

Влияние защитного покрытия реконфигурируемой интеллектуальной поверхности на ее характеристики ¹

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

Email: {tyarin, tronin, kureev, khorov}@wireless.iitp.ru

^{*} *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

^{**} *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук*

^{***} *Московский физико-технический институт*

Поступила в редколлегию 27 ноября 2023 г.

Аннотация—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) — перспективные устройства, способные увеличить пропускную способность и область покрытия новых и уже существующих беспроводных сетей. На сегодняшний день большая часть RIS представлена в виде прототипов, которые не обладают защитой от воздействий внешней среды и не приспособлены для внедрения в реальные системы связи. Однако, защитное покрытие может значительно повлиять на характеристики RIS и снизить ее эффективность. В данной работе рассмотрено влияние толщины, диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь наиболее распространенных материалов для защитного покрытия на амплитудно- и фазо-частотные характеристики элементарной ячейки RIS. В результате даны рекомендации по выбору материала и его толщины, а также по коррекции параметров ячейки при фиксированных параметрах защитного покрытия.

Ключевые слова: RIS, PIN-диод, широкополосная связь, защитное покрытие, CST Studio.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_497

1. ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) — перспективные устройства, способные увеличить пропускную способность и область покрытия новых и уже существующих беспроводных сетей. RIS является плоской периодической структурой, состоящей из элементарных ячеек (ЭЯ), электромагнитным (ЭМ) откликом которых можно управлять. ЭМ отклик ЭЯ описывается фазо- и амплитудно-частотными характеристиками (ФЧХ и АЧХ). АЧХ показывает, насколько ЭЯ ослабляет падающую ЭМ волну, в то время как ФЧХ показывает, какой фазовый сдвиг приобретает ЭМ волна при отражении от ЭЯ. Регулируя ФЧХ ЭЯ, можно добиться, например, фокусирования на принимающем устройстве, тем самым увеличивая мощность принимаемого сигнала.

Предполагается, что RIS будет использоваться в сценариях как внутри [1], так и вне помещений. В сценарии вне помещений RIS подвержена влиянию таких факторов, как влага и пылевое загрязнение. Их влияние приводит к некорректной работе RIS или к выходу ее из строя, поэтому готовые устройства RIS должны обладать достаточной защитой от их воздействия.

Одним из решений этой проблемы является нанесение на RIS защитного покрытия. Такое решение сохранит плоскую структуру RIS, оставляя возможность размещать ее на таких по-

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

верхностях, как стены помещений, фасады зданий, билборды. Однако, присутствие защитного покрытия может оказать влияние на АЧХ и ФЧХ ЭЯ.

На сегодняшний день существуют исследования влияния различных факторов на характеристики ЭЯ. Например, в статьях [2, 3] учитывается наличие капель припоя на компонентах ЭЯ и проводных соединений между ними. В статье [4] исследуется влияние угла падения ЭМ волны на импеданс ЭЯ. В статье [5] рассматривается влияние погрешности в размерах патча, толщины и длины линии питания ЭЯ, а также их взаимное влияние на АЧХ и ФЧХ ЭЯ. Вышеупомянутые исследования показывают, что данные факторы приносят значительные изменения в характеристики ЭЯ и могут привести к некорректной работе RIS. Однако большинство факторов можно учесть на этапе проектирования, чтобы уменьшить их влияние на ЭЯ.

Влияние защитного покрытия исследовалось для патч-антенн, которые похожи по своей структуре на ЭЯ RIS. Например, в статьях [6, 7] исследуется влияние защитного покрытия на АЧХ патч-антенн, однако не рассматривается влияние на ФЧХ, которая является важной характеристикой для ЭЯ RIS. Таким образом, на сегодняшний день не известно, как защитное покрытие будет влиять на АЧХ и ФЧХ ЭЯ.

Цель данной работы — исследование влияния материала и толщины защитного покрытия на АЧХ и ФЧХ ЭЯ, работающих на частотах 2,6 и 5,3 ГГц. Данные частоты соответствуют наиболее распространенным технологиям широкополосной связи, таким как LTE (Long Term Evolution) и Wi-Fi. На основе полученных результатов представлены рекомендации для выбора материала и толщины защитного покрытия для исследуемых ЭЯ и рекомендации по коррекции их размеров для выбранных материалов и толщин защитного покрытия. Результаты работы позволят скорректировать влияние защитного покрытия RIS на АЧХ и ФЧХ ее ЭЯ, что упростит внедрение RIS в беспроводные сети.

