

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.5>

УДК 621.314.6, 621.396.67

## ПЛАНАРНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ СО СПИРАЛЕВИДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ РЕКТЕННЫ

К. Т. Ч. Ву, Г. М. Казарян, В. Л. Саввин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Москва, 119991, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2021 г.

**Аннотация.** Использование ректенн является перспективным методом преобразования в электрический ток излучения терагерцового и более высокочастотных диапазонов. При использовании в составе терагерцовой ректенны одиночной антенны получаемый от неё сигнал в практических условиях может быть слишком мал для нормальной работы выпрямителя, особенно если ректенна используется в качестве элемента питания. Поэтому задача увеличения напряжения на выпрямителе ректенны обладает актуальностью. Эту задачу можно решать применением антенных решёток. С увеличением рабочей частоты становится существенной конечная проводимость металлов, что делает осмысленным рассмотрение антенных решёток с минимальным расстоянием между отдельными антеннами. Такое расположение приводит к появлению между ними сильной взаимной связи, что делает аналитическое исследование такой структуры очень сложным. В работе рассматривается вариант построения планарной антенной решётки с близко расположенными спиралевидными элементами, и её характеристики определяются с помощью компьютерного моделирования. Максимальная абсолютная величина напряжённости электрического поля была рассчитана в выходном зазоре антенны для каждой решётки в случае нормального падения циркулярно поляризованной плоской электромагнитной волны. Приведены полученные значения рабочих частот и ширины полос рабочих частот для построенных решёток, а также значение коэффициента отражения в центре рабочей полосы частот. Параметры модели оптимизируются с целью

сохранения значения рабочей частоты при увеличении числа антенных элементов. Показывается возможность увеличения напряжения на выходе решётки пропорционально количеству антенных элементов.

**Ключевые слова:** электромагнитные волны, терагерцовый диапазон, ректенны, сильная связь, численное моделирование.

**Abstract.** Implementation of rectennas is a prospective method for electromagnetic radiation to DC conversion in terahertz band and bands of higher frequencies. A signal obtained from a single antenna in practical conditions may not be enough to drive rectenna's rectifier. That problem is most likely to occur if the rectenna is used as a power source. Therefore the problem of increasing voltage over rectenna's rectifier is important. One can try to address this problem with the use of antenna arrays. As the operating frequency increases the finite conductance of metals becomes a significant limiting factor. This makes considering minimally spaced arrays a worthwhile task. Such spacing results in tight coupling between elements of the array. As a consequence an analytical study of such structure is very hard. The paper examines the option of planar antenna array's design with closely spaced helical elements. The array's characteristics are determined using computer simulation. The maximum absolute value of the electric field strength was calculated at the antenna output gap for each array in the case of a normal incidence of a circularly polarized plane electromagnetic wave. The obtained values of the operating frequencies and the width of the operating frequency bands for the designed arrays are presented, as well as the values of the reflection coefficient in the center of the operating frequency band. The array parameters are optimized to maintain the operating frequency while increasing the number of antenna elements. The possibility of increasing the voltage at the array's output in proportion to the number of antenna elements is demonstrated.

**Key words:** electromagnetic waves, terahertz radiation, rectenna, tight couplig, numerical model.

## **Введение**

Терагерцовый диапазон электромагнитного излучения - важный объект

современных исследований, занимающий положение между относительно хорошо изученными микроволновым и инфракрасным диапазонами. Излучение этого диапазона может применяться в медицине (диагностика, томография), анализа химических соединений (спектроскопия), в промышленности для неразрушающего контроля [1].

Для приема излучения терагерцового диапазона используются различные детекторы, как селективные по частоте, так и неселективные (болометры, пироприемники, ячейки Голея) [2-3]. Также ведутся поиски новых способов. Одним из активно развивающихся направлений в этих поисках является использование ректенн.

Ректенна — это резонансное устройство преобразования электромагнитного излучения в электрический ток. Оно состоит из антенны и выпрямляющего элемента [4]. Такое устройство также может включать в себя цепи согласования, если это необходимо. Его отличительным качеством является то, что настройка рабочей частоты производится соответствующим выбором параметров антенны, что является хорошо изученной задачей.

Экспериментальные работы показали, что в микроволновом диапазоне ректенны могут достигнуть эффективности преобразования, близкой к 90% [4, 5]. Успехи в этой области стали мотивацией для формулирования ряда проектов по беспроводной передаче энергии с использованием ректенн для решения задач энергетики [6–10]. Терагерцовые ректенны могут найти применение также и в области медицины – для энергопитания электронных имплантов и кардиостимуляторов. В наиболее оптимистичных прогнозах ректеннам предсказывали возможное применение и в оптическом диапазоне [11, 12].

