

Исследование элементарных ячеек RIS с помощью 3D-печатных волноводов¹

А.С. Тярин^{*,***}, К.А. Глинский^{*,***}, А.А. Куреев^{*,**}, Е.М. Хоров^{*,**}

** Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*

*** Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

**** Московский физико-технический институт*

Поступила в редколлегию 01.10.2024. Принята 20.11.2024

Аннотация—На текущий момент реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) является многообещающей технологией, способной повысить пропускную способность и покрытие в современных беспроводных сетях. Одним из способов измерения амплитудно- и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) элементарных ячеек RIS является использование волноводов. Однако коммерческие волноводы имеют фиксированные размеры, что приводит к невозможности измерить RIS с произвольным расстоянием между элементами. Данная работа предлагает альтернативный подход к измерению характеристик элементарных ячеек RIS, основанный на использовании 3D-печатных волноводов, размеры которых, наоборот, соответствуют размерам элементарных ячеек RIS. Представленный в работе 3D-печатный волновод обладает сопоставимым с коммерческими аналогами коэффициентом стоячей волны. Сходимость измерений АЧХ и ФЧХ элементарной ячейки RIS, полученных в ходе моделирования и с помощью разработанного волновода, демонстрируют точность и потенциал предложенного подхода для прототипирования RIS с произвольным расстоянием между элементами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-печать, волновод, аддитивное производство, RIS.

DOI: 10.53921/18195822_2024_24_4_384

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов повышения надежности, скорости и области покрытия современных беспроводных систем связи является использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) [1, 2]. Один из способов исследования RIS заключается в изготовлении прототипа и измерении его характеристик в безэховой камере с использованием направленных антенн [3, 4]. Однако если RIS не соответствует требуемым характеристикам, то необходимо создать новый, исправленный прототип, что увеличивает время и затраты как на разработку устройства, так и на его тестирование. Другой способ заключается в изготовлении небольшой части RIS, обычно одной или двух элементарных ячеек (англ.: Unit Cell, UC) и ее измерении с использованием прямоугольного волновода [5]. Однако коммерческие волноводы имеют фиксированные размеры, что приводит к невозможности измерить RIS с произвольным расстоянием между элементами. Это ограничение имеет решающее значение, поскольку расстояние между элементами RIS определяет их взаимное влияние. Частично эту проблему позволяют решить дорогостоящие волноводные переходники [6], но в виду их ограниченного количества, они также не охватывают всевозможные размеры UC. Использование переходников также усложняет дальнейшее моделирование UC [7].

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Аддитивное производство, широко известное как 3D-печать, представляет собой жизнеспособную альтернативу, позволяя быстро и экономично создавать волноводы с нужными размерами. Эта возможность может существенно улучшить разработку и тестирование RIS, позволяя сделать волновод нужных размеров для измерения характеристик разрабатываемой RIS. Недавние исследования продемонстрируют возможность достижения 3D-печатными волноводами характеристик, сопоставимых с коммерческими аналогами [8]. Однако в большинстве 3D-печатных волноводах используются те же фиксированные размеры коммерческих аналогов, что сужает их потенциал.

Данная работа посвящена разработке метода аддитивного производства 3D-печатных прямоугольных волнопроводов, предназначенных для измерения элементарных ячеек RIS. Представленное решение охватывает проектирование и моделирование структур волнопроводов, с размерами подходящими под UC RIS, описание метода металлизации для достижения поверхностей с высокой проводимостью, а также разработку специализированного калибровочного комплекта для спроектированного волновода.

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 описывается процесс проектирования и изготовления 3D-печатного волновода. Раздел 3 посвящен основным результатам работы, включающие в себя: измерение АЧХ волновода и валидацию его калибровки, разработку, моделирование и измерение UC RIS. Наконец, в разделе 4 подводятся итоги работы.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ 3D-ПЕЧАТНОГО ВОЛНОВОДА

На рис. 1 показана конструкция 3D-печатного прямоугольного волновода и представлены его основные параметры. В данной работе, рассматривается UC RIS квадратной формы, сторона которого равна половине рабочей длины волны RIS для снижения взаимного влияния. Размер UC определяет меньший размер волновода B , в то время как $A = 2B$. Данное соотношение позволяет добиться наилучших характеристики таких как, полоса и коэффициент стоячей волны (КСВ). Размер C составляет приблизительно три четверти длины центральной волны волновода λ_{wg} , выраженной следующей формулой [9]:

$$\lambda_{wg} = \frac{c}{f_r} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2A \cdot f_r}\right)^2},$$

где c — скорость света, f_r — центральная частота из диапазона рабочих частот волновода. Расстояние от края волновода до штыря D и длина штыря E приблизительно равны четверти длины волны в волноводе и в свободном пространстве, соответственно. При таких размерах АЧХ волновода имеет минимум на рабочей частоте элемента RIS [10].