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 описывается принцип работы и структура ЭЯ RIS. В разделе 3 описывается моделирование ЭЯ и ее защитного покрытия. В разделе 4 обсуждаются результаты, рекомендации и коррекция. Наконец, раздел 5 завершает работу.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И СТРУКТУРА ЭЯ RIS

RIS состоит из ЭЯ, главными элементами которых являются управляющий и отражающий элементы [8]. Отражающий элемент определяет рабочую частоту ЭЯ. Управляющий элемент

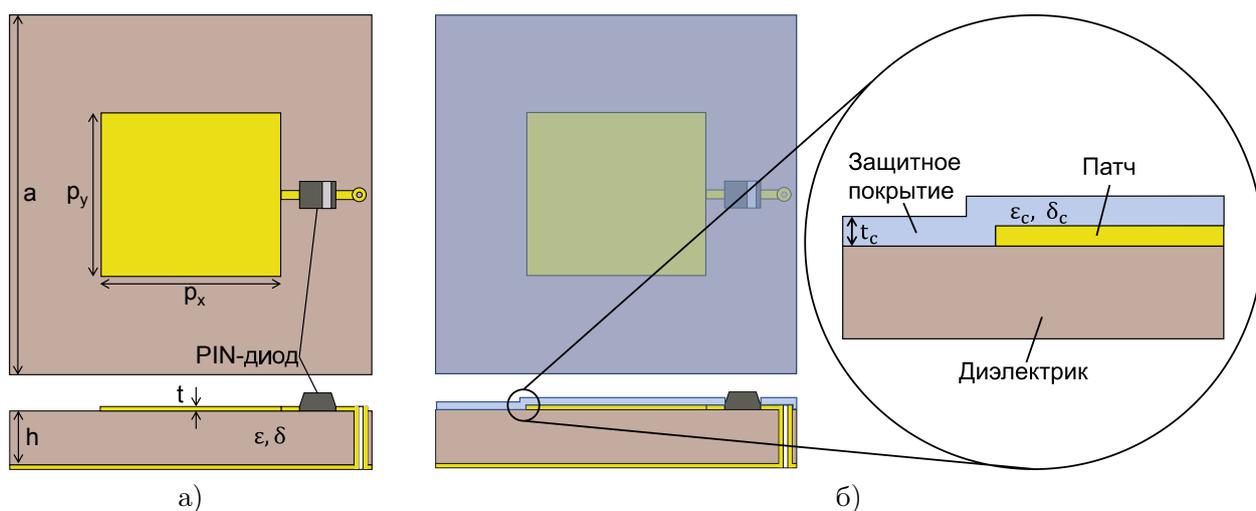


Рис. 1. Структура ЭЯ без покрытия (а) и с покрытием (б).

необходим для изменения фазы отраженной ЭМ волны [9]. Рассмотрим одну из наиболее распространенных архитектур ЭЯ [10] с однобитным квантованием по фазе, которое реализовано через PIN-диод. Структура исследуемой ЭЯ представлена на рис. 1 (а). Каждая ЭЯ состоит из 3 слоев: нижний изготовлен из проводящего материала, средний — из диэлектрика, верхний содержит PIN-диод и прямоугольный патч, который является отражающим элементом. Патч соединен с нижним слоем через переходное отверстие и PIN-диод. PIN-диод может находиться в двух состояниях: открытом (ON) и закрытом (OFF). Каждому состоянию PIN-диода соответствует свой импеданс. На рис. 2 в качестве примера представлены ФЧХ и АЧХ ЭЯ с рабочей частотой 5,3 ГГц для обоих состояний PIN-диода. Параметры ЭЯ подбираются так, чтобы достичь сдвига фаз 180° между состояниями PIN-диода на рабочей частоте [9], что показано на рис. 2 (а). Дополнительно к этому, амплитуды в разных состояниях должны быть близки по значениям, что продемонстрировано на рис. 2 (б).

