. 822-825.
15. Song T., Lee Y., Ga D., Choi J. A Polarization Reconfigurable Microstrip Patch Antenna using PIN Diodes. Proceedings of APMC 2012, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7, 2012, pp. 616-618.
16. Lee M.J., Sung Y., Kim S.H., Kim Y.S. Polarization Reconfigurable Microstrip Patch Antenna with Complementary Split Ring Resonator (CSRR), *Proceedings of APMC 2012, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7, 2012*, pp. 619-621.
17. Lee S.W., Sung Y., Lee S.J., Yoon H.S. and Park H.J. A reconfigurable patch antenna with symmetrical structure for polarization diversity, *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 13-17 April 2015, Lisbon, Portugal*.

18. Ji L.Y., Qin P.Y., Guo Y.J., Fu G., Mittra R. A Wideband Polarization Reconfigurable Antenna for WLAN Applications, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 10-15 April 2016, Davos, Switzerland.*
19. Pan P., Guan B. A Wideband Polarization Reconfigurable Antenna with Six Polarization States. 2018 12th International Symposium on Antennas, *Propagation and EM Theory (ISAPE), 3-6 Dec. 2018, Hangzhou, China.*
20. Roseli W.I., Mokhtar N.H., Ali M.T. Polarization Reconfigurable Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication Applications, *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 23-26 Oct. 2018.*
21. Qi Ch., Cui Y., Li R. A Quad-Polarization Reconfigurable Omnidirectional Antenna, *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 8-13 July 2018, Boston, MA, USA.*
22. McMichael I.T. A Mechanically Reconfigurable Patch Antenna With Polarization Diversity, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, issue 7, July 2018.*
23. Eqbal Z., Varma R., Ghosh J. A Compact Polarization Reconfigurable Square Slot Antenna for WiMAX, *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP 2018), 9-11 February, 2018.*
24. Wong H., Lin W., Wang X., Lu M. LP and CP Polarization Reconfigurable Antennas for Modern Wireless Applications, *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 30 Oct.-2 Nov. 2017, Phuket, Thailand.*
25. Begum H., Wang X., Lu M. A Polarization-Reconfigurable Microstrip Antenna Design Based on Parasitic Pin Loading, *2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 15-18 Jan. 2017, Phoenix, AZ, USA.*
26. Vaganova A.A., Kisel N.N., Panychev A.I. Statistical Account of the Obstacle Position in a MIMO System Channel Matrix Indoors, *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 11-13 March 2020, Moscow, Russia.*
27. Panychev A.I., Vaganova A.A. Efficient three-dimensional ray tracing and electromagnetic field intensity estimation algorithm for WLAN, *2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 29 Sept.-2 Oct. 2017, Novi Sad.*
28. Panychev A.I., Vaganova A.A. Approximate calculation of the diffraction coefficients in the analysis of WLAN coverage area. 26-30 June 2017, Divnomorskoe, Russia.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров

**Ваганова Анастасия Алексеевна** – Южный федеральный университет; email: anastasia\_vaganova@mail.ru; г. Таганрог, Россия; м.н.с.

**Кисель Наталья Николаевна** – e-mail: nnkisel@sfnu.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Паньчев Андрей Иванович** – e-mail: ruu2011@mail.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Vaganova Anastasia Alexeevna** – Southern Federal University; e-mail: anastasia\_vaganova@mail.ru; Taganrog, Russia; junior researcher.

**Kisel Natalia Nikolayevna** – e-mail: nnkisel@sfnu.ru; the department of antennas and radio transmitters; cand. of emg. sc.; associate professor.

**Panychev Andrey Ivanovich** – e-mail: ruu2011@mail.ru; the department of antennas and radio transmitters; cand. of emg. sc.; associate professor.