При повышении рабочей частоты ректенны быстрее всего встает проблема эффективности выпрямляющего элемента, т. к. полупроводниковые диоды и диоды с барьером Шоттки ограничены по рабочей частоте [12, 13].

Для преодоления этой проблемы предлагается использование других типов диодов, например, диодов типа металл-диэлектрик-металл, геометрических

диодов, диодов на углеродных нанотрубках [12, 14, 15]. Однако в современных экспериментальных работах они пока демонстрируют невысокую эффективность преобразования [12].

Одним из возможных путей повышения эффективности ректенн терагерцового диапазона является увеличение напряжения входного сигнала. В работе [16] отмечается, что теоретически наибольшая эффективность ректенны достижима в так называемом классическом режиме работы, для которого необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$V_D \gg \frac{\hbar\omega}{q}, \quad (1)$$

где  $V_D$  – амплитуда переменного напряжения на диоде,  $\hbar\omega$  – энергия кванта излучения, а  $q$  – величина элементарного электрического заряда. Для высоких частот напряжение, соответствующее классическому режиму работы, (порядка 4 мВ для 1 ТГц) оказывается довольно высоким, если учесть малые размеры подходящих для этого диапазона антенн. Это означает, что работа высокочастотной ректенны в классическом режиме может осуществляться при очень больших интенсивностях падающего излучения, что не всегда практически осуществимо.

Увеличения напряжения можно также попытаться добиться, например, путём подачи на один диод сигналов, полученные от нескольких антенн, правильно согласованных по фазе, то есть путём применения антенной решётки. Это согласование, обычно, осуществляется за счет взаимного расположения антенных элементов и подбором длины и формы соединительных дорожек.

Такое увеличение в зависимости от условий использования ректенны может быть необходимо для нормальной работы устройства в силу наличия у выпрямляющих элементов ненулевого напряжения отсечки [12, 17].

При дальнейшем увеличении частоты (в терагерцовый диапазон) начинает сказываться конечная проводимость металлов, которая проявляется в виде потерь. Для того чтобы структура подходила для как можно более высоких

частот, длина соединительных дорожек должна быть как можно меньшей. Это требование заставляет располагать антенные элементы очень близко друг другу, что усложняет задачу, т. к. на таких расстояниях они испытывают существенное взаимное влияние.

## 1. Описание метода

В качестве базового антенного элемента была выбрана антенна, рассмотренная в работах [18-20]. Она представляет собой квадратную спираль, расположенную на диэлектрической подложке с металлическим покрытием (рис 1, а). Антенны в виде квадратных спиралей относятся к классу частотно-независимых, но расположение ее на металлизированной подложке создает структуру, подобную резонатору. Данная антенна обладает узкими глубокими резонансами на нескольких частотах. На низших модах диаграмма направленности антенны можно считать круговой в широком диапазоне углов места. В качестве характеристик модельного металла были взяты параметры золота, а для характеристик подложки - тефлона.

Антенная решетка составлялась последовательно. Вначале были получены характеристики одного антенного элемента, чьи параметры были подобраны таким образом, чтобы рабочая частота равнялась 20.54 ТГц. Также было рассчитано распределение электрического поля внутри расчётной области.

Число элементов удваивалось на каждом шаге путём отражения через плоскость, перпендикулярную поверхности подложки. Базовые элементы соединялись на продолжении плеч антенн. На последующих шагах металлическими дорожками соединялись выходы антенн. На каждом этапе производилась оптимизация длин только что добавленных соединительных дорожек с целью получения минимума на частоте 20.54 ТГц. Для решётки из 8 элементов также пришлось дополнительно варьировать длину дорожки, добавленной на предыдущем шаге, и перемещать выход антенны.

Распределения электрических полей получались путём численного решения уравнений Максвелла методом конечных интегралов [21]. На основе полученных результатов затем рассчитывались характеристики полученных

структур: диаграммы направленности, коэффициенты отражения  $S_{11}$ , импедансы и напряжённость электрического поля в зазоре. Оптимизация по коэффициенту отражения производилась методом доверительной области [22].

## 2. Результаты

Для исходного элемента была произведена настройка на частоту 20.54 ТГц путём изменения масштаба и получены её характеристики (рис. 2 – рис. 4). В этом виде она, как и в исходном, имеет несколько узких рабочих полос частот. Для её диаграммы направленности на частоте 20.54 ТГц действительно характерна высокая равномерность по азимутальному углу при угле места меньше 30 градусов.

