

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.3>

УДК 621.314.6, 621.396.67

ТЕРАГЕРЦОВАЯ РЕКТЕННАЯ РЕШЁТКА С ОБЪЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕ ПЛОСКОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕНН

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

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

Статья поступила в редакцию 11 мая 2021 г.

Аннотация. Терагерцовый диапазон электромагнитного излучения имеет множество потенциальных практических применений, однако он до сих пор недостаточно хорошо изучен в силу сложности создания подходящих для данного диапазона генераторов и детекторов. В современных исследованиях в качестве возможного эффективного терагерцового детектора часто предлагается использовать ректенну (выпрямляющую антенну). Применение ректенн в терагерцовом диапазоне сопряжено со своими трудностями. В частности, для эффективной работы ректенны требуется, чтобы на её выпрямляющий элемент подавалось высокое значение напряжения. Этого можно пытаться достичь при помощи использования в составе ректенны антенной решётки. Антенны в такой решётке при этом не могут располагаться далеко друг от друга, так как в терагерцовом диапазоне уже начинают проявляться эффекты, связанные с конечной проводимостью металлов. Одной из наиболее широко изучаемых видов терагерцовых антенн являются планарные антенны, расположенные на диэлектрической подложке с металлическим отражателем под этой подложкой. Соединение антенн в решётке в плоскости расположения самой решётки минимизирует длину металлических соединительных дорожек, но при большом количестве используемых антенн становится сложным для расчёта. Расположение соединительных дорожек вне плоскости антенны, например, за металлическим отражателем, позволяет исключить их влияние на характеристики

рассматриваемой решётки. Более того, как показывается в данной работе, этот подход также позволяет добавлять элементы в решётку единообразно вне зависимости от их количества. При этом также можно добиться предсказуемого поведения выходного сопротивления решётки.

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

Abstract. The terahertz frequency band of electromagnetic radiation has many potential practical uses. However it still remains to be underdeveloped because of the difficulties with its generation and detection. Many modern studies suggest using rectennas (rectifying antennas) as a potential efficient terahertz detector. The application of rectennas in the terahertz band is challenging in its own way. In particular an efficient operation of a rectenna device requires applying high values of voltage to the rectifying element. This can be attempted by employing an antenna array. However the terahertz band is the band in which the effects of finite conductance of metals start becoming noticeable. This means that antennas in the array cannot be spaced too far away from each other. For a terahertz antenna one of the most popular kinds of structure is a planar antenna, placed on top of a dielectric layer with a metal reflector beneath it. Placing connecting wires in the same plane as the antenna array can minimize the length of the said wires. But it also leads to the structure becoming too complex to compute as the number of the antennas in the array increase. Placing the connections in a different plane, e.g. behind the reflector, can eliminate the influence of these connections on the antenna array characteristics. This study shows that this method also allows adding antennas to the array in a unified manner regardless of their amount. It is worth noting that using this way it is also possible to achieve a predictable behavior of the output impedance of the antenna array.

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

Введение

Терагерцовый диапазон электромагнитного излучения определяется по-разному в различных источниках. В наиболее широком определении он включает в себя частоты от 0.1 ТГц до 30 ТГц [1, 2]. Это излучение обладает рядом свойств, которые могут найти широкое применение, например, для задач спектроскопии [3], в медицине [4], в промышленности для обнаружения дефектов материалов [5], для беспроводной передачи и сбора энергии [6].

Диапазон терагерцового излучения разделяет частотные области с устоявшимися и хорошо разработанными методами генерации и детектирования, но эти в настоящее время подходы недостаточно хорошо работают в самом терагерцовом диапазоне [7]. Много усилий в области изучения терагерцового диапазона прилагается к разработке новых видов детекторов. Одним из перспективных видов детекторов является устройство, называемое ректенной (выпрямляющей антенной) [8]. Их эффективность была продемонстрирована в микроволновом диапазоне [9, 10], а современное развитие нанотехнологий мотивировало изучение их применения в терагерцовом диапазоне частот.

