

11

## Линзовая антенна диапазона 60 GHz для высокоскоростных каналов связи на короткие расстояния

© О.В. Минин<sup>1,2</sup>, И.В. Минин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия<sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

E-mail: prof.minin@gmail.com

Поступило в Редакцию 25 июля 2024 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2024 г.

Принято к публикации 11 сентября 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований линзовой антенны диапазона 60 GHz по улучшению ее характеристик на основе эффекта фотонной струи. Показано, что размещение диэлектрического кубика на открытом конце волновода по принципу „plug-and-play“ приводит к увеличению коэффициента усиления антенны до 5 dBi без изменения конструкции самой линзовой антенны. При работе антенны в режиме „на прием“ увеличение усиления составляет примерно 7 dB на частоте около 67 GHz.

**Ключевые слова:** фотонная струя, линзовая антенна, усиление.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.02.59556.20071

Антенны являются одним из фундаментальных компонентов в системах формирования изображения, обнаружения и высокоскоростной связи в миллиметровом (MMW) и терагерцевом (THz) диапазонах. Полоса частот 60 GHz предоставляется бесплатно и используется в промышленных, научных и медицинских приложениях. Однако из-за резонансного поглощения молекулами кислорода в воздухе потери затухания на частоте 60 GHz превышают 13 dB/km [1–3]. Это затухание может ограничить дальность действия беспроводной связи, однако такие высокие потери можно компенсировать использованием антенн с высоким коэффициентом усиления.

Для антенн 5G „точка–точка“ миллиметровых волн необходимы низкий профиль, низкая стоимость и высокий коэффициент усиления, поскольку они в основном могут быть развернуты для небольших сот в городских условиях. Диапазон V (57–66 GHz) является одним из кандидатов на связь малых сот 5G. Так, MMW-системы на нелицензируемой частоте 60 GHz уже стандартизированы для высокоскоростных каналов связи на короткие расстояния для беспроводных персональных сетей (WPAN) (802.15.3c), беспроводной потоковой передачи видео высокой четкости (WirelessHD), сетей WiGig и систем связи „точка–точка“ [4,5], а также антенных систем для наземных терминалов перспективных систем спутниковой связи.

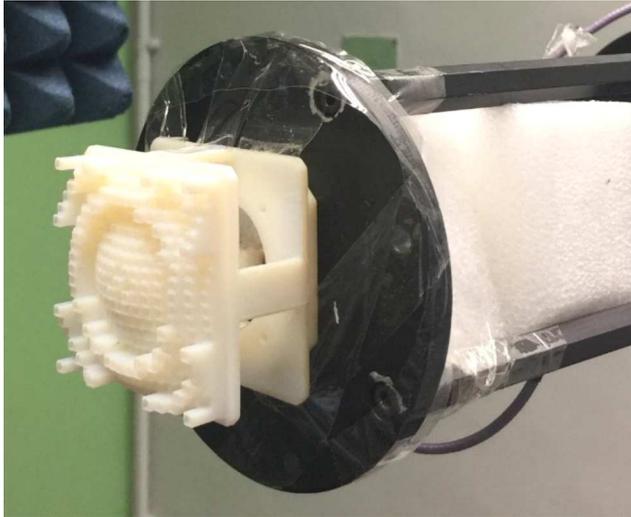
Линзовые антенны более привлекательны для различных приложений миллиметрового диапазона волн из-за хорошего компромисса между направленностью и уровнем вносимых потерь. Для улучшения усиления и коэффициента направленности антенны для фокусировки электромагнитных волн используются различные типы линз [6–9]. В [10] исследовались линзовые антенны MMW- и THz-диапазона, изготовленные по технологии 3D-печати, с квадратными диэлектрическими штырями

переменной высоты в качестве просветляющего слоя. Такая концепция позволяет улучшить направленность линзы за счет периодической просветляющей структуры на границах раздела воздух–линза. Подобные линзовые антенны имеют высокий коэффициент усиления и широкую полосу пропускания при низком профиле.

Как известно, линзовые антенны состоят из двух основных частей: собственно линзы, фокусирующей падающую энергию в заданную точку, и приемника излучения, при этом приемная часть может быть совершенно различной: от рупорной антенны до микрополосковой антенны и открытого конца волновода [11]. Однако из-за принципиальных дифракционных ограничений линзовая антенна не может фокусировать падающее излучение в область с поперечным размером меньше дифракционного предела, и обычно поперечный размер этой зоны фокусировки больше размера открытого конца волновода. Это означает, что часть энергии, фокусируемой линзой, теряется.

