

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН УСТРОЙСТВ СБОРА ЭНЕРГИИ

Е.В.Кузьмин, С.В.Платонов*, М.А.Хаванова, Р.В.Петров

METHOD FOR MEASURING THE ANTENNA RADIATION PATTERNS OF ENERGY HARVESTING DEVICE

E.V.Kuz'min, S.V.Platonov*, M.A.Khavanova, R.V.Petrov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, hma41@mail.ru

*ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

Рассматриваются диаграммы направленности антенн для устройства сбора энергии СВЧ диапазона. Проведены исследования двух способов измерения диаграмм направленности антенн. Разработаны макеты для измерения диаграмм направленности, описаны устройства, использованные в них. Для исследования были выбраны пять типов антенн: дипольная, полосковая, рупорная, параболическая антенна и полосковая антенная решетка. Все исследованные антенны были настроены на резонанс на частоте 2,44 ГГц. Приведено графическое сравнение двух способов измерения диаграммы направленности для различных типов антенн.

Ключевые слова: антенна, диаграмма направленности, устройство сбора энергии

This paper is devoted to the research of antenna directivity of the microwave range energy harvesting device. The authors present two methods for measuring antenna patterns. The models for measurement of radiation patterns are developed and the devices used in these models of measurements are described. Five antenna types were chosen for the study: dipole, patch, horn, and parabolic ones and a patch antenna array. All investigated antennas were tuned to resonance at the frequency of 2.44 GHz. A graphical comparison of two techniques of antenna radiation pattern measurements for different types of antennas is presented.

Keywords: antenna, antenna radiation pattern, energy harvesting device

1. Введение

Антенна, вне зависимости от конструкции, обладает свойством обратимости (может работать как на прием, так и на излучение). Часто в радиорелейных трактах одна и та же антенна может быть подключена одновременно к приемнику и передатчику. Это позволяет излучать и принимать сигнал в одном направлении на разных частотах.

Несмотря на то, что приемная и передающая антенны обладают принципом двойственности, в конструктивном отношении они могут существенно отличаться. Связано это с тем, что передающая антенна должна пропускать через себя значительные мощности для передачи электромагнитного сигнала на большие (максимально возможные) расстояния. Если же антенна работает на прием, то она взаимодействует с полями очень малой напряженности. Вид токопередающей конструкции антенны часто определяет ее конечные габариты.

Основная характеристика любой антенны — это диаграмма направленности (ДН). Из нее вытекает множество вспомогательных параметров и такие важные энергетические характеристики, как коэффициент усиления и коэффициент направленного действия. ДН — это зависимость напряженности поля, создаваемого антенной на достаточно большом расстоянии, от углов наблюдения в пространстве.

2. Способы измерения диаграмм направленности

Способы измерения ДН подразделяются на группы в соответствии с зоной (дальней, промежуточной, ближней) проведения измерений [1]. Наиболее отработанными и простыми являются способы измерения в дальней зоне.

Когда говорят о ДН антенны, обычно подразумевают ДН антенны в дальней зоне. Граница дальней зоны определяется соотношением размеров антенны и длины волны [2]:

$$r \geq 2 \frac{D^2}{\lambda},$$

где r — расстояние от фазового центра антенны; D — максимальный габаритный размер антенны (размер апертуры); λ — длина волны.

При большой длине волны или больших линейных размерах антенны для удовлетворения этому условию используют способ вышки и облетный способ на специально созданных полигонах. При малой длине волны и малых размерах антенны можно организовать измерения в безэховых камерах на незначительных расстояниях между приёмной и передающей антенной.

3. Используемые способы измерений

Для измерения ДН антенн устройства сбора энергии СВЧ диапазона были разработаны и собраны макеты. Макет согласно первого способа измерений показан на рисунке 1 [3].