В настоящее время КПД преобразования терагерцовых ректенн в экспериментальных работах остаётся довольно низким, в поисках способа его увеличения ведутся активные исследования. Одним из возможных путей повышения эффективности ректенн терагерцового диапазона является увеличение напряжения входного сигнала. Теоретически наибольшая эффективность ректенны достижима в так называемом классическом режиме работы [8], 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, может оказаться слишком высоким и недостижимым на практике. Тем не менее, такое

увеличение в зависимости от условий использования ректенны может также быть необходимо для самой возможности работы устройства в силу наличия у выпрямляющих элементов ненулевого напряжения отсечки [8, 11].

Увеличения напряжения можно также попытаться добиться путём применения антенной решётки, когда на один МДМ-диод подаются сигналы, полученные от нескольких антенных элементов, если правильно согласовать их по фазе. Это согласование, обычно, осуществляется за счет взаимного расположения антенных элементов и подбором длины и формы соединительных элементов [12]. Этот подход встречает свои трудности. Например, на высоких частотах начинает сказываться конечная проводимость металлов, которая проявляется в виде потерь, из-за чего возникает потребность располагать элементы решётки как можно ближе друг к другу. Такое расположение приводит к появлению сильного взаимного влияния между элементами, которое необходимо учитывать.

В предложенной планарной антенне элементы соединяются при помощи дорожек, проходящих в плоскости расположения самих антенн [12]. При этом соединяющие дорожки вносят искажения в характеристики системы. С увеличением количества элементов схема их соединения быстро растёт в сложности и теряет в практичности. Предполагается, что этих проблем можно избежать, если соединять элементы решётки вне плоскости расположения антенн.

1. Схема объединения элементов планарной антенной решетки

В работе исследуется схема многоэлементной планарной антенной решетки для терагерцовой ректенны с объединением элементов по высокой частоте в другой плоскости, расположенной с тыльной стороны отражающего металлического экрана.

В качестве базового антенного элемента для исследований была выбрана квадратную спиралевидная антенна [12], расположенная на диэлектрической подложке с металлическим покрытием (см. рис. 1). 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.

Выходы квадратных спиралевидных антенных элементов соединяются с микрополосковой линией, расположенной над слоем диэлектрика, нанесенного на тыльную сторону металлического экрана. Микрополосковая линия замыкается с обеих концов коротко-замыкающими перемычками, в результате чего создается резонатор, настроенный на частоту принимаемого терагерцового сигнала. Выходные сигналы от нескольких антенных элементов суммируются в месте расположения выходного порта, к которому подключается диод.

