

Исследование характеристик реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей с неидеальными элементарными ячейками¹

Тярин А.С.*, Куреев А.А.**,**, Хоров Е.М.**,**

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

**Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Поступила в редколлегию 08.09.2022.

Аннотация—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности являются перспективным направлением развития беспроводных сетей будущего. Такие поверхности состоят из элементарных ячеек, меняя состояние которых, можно управлять отражением падающего сигнала. На данный момент детально не изучено влияние неидеальностей элементарной ячейки на ее характеристики. Данная работа призвана заполнить этот пробел.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: RIS, CST Studio, PIN-диод, широкополосная связь

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_210

1. ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: reconfigurable intelligent surface, RIS) является одной из перспективных технологий, способных повысить эффективность как уже развернутых, так и будущих беспроводных широкополосных сетей связи. RIS