

11. Samkov I. Osnovy teorii demoduliruyushchikh logarifmicheskikh usiliteley [Fundamentals of the Theory of demodulating logarithmic amplifiers], *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2009, No. 3, pp. 84-90.
12. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Ponomarenko A.A. Dinamicheskiy diapazon priemnika pryamogo usileniya s logarifmicheskim videousilitelem [Dynamic range of a direct-amp receiver with a logarithmic video amplifier], *Mater. MNTK «Informatsionnyy podkhod v estestvennykh, gumanitarnykh i tekhnicheskikh naukakh»* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Information Approach in Natural, Humanitarian and Technical Sciences"], Part 4. Taganrog, TRTU, 2004, pp. 8-9.
13. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Dinamicheskiy diapazon i propusknaya sposobnost' priemnika pryamogo usileniya s logarifmicheskim videousilitelem [Dynamic range and bandwidth of a direct gain receiver with a logarithmic video amplifier], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya OVR* [Issues of special radio electronics. Series OVR], 2004, No. 2, pp. 188-122.
14. Belyaev D.V., Zikiy A.N., Rumyantsev K.E. Approksimatsiya amplitudnoy kharakteristiki detektornogo priemnika [Approximation of the amplitude characteristic of a crystal receiver], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information counteraction to terrorist threats], 2005, No. 6, pp. 201-205.
15. Ken Yang. Logarifmicheskie usiliteli dlya kompleksnykh izmereniy RCh–signalov [Logarithmic amplifiers for complex measurements of RF signals], *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2006, No. 8, pp. 121-124.
16. Belyaev D.V., Burlachenko A.A., Zikiy A.N., Rumyantsev K.E. Logarifmicheskie detektory (obzor) [Logarithmic detectors (review)], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Information Counteraction to Terrorist Threats], 2008, No. 12, Part 2, pp. 241-249.
17. Andrianov A.V., Babaev A.A., Zikiy A.N., Pustovalov A.I. Eksperimental'noe issledovanie pelengatsionnogo priemnika santimetrovogo diapazona [Experimental study of a centimeter-range direction-finding receiver], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2021, No. 5. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6987.
18. D'yakov V.P. MATLAB i Simulink dlya radioinzhenerov [MATLAB and Simulink for radio engineers]. Moscow: DMK – Press, 2016, 976 p.
19. Likharev V.A. Tsifrovye metody i ustroystva v radiolokatsii [Digital methods and devices in radar]. Moscow: Sov. radio, 1973, 456 p.
20. Andre Ango. Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov [Mathematics for electrical and radio engineers]. Moscow: Nauka, 1967, 780 p.

Андрянов Артур Валерьевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79034885927; начальник отдела.

Зикий Анатолий Николаевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185822295; к.т.н.; с.н.с.

Кочубей Алексей Сергеевич – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: l.co4ubey@ya.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79896270939; инженер-конструктор II категории.

Andrianov Artur Valerievich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: artur_andrianov_1990@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034885927; head of department.

Zikiy Anatoly Nikolaevich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185822295; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Kochubey Alexey Sergeevich – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@ya.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939; design engineer category II.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-255-262

Во Ба Ау, Ю.В. Юханов

НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ

Рассмотрена конструкция низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. Основной деталью конструкции является квадратный дипольный массив, который представляет собой утолщенные вибраторы. В конструкции применяется балун в форме «Змейки», который обеспечивает формирование линий передачи и поддержку излучателей с квадратным контуром.

Улучшение полосы рабочих частот и уменьшение высоты удалось достичь путем размещения непосредственно между диполем и землей диэлектрического материала с $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$, электрическая толщина которого составила $0,16\lambda$ на центральной частоте рабочего диапазона длин волн. Представлены результаты численного исследования характеристик элементарной ячейки антенной решетки с периодическими граничными условиями на гранях в программном обеспечении ANSYS HFSS. Показаны коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) элементов антенны и элементов прототипа Kathrein 739622. Показана зависимость КСВН элемента антенны от частоты при различных значениях радиуса диполя. Исследовано влияние размера балуна на характеристики элемента антенной решетки. Расчетным путем установлено, что выбор радиуса диполя позволяет укоротить диполь в 1,5 раза и выбор размера балуна в форме «Змейки» обеспечивает уменьшение высоты антенны при этом не ухудшаются характеристики антенны. Показаны диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На основе предложенного элемента разработаны модели конечных антенных решеток. Эта антенна обычно состоит из ряда 4 идентичных элементов, установленных вдоль вертикальной линии, что формирует антенную решетку. Показаны КСВН и коэффициент усиления (КУ) антенной решетки и также диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной и вертикальной плоскости на разных частотах. Результаты моделирования показывают, что благодаря предложенной оригинальной идее трансформации прямолинейного балуна в криволинейный в форме «змейки» и утолщенных вибраторов удалось получить конструкцию излучателя базовой сотовой связи, уменьшенную в 1,5 раза по сравнению с применяемыми антеннами на практике в Kathrein 739622 с не худшими характеристиками.