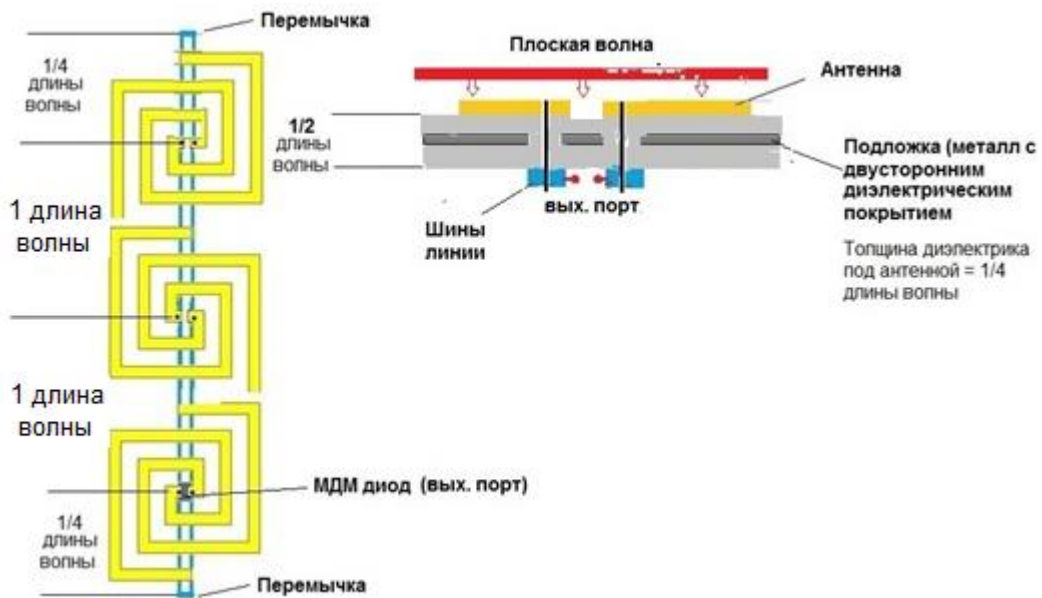


Рис. 1. Внешний вид и сечение исследуемой многоэлементной антенны.

Предлагаемая схема многоэлементной антенны позволит унифицировать методику расчета для произвольного числа элементов и определения необходимых характеристических значений параметров диодов.

2. Результаты моделирования

Основной задачей настоящего исследования являлось проведение моделирования предложенной схемы планарной многоэлементной антенны с помощью современных численных методов с целью подтверждения выдвинутых предположений. Расчеты проводились для следующих параметров модели (см табл.1).

Таблица 1.

Параметр модели	обозначение	Величина(мкм)
толщина первой тефлоновой подложки	cav	0,774
толщина второй тефлоновой подложки	cav2	0,280
толщина металлической (золотой) подложки	gnd	0,774
толщина элементов антенны и полосок линии	T	0,127
размер проводников двухпроводной линии	wire	0,160
зазор в антенне и между полосками линии на тыльной стороне	s	0,150
длина волны, соответствующая частоте 20,54 ТГц	λ	14,6

Решение поставленной задачи выполнялось в виде последовательных этапов.

На первом этапе изучалась задача трансляции терагерцового сигнала, принятого спиралевидным элементом планарной антенны [12], к микрополосковой линии, расположенной над слоем диэлектрика, нанесенного на тыльную сторону металлического экрана. Элемент антенны соединялся с микрополосковой линией с помощью полуволнового отрезка двухпроводной линии, проходящей через отверстие в металлическом экране. В качестве элементов двухпроводной линии рассматривалось применение проводников как круглого, так и прямоугольного сечения (см. рис.2).

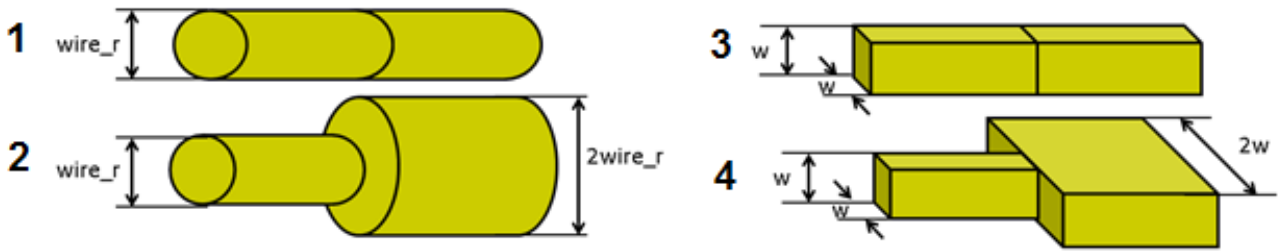


Рис. 2. Элементы соединительной двухпроводной линии.

Вначале рассматривались элементы постоянного сечения (1 и 3 на рис. 2), впоследствии элемент разбивался на два четвертьволновых отрезка с разным сечением (2 и 4 на рис. 2). Изучено прохождение сигнала на частоте 20,54 ТГц от спиралевидной антенны до микрополосковой линии на тыльной стороне антенны. Установлено, что прохождение сигналов зависит от формы проводников, связывающих выход антенного элемента с микрополосковой линией. Наилучшие результаты получены для проводников прямоугольного сечения с размерами, совпадающими с размерами зазора между диполями спиралевидной антенны. По-видимому, при этом антенный элемент наилучшим образом согласуется с двухпроводной линией.