Упомянутые выше ограничения побудили нас предложить альтернативный подход к построению антенны MMW/THz-диапазона, для которого характерна высокая степень интеграции в уже существующие антенны по принципу „plug-and-play“.

Один из методов уменьшения размера фокального пятна вплоть до субволнового значения миллиметровых и/или THz-волн заключается в использовании так называемого эффекта фотонной струи [12,13], генерируемой мезоразмерной трехмерной диэлектрической частицей произвольной формы [13]. Заметим, что первое экспериментальное подтверждение эффекта фотонной струи было получено в СВЧ-диапазоне (см. работу [13] и ссылки в ней). Напомним, что образование фотонной струи (локализация и усиление поля в теневой части диэлектрической частицы) наблюдается при условии,



**Рис. 1.** Антенна диапазона 60 GHz, изготовленная методом 3D-печати.

что характерный размер частицы составляет не менее длины волны падающего излучения [12,13]. Явление фотонной струи в режиме ближнего поля для субволновой THz-визуализации впервые было исследовано в [14]. В [15] как на частоте 300 GHz, так и на частоте 24 GHz исследования кубической мезоразмерной структуры в дальней зоне показали, что усиление такой антенны (14.22 dBi) в дальней зоне на 1.9 dB выше, чем у рупорной антенны тех же размеров. Значения ширины диаграммы направленности (FWHM) были примерно на 21 и 34% меньше, чем у рупорной антенны в плоскостях  $E$  и  $H$  соответственно. Мы также продемонстрировали беспроводную передачу данных со скоростью 17.5 Gbit/s с использованием диэлектрической кубической антенны размером  $1.2 \times 1.2 \times 1.36$  mm в диапазоне 300 GHz. На этой частоте максимальное усиление антенны составило примерно 15 dBi [16].

В то же время, насколько нам известно, до сих пор не было предложено ни одного решения и исследования, демонстрирующего применение эффекта фотонной струи в диэлектрической линзовой антенне миллиметрового диапазона, что позволило бы увеличить усиление антенны без модификации самой линзы.

Цель настоящей работы состоит в демонстрации метода увеличения усиления линзовой антенны путем локализации поля на входе открытого конца приемного волновода с помощью мезоразмерной диэлектрической частицы, формирующей фотонную струю. На примере линзовой антенны диапазона 60 GHz, изготовленной по технологии 3D-печати [10], с облучателем в виде открытого конца круглого волновода мы показываем, что размещение кубической мезоразмерной диэлектрической частицы на выходе открытого конца волновода позволяет увеличить усиление примерно на 6 dBi.

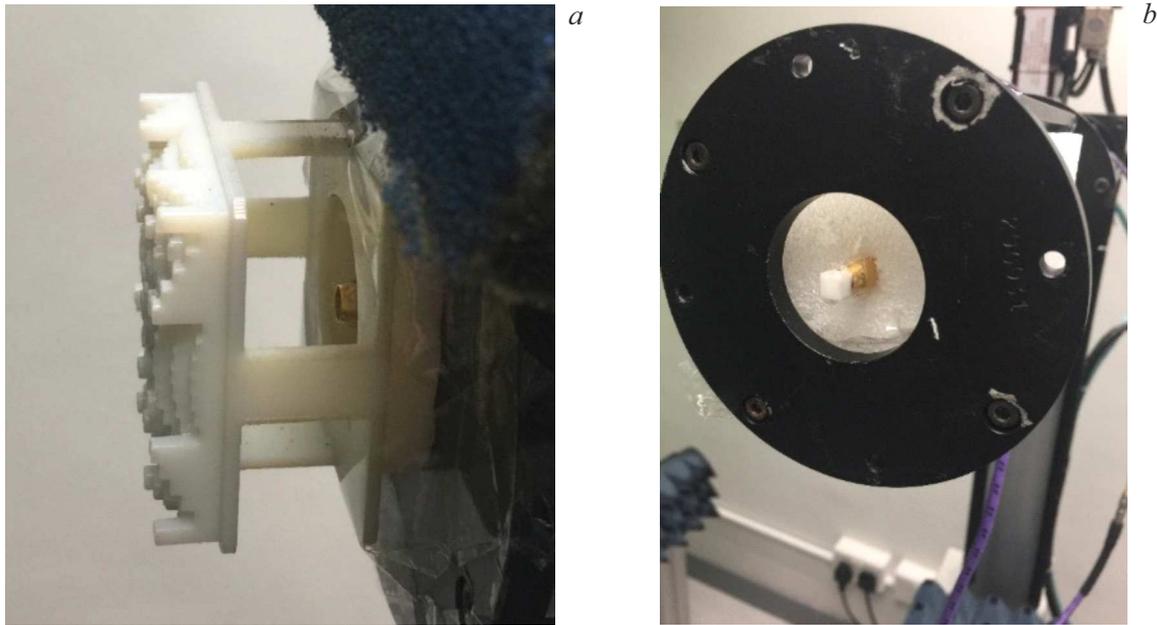
За основу конструкции экспериментальной линзовой ММВ-антенны на частоту 60 GHz была взята дифрак-