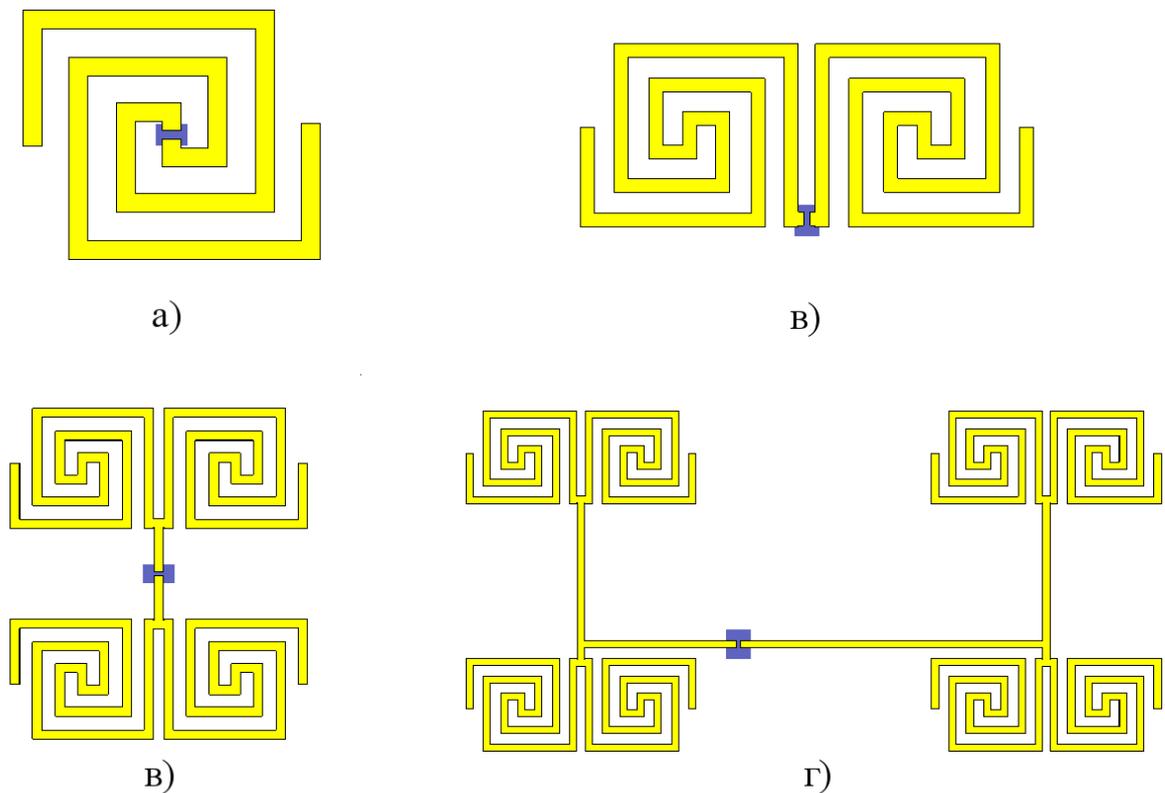


Рис.1. Внешний вид исследуемых антенных решёток, состоящих из 1 элемента (а), 2 элементов (б), 4 элементов (в) и 8 элементов (г). Выходы решёток отмечены синими фоновыми прямоугольниками.

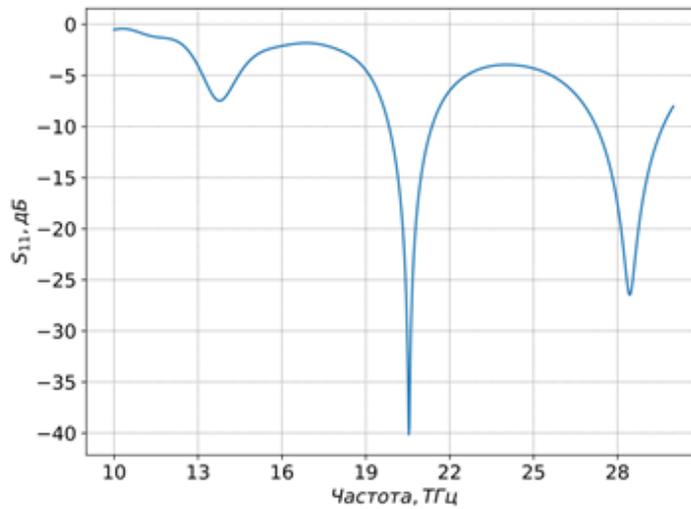


Рис. 2. Коэффициент отражения  $S_{11}$  одиночного антенного элемента.