Заметное улучшение передачи сигнала (около 70 %) происходит (см. рис. 3) при применении трансформатора волновых сопротивлений в виде четвертьволнового отрезка прямоугольного сечения (4 на рис. 2).

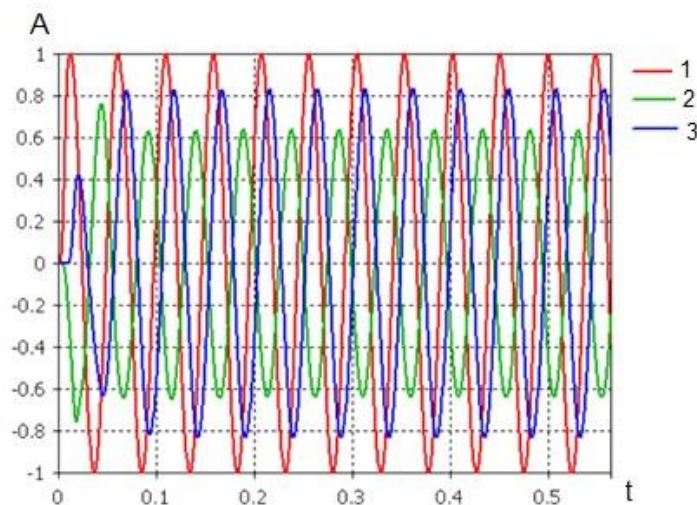


Рис. 3. Сигналы в двухпроводной линии, 1- на входе, 2 – переданный в порт на микрополосковой линии, 3 – сигнал, отраженный от порта.

Как следует из проведенных расчетов, оптимальное значение сопротивления порта на микрополосковой линии равнялось 200 Ом. Это подтверждается приведенными ниже оценками параметров четвертьволнового трансформатора сопротивлений.

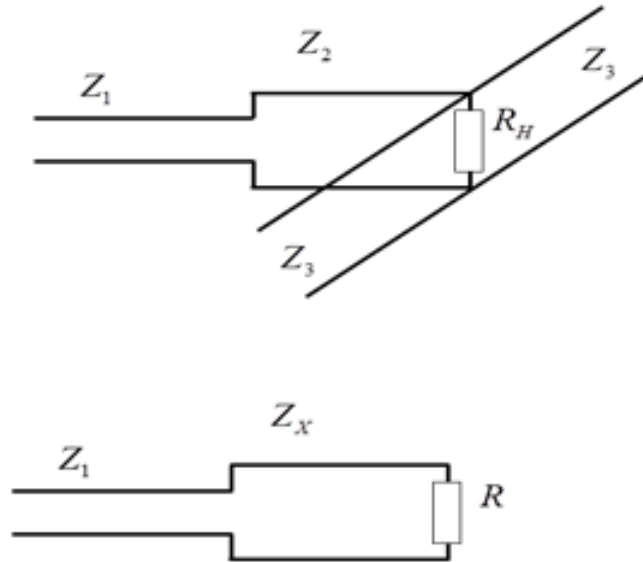


Рис.4. К анализу четвертьволнового трансформатора сопротивлений.

Результаты приближенного расчета волнового сопротивления для отрезков двухпроводной линии прямоугольного сечения (4 на рис.2) дают значения 88 Ом и 57 Ом, которые обозначаются на рис. 4 как Z_1 и Z_2 , соответственно. Волновое сопротивление Z_3 микрополосковой линии с боковым зазором и противофазным возбуждением оценивается в 123 Ом. Сопротивление нагрузки двухпроводной линии R можно оценить по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_H} + \frac{2}{Z_3} \quad (0.1)$$

При подстановке указанных выше значений, получаем величину 47 Ом. Для четвертьволнового трансформатора выполняется соотношение

$$Z_x^2 = R \cdot Z_1 \quad (0.2)$$

Использование полученного значения R дает для Z_x значение 64 Ом, что согласуется с полученным выше значением сопротивления отрезка двухпроводной линии 57 Ом.