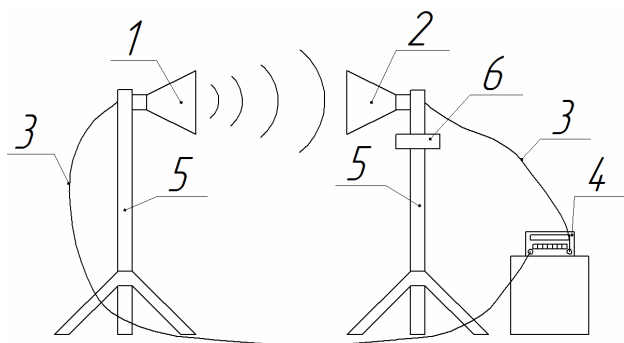


Рис.1. Схема макета измерений диаграмм направленности для устройства сбора энергии СВЧ диапазона по первому способу. 1 — передающая антенна; 2 — приемная антенна; 3 — СВЧ-кабель; 4 — измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (ИККПО) «Обзор-804»; 5 — штатив; 6 — угломер

На передающую антенну, закрепленную на штативе, подается сигнал мощностью 10 мВт на частоте 2,44 ГГц с первого порта ИККПО «Обзор-804». На второй штатив, оборудованный угломером, закреплена приемная антенна, расположенная на расстоянии 2 метра от передающей антенны. В качестве приемной антенны использовалась дипольная антенна TP-LINK TL-ANT2408CL [4]. С помощью второго порта измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (ИККПО) «Обзор-804» снимались значения коэффициента направленного действия (КНД), изменяя угол расположения передающей антенны по отношению к приемной с шагом в 10 градусов с помощью угломера на втором штативе.

Макет для измерения диаграмм направленности для устройства сбора энергии СВЧ диапазона согласно второго способа измерений показан на рис.2 [1].

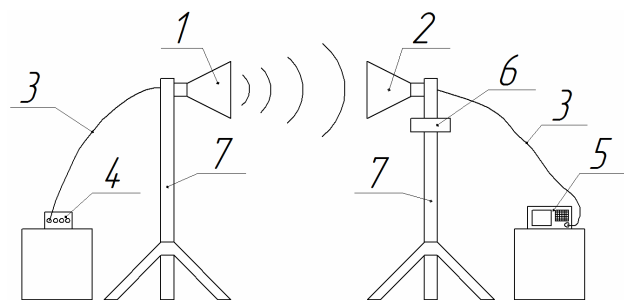


Рис.2. Схема макета измерений диаграмм направленности для устройства сбора энергии СВЧ диапазона по второму способу. 1 — передающая антенна; 2 — приемная антенна; 3 — СВЧ кабель; 4 — генератор сигнала «Обзор-804»; 5 — анализатор спектра «SIGLENT АКИП-4205»; 6 — угломер; 7 — штатив

На передающую антенну с помощью передающей части системы сбора радиочастотной энергии, используемой в качестве генератора сигнала, подавался сигнал мощностью 10 мВт на частоте 2,44 ГГц. На второй штатив, оборудованный угломером, закреплена приемная антенна, расположенная на расстоянии 7 метров от передающей антенны. В качестве приемной антенны использовалась та же дипольная антенна TP-LINK TL-ANT2408CL. С помощью ана-

лизатора спектра «SIGLENT АКИП-4205» снимались значения коэффициента направленного действия (КНД), изменяя угол расположения передающей антенны по отношению к приемной с шагом в 10 градусов с помощью угломера на втором штативе.

Существенная разница в способах измерения состоит в расстоянии между приёмной и передающей антеннами. На частоте 2,44 ГГц длина волны в пространстве составит примерно 0,123 м. Для корректного измерения ДН требуется расстояние от точки излучения до точки приема не менее 10 длин волн, что в нашем случае составит около 1,23 м. Первый способ, использующий для измерений только панораму «Обзор-804», находится на краю ближней зоны измерений (16 длин волн), но тем не менее согласно рекомендациям, данным в [3], такие измерения могут быть проведены. Этот способ требует только один измерительный прибор, приёмный и передающий каналы которого хорошо откалиброваны. Второй способ широко применяется и не вызывает каких-либо сомнений (57 длин волн), использует два прибора — генератор и анализатор спектра. В лабораторных условиях существенным является фактор расстояний. Поэтому проверка способа измерений на небольших дистанциях оказывается существенной для таких приборов, как устройства сбора энергии. В них приемная и передающая антенны располагаются обычно на небольших расстояниях — от нескольких сантиметров до нескольких метров, что делает актуальным проведение исследований способов измерения ДН на небольших расстояниях.