ционная линза, подробно описанная в [10], в которой в качестве облучателя линзы использовался открытый конец волновода WR-15. Используемый диэлектрик на частоте около 60 GHz имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r = 2.9$  и тангенс угла потерь  $\tan \delta = 0.01$ . В качестве элементарных ячеек линзы для фазовой компенсации были использованы квадратные диэлектрические столбики переменной высоты. Для минимизации отражений от линзы просветляющий слой реализован в виде искусственного диэлектрика из столбиков прямоугольной формы, их геометрические размеры выбирались в соответствии с рекомендациями [17]. Диэлектрическая проницаемость и толщина столбика составляют  $\epsilon_{AR} \approx 1.7$ ,  $t \approx 0.95$  mm соответственно. Разработанная линза имела квадратную апертуру с  $19 \times 19$  прямоугольными диэлектрическими столбиками, которые обеспечивали необходимую фазовую компенсацию (рис. 1). Отношение фокусного расстояния к диаметру линзы ( $F/D$ ) составило 0.42. Линза изготавливалась на 3D-принтере с базовым разрешением  $42 \times 42 \times 28 \mu\text{m}$  по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Для минимизации уровня боковых лепестков использовалась оптимизация опорной фазы Соре–Минина–Вебба (Soret–Minin–Webb) дифракционной линзы [8,9,18]. Более подробно формирование структуры линзы описано в [10].

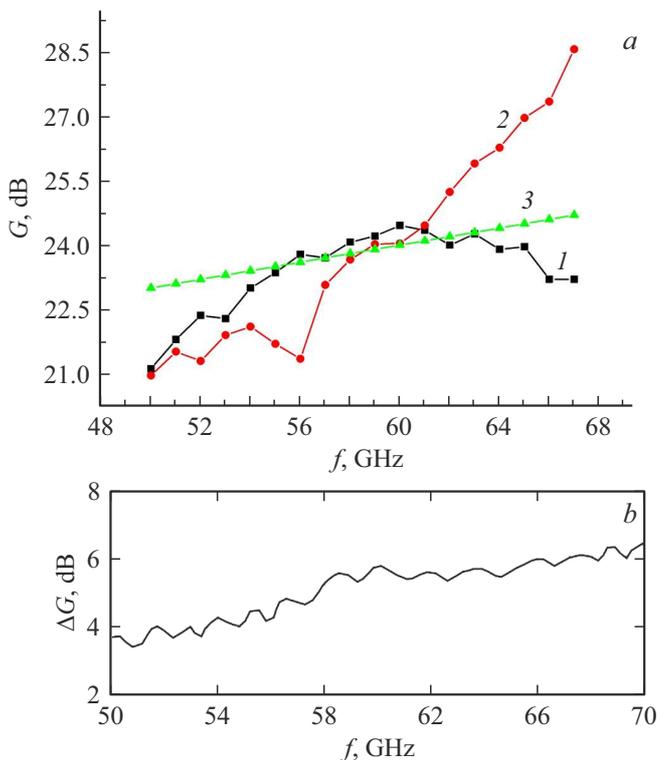
Диаграмма направленности и усиление предлагаемой антенны измерялись с помощью системы ближнего поля NSI2000 с планарным сканированием [19] в безэховой камере. Измеренный коэффициент усиления исходной антенны, показанной на рис. 1, находится в пределах от 19.4 до 23.5 dBi, уровни боковых лепестков ниже  $-18$  и  $-14$  dB в плоскостях  $H$  и  $E$  соответственно. При установке мезоразмерной диэлектрической частицы (фторопласт, размер грани куба 5 mm) на открытый конец круглого волновода (рис. 2) усиление антенны заметно увеличивается (рис. 3, а). Так, измеренный коэффициент усиления антенны с кубической частицей на открытом конце волновода находится в пределах от 19.1 до 28.5 dBi, уровни боковых лепестков ниже  $-18.1$  и  $-14.3$  dB в плоскостях  $H$  и  $E$  соответственно.