Уровень сигнала в выходном порте на микрополосковой линии можно увеличить путём сложения сигналов, поступающих от различных двухпроводных линий, соединенных со спиралевидными антенными элементами. При этом возможны для использования две схемы передачи: «короткая», образованная двумя антенными элементами на расстоянии половины длины волны от выходного порта между ними, и «длинная», где выходной порт расположен с одного края микрополосковой линии, а антенные элементы расположены последовательно в пучностях стоячей волны с шагом, равным длине волны в линии (Рис. 5).

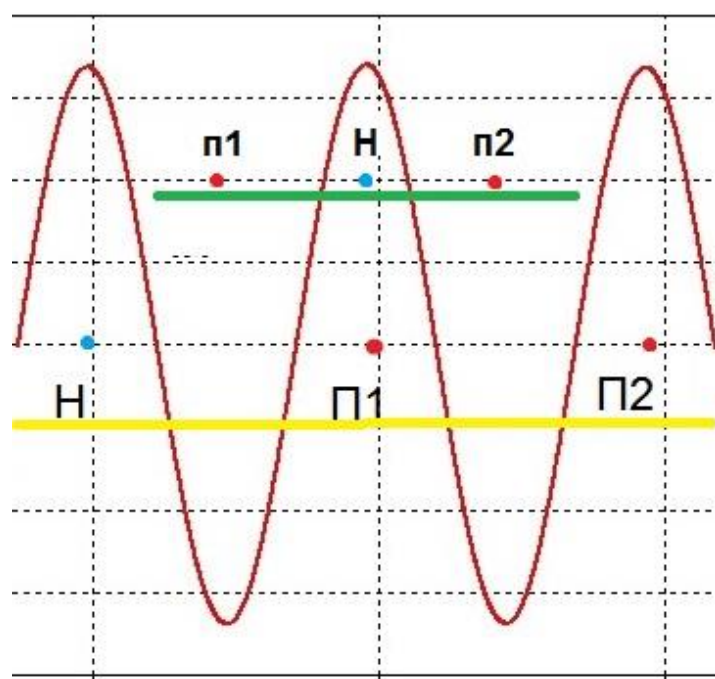


Рис. 5. Схемы расположения выходного порта Н и антенных элементов п1, п2 в линии («короткая» – зеленая, «длинная» – желтая).

Проведенные расчеты подтверждают сделанные предположения – на рис. 6 представлены сигналы, приходящие в выходной порт Н из разных портов п1 и п2 (для «короткой» схемы).

Вне зависимости от выбранной схемы соединения, расстояние между антеннами в решётке составляет одну длину волны. Частотная характеристика для антенны, входящей в решётку из 2 элементов, имеет несколько узких рабочих полос частот аналогично планарной антенне из двух элементов, рассчитанной в [12].