4. Использованное оборудование

Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (векторный анализатор цепей) ОБЗОР-804 предназначен для измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения (S -параметров) СВЧ-устройств в диапазоне частот от 0,3 до 8000 МГц и обладает динамическим диапазоном измерения модуля коэффициентов передачи более 145 дБ.

Технические характеристики ОБЗОР-804 [5]:

- диапазон частот: от 0,3 до 8000 МГц;
- измеряемые параметры: S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} ;
- динамический диапазон измерения модуля коэффициента передачи: более 145 дБ;
- минимальное время измерения на одной частоте: 100 мкс;
- диапазон регулирования выходной мощности: от -60 дБм до +10 дБм.

Векторный анализатор цепей (ИККПО) «Обзор-804» имеет два измерительных порта и представлен на рис.3. Поставляется со встроенным компьютером, сенсорным экраном и клавиатурой на передней панели.

Наличие переключателя тестирующего сигнала на измерительных портах прибора позволяет производить измерения всех параметров за одно подключение. Для измерений нелинейных свойств

четырёхполосников и расширения диапазона измерений в приборах используется регулировка выходной мощности глубиной не менее 70 дБ. Возможность удаленного управления приборами позволяет использовать их в качестве средств измерения.



Рис.3. ИККПО «Обзор-804»

Анализатор спектра «SIGLENT АКИП-4205» обладает характеристиками [6]:

- частотный диапазон: 9 кГц...2,1 ГГц;
- средний уровень собственных шумов: <-146 дБм/Гц;
- фазовый шум: от -115 дБн/Гц при отстр. На 10 МГц @ 1 ГГц;
- погрешность измерения амплитуды: $<0,7$ дБ;
- разрешение полосы пропускания: 10 Гц;
- встроенный предусилитель, маркерные измерения;
- программа опции: трекинг генератор (TG), расширенный набор измерений, рефлектометр, фильтры ЭМС и квазипиковый детектор;
- диагональ экрана: 25,6 см (разрешение 1024×600);
- интерфейсы USB, LAN.

Анализатор спектра «SIGLENT АКИП-4205» показан на рис.4.



Рис.4. Анализатор спектра «SIGLENT АКИП-4205»

5. Результаты измерений. Сравнение способов измерения ДН

В дальнейшем на рисунках сплошной линией показана ДН, измеренная первым способом, точками — диаграмма направленности, измеренная вторым способом. Для исследования были выбраны пять типов антенн: дипольная, полосковая, рупорная, параболическая антенна и полосковая антенная решетка. Все исследованные антенны были настроены на резонанс на частоте 2,44 ГГц. Данные антенны были разработаны для устройства сбора энергии СВЧ диапазона [7-9].

На рис.5а представлена стандартная дипольная антенна для передатчиков типа Wi-Fi. На рис.5б показана измеренная диаграмма направленности дипольной антенны устройства сбора энергии СВЧ диапазона. Эта антенна использовалась в качестве приемной антенны. Из диаграммы направленности видно, что максимум излучения не выражен, а сигнал находится на уровне -45 дБ.

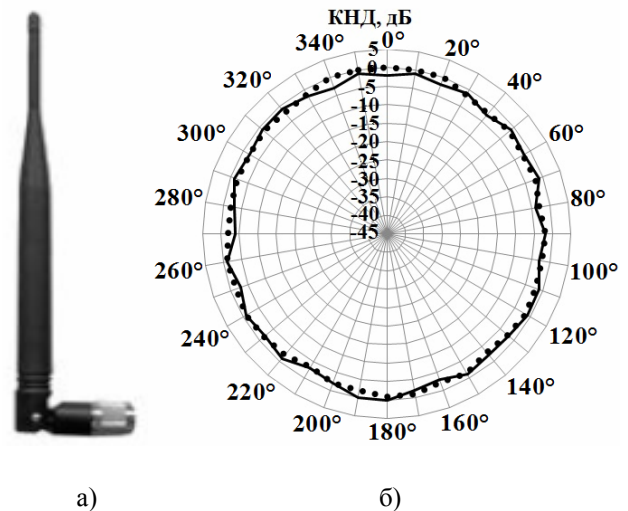
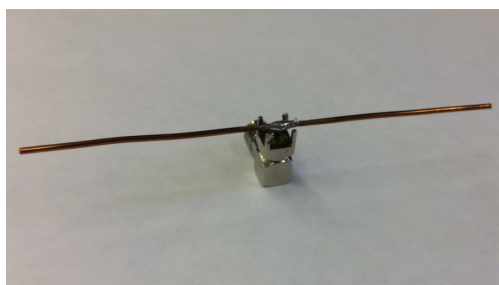