Антенная решетка; дипольные антенны; поляризация; антенна для базовой станции.

Vo Ba Au, Y.V. Yukhanov

LOW-PROFILE ANTENNA ARRAY FOR A BASE STATION

The design of a low-profile antenna array for a base station is considered. The main part of the design is a square dipole array, which is thickened vibrators. The design uses a balun in the form of a snake, which provides the formation of transmission lines and support for radiators with a square contour. The improvement of the operating frequency band and the reduction of the height were achieved by placing a dielectric material with $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$ directly between the dipole and the ground, the electrical thickness of which was 0.16λ at the central frequency of the operating wavelength range. The results of a numerical study of the characteristics of an elementary cell of an antenna array with periodic boundary conditions on the edges in the ANSYS HFSS software are presented. VSWR of antenna elements and prototype element Kathrein 739622 are shown. The dependence of VSWR of antenna element on frequency at different values of dipole radius is shown. The influence of balun size on characteristics of antenna array element is investigated. It was established by calculation that the choice of the dipole radius shortens the dipole by 1.5 times, and the choice of the size of the "Snake" shaped balun ensures a lower antenna height, without deteriorating the antenna's characteristics. Radiation patterns in horizontal and vertical planes are shown. Based on the proposed element, models of finite antenna arrays are developed. This antenna usually consists of a row of 4 identical elements installed along a vertical line to form an antenna array. VSWR and gain of antenna array and also radiation patterns in the horizontal and vertical planes at different frequencies are shown. The results show that due to the proposed original idea of transforming a rectilinear balun into a curvilinear one in the form of a "snake" and thickened vibrators, it was possible to obtain a design of a basic cellular communication emitter of 1.5 times smaller dimensions, compared to those antennas used in practice in Kathrein 739622 with good characteristics.

Antenna array; dipole antennas; polarization; antenna for base station.

Введение. С быстрым развитием технологий беспроводной связи неизбежна ситуация, при которой сосуществуют различные стандарты связи. С уменьшением ресурсов антенны базовых станций с широкополосной связью и двойной поляризацией стали предпочтительными в современных приложениях антенн базовых станций, поскольку они могут снизить стоимость установки, значительно улучшить емкость системы и качество сигнала [1–3]. Также достижение стабильных рабочих характеристик, несмотря на влияние ветра, дождя и других факторов, требует особого внимания к размерам и форме антенной системы. Необходимость создания низкопрофильной конструкции или уменьшения размеров антенны вызывает интерес и внимание при проектировании антенны для базовой станции БС [3].

Для решения этой проблемы было предложено несколько форм широкополосной антенны базовой станции [4–7]; однако либо антенны слишком высокие, либо дальнейшее уменьшение высоты этих антенн представляет собой сложную задачу.

Для базовых станций антенны с двойной поляризацией предложены в [9–11] с различными структурами. Например, патч-антенна с ортогональной линейной поляризацией была предложена в [10], рабочая полоса частот предлагаемой антенны не слишком широка от 890 до 960 МГц, чтобы охватить диапазоны CDMA800 и GSM900. В [11] магнитоэлектрическая дипольная антенна представляет собой сложные структуры, что ограничивает широкое применение антенн.

В данной статье представлен широкополосный наклонный $\pm 45^\circ$ двойной поляризованный антенный элемент базовой станции, работающий в диапазоне частот 790–960 МГц. Элемент антенны имеет хорошие электрические характеристики, включая КСВН $< 1,5$ и стабильную диаграмму направленности как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Кроме того, элемент антенны имеет отличные механические свойства, такие как компактная структура, высокая надежность, хорошая стабильность, малый вес и простота изготовления. На основе элемента представлена антенная решетка в виде 4 идентичных элементов, установленных вертикально.