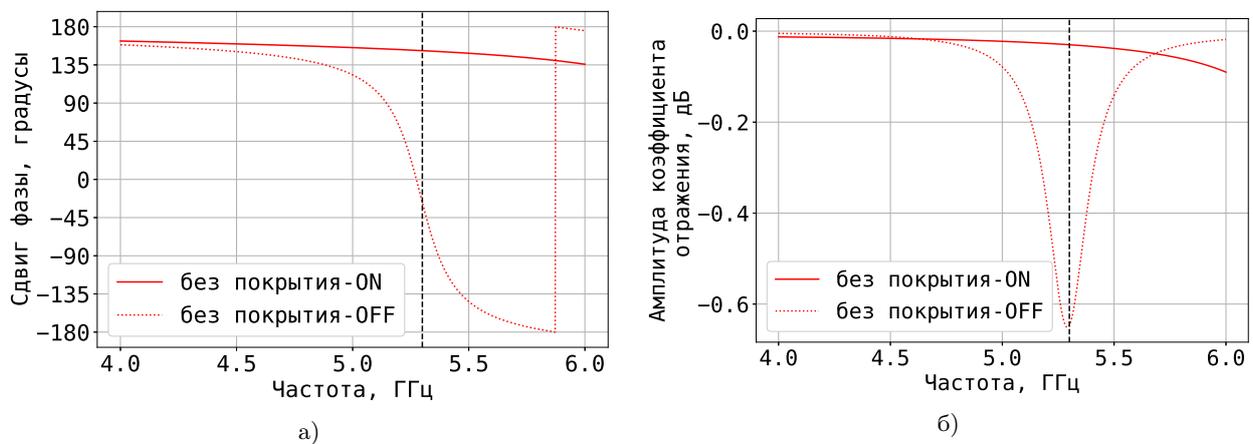


Рис. 2. ФЧХ (а) и АЧХ (б) ЭЯ RIS с рабочей частотой 5,3 ГГц.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЯ

3.1. Моделирование ЭЯ без покрытия

Моделирование ЭЯ проведено в среде ЭМ анализа CST Microwave Studio [11] (CST). В качестве материала нижнего слоя, патча и проводящих соединений используется медь («Copper (pure)» в CST). В качестве материала среднего слоя используется диэлектрик «Taconic TLX-8 (lossy)» с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,55$ и тангенсом угла потерь $\delta = 0,0017$. Длина и ширина квадратной ЭЯ $a = \frac{\lambda}{2}$, где λ — длина волны на рабочей частоте, поскольку в этом случае минимизируется взаимное влияние ЭЯ друг на друга, а также максимизируется диапазон углов отражения [12]. Длина и ширина патча $p_x \approx p_y \approx \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}}$ [13]. В исследуемых ЭЯ используется PIN-диод с индуктивностью $L = 700$ пГн, емкостью $C = 230$ фФ, сопротивлением $R = 1,9$ Ом. Для достижения разности сдвига фаз 180° на рабочих частотах, равных 2,6 ГГц и 5,3 ГГц используются параметры ЭЯ, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ЭЯ без покрытия.

Параметры	2,6 ГГц	5,3 ГГц
Длина a квадратной ЭЯ	57,69 мм	26 мм
Длина патча p_x	33,45 мм	13,55 мм
Ширина патча p_y	44,4 мм	13,55 мм
Толщина диэлектрика h	1,6 мм	1,6 мм
Диэлектрическая проницаемость ε	2,55	2,55
Тангенс угла потерь δ	0,0017	0,0017
Толщина металла t	18 мкм	36 мкм

3.2. Моделирование ЭЯ с покрытием

В данной работе рассмотрим нанесение покрытия по всей ячейке таким образом, как показано на рис. 1 (б). Защитное покрытие наносится ровным слоем, повторяя контуры ЭЯ, без воздушных зазоров между покрытием и поверхностью ЭЯ. Материал покрытия обладает следующими параметрами: диэлектрическая проницаемость ε_C и тангенс угла потерь δ_C . В качестве защитного покрытия рассматриваются следующие материалы: политетрафторэтилен (англ.: polytetrafluoroethylene, PTFE) [14], поликарбонат (англ.: polycarbonate, PC) [15], полиэтилентерефталат (англ.: polyethyleneterephthalate, PET) [16], поливинилхлорид (англ.: polyvinylchloride, PVC) [17] и полифталамид (англ.: polyphthalamide, PPA) [18]. Данные материалы позволяют изолировать RIS от влаги и пыли. Значения ε_C и δ_C для каждого из материалов приведены в таблице 2. Толщина покрытия t_C варьируется в диапазоне от 10 до 100 мкм из следующих соображений. При больших значениях увеличиваются потери при отражении, особенно в частотном диапазоне 5,3 ГГц, а при меньших значительно усложняется процесс нанесения покрытия и ухудшаются его защитные свойства. При моделировании меняется только толщина при фиксированном материале защитного покрытия.