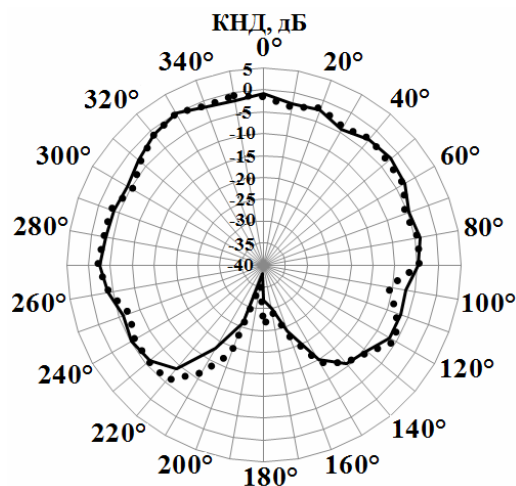
Рис.5. Дипольная приёмная антенна: а — фото, б — диаграмма направленности

На рис.6а представлена исследуемая дипольная передающая антенна для частоты 2,44 ГГц, которая имеет КСВ $< 1,3$. На рис.6б показана полученная диаграмма направленности для данной антенны устройства сбора энергии СВЧ диапазона. Из диаграммы направленности видно, что максимум излучения направлен перпендикулярно расположению диполя и равен приблизительно -46 дБ.

На рис.7а показана полосковая антенна, размерами $25,2 \times 18,7$ мм с длиной полоска от точки возбуждения до пластины 19,1 мм, для устройства сбора энергии СВЧ диапазона. Подложка выполнена на материале ФЛАН-10 ($\epsilon = 10$), размерами $30 \times 39 \times 1$ мм. Снизу подложки нанесена металлизация. На рис.7б показана диаграмма направленности полосковой антенны, максимум излучения которой равен около -53 дБ [8].



а)

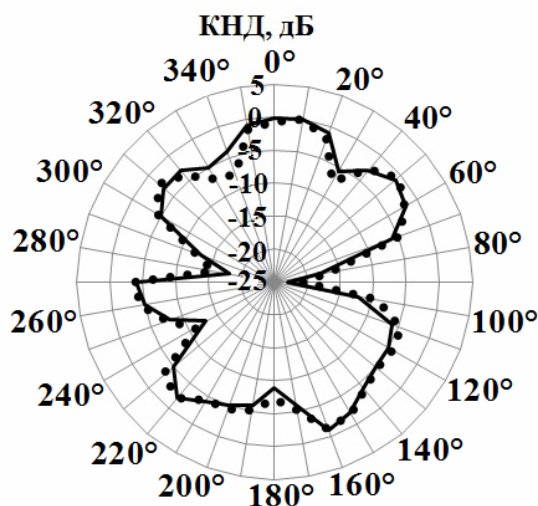


б)

Рис.6. Дипольная передающая антенна: а — фото, б — диаграмма направленности



а)



б)

Рис.7. Полосковая антенна: а — фото, б — диаграмма направленности полосковой антенны

На рис.8а,б представлена конструкция пирамидального рупора для устройства сбора энергии СВЧ диапазона. В качестве материала для боковин антенны использован гофрированный картон, равномерно обклеенный фольгой. В одном из оснований для боковин вырезано отверстие под SMA-разъем, расположенный на расстоянии четверти длины волны (в нашем случае 33 мм) от узкой стороны в одной из четырех трапеций рупора. Все четыре трапеции склеиваются таким образом, чтобы обеспечить непрерывную проводимость всей площади фольгированного покрытия. На рис.8б показана диаграмма направленности экспериментального образца пирамидальной рупорной антенны с пиком излучения энергии в точке около -44 дБ.