Конструкция элемента антенной решетки. На рис. 1 показан общий вид предлагаемого широкополосного двойного поляризованного антенного элемента состоит из квадратного дипольного массива, балуна в форме «Змейки» и U-образного металлического отражателя. На рис. 1,а–в представлены полный вид, вид сверху и вид сбоку предлагаемого излучающего элемента соответственно.

Конструкция элемента включает излучатель, который состоит из двух пар симметричных диполей, четыре пар симметризирующих трансформаторов и металлический отражатель.

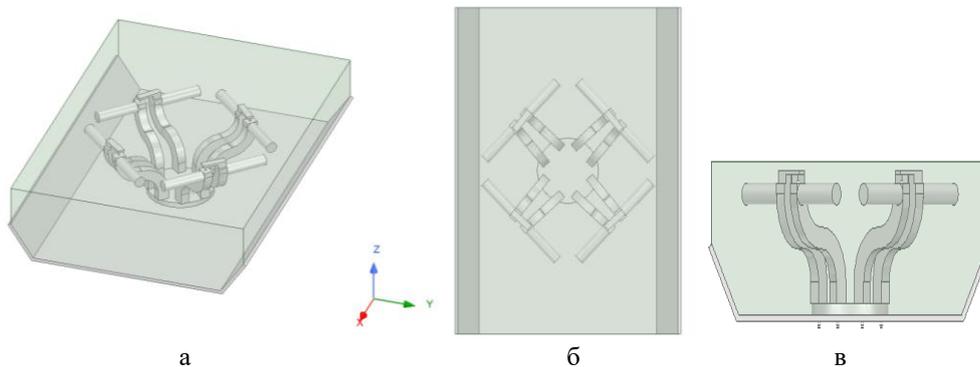


Рис. 1. (а) конфигурация исследованного антенного элемента базовой станции, (б) вид сверху и (в) вид сбоку

Излучающие токи в диполях на противоположных сторонах квадрата синфазны. Одна пара диполей обеспечивает поляризацию $+45^\circ$, а другая -45° поэтому это называется наклонной $\pm 45^\circ$ двойной поляризацией. Длина диполя напрямую определяет резонансную частоту антенны. Расстояние между двумя соседними излучателями заметно влияет на согласование импеданса антенны.

В конструкции предложен балун в форме «Змейки», который обеспечивает преобразование линии передачи, например, коаксиального кабеля 50 Ом, в структуру сбалансированного питания и одновременно поддерживает излучатели с квадратным контуром. Коаксиальные кабели проходят через кабельные трассы и питают диполи: внешний проводник коаксиального кабеля подключается к одному плечу пары симметричных диполей, а внутренняя жила подключается к другому плечу диполей. Форма и размер балуна оказывают значительное влияние на характеристики антенны.

Отражатель также сильно влияет на характеристики излучения антенны. При правильной конструкции отражателя можно получить хороший баланс между шириной луча главного лепестка, отношением переднего к заднему лепестку.

Улучшение полосы рабочих частот и уменьшение высоты и габаритов элемента антенны удалось достичь путем размещения непосредственно между диполями и землей диэлектрического материала с $\epsilon_r = 2$, $\tan(\delta) = 0.002$, электрическая толщина которого составила $0,16\lambda$ на центральной частоте рабочего диапазона длин волн.

В качестве прототипа использована антенна для базовой станции модели Kathrein 739622. (рис. 2).

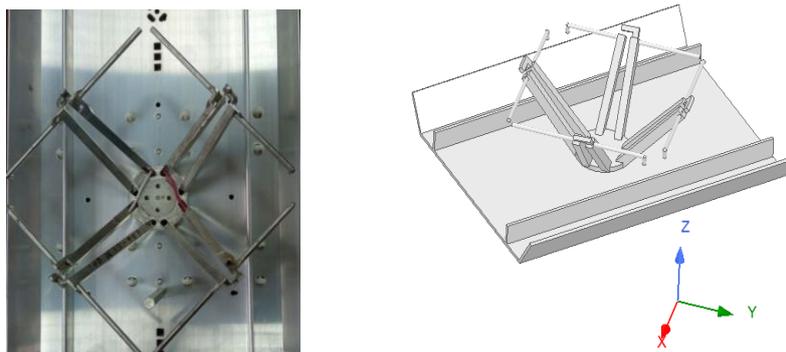


Рис. 2. Модель и прототипа элемента антенны Kathrein 739622

В основном конструкция предлагаемого элемента и прототипа антенны Kathrein 739622 схожа. Отличие заключается в радиусе диполя и форме балуна. Длина диполя у элемента Kathrein 739622 больше 1,5 раза, чем у предлагаемого. В конце каждого диполя прототипа имеется изогнутая часть для удобного размещения элемента антенны в корпусе.