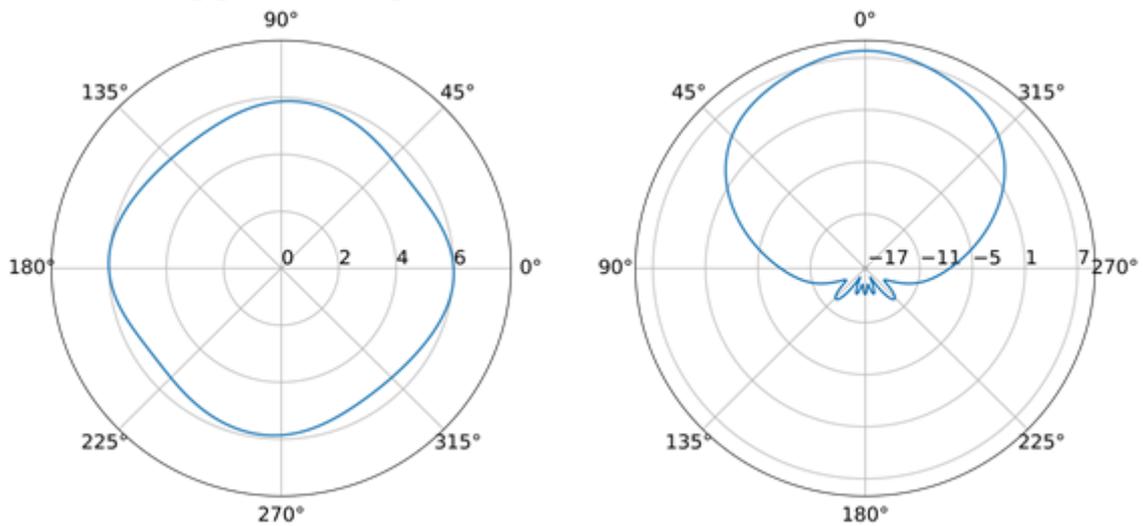


Рис. 3. Диаграммы направленности одиночного элемента на частоте 20.54 ТГц: при постоянном угле места  $30^\circ$  (слева); при постоянном азимутальном угле  $0^\circ$  (справа).

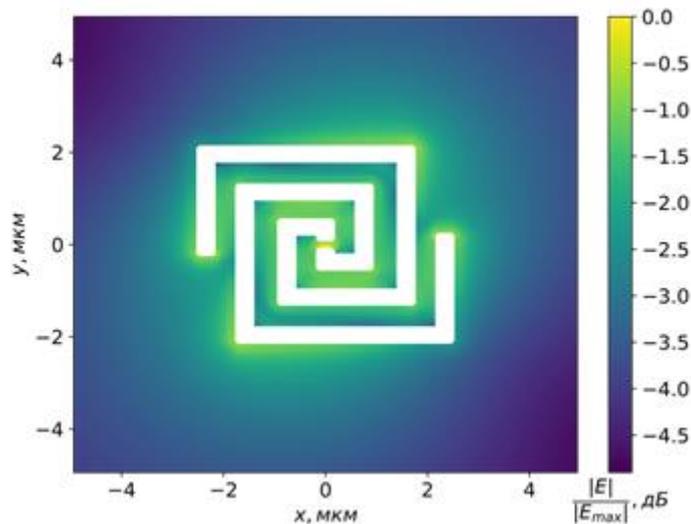


Рис. 4. Распределение абсолютной величины напряжённости электрического поля вблизи одиночного антенного элемента при его возбуждении на частоте 20.54 ТГц.

Антенная решётка из двух элементов демонстрирует похожие характеристики (рис. 5,6), хотя частота, на которую производилась настройка, и не попадает на низшую моду. Диаграмма направленности для этой структуры имеет выделенное направление, очевидно следующее из расположения выхода антенны на стороне решётки, а не в её центре.

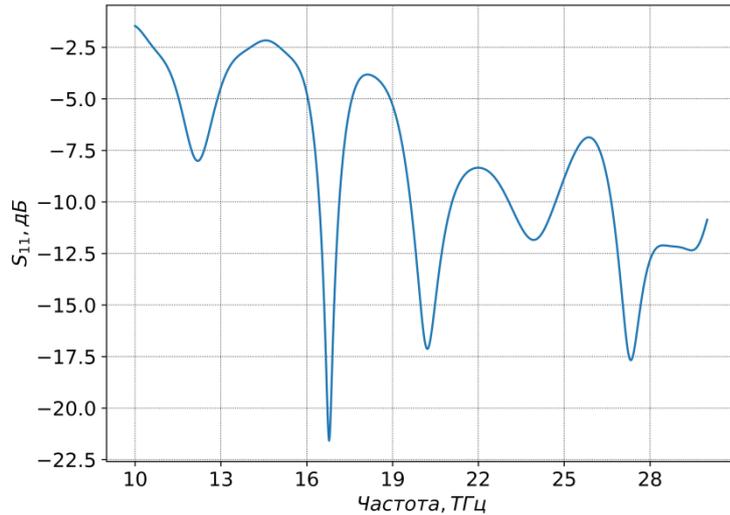


Рис. 5. Коэффициент отражения  $S_{11}$  решётки, состоящей из 2 антенных элементов.