Для измерения элементов RIS с помощью волновода необходимо откалибровать его относительно его открытого конца. Для этого используется метод SSST (англ.: Short-Short-Short-Thru), использующий калибровочный набор, состоящий из трех короткозамкнутых нагрузок разной длины. Данный набор изготавливается также с использованием 3D-печати. Обычно эти длины равны сумме B и $1/8, 1/4, 3/8$ длины волны λ'_{wg} , выраженной следующим образом [11]:

$$\lambda'_{wg} = 2 \frac{\lambda_{wg}^h \lambda_{wg}^l}{\lambda_{wg}^h + \lambda_{wg}^l},$$

где λ_{wg}^l и λ_{wg}^h — длины волн волновода на самой низкой и самой высокой частотах рабочего диапазона волновода. Иногда вместо одного из предыдущих вариантов используется короткое замыкание нулевой длины.

Для изготовления волновода и калибровочного набора используется технология послойного наплавления (англ.: fused deposition modeling, FDM) и полимера HIPS (англ.: High-Impact

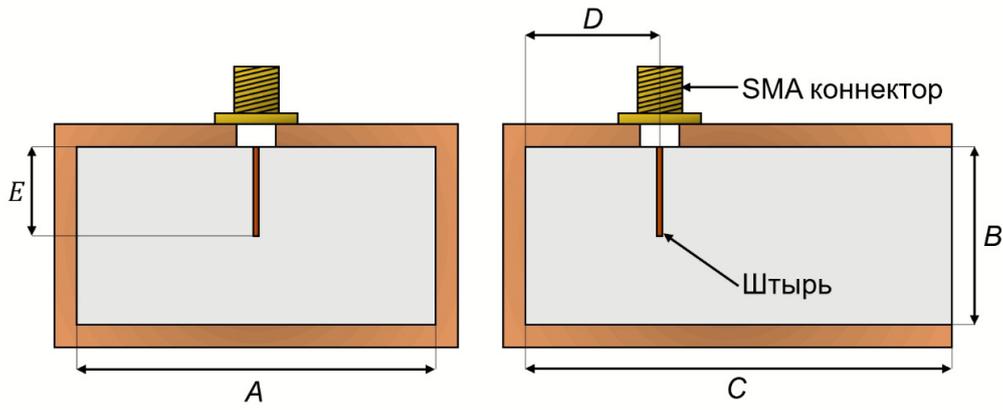


Рис. 1. Схема прямоугольного волновода

PolyStyrene) на принтере QIDI Q1 с высотой слоя 0,12 мм. После этого волновод и калибровочный набор металлизируются методом покрытия фольгой, который предлагает высокую проводимость, низкую стоимость и простоту применения [12].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Измерение и валидация волновода

В данной работе рассматриваются элементы RIS с рабочей частотой 4,8 ГГц, что соответствует диапазону n79 технологии 5G NR [13]. 3D-печатный волновод, используемый для измерений данного элемента, имеет следующие параметры: $A = 64,2$ мм, $B = 31,2$ мм, $C = 54,13$ мм, $D = 17,7$ мм и $E = 14,8$ мм. На практике лучше сделать штырь большего размера E , чем рассчитанный, чтобы его можно было укоротить для достижения наилучших характеристик волновода с точки зрения АЧХ и полосы волновода. На рис. 2 представлена АЧХ разработанного 3D-печатного волновода, диапазон рабочих частот которого составляет от 4,3 ГГц до 5,0 ГГц. Расхождение в результатах вызвано различием в размерах E , а также упрощенной моделью SMA-разъема в CST. Однако АЧХ в волноводе не превышает -17 дБ для всего рабочего частотного диапазона, что соответствует КСВ=1,3. Таким образом, КСВ 3D-печатного волновода сопоставим с коммерческими аналогами при меньшей частотной полосе. Однако ширины данной полосы достаточно для измерения элементов RIS, работающих во всем диапазоне n79 5G NR. Далее печатается калибровочный набор со следующими длинами смещения: 9,43 мм, 18,85 мм, 28,28 мм. После чего параметры 3D-печатного калибровочного набора задаются в программном обеспечении векторном анализаторе цепей (англ.: Vector Network Analyzer, VNA) и происходит калибровка волновода.