На рис.9а представлена параболическая антенна TL-ANT2424В 24 дБ 2,4 ГГц для устройства сбора энергии СВЧ диапазона. На рис.9б — измеренная диаграмма направленности параболической антенны. Из нее видно, что максимум излучения направлен

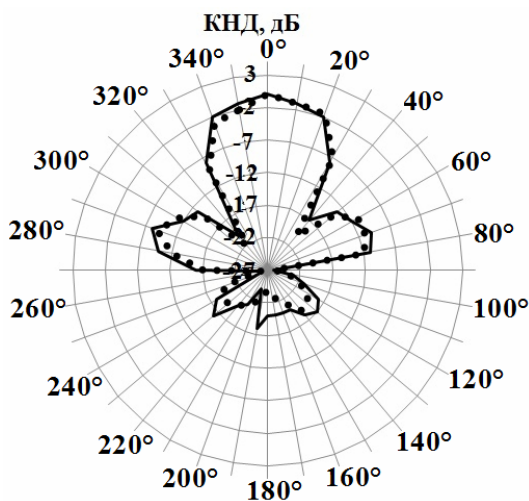
перпендикулярно поверхности антенны и равен -45 дБ [9].

На рис.10а представлена полосковая антенная решетка с воздушным диэлектриком [10] для устройства сбора энергии СВЧ диапазона. На рис.10б — измеренная диаграмма направленности полосковой антенной решеткой. Из нее видно, что максимум излучения направлен перпендикулярно поверхности антенны и равен -25 дБ.

Сравнивая диаграммы направленности, полученные двумя рассмотренными способами измерений, можно отметить, что первый способ более простой и пригодный для использования в небольших помещениях, т.к. не требует больших расстояний между приемной и передающей антеннами. Для проведения измерений требуется меньше времени, нужны СВЧ кабели достаточной для измерений длины. При использовании второго способа требуется большая площадь помещения либо полигон. Проведение измерений занимает больше времени, а



а)

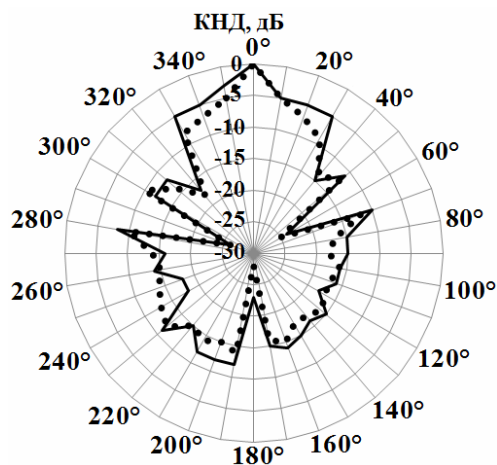


б)

Рис.8. Пирамидальная рупорная антенна: а — фото, б — диаграмма направленности



а)



б)

Рис.9. Параболическая антенна: а — фото, б — диаграмма направленности

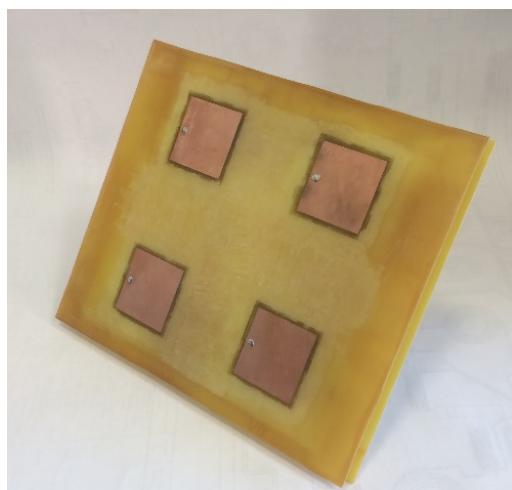
для измерительного стенда необходимы СВЧ кабели небольшой длины.