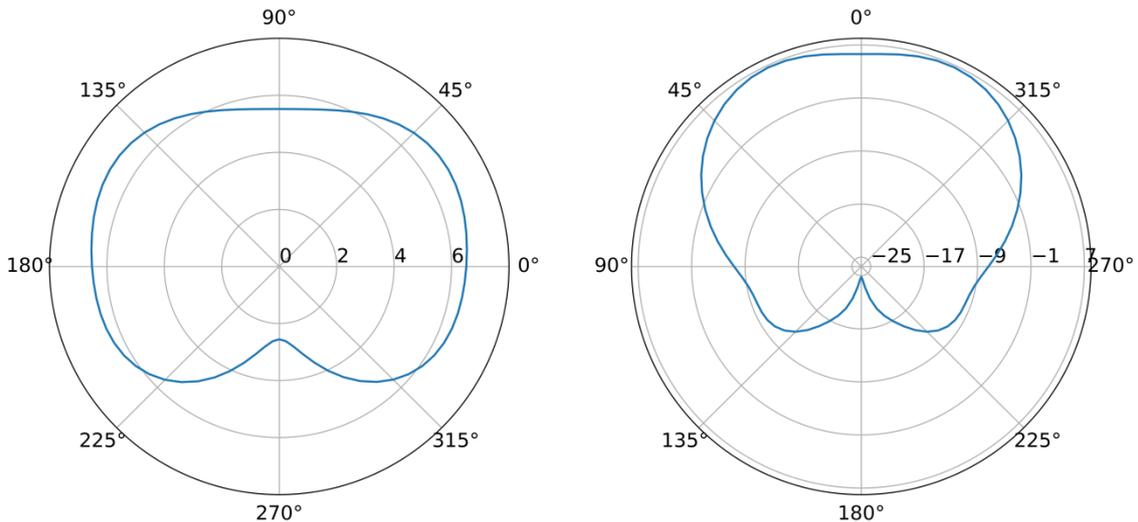


Рис. 6. Диаграммы направленности решётки, состоящей из 2 антенных элементов, на частоте 20.54 ТГц: при постоянном угле места  $30^\circ$  (слева); при постоянном азимутальном угле  $0^\circ$  (справа).

Резонанс решётки из четырёх элементов (рис. 7) гораздо более выражен, чем одиночного элемента и, тем более, решётки, состоящей из двух антенн. Её диаграмма направленности имеет вытянутую форму (рис. 8), но перепад между максимальным и минимальным значениями составляет всего около 1 дБ, поэтому её можно приближённо считать круговой.

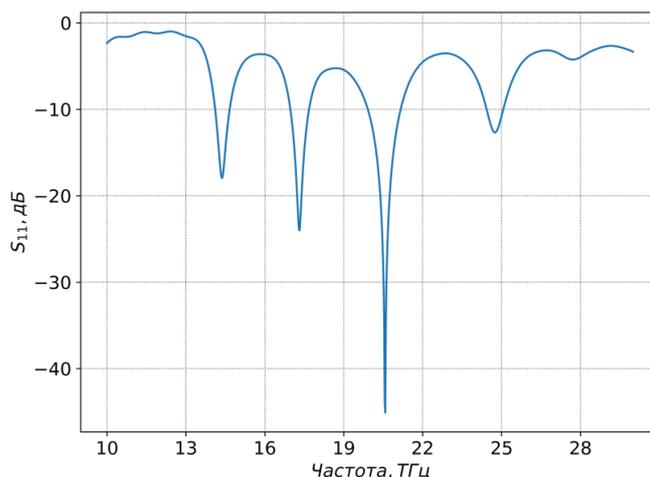


Рис. 7. Коэффициент отражения  $S_{11}$  решётки, состоящей из 4 антенных элементов.