Валидация калибровки 3D-печатного волновода происходит следующим образом. Разрабатываются и изготавливаются пары квадратных медных патчей размером L с подложкой из фольгированного армированного фторопласта (ФАФ-4Д) толщиной h мм. На рис. 3 показана его структура, где $a = 31,2$ мм, $h = 1,5$ мм, $t = 0,032$ мм, а L варьируется от 17,5 мм до 19,5 мм с шагом 0,5 мм. Для валидации используется такой объект, поскольку он имеет простую геометрическую форму и предсказуемое поведение АЧХ и ФЧХ. Затем, используя VNA и волновод, измеряются АЧХ и ФЧХ пары квадратных патчей для каждого значения L . Затем эти пары моделируются в CST с периодическими граничными условиями и портами Флоке [14]. Также учитывается, что в волноводе электромагнитная волна распространяется под углом падения θ_{wg} , который зависит от ее частоты f и размера волновода A следующим образом [15]:

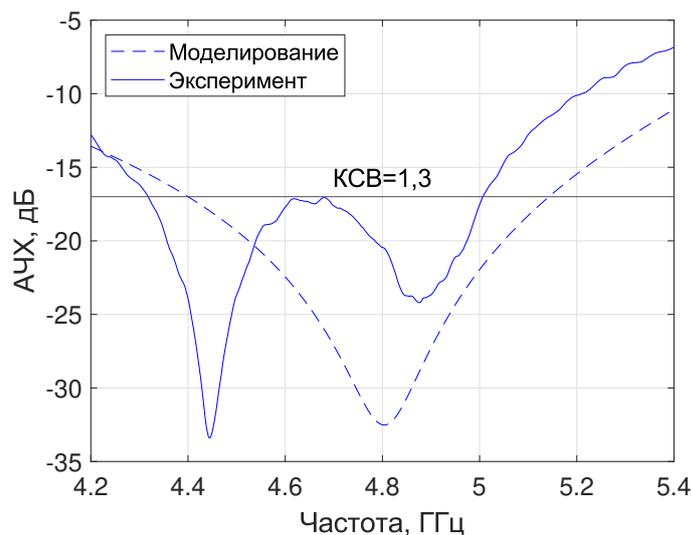


Рис. 2. АЧХ 3D-печатного волновода, рассчитанного для измерений элемента RIS на 4.8 ГГц.

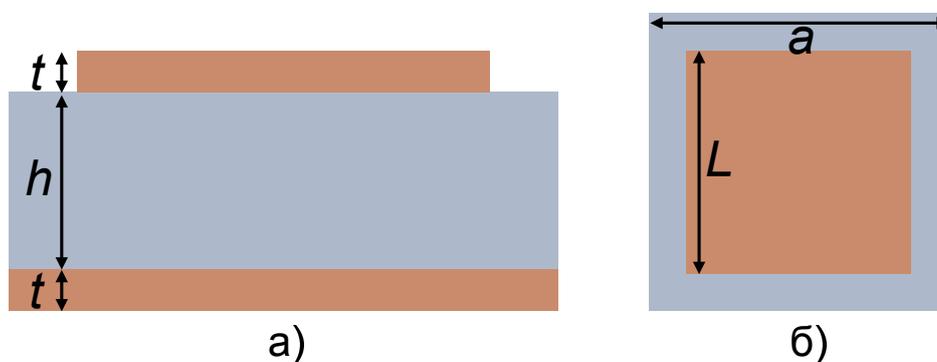


Рис. 3. Квадратный патч с подложкой из ФАФ-4Д: (а) вид сбоку и (б) сверху.

$$\theta_{wg} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2A \cdot f} \right)^2} \right).$$