На рис.11 представлены диаграммы направленности исследуемой параболической антенны согласно её паспортных данных (а), и полученные с помощью двух различных способов измерений (б). Из рисунка видно, что диаграмма направленности имеет характерную форму, один основной лепесток и несколько боковых. Полученные разными способами диаграммы направленности очень схожи. Диаграмма направленности, полученная с помощью первого способа, является более плавной, без резких изменений угловых значений. При сравнении диаграмм направленностей с паспорта антенны и измеренных, более близкой характеристикой обладает диаграмма направленности антенны для устройств сбора энергии СВЧ диапазона, полученная вторым способом. В то же время, т.к. нас интересует только основной лепесток и его направленность в случае антенн для устройств сбора энергии, то может быть применён и первый способ измерений без существенной потери

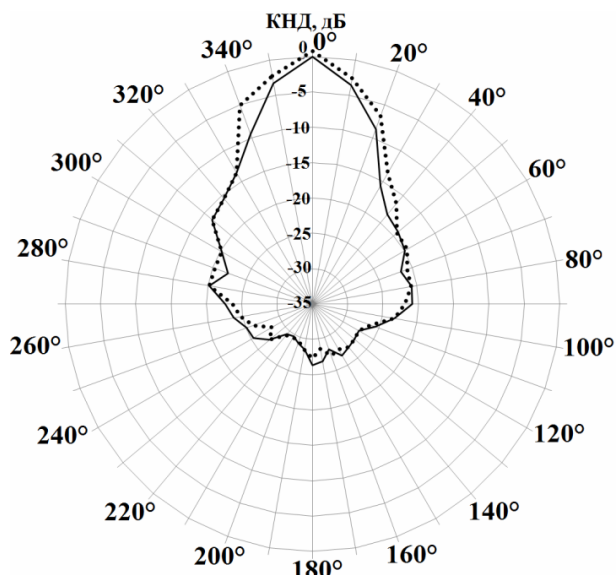
качества. Лучшая точность измерений достигается вторым способом измерений. Расхождения в характеристиках двух способов измерений не превосходят пяти процентов в зоне основного лепестка.

Заключение

В статье рассмотрены два способа измерения диаграмм направленности антенн устройств сбора энергии. Разработаны и реализованы макеты для измерения ДН антенн, описаны приборы, использованные в этих макетах. Для измерения были применены способы измерений диаграмм направленностей рекомендованных изготовителем устройств, использованных в данных макетах. Для исследования были выбраны пять типов антенн: дипольная, полосковая, рупорная, параболическая антенна и полосковая антенная решетка. Все исследованные антенны были настроены на резонанс на частоте 2,44 ГГц. Приведено графическое сравнение двух способов измерений для различных типов антенн, в ходе которого было выявлено, что могут быть применены оба способа. В то же время изме-

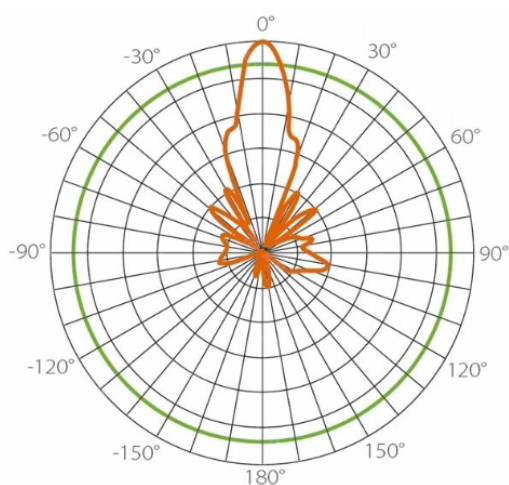


а)

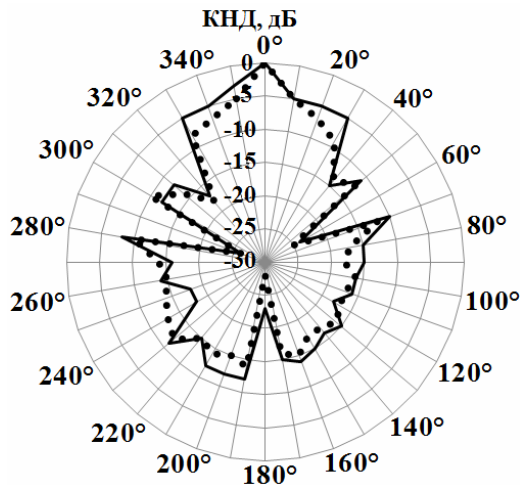


б)

Рис.10. Полосковая антенная решетка: а — фото, б — диаграмма направленности



а)



б)

Рис.11. Параболическая антенна: а — диаграмма направленности, приведённая в паспорте изделия, б — диаграммы направленности измеренные двумя способами

рения, проведённые с помощью спектроанализатора, дают более качественные результаты ДН.