Таблица 2. Параметры материалов покрытия.

Материал	Диэлектрическая проницаемость ε_C	Тангенс угла потерь δ_C
PTFE	2,1	0,0003
PC	2,9	0,01
PET	3,2	0,02
PVC	4,0	0,02
PPA	4,2	0,03

Введем следующий критерий допустимых значений параметров защитного покрытия: полные потери P_{full} в ЭЯ, вызванные нанесенным покрытием, не должны превышать 1 дБ на рабочей частоте. Это можно выразить следующим образом:

$$|P_{full}| = |P_{amp} + P_{phase}| \leq 1 \text{ дБ}, \quad (1)$$

где P_{amp} — потери непосредственно при прохождении ЭМ волной через слой диэлектрика, P_{phase} — потери из-за изменения разности сдвига фаз, выраженные в дБ, которые рассчитываются по формуле [19]:

$$P_{phase} = 10 \cdot \log \left(\frac{1 - \cos(\Delta\varphi)}{2} \right). \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — разность сдвигов фаз в положениях ON и OFF.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены результаты моделирования исследуемых ЭЯ на частоте 2,6 ГГц и 5,3 ГГц для различных значений параметров защитного покрытия: толщины t_C ,

диэлектрической проницаемости материала ε_C и тангенса угла потерь δ_C . На основе ФЧХ и АЧХ исследуемых ЭЯ даны рекомендации по выбору материала защитного покрытия и его толщины, а также по коррекции размера патча.

4.1. Рабочая частота 2,6 ГГц

На рис. 3 приведены зависимости сдвигов фаз в состоянии OFF и разности сдвига фаз от толщины защитного покрытия при различных значениях ε_C для ЭЯ с рабочей частотой 2,6 ГГц и $\delta_C = 0$. При этом, если $0 < \delta_C < 0,03$, что соответствует рассматриваемым материалам, значения сдвига фаз меняются незначительно. Это говорит о незначительном влиянии δ_C на ФЧХ ЭЯ для данных материалов. Состояние ON не приведено на рис. 3 по причине незначительного убывания сдвига фаз, которое объясняется расположением точки, соответствующей рабочей частоте, на более пологом участке ФЧХ, чем в состоянии OFF.

Убывание сдвигов фаз в состояниях ON и OFF с ростом t_C приводит к уменьшению рабочей частоты ЭЯ. Поскольку размеры патча остаются неизменными при нанесении защитного покрытия, то при уменьшении рабочей частоты должна расти эффективная диэлектрическая проницаемость [13]. Действительно, при увеличении толщины защитного покрытия и/или при увеличении его диэлектрической проницаемости увеличивается значение эффективной диэлектрической проницаемости диэлектрика ЭЯ ε_{eff} [20], что видно на рис. 4. При этом само наличие защитного покрытия ненулевой толщины существенно влияет на значение ε_{eff} , которое скачкообразно меняется при наличии защитного покрытия. Скачкообразное изменение ε_{eff} приводит к резкому уменьшению сдвига фаз в точке 0,01 мм.

На рис. 5 приведены зависимости амплитуды коэффициента отражения в состояниях ON и OFF от толщины защитного покрытия для различных материалов для исследуемой ЭЯ.