На рис. 4 показаны АЧХ и ФЧХ пары патчей, полученные в результате экспериментальных измерений и имитационного моделирования в CST Microwave Studio (CST). Из результатов следует, что отклонения измеренной АЧХ от результатов моделирования составляют в среднем 0,3 дБ, что вызвано несоответствием размера и формы патчей с их моделью, а также потерями в волноводе и проводах, соединяющих его с VNA. Однако, экспериментально полученные ФЧХ практически совпадают с ФЧХ, полученными в ходе имитационного моделирования, а средняя погрешность составляет менее 7%, что сопоставимо с результатами, полученными с помощью коммерческих волноводов [16]. Таким образом, данный эксперимент подтверждает применимость использования напечатанного на 3D-принтере волновода с калибровочным набором для измерения элементов RIS.

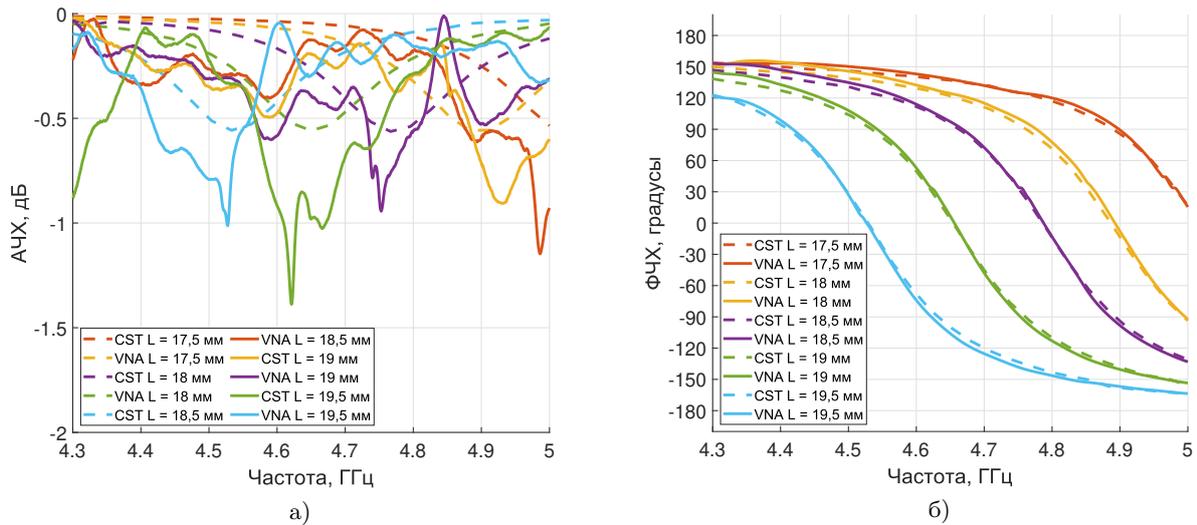


Рис. 4. а) АЧХ и б) ФЧХ пар квадратных патчей для различных значений L полученные в CST (CST) и измеренные с помощью 3D-печатного волновода и VNA (VNA).

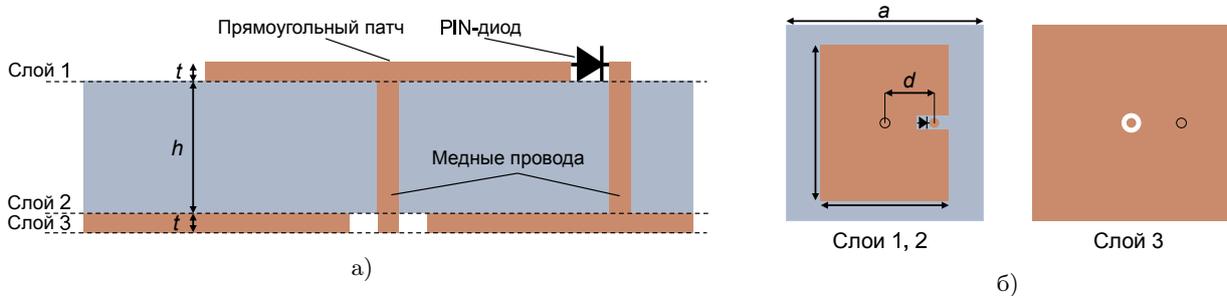


Рис. 5. Структура элемента RIS: а) вид сверху и б) послойная структура.

3.2. Разработка и моделирование элемента RIS

Теперь рассмотрим, как выбираются параметры для элемента RIS. В данной работе используется элементарная ячейка RIS, структура которой показана на рис. 5. Для управления фазой отраженной ЭМ волны используется PIN-диод Infineon BAR63-03W [17]. Обладая двумя состояниями с различными импедансами, с его помощью можно реализовать 1-битное квантование по фазе. Для состояния прямого напряжения смещения (ON) его эквивалентная схема представляет собой последовательное соединение индуктивности 1,8 нГн и сопротивления 2,1 Ом. В состоянии обратного (или нулевого) напряжения смещения (OFF) его эквивалентная схема представляет собой последовательное соединение с индуктивностью 1,8 нГн и емкостью 0,17 пФ.

Значения L , W и d подбираются так, чтобы разница между ФЧХ состояний ON и OFF составляла 180° на частоте 4,8 ГГц. В отличие от квадратных патчей, элемент RIS моделируется с периодичными условиями и прямым падением плоской ЭМ волны. Окончательные размеры элемента RIS следующие: $a=31.2$ мм, $L=17.9$ мм, $W=25$ мм, $d=3.9$ мм, $h=1.5$ мм и $t=0.035$ мм. На рис. 6 показаны АЧХ и ФЧХ УС в разных состояниях, полученные с помощью моделирования в CST. Ширина полосы, в которой разность ФЧХ элемента RIS в состояниях ON и OFF составляет $180 \pm 20^\circ$, равна 187 МГц. Таким образом, рабочего частотного диапазона 3D-печатного волновода достаточно для измерения ФЧХ элемента RIS на всей его полосе.

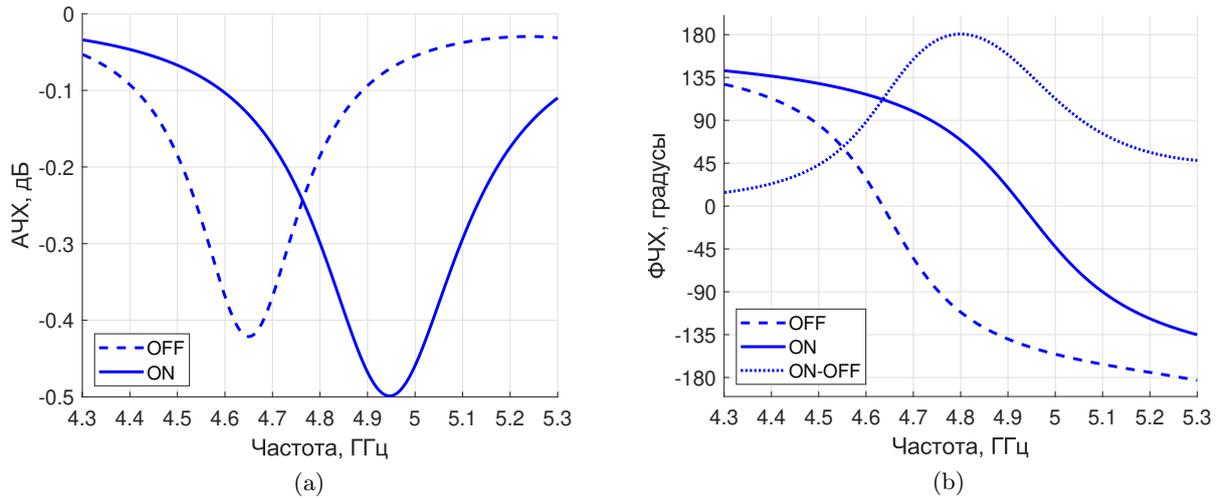


Рис. 6. а) АЧХ и б) ФЧХ элемента RIS в разных состояниях PIN-диода полученные с помощью моделирования в CST при прямом падении плоской электромагнитной волны.

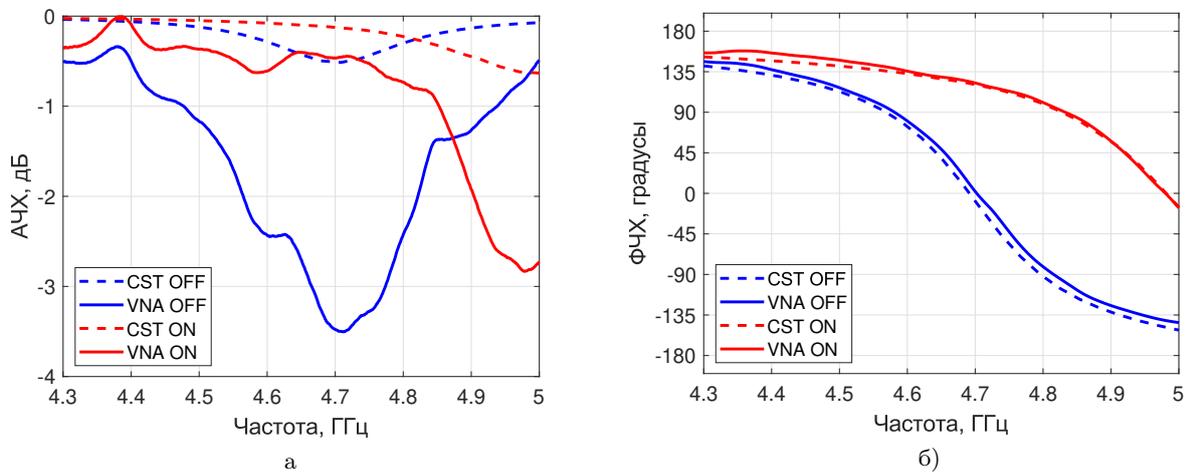


Рис. 7. а) АЧХ и б) ФЧХ элемента RIS в разных состояниях PIN-диода полученные с помощью моделирования в CST (CST) и измеренные с помощью 3D-печатного волновода и VNA (VNA).

3.3. Измерение элемента RIS

Процесс измерения исследуемых элементов RIS начинается с установки их в держатель и присоединения к волноводу. Далее, с помощью VNA измеряются АЧХ и ФЧХ пары элементов RIS для каждого состояния их PIN-диодов, причем оба PIN-диода находятся в одинаковом состоянии одновременно. Затем пара элементов RIS моделируется в CST таким же образом, как описано выше для пары патчей.

На рис. 7 показаны АЧХ и ФЧХ пары элементов RIS в состояниях ON и OFF, полученные в результате экспериментальных измерений и имитационного моделирования в CST Microwave Studio (CST). Как видно из результатов, измеренная АЧХ отличаются не более чем на 3 дБ от результатов моделирования. Такие отклонения связаны с потерями в волноводе, в PIN-диодах и их управляющих схемах, а также с влиянием разъемов и кабелей, используемых в процессе измерений [18]. Несмотря на такие отклонения по амплитуде, измеренная и полученная в ходе моделирования ФЧХ отличаются не более чем 10° . Разница ФЧХ между ON и OFF состояниями не равна 180° при 48 ГГц, поскольку электромагнитная волна распространяется под

углом θ_{wg} внутри волновода. Однако совпадение данных экспериментальных и имитационных кривых подтверждает, что исследуемые элементы RIS также работают должным образом при прямом падении электромагнитной волны. Таким образом, предложенный в данной работе подход можно использовать для измерения RIS с произвольным периодом путем изготовления волновода нужного размера.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен новый метод исследования элементов RIS с помощью 3D-печатных прямоугольных волноводов. Изготовленный 3D-печатный волновод продемонстрировал КСВ=1,3, сопоставимый с коммерческими металлическими волноводами в диапазоне рабочих частот от 4,3 ГГц до 5,0 ГГц. Для проверки работоспособности 3D-печатного волновода, проведен валидационный эксперимент, результаты которого демонстрируют минимальные ошибки в АЧХ и ФЧХ между имитационными и измеренными результатами. Таким образом, данная работа предлагает экономически эффективный и настраиваемый подход к изготовлению волноводов, значительно сокращая время и расходы, связанные с традиционными методами производства, тем самым, открывая путь для быстрого прототипирования и тестирования RIS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernandez, M., Kabatiansky, G. A. E., Kruglik, S. A., and Miao, Y. (2023). Codes for exact support recovery of sparse vectors from inaccurate linear measurements and their decoding. *Problems of Information Transmission*, 59(1), 14-21.
2. Trifonov, P. V. (2023). Design and decoding of polar codes with large kernels: a survey. *Problems of Information Transmission*, 59(1), 22-40.
3. Pan, C., Ren, H., Wang, K., Kolb, J. F., Elkhashlan, M., Chen, M., ... and Hanzo, L. (2021). Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions. *IEEE Communications Magazine*, 59(6), 14-20.
4. Trichopoulos, G. C., Theofanopoulos, P., Kashyap, B., Shekhawat, A., Modi, A., Osman, T., ... and Alkhateeb, A. (2022). Design and evaluation of reconfigurable intelligent surfaces in real-world environment. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 462-474.
5. Sayanskiy, A., Belov, A., Yafasov, R., Lyulyakin, A., Sherstobitov, A., Glybovski, S., and Lyashev, V. (2022). A 2D-programmable and scalable reconfigurable intelligent surface remotely controlled via digital infrared code. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(1), 570-580.
6. Lenin, N., and Rao, P. H. (2005). Evaluation of the reflected phase of a patch using waveguide simulator for reflectarray design. *Microwave and Optical Technology Letters*, 45(6), 528-531
7. Cuong, H. D., Le, M. T., Dinh, N. Q., Tran, X. N., and Michishita, N. (2023). A broadband 1-bit single-layer reconfigurable reflectarray unit cell based on PIN diode model. *IEEE Access*, 11, 6477-6489.
8. Tamayo-Dominguez, A., Fernandez-Gonzalez, J. M., and Sierra-Perez, M. (2019). Metal-coated 3D-printed waveguide devices for mm-wave applications [application notes]. *IEEE Microwave Magazine*, 20(9), 18-31.
9. Dansran, B., Xu, S., Heo, J., Lee, C. S., and Ahn, B. C. (2023). Design of a Broadband Transition from a Coaxial Cable to a Reduced-Height Rectangular Waveguide. *Applied Sciences*, 13(20), 11265.
10. Enayati, P., and Zarifi, D. (2022). Design of a Wideband Coaxial-to-Rectangular Waveguide Transition Based on Supershapes. *IEEE Access*, 10, 121924-121929.
11. Microwave, F. (2022). Flann Microwave. Accessed: Jun, 25, 2023.
12. Wang, L., Lin, S., Wang, Y., Xu, T., Zhang, X., and Zhang, X. (2023, November). Experimental Investigation of 3D-Printed Lightweight Waveguide Port Antenna. In *2023 IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)* (pp. 1-2). IEEE.

13. 3GPP. (2023). NR; User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 1: Range 1 Standalone.
14. Tyarin, A. S., Kureev, A. A., and Khorov, E. M. (2024). Fundamentals of design and operation of reconfigurable intelligent surfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1-7.
15. Nayeri, P., Yang, F., and Elsherbeni, A. Z. (2018). *Reflectarray antennas: theory, designs, and applications*.
16. Abbasi, M. I., and Ismail, M. Y. (2011). Reflection loss and bandwidth performance of X-band infinite reflectarrays: Simulations and measurements. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(1), 77-80.
17. BAR63-03W: Low signal distortion, surface mount RF PIN diode
18. Rajagopalan, H., and Rahmat-Samii, Y. (2010). On the reflection characteristics of a reflectarray element with low-loss and high-loss substrates. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 52(4), 73-89.

Study of RIS unit cells using 3D printed waveguides

A.S. Tyarin, K.A. Glinskiy, A.A. Kureev, E.M. Khorov

Currently, Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) is a promising technology that can enhance bandwidth and coverage in modern wireless networks. One way to measure the amplitude and phase response of RIS unit cells (UCs) is through the use of waveguides. However, commercial waveguides have fixed dimensions, making it impossible to measure RIS with arbitrary distance between UCs. This work proposes an alternative approach of measuring using 3D-printed waveguides that match the dimensions of the RIS UCs. The 3D printed waveguide presented in this work has a standing wave coefficient comparable to commercial ones. The convergence of the amplitude and phase responses obtained from modeling and from measuring using this waveguide demonstrates the accuracy and potential of this approach for prototyping RIS with arbitrary distance between UCs.

KEYWORDS: 3D printing, waveguide, additive manufacturing, RIS.