Результаты численного исследования элемента низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. Модель антенны была исследована с помощью программы HFSS. Проведено сравнение с характеристиками прототипа антенны Kathrein 739622. Параметры КСВН показаны на рис. 3.

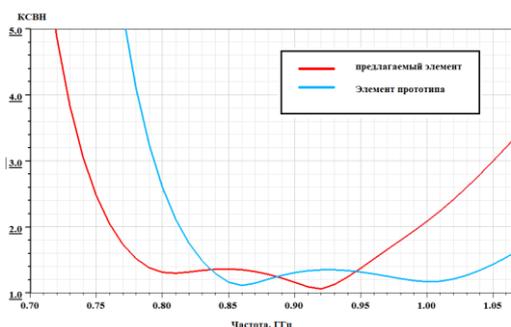


Рис. 3. КСВН элемента антенны

Результаты расчетов показали, что по критерию $КСВН < 1,5$ можно добиться рабочей полосы частот 0,78–0,96 ГГц, которая охватывает как полосы частот CDMA, так и мобильной связи GSM. По сравнению с элементом прототипа рабочие полосы смещаются в более низкие частоты, однако технические требования антенны выполняются.

На рис. 4 показана зависимость КСВН от частоты для различных значений радиуса диполя. Изменение КСВН является сильно выраженным, путём увеличения радиуса диполя можно добиться расширения полосы рабочих частот по критерию $КСВН < 1,5$ в области низких частот рабочего диапазона, и одновременно уменьшения длины диполя на 1,5 раза.

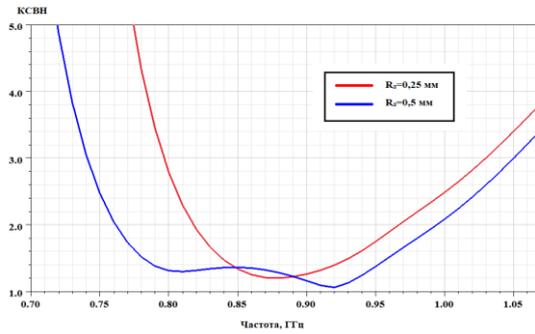


Рис. 4. Зависимость КСВН элемента антенны от частоты при различных значениях радиуса диполи

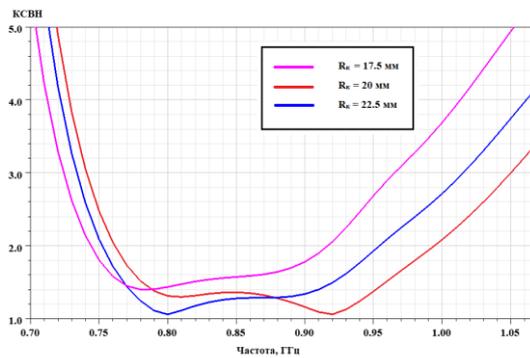


Рис. 5. Влияние размера балуна на характеристики элемента антенной решетки. Зависимость КСВН элемента АР от частоты

На рис. 5 показаны зависимости КСВН от частоты при различных значениях радиуса дуги балуна R_k в форме «Змейки» предлагаемого элемента антенны. Из анализа результатов можно сделать вывод, что при оптимальном выборе радиуса дуги балуна обеспечивается КСВН $< 1,5$ в области рабочих частот 0,78-0,96 ГГц. При увеличении радиуса дуга обеспечивает лучшее согласование на низких частотах диапазона рабочих длин волн. Но в то же время это приводит к увеличению коэффициента стоячей волны в области верхних частот. При уменьшении радиуса дуга происходит рассогласование на всем диапазоне частот. Таким образом размер балуна оказывает значительное влияние на характеристики антенны.