Статья подготовлена по итогам исследования, проведенного при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания, проект №11.7069.2017/8,9.

1. Фрадин А.В., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М.: Связь, 1972. 150 с.
2. Иванов А.А. Применение сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием в системах ближней локализации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2010. №78. С.88-102.
3. Каталог специализированных измерительных решений партнеров. Keysight Technologies [Электронный ресурс]. URL: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-3343RURU.pdf?id=3006924>.
4. TP-Link [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tp-link.com/ru/products/details/TL-ANT2408CL.html>.

5. Кузьмин Е.В., Платонов С.В., Бичурин М.И. и др. Исследование устройства сбора радиочастотной энергии // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2017. №6 (104). С.63-66.
6. Обзор-804/1. Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.priborelektro.ru/product/price/izmeriteli-ksvn-24/3468.html>
7. АКПИ-4205/1 — анализатор спектра цифровой [Эл. ресурс]. URL: http://www.electronpribor.ru/catalog/777/akip-4205_1.htm.
8. Кузьмин Е.В., Платонов С.В., Хаванова М.А., Петров Р.В. Система сбора энергии СВЧ диапазона // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2017. №7 (105). С.52-58.
9. Кузьмин Е.В., Хаванова М.А., Платонов С.В. Система сбора радиочастотной энергии // Мат. XXIV Всерос. научн. конф. студентов-физиков и молодых ученых. 31 марта — 07 апреля 2018 г. Томск. С.422.
10. Кузьмин Е.В., Платонов С.В., Юхно И.М., Хаванова М.А. Моделирование антенной решетки для устройств сбора энергии // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2018. №1(107). С.29-35.

References

1. Fradin A.V., Ryzhkov E.V. Izmerenie parametrov antenno-fidernykh ustroystv [Measuring the parameters of antenna-feeder devices]. Moscow, "Sviaz" Publ., 1972.
2. Ivanov A.A. Primenenie signalov s ortogonal'nym chastotnym mul'tipleksirovaniem v sistemakh blizhnei lokatsii [Application of signals with orthogonal frequency-division multiplexing in systems of short-range location]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroenie – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering, 2010, no. 78, pp. 88-102.
3. Katalog spetsializirovannykh izmeritel'nykh reshenii partnerov. [Guidelines on technical measuring solutions of the partners]. Keysight Technologies. Available at: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-3343RURU.pdf?id=3006924>.
4. TP-Link. Available at: <https://www.tp-link.com/ru/products/details/TL-ANT2408CL.html>.
5. Kuz'min E.V., Platonov S.V., Nikitin A.O., Khavanova M.A., Petrov R.V. Issledovanie ustroystva sbora radiochastotnoi energii [The study of the radiofrequency energy harvesting device]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2017, no.6(104), p.63-66.
6. Obzor-804/1. Izmeritel' kompleksnykh koeffitsientov peredachi i otrazheniia [Review-804/1. Instrument for measuring complex transmission and reflection coefficients]. Available at: <https://www.priborelektro.ru/product/price/izmeriteli-ksvn-24/3468.html>.
7. АКПП-4205/1 — анализатор спектра tsifrovoy [Spectrum digital analyzer АКПП-4205/1]. Available at: http://www.electronpribor.ru/catalog/777/akip-4205_1.htm.
8. Kuz'min E.V., Platonov S.V., Khavanova M.A., Petrov R.V. Sistema sbora energii SVCh diapazona [Microwave energy harvesting system]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhn. nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2017, no.7(105), p.52-58.
9. Kuz'min E.V., Khavanova M.A., Platonov S.V. Sistema sbora radiochastotnoi energii [The system of radio-frequency energy harvesting]. Materialy XXIV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov-fizikov i molodykh uchenykh [Proc. 24th All-Russia Sci. Conf. of Physics Students and Young Scientists]. 2018, Tomsk, Russia, p. 422.
10. Kuz'min E.V., Platonov S.V., Iukhno I.M., Khavanova M.A. Modelirovanie antennoi reshetki dlia ustroystv sbora energii [Modeling of an antenna array for energy harvesting devices]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2018, no. 1(107), pp. 29-35.