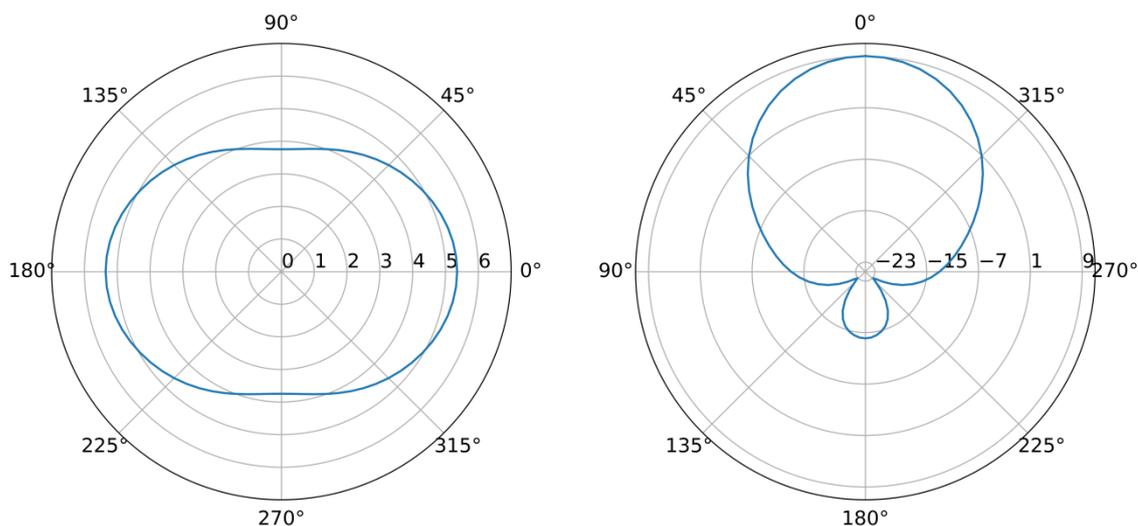


Рис. 8. Диаграммы направленности решётки, состоящей из 4 антенных элементов, на частоте 20.54 ТГц: при постоянном угле места  $30^\circ$  (слева); при постоянном азимутальном угле  $0^\circ$  (справа).

При соединении 8 антенных элементов структура решётки после оптимизации получается значительно разнесённой в пространстве, а диаграмма направленности неконтролируемо искажается (рис.9,10).

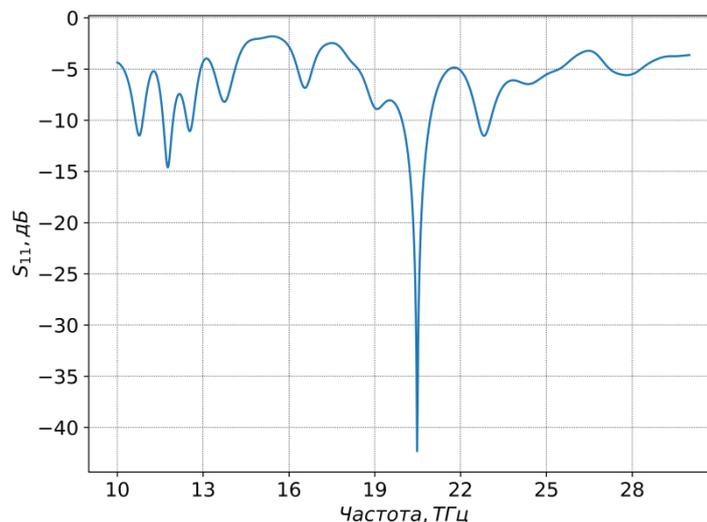


Рис. 9. Коэффициент отражения  $S_{11}$  решётки, состоящей из 8 антенных элементов.