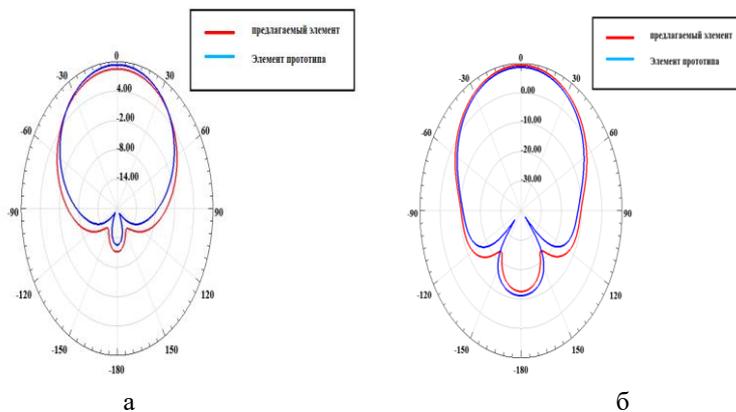


Рис. 6. Диаграммы направленности элемента антенны в (а) горизонтальной и (б) вертикальной плоскости на 0,88 ГГц частоте

Диаграммы направленности элемента на частоте 0,88 ГГц в пределах рабочей полосы имеют ширину луча 3дБ более 65° по горизонтали. Видно, что у предлагаемого элемента наблюдается более низкий уровень излучения заднего лепестка в вертикальной плоскости.

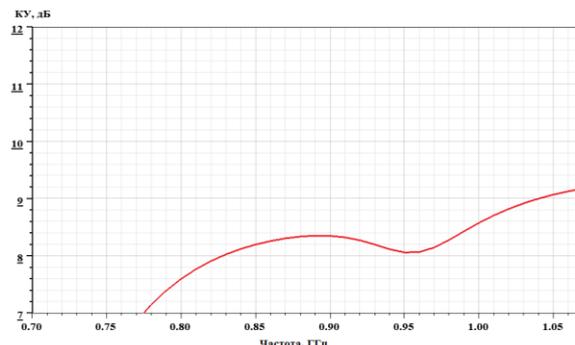


Рис. 7. Коэффициент усиления предлагаемого элемента антенны

На рис. 7 показан реализованный коэффициент усиления элемента предлагаемой антенной решетки, который достигает 9,5 дБ в области частот диапазона. Пиковое усиление составляет 8,4 дБ на частоте 0,9 ГГц и варьируется менее 0,4 дБ во всем рабочем диапазоне 0,78–0,96 ГГц.

Конструкция низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. На рис. 8 представлена конструкция антенной решетки для базовой станции на основе предлагаемого элемента. Эта антенна состоит из ряда 4 идентичных элементов, установленных вдоль вертикальной линии, что формирует антенную решетку. Эти элементы расположены на расстоянии в одну длину волны с соответствующими элементами и возбуждаются токами соответствующей амплитуды и фазы, которые определяют форму диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

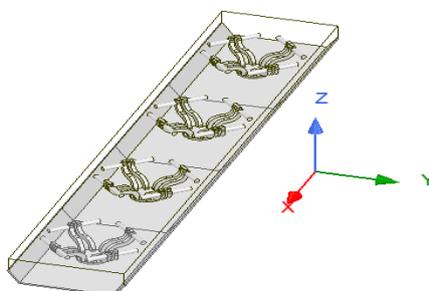


Рис. 8. Геометрия низкопрофильной антенной решетки для базовой станции

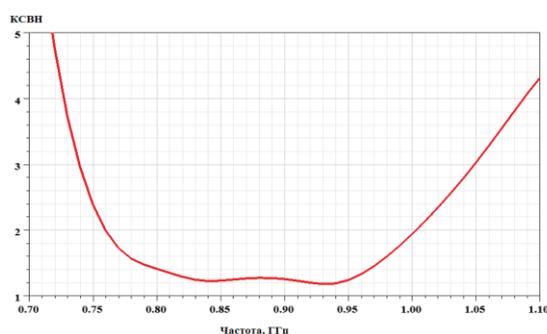


Рис. 9. КСВН низкопрофильной антенной решетки

Рассчитанные значения КСВН показаны на рис. 9. Как и КСВН элемента, КСВН антенной решеткой достигает значения менее 1,5 дБ в диапазоне рабочих частот 0.79–0.97 ГГц. Это соответствует требованиям технических задач по диапазону частот.