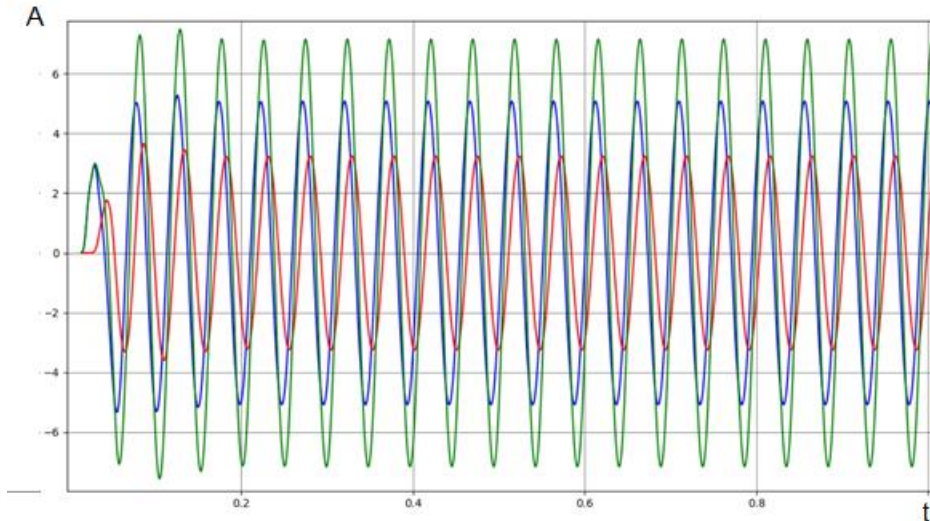


Рис. 6. Сигналы, приходящие в выходной порт Н из портов п1 (синий) и п2 (красный), зеленым показан сигнал из двух портов одновременно.

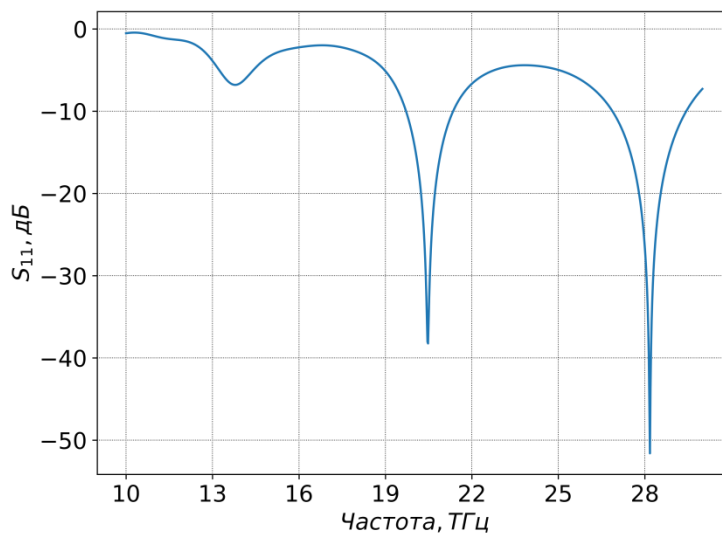


Рис. 7. Коэффициент отражения S_{11} антенны, входящей в решётку, состоящей из двух элементов.

Диаграммы направленности решётки, состоящей из 2 антенных элементов, при их синфазном возбуждении на частоте 20,54 ТГц при постоянном угле места 30° ближе к круговой по сравнению с диаграммой для планарной антенне из двух элементов, рассчитанной в [12].