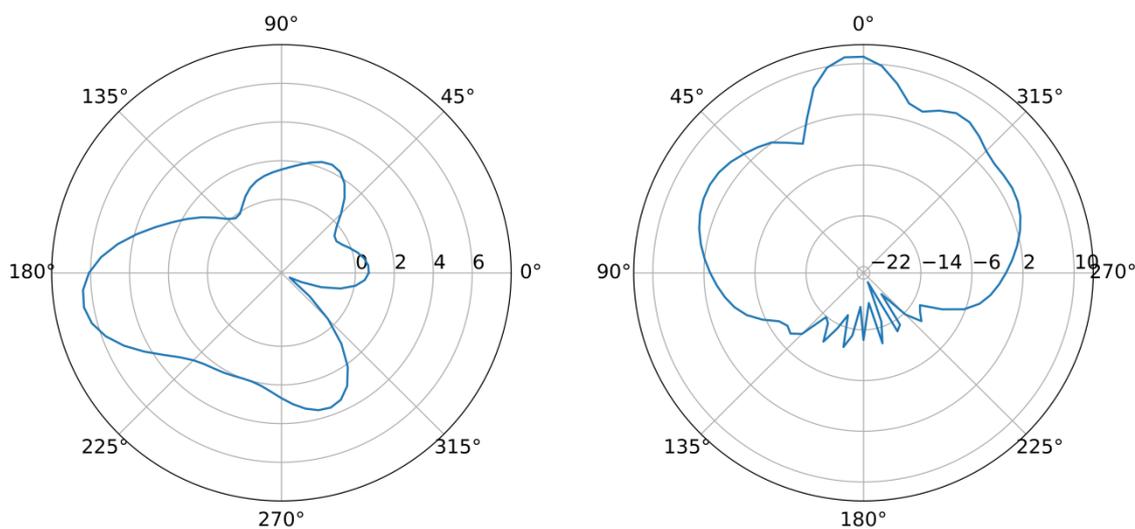


Рис. 10. Диаграммы направленности решётки, состоящей из 8 антенных элементов, на частоте 20.54 ТГц: при постоянном угле места  $30^\circ$  (слева); при постоянном азимутальном угле  $0^\circ$  (справа).

Для каждой решётки также была рассчитана максимальная абсолютная величина продольной компоненты напряжённости электрического поля в зазоре выхода антенны при нормальном падении циркулярно поляризованной плоской

электромагнитной волны. Под продольной компонентой имеется в виду компонента, параллельная дорожке, идущей к выходу данной антенной решётки. Полученные результаты приведены в табл. 1. Из этих результатов можно заключить, что можно добиться увеличения значения напряжённости, приблизительно пропорционального количеству используемых антенных элементов. При этом величина импеданса антенны принимает значения, которые также указаны в таблице. Эти значения необходимо учитывать при согласовании антенной решётки с остальной частью устройства.

Таблица 1

Число элементов	Напряжённость, В/м	Re(Z), Ом	Im(Z), Ом
1	26.57	50.78	– 0.62
2	55.09	193.48	– 78.67
4	107.78	94.19	– 3.10
8	158.24	504.41	– 40.84

Таблица 2

Число элементов	Рабочая частота, МГц	Ширина полосы, кГц	S <sub>11</sub> , дБ
1	20.54	48	– 40.15
2	20.22	640	– 17.13
4	20.58	31	– 45.12
8	20.48	22	– 42.31

В табл. 2 приведены полученные значения рабочих частот и ширины рабочих полос частот для построенных решёток, а также значение коэффициента отражения S<sub>11</sub> на рабочей частоте. Рабочей считалась частота, для которой минимум коэффициента S<sub>11</sub> ближе всего находился к значению 20.54 ТГц. Рабочая полоса частот определялась по уровню 3 дБ от минимума коэффициента отражения, соответствующего рабочей частоте. Для полученных решёток характерно уменьшение ширины рабочей полосы с увеличением числа элементов, кроме двухэлементной решётки. Для двухэлементной решётки

резонанс на рабочей частоте также не является самым глубоким в рассматриваемой частотной области. Такое исключение, скорее всего, объясняется расположением выхода антенны на её внешней стороне, в отличие от остальных решёток, у которых выход расположен ближе к геометрическому центру.

### **Заключение**

Показано, что за счёт выбора подходящих длин соединительных дорожек можно добиться увеличения выходного напряжения антенны, приблизительно пропорционального количеству используемых антенных элементов. С увеличением количества элементов рабочая полоса частот полученных антенных решёток ожидаемо сужается, кроме как для решётки, состоящей из двух элементов. Узкая рабочая полоса частот может оказаться полезной для применения в детекторах, но для беспроводной передачи энергии, вероятно, более практично применение антенн с более широкой рабочей полосой. Для решения подобных задач также имеет смысл подавать на выпрямляющий элемент как можно большее напряжение, чтобы его работа осуществлялась как можно ближе к классическому режиму. Нахождение более удачных вариантов антенных решёток требует дальнейшего исследования.

Необходимо отметить, что для практических задач с многоэлементными решетками на более высоких частотах приведённый метод может стать весьма трудоемким из-за быстро растущего количества параметров. Альтернативно можно соединять элементы решётки вне плоскости самих элементов, например, под металлическим отражателем. Такой метод может позволить располагать элементы более свободно, но также может привести к увеличению общей длины металлических дорожек, что делает его достойным объектом для будущих исследований.