Хорошо видно, что эффект увеличения коэффициента усиления наблюдается на частоте выше 60 GHz. Такое поведение коэффициента усиления обусловлено размерами диэлектрической кубической частицы: на этой частоте длина ребра куба равна одной длине волны, а на более высоких частотах эффективные размеры куба больше длины волны (рис. 3). Выигрыш от усиления антенны при помещении простой диэлектрической частицы на открытый конец волновода в данном случае составляет до 4 dB. Помещение диэлектрического кубика на открытый конец волновода, как показали измерения, приводит к уменьшению ширины диаграммы направленности основного лепестка рассеяния антенны примерно в 1.4 раза.

Наконец, на рис. 3, б показана частотная характеристика повышения чувствительности антенны при использо-



**Рис. 2.** *a* — исходная антенна с открытым концом круглого волновода; *b* — круглый волновод с мезоразмерной кубической частицей.



**Рис. 3.** *a* — измененное усиление антенн с открытым круглым концом волновода (1) и волноводом с кубической частицей (2). 3 — усиление стандартной рупорной антенны. *b* — увеличение чувствительности приемной антенны при расположении кубика на открытом конце приемного волновода.

вании кубической частицы в качестве дополнительного приемного элемента, устанавливаемого на открытый конец волновода. Частотная характеристика нормирована на частотную характеристику открытого волновода. В качестве облучающей антенны использовался конический рупор, соединенный с волноводом. Измеренные параметры облучающего волнового фронта показали, что падающую на линзу волну можно считать плоской. Более высокое значение чувствительности было достигнуто в области более высоких частот в рассматриваемом диапазоне, а увеличение усиления примерно на 7.3 dB наблюдалось на частоте около 67 GHz. Эти характеристики примерно совпадают с таковыми при размещении мезоразмерной частицы различной формы (сфера, куб) непосредственно на приемнике в THz-диапазоне [20]. Примечательно, что усиление сигнала при использовании кубика не имеет резонансных характеристик, что указывает на его широкополосность. Последнее очень важно для приложений беспроводной связи MMW- и THz-диапазонов.

Концепция модификации конструкции линзовой антенны, кратко рассмотренная выше, применима и к другим типам антенн, что дает „новую жизнь“ и открывает новые возможности для существующих и будущих антенн MMW- и THz-диапазонов. Основным ограничением увеличения рабочей частоты мезоразмерной частицы для антенн различного типа являются потери в материале диэлектрика. Тем не менее по крайней мере до частот около 300 GHz такое решение имеет определенные преимущества, среди которых широкая полоса пропускания, высокая направленность и малая ширина диаграммы на полувысоте при небольшой физической занимаемой

площади. Подход к модификации линзовой антенны по принципу „plug-and-play“, продемонстрированный в настоящей работе, может стать важным шагом на пути к практическому применению систем связи, радиолокации и визуализации ММВ- и ТГц-диапазонов.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность проф. Chi Hou Chan за приглашение посетить его лабораторию и предоставленную возможность проведения соответствующих экспериментов в 2016 г.