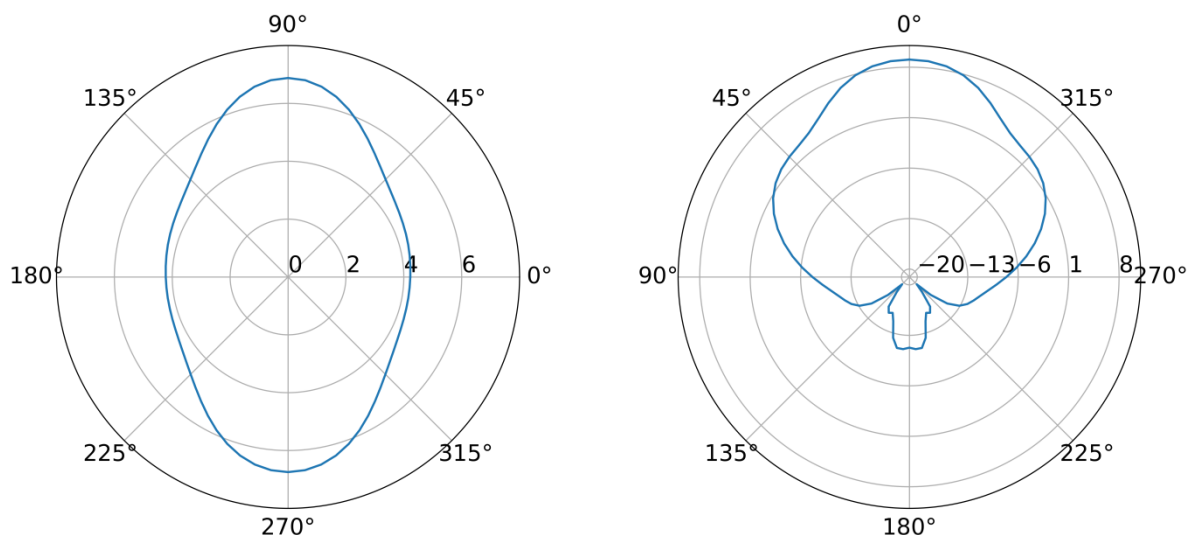


Рис. 8. Диаграммы направленности решётки, состоящей из 2 антенных элементов, на частоте 20,54 ТГц при синфазном возбуждении: при постоянном угле места 30° (слева); при постоянном азимутальном угле 0° (справа).

Необходимо также отметить, что величина импеданса рассмотренной антенной решетки принимает более предсказуемые значения по сравнению с планарной схемой соединения антенных элементов, что облегчает согласование антенной решетки с выпрямительными устройствами.

Заключение

Таким образом, показана возможность реализации многоэлементной планарной антенной решетки с соединением элементов вне плоскости расположения антенн, обеспечивающей повышенный уровень амплитуды сигнала в выходном порту микрополосковой линии, необходимым для оптимизации работы выпрямляющих элементов в терагерцовой ректенне. Необходимо отметить, что предложенная схема планарной антенной решетки отличается унифицированным расположением антенных элементов и прогнозируемыми их выходными сопротивлениями, независимо от числа антенных элементов в решетке. Кроме того, отсутствие соединительных проводников в плоскости антенн исключает их влияние на диаграмму направленности ректенны.

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

Литература

1. Rong Z., Leeson M.S., Higgins M.D., Lu Y. Nano-rectenna powered body-centric nano-networks in the terahertz band. *Healthcare Technology Letters*. 2018, Vol.5. No.4. P.113-117. <https://doi.org/10.1049/htl.2017.0034>
2. Downes L.A., MacKellar A.R., Whiting D.J., Bourgenot C., Adams C.S., Weatherill K.J. Full-field terahertz imaging at kilohertz frame rates using atomic vapor. *Physical Review X*. 2020. Vol.10. No.1. P.011027. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.011027>
3. 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>.
4. Yu C., Fan S., Sun Y., Pickwell-Macpherson E. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. 2012. Vol.2. No.1. P.33–45. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-4292.2012.01.04>
5. Jansen C., Wietzke S., Peters O., Scheller M., Vieweg N., Salhi M., Krumbholz N., Jördens C., Hochrein T., Koch M. Terahertz imaging: applications and perspectives. *Applied Optics*. 2010. Vol.49. No.19. P.E48-E57. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000E48>
6. Amara W., Yahyaoui A., Eltresy N, Aseeri M., Hakim B., Al-Turki Y., Rmili H. Vivaldi dipole nano-rectenna for IR energy harvesting at 28.3 THz. *International Journal of Numerical Modelling*. 2021. Vol.34. No.2. P.e2836. <https://doi.org/10.1002/jnm.2836>

7. Гибин И.С., Котляр П.Е. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2018. Т.6. №2. С.117-129.
8. Moddel G., Grover S. *Rectenna Solar Cells*. New York, Springer. 2013. 399 p.
9. 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>.
10. Shanawani M., Masotti D., Costanzo A. THz rectennas and their design rules. *Electronics*. 2017. Vol.6. No.4. P.99. <https://doi.org/10.3390/electronics6040099>.
11. 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>.
12. 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>

Для цитирования:

Ву К.Т.Ч, Зиненко А.С., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Терагерцовая ректенная решётка с объединением элементов вне плоскости расположения антенн. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.3>