### **Финансирование**

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

## Литература

1. Sun Q., He Y., Liu K., Fan S., Parrott E.P.J., Pickwell-MacPherson E. Recent advances in terahertz technology for biomedical applications. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. 2017. Vol.7 No.3. P.345–355. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5537133/>.  
<https://doi.org/10.21037/qims.2017.06.02>
2. Гибин И.С., Котляр П.Е. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2018. Т.6. №2. С.117-129.
3. Wang Y., Zhao Z., Chen Z., Wang L. Characterization of Golay detector for the absolute power measurement of terahertz radiation. *37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 23-28 September 2012. P.1-2. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2012.6380076>
4. Brown W.C. The History of Power Transmission by Radio Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1984. Vol.32. No.9. P.1230-1242. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>
5. McSpadden J.O., Fan L., Kai C. Design and Experiments of a High-Conversion-Efficiency 5.8-GHz Rectenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1998. Vol.46. No.12. P.2053-2060. <https://doi.org/10.1109/22.739282>
6. Glaser P.E. Power from the Sun. *Science*. 1968. No.162. P.857-886. <https://10.1126/science.162.3856.857>
7. Matsumoto H. Microwave Power Transmission from Space and Related Nonlinear Plasma Effects. *The Radio Science Bulletin*. 1995. No.273. P.11-35. <https://doi.org/10.1109/MMW.2002.1145674>
8. Schlesak J.J., Alden A., Ohno T. A microwave powered high altitude platform. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 25-27 May 1988. P.283-286. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.1988.22031>
9. Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan. *IEEE Microwave Magazine*. 2002. Vol.3. No.4. P.36-45. <https://doi.org/10.1109/MMW.2002.1145674>

10. Celeste A., Jeanty P., Pignolet G. Case study in Reunion Island. *Acta Astronautica*. 2004. Vol.54. P.253-258.1. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(02\)00302-8](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(02)00302-8)
11. Bailey R.L. A proposed new concept for a solar-energy converter. *J. Eng. Power*. 1972. Vol.94. No.2. P.73–77. <https://doi.org/10.1115/1.3445660>
12. Moddel G., Grover S. *Rectenna Solar Cells*. 2013. New York, Springer. 399 p.
13. Kazemi H., Shinohara, K., Nagy G. Ha W., Lail B., Grossman E., Zummo G., Folks W., Alda J., Boreman G. First THz and IR characterization of nanometer-scaled antenna-coupled InGaAs/InP Schottky-diode detectors for room temperature infrared imaging. *Defense and Security Symposium*. 9-13 April 2007. Vol.6542. <https://doi.org/10.1117/12.718887>
14. Zhu Z., Joshi S., Moddel G. High Performance Room Temperature Rectenna. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014. No.6. Vol.20. P.70-78. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2318276>
15. Fedorov G., Gayduchenko I., Titova N., Gazaliev A., Moskotin M., Kaurova N., Voronov B., Goltsman G. Carbon Nanotube Based Schottky Diodes as Uncooled Terahertz Radiation Detectors. *Physica Status Solidi B – Basic Solid State Physics*. 2017. Vol.255. No.1. P.1700227. <https://doi.org/10.1002/pssb.201700227>
16. Joshi S., Moddel G. Optical rectenna operation: where Maxwell meets Einstein. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016. Vol.49. No.26. P.265602. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/26/265602>
17. Donchev E., Pang, J., Gammon P., Centeno A., Xie F., Petrov P., Breeze J.D., Ryan M.P., Riley D.J., Alford N. The rectenna device: From theory to practice (a review). *MRS Energy & Sustainability*. 2014. Vol.1. E1. <https://doi.org/10.1557/mre.2014.6>
18. Бу К.Т., Егоров Р.В., Саввин В.Л., Михеев Д.А. Изучение электродинамических характеристик спиралеобразной микроволновой ректенны. *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. 2014. Т.144301. №4. С.144301–1–144301–3.

19. Ву К.Т., Егоров Р.В., Саввин В.Л., Михеев Д.А. Модель решётки спиралеобразных ректенн, обладающих круговой диаграммой направленности. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2015. Т.79. №12. С.1687–1690.
20. Ву К.Т., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Процессы при преобразовании терагерцового излучения в электрический ток. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019. Т.83. №1. С.46–49. <https://doi.org/10.1134/S0367676519010265>
21. Gedney S.D. Introduction to the Finite-Difference Time Domain Method for Electromagnetics. *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*. 2011. Vol.6. No.1. P.1-250. <https://doi.org/10.2200/S00316ED1V01Y201012CEM027>
22. Yuan Y. Recent advances in trust region algorithms. *Mathematical Programming*. 2015. Vol.151. P.249-281. <https://doi.org/10.1007/s10107-015-0893-2>

**Для цитирования:**

Ву К.Т.Ч, Казарян Г.М., Саввин В.Л. Планарные антенные решетки со спиралевидными элементами для терагерцовой ректенны. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.5>