## Финансирование работы

Работа частично поддержана программой развития Томского политехнического университета.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] D.S. Makarov, M.Yu. Tretyakov, P.W. Rosenkranz, J. Quant. Spectr. Rad. Transfer, **243**, 106798 (2020). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.106798
- [2] M. Arvas, M. Alsunaidi, in *2019 IEEE Int. Symp. on antennas and propagation and USNC-URSI radio science meeting* (IEEE, 2019), p. 2127–2128. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888884
- [3] *Ultra-wideband and 60 GHz communications for biomedical applications*, ed. by M.R. Yuce (Springer, N.Y., 2014). DOI: 10.1007/978-1-4614-8896-5
- [4] A. Jabbar, M.A. Jamshed, Q. Abbasi, M.A. Imran, M. Ur-Rehman, in *2023 IEEE Int. Symp. on antennas and propagation and USNC-URSI radio science meeting (USNC-URSI)* (IEEE, 2023), p. 1567–1568. DOI: 10.1109/USNC-URSI52151.2023.10237884
- [5] X. Tie, K. Ramachandran, R. Mahindra, in *Passive and active measurement (PAM 2012)*, ed. by N. Taft, F. Ricciato. Ser. Lecture Notes in Computer Science (Springer, Berlin–Heidelberg, 2020), vol. 7192, p. 147–157. DOI: 10.1007/978-3-642-28537-0\_15
- [6] D. Zelenchuk, V. Kirillov, C. Kärnfelt, F. Gallée, I. Munina, *Electronics*, **12** (11), 2354 (2023). DOI: 10.3390/electronics12112354
- [7] N. Muckermann, J. Barowski, N. Pohl, *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, published online (2023). DOI: 10.1017/S1759078723001472
- [8] I.V. Minin, O.V. Minin, *Diffractional optics of millimetre waves* (CRC Press, Boca Raton, 2004). DOI: 10.1201/9781420034486
- [9] I.V. Minin, O.V. Minin, *Basic principles of Fresnel antenna arrays* (Springer, Berlin–Heidelberg, 2008). DOI: 10.1007/978-3-540-79559-9
- [10] H. Yi, S.-W. Qu, K.-B. Ng, C.H. Chan, X. Bai, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **64** (2), 442 (2016). DOI: 10.1109/TAP.2015.2505703
- [11] S.S. Dhillon, M.S. Vitiello, E.H. Linfield, A.G. Davies, M.C. Hoffmann, J. Booske, C. Paoloni, M. Gensch, P. Weightman, G.P. Williams, E. Castro-Camus, D.R.S. Cumming, F. Simoens, I. Escorcía-Carranza, J. Grant, S. Lucyszyn, M. Kuwata-Gonokami, K. Konishi, M. Koch, C.A. Schmuttenmaer, T.L. Cocker, R. Huber, A.G. Markelz, Z.D. Taylor, V.P. Wallace, J.A. Zeitler, J. Sibik, T.M. Korter, B. Ellison, S. Rea, P. Goldsmith, K.B. Cooper, R. Appleby, D. Pardo, P.G. Huggard, V. Krozer, H. Shams, M. Fice, C. Renaud, A. Seeds, A. Stöhr, M. Naftaly, N. Ridler, R. Clarke, J.E. Cunningham, M.B. Johnston, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (4), 043001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001
- [12] O.V. Minin, I.V. Minin, *Opt. Quantum Electron.*, **49** (10), 326 (2017). DOI: 10.1007/s11082-017-1165-6
- [13] I.V. Minin, O.V. Minin, *Diffractional optics and nanophotonics. Resolution below the diffraction limit* (Springer, Cham, 2016). DOI: 10.1007/978-3-319-24253-8
- [14] H.H. Nguyen Pham, S. Hisatake, O.V. Minin, T. Nagatsuma, I.V. Minin, *APL Photon.*, **2** (5), 056106 (2017). DOI: 10.1063/1.4983114
- [15] Y. Samura, K. Horio, V. Antipov, S. Shipilov, A. Eremeev, O.V. Minin, I.V. Minin, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, **18** (9), 1828 (2019). DOI: 10.1109/LAWP.2019.2930820
- [16] K. Yamada, Y. Samura, O.V. Minin, A. Kanno, N. Sekine, J. Nakajima, I.V. Minin, S. Hisatake, *Front. Commun. Net.*, **2**, 702968 (2021). DOI: 10.3389/frcmn.2021.702968
- [17] А.В. Станковский, Е.А. Стригова, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, *Письма в ЖТФ*, **50** (14), 21 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58304.19888 [A.V. Stankovsky, E.A. Strigova, S.V. Polenga, Yu.P. Salomatov, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (7), 63 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.07.58731.19888].
- [18] И.В. Минин, О.В. Минин, *Письма в ЖТФ*, **15** (23), 29 (1989).
- [19] *Near-field Systems, Inc., NSI2000* [Электронный ресурс]. <http://www.nearfield.com/products/Software.aspx>
- [20] O.V. Minin, I.V. Minin, Y. Li, J. Han, *PIER Lett.*, **101**, 29 (2021). DOI: 10.2528/PIERL21071901