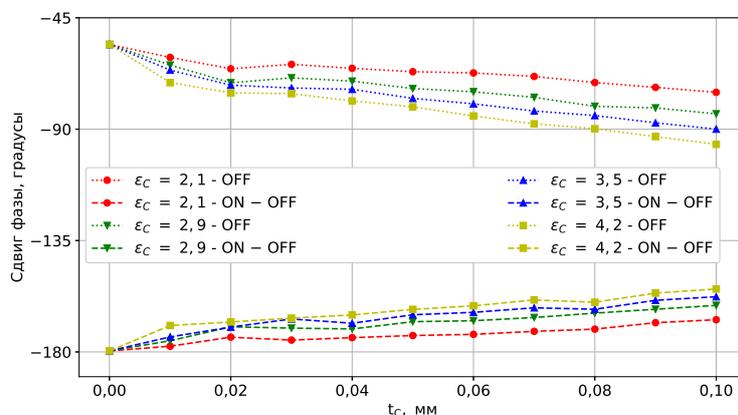


Рис. 3. Значения сдвига фазы на частоте 2,6 ГГц в зависимости от t_C для различных значений ε_C .

В состоянии OFF амплитуда коэффициента отражения увеличивается, поскольку точка рабочей частоты находится на возрастающем участке АЧХ. На рис. 6 представлена зависимость полных потерь, вызванных наличием защитного покрытия, в состояниях ON и OFF от t_C для различных материалов защитного покрытия для исследуемой ЭЯ. Для данной ЭЯ все исследуемые материалы удовлетворяют вышеупомянутому критерию в рассматриваемом диапазоне толщин, поскольку все кривые лежат выше -1 дБ.

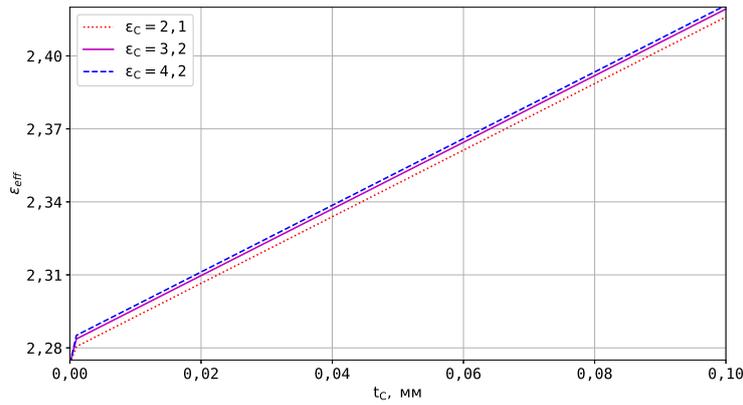


Рис. 4. Зависимость ε_{eff} от t_C при различных ε_C и $\delta_C = 0$.

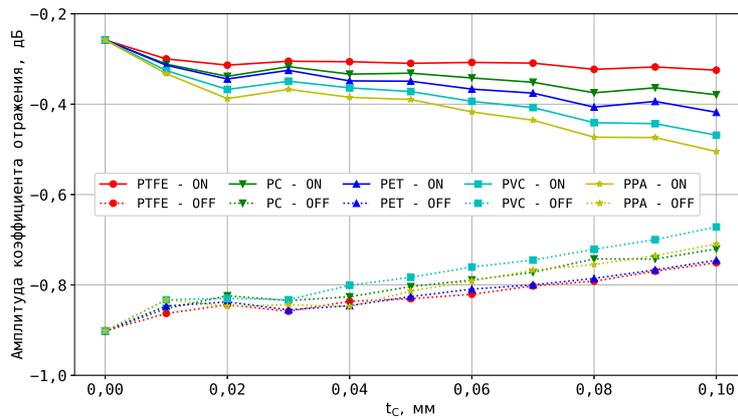


Рис. 5. Зависимости амплитуд коэффициента отражения в состояниях ON и OFF на частоте 2,6 ГГц в зависимости от t_C для различных материалов.

4.2. Рабочая частота 5,3 ГГц

На рис. 7 приведены зависимости сдвигов фаз в состояниях ON и OFF и разности сдвига фаз от толщины защитного покрытия для различных значений ε_C для ЭЯ с рабочей частотой 5,3 ГГц. Характер зависимостей, за исключением состояния ON, схож с ЭЯ с рабочей частотой 2,6 ГГц, однако скорости роста графиков отличаются. Это объясняется изменением отношения длины патча к толщине диэлектрика ЭЯ. Незначительное уменьшение сдвига фаз в состоянии ON объясняется расположением точки, соответствующей рабочей частоте, на практически постоянном участке ФЧХ.