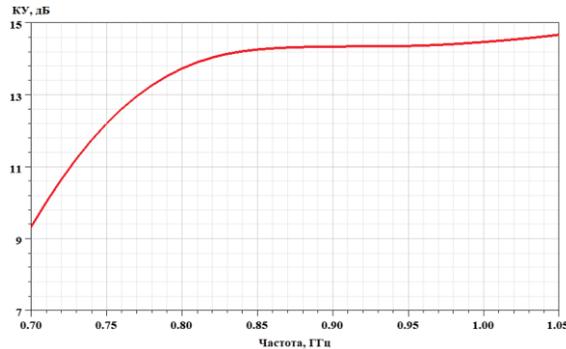


Рис. 10. Коэффициент усиления низкопрофильной антенной решетки

На рис. 10 показано что, коэффициент усиления антенной решетки составляет 14,5 дБ и так же мало варьируется в диапазоне рабочих частот от 0,78 до 0.96 ГГц. Данная антенная решетка обеспечивает стабильное усиление во всем диапазоне частот.

Диаграммы направленности в двух плоскостях показаны на рис. 11. Видно, что диаграммы направленности излучения стабильны на всей рабочей частот и улучшаются с увеличением частот в вертикальной частоте.

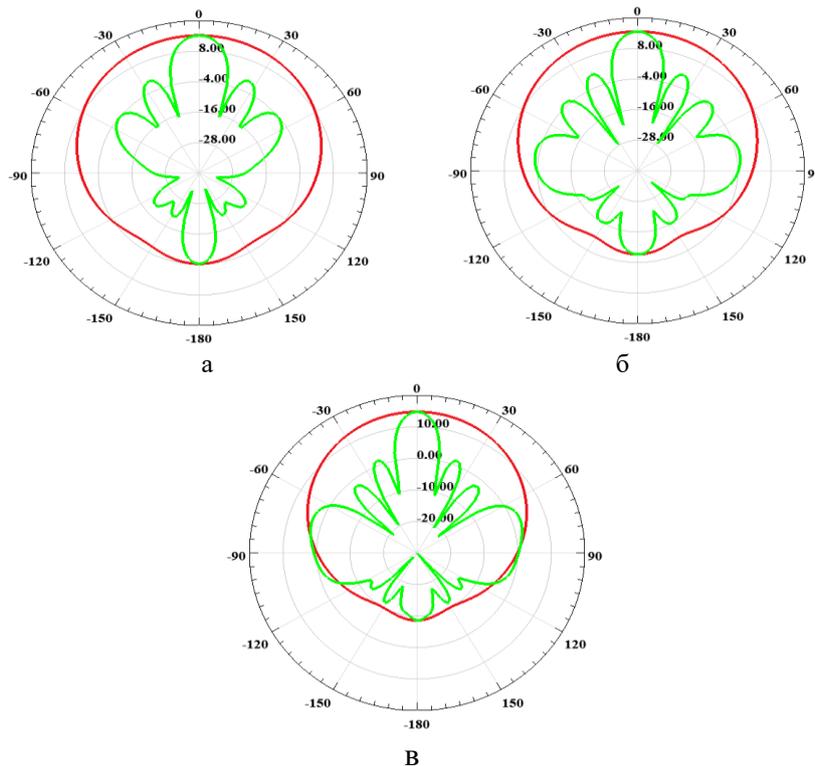


Рис. 11. Диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной и вертикальной плоскости на (а) 0,8 ГГц (б) 0,88 ГГц (в) 0,96 ГГц частоте

Заключение. В работе предложена антенная решетка для базовой станции с двойной наклонной поляризацией. Результаты измерений демонстрируют значение коэффициента стоячей волны по напряжению соотношение менее 1,5 дБ в диапазоне от 0,8 до 0,96 ГГц, которое охватывает как CDMA, так и полосы частот мобильной связи GSM. В пределах этой частоты диапазон, она имеет ширину луча 3дБ более 65° по горизонтали, и также обеспечивает низкий уровень излучения заднего лепестка в обеих плоскостях. Кроме того, антенная решетка имеет более низкопрофильную конструкцию по сравнению с существующими антеннами. Результаты моделирования доказали, что его основные технические характеристики полностью соответствуют промышленным стандартам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Daniel M. Telecommunications Technology Handbook. Boston, MA: Artech House, 2003.
2. Golio M. The RF and Microwave Handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
3. Balanis C.A. Antenna Theory Analysis and Design, Hoboken, NJ, USA Wiley, 2005.
4. Targonski S.D., Waterhouse R.B. and Pozar D.M. Design of wide-band aperture-stacked patch microstrip antennas, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Sep. 1998, Vol. 46, No. 9, pp. 1245-1251.
5. Lai H.W. and Luk K.M. Design and study of wide-band patch antenna fed by meandering probe, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Feb. 2006, Vol. 54, No. 2, pp. 564-571.
6. Wong H., Lau K.L. and Luk K.M. Design of dual-polarized L-Probe patch antenna arrays with high isolation, *IEEE Trans Antennas Propagation*, Jan. 2004, Vol. 52, No. 1, pp. 45-52.
7. Gao S., Li L.W., Leong M.S. and Yeo T.S. A broad-band dual-polarized microstrip patch antenna with aperture coupling, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Apr. 2003, Vol. 51, No. 4, pp. 898-900.
8. Sim C., Chang C. and Row J. Dual-feed dual-polarized patch antenna with low cross polarization and high isolation, *IEEE Transactions Antennas Propagation*, Oct. 2009, Vol. 57, No. 10, pp. 3321-3324.
9. Luk K.M., Lai C.H. and Lee K.F. Wideband L-probe-feed patch antenna with dual-band operation for GSM/PCS base stations, *Electronics Letters*, Jul. 1999, Vol. 35, No. 14, pp. 1123-1124.
10. Chiou T.W. and Wong K.L. A compact dual-band dual-polarized patch antenna for 900/1800-MHz cellular systems, *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, Aug. 2003, Vol. 51, No. 8, pp. 1936-1940.
11. Wenxing An, Shufang Li, Weijun Hong, Fangzheng Han and Kunpeng Chen. Design of wideband dual-band dual-polarized dipole for base station antenna, *Journal of China Universities of Posts & Telecommunications*, Jun. 2012, Vol. 19, No. 19, pp. 22-28.
12. Kaboli M., Abrishamian M.S., Mirtaheeri S.A. and Aboutorab S.M. High-isolation XX-polar antenna, *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, Jul. 2012, Vol. 60, No. 9, pp. 4046-4055.
13. Shaoli Zuo, Qionqiong Liu and Zhiya Zhang. Wideband dual-polarized crossed-dipole antenna with parasitical crossed-strip for base station applications, *Progress in Electromagnetics Research C*, Jan. 2014, Vol. 48, pp. 159-166.
14. Yanyan Liu and Zhihong Tu. Differential enhanced broadband dual-polarized printed dipole antenna for base stations, *Microwave & Optical Technology Letters*, Dec. 2016, Vol. 58, No. 12, pp. 2864-2868.
15. Yejun He, Yadong Yue and Zhongxiang Shen. A novel broadband dual-polarized antenna element for LTE700 MHz/GSM850 MHz/GSM900 MHz applications, *IEEE Access*, 2016, Vol. 4, pp. 4321-4326.
16. Siwiak K. and McKeown D. Ultra-wideband Radio Technology. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
17. Ghavami M., Michael L.B., and Kohno R. Ultra-wideband Signals and Systems in Communication Engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
18. Liu Z., Liu J., Liu Z., Zhang Y. and Zhang X.-Y. A novel dual-band and high-gain antenna for 2G/3G base station, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Jun. 2015, Vol. 54, pp. 1-6.
19. Guanfeng Cui, Shigang Zhou, Shuxi Gong and Ying Liu. A compact dual-polarized antenna for base station application, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, Jan. 2016, Vol. 59, pp. 7-13.
20. Chen S. and Luk K.M. High performance dual-band dual-polarized magneto-electric dipole base station antenna, *Proc. Asia-pacific Microw. Conf. (APMC)*, Nov. 2014, pp. 321-323.

Во Ба Ау – Южный федеральный университет; e-mail: bvo@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; слушатель.

Юханов Юрий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Vo Ba Au – Southern Federal University; e-mail: bvo@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371634; listener.

Yukhanov Yury Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371634; the Department Antenna and Radio Transmitter; dr. of eng. sc.; professor; head of the department.