На рис. 8 приведены зависимости амплитуды от толщины защитного покрытия для различных материалов для исследуемой ЭЯ. Амплитуда коэффициента отражения практически не меняется в состоянии ON, а в состоянии OFF незначительно увеличивается. Амплитуда коэффициента отражения в состоянии ON практически постоянная, поскольку точка рабочей частоты находится на практически прямом участке АЧХ, что указано на рис. 2 (б). В состоянии OFF амплитуда коэффициента отражения увеличивается, поскольку точка рабочей частоты находится на возрастающем участке АЧХ.

Наконец, на рис. 9 представлена зависимость полных амплитудных потерь, вызванных наличием защитного покрытия, в состояниях ON и OFF и потерь из-за некорректной разно-

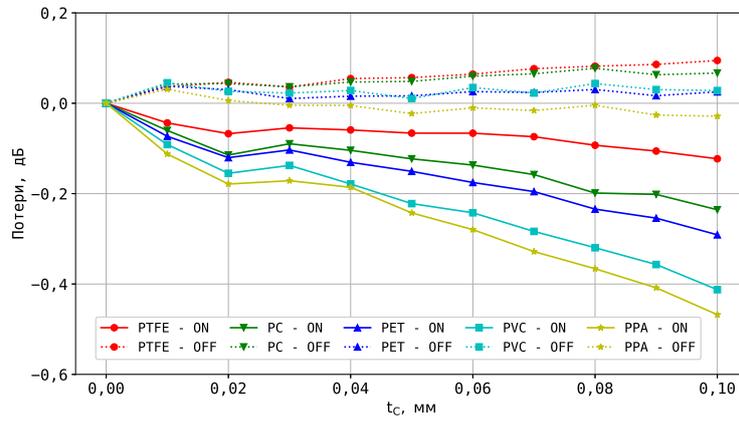


Рис. 6. Зависимости полных потерь в состояниях ON и OFF на частоте 2,6 ГГц от t_C для различных материалов.

сти сдвига фаз от t_C для различных материалов защитного покрытия для исследуемой ЭЯ. Параметры защитного покрытия, удовлетворяющие вышеописанному критерию, указаны в таблице 3.

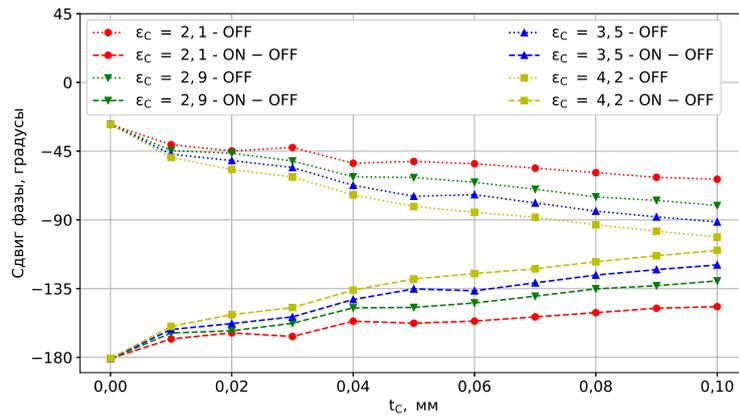


Рис. 7. Значения сдвига фаз на частоте 5,3 ГГц в зависимости от t_C для различных значений ϵ_C .

Потери при прохождении ЭМ волны через материал защитного покрытия вносят несущественный вклад в полные потери. Поэтому необходимо уменьшить рабочую частоту, чтобы для полных потерь P_{full} выполнялось условие $|P_{full}| \leq 1$ дБ. Для этого размеры патча ЭЯ уменьшаются. Полученные рекомендованные значения размеров патча ЭЯ представлены в таблице 4. Тогда на основе значений из этой таблицы можно сформулировать следующие рекомендации по коррекции размера патча ЭЯ. При нанесении защитного покрытия необходимо уменьшать размеры патча на 2,5 % для PET при $t_C > 90$ мкм, на 2,9 % для PVC при $t_C > 60$ мкм, на 3,0 % для PPA при $t_C > 50$ мкм. При остальных значениях толщины коррекция не требуется, поскольку для них полные потери, вызванные покрытием, не превышают 1 дБ.

Полученные результаты будут полезны для оценки конечных метрик, например, пропускной способности [21]. Для этого можно интегрировать разработанные структуры УС в платформы имитационного моделирования, которые поддерживают УС с реалистичными диаграммами направленности, такая как QRIS [22, 23].

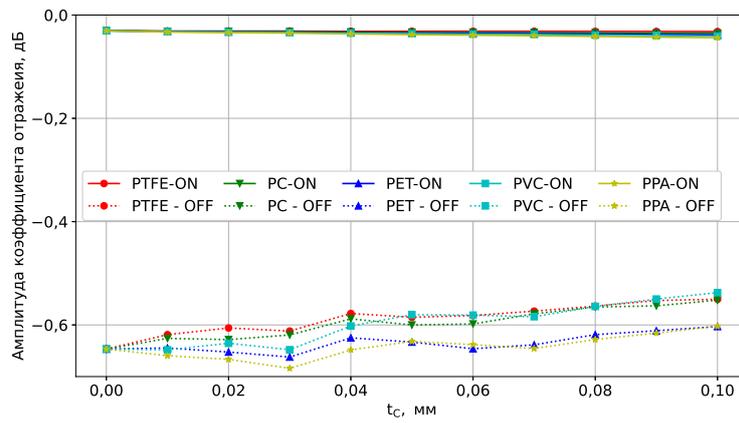


Рис. 8. Значение амплитуды коэффициента отражения на частоте 5,3 ГГц в зависимости от t_C для различных материалов.

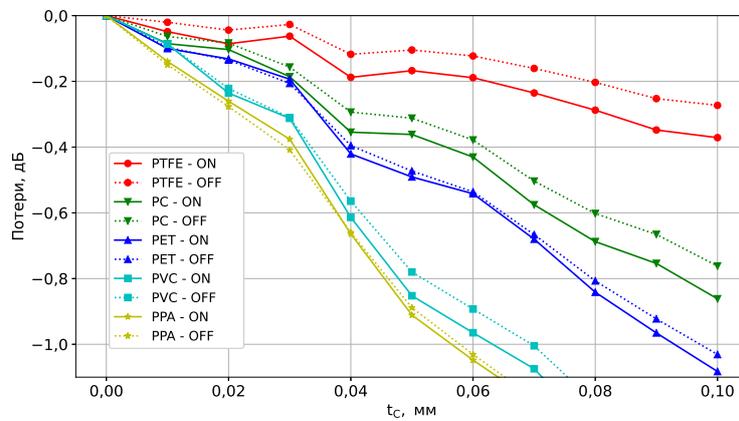


Рис. 9. Потери из-за некорректной разности сдвига фаз и полные потери в состояниях ON и OFF на частоте 5,3 ГГц в зависимости от t_C для различных материалов.

Таблица 3. Допустимые параметры покрытия для исследуемой ЭЯ.

Материал	t_C , мкм
PTFE	10–100
PC	10–100
PET	10–90
PVC	10–60
PPA	10–50

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано влияние защитного покрытия на характеристики ЭЯ RIS. Для этого получены зависимости значений АЧХ и ФЧХ ЭЯ на рабочих частотах 2,6 ГГц и 5,3 ГГц от параметров защитного покрытия. Для данных частотных диапазонов получены значения параметров защитного покрытия, при которых общие потери от внесения покрытия не превышают 1 дБ. Для параметров ЭЯ и материалов защитного покрытия, не удовлетворяющих критерию 1 дБ, приведены рекомендации по коррекции ЭЯ. Полученные результаты позво-

Таблица 4. Рекомендованные измененные значения p_x для исследуемой ЭЯ при различных материалах защитного покрытия.

Материал	Рекомендуемое значение p_x , мм
РЕТ	13,21
PVC	13,16
PPA	13,15

лест учитывать наличие защитного покрытия при проектировании RIS, что позволит быстрее внедрить их в уже развернутые и будущие беспроводные сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khorov E., Levitsky I. Current status and challenges of li-fi: IEEE 802.11 bb. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 35-41.
2. Heikkinen J.J., Laine-Ma T.T., Kivikoski M.A. Flexible fabric-base patch antenna with protective coating. 2007 IEEE antennas and propagation society international symposium. Honolulu: IEEE, 2007, pp. 4168–4171.
3. Abadal S. Programmable metamaterials for software-defined electromagnetic control: Circuits, systems, and architectures. Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 6–19.
4. Chen W. Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold?. IEEE Communications Letters, 2020, vol. 24, no. 9, pp. 2060–2064.
5. Tyarin A. Study of the characteristics of reconfigurable intelligent surfaces with imperfect unit cells. Journal of Communications Technology and Electronics, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 159–166.
6. Cheng C. Gain enhancement of terahertz patch antennas by coating epsilon-near-zero metamaterials. Superlattices and Microstructures, 2020, vol. 139, no. 106390.
7. Pitilakis A. Multifunctional metasurface architecture for amplitude, polarization and wave-front control. Physical Review Applied, 2022, vol. 17, no. 6, pp. 064060.
8. Tyarin A. S., Kureev A. A., Khorov E. M. Fundamentals of Design and Operation of Reconfigurable Intelligent Surfaces. Submitted to Journal of Communications Technology and Electronics (Тярин А.С., Куреев А.А., Хоров Е.М. Базовые принципы построения и работы реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей. Подана в Информационные процессы)
9. Yang H. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. Scientific reports, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 35692.
10. Zhang L. Space-time-coding digital metasurfaces. Nature communications, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 4334.
11. CST STUDIO SUITE, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>. Last accessed 30 June 2023.
12. Delos P. Phased array antenna patterns-part 1: Linear array beam characteristics and array factor. Analog Dialogue, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 1–8.
13. Balanis C.: Modern antenna handbook. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
14. Luo F. Newly developed polytetrafluoroethylene composites based on F8261-modified Li₂Mg₂. 88Ca₀. 12TiO₆ powder. Journal of Alloys and Compounds, 2019, vol. 803, pp. 145–152.
15. Santhoshi D., Karthikeya G. S., Shivani G., Krishna D. R., & Koul S. K. Dielectric loaded polycarbonate based antipodal vivaldi antenna for mmwave 5g applications. 2019 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation. Ahmedabad: IEEE, 2019, pp. 1–4.
16. Wang L., Guo Y. X., Salam B., & Lu C. W. A flexible modified dipole antenna printed on PET film. 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Singapore: IEEE, 2012, pp. 239–240.

17. Крыжановский В. К., Бурлов, В. В., Паниматченко А. Д., & Крыжановская Ю. В. Технические свойства полимерных материалов. Санкт-Петербург: Издательство «Профессия», 2003.
18. Bashford D., & Bashford D. Thermoplastics: Directory and Databook. London: Chapman & Hall, 1997.
19. Yang J. How practical phase-shift errors affect beamforming of reconfigurable intelligent surface?. Preprint. arXiv:2304.06388, 2023.
20. Rano D., Hashmi M.S. Determination of effective dielectric constant and resonant frequency of microstrip patch antenna with multilayered superstrate structures. 2019 49th European Microwave Conference. Paris: IEEE, 2019, pp. 81–84.
21. Khorov E., Krasilov A., Susloparov M., Kong L., Boosting TCP & QUIC Performance in mmWave, Terahertz, and Lightwave Wireless Networks: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, doi: 10.1109/COMST.2023.3301820
22. Burtakov I., Kureev A., Tyarin A., Khorov E. QRIS: A QuaDRiGa-Based Simulation Platform for Reconfigurable Intelligent Surfaces, in IEEE Access, vol. 11, pp. 90670-90682, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3306954.
23. Burtakov I. A. et al. RIS Configuration Aging in time-varying environment. Submitted to Journal of Communications Technology and Electronics

The Influence of Protective Coating on the Characteristics of a Reconfigurable Intelligent Surface

Tyarin A.S., Tronin S.S., Kureev A.A., Khorov E.M.

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) are promising devices capable of increasing the bandwidth and coverage area of new and existing wireless networks. Nowadays, most of these devices are presented in the form of prototypes that have no environmental protection and are not adapted for implementation in existing communication systems. However, protective coating may significantly affect the characteristics of RIS and reduce its effectiveness. This work considers the influence of thickness, dielectric permittivity, and loss tangent of the most common materials for protective coating on the amplitude and phase response characteristics of the RIS unit cell. As a result, the paper gives recommendations on the choice of the material and its thickness and on the correction of unit cell sizes for various parameters of the protective coating.

KEYWORDS: RIS, PIN diode, broadband communication, protective coating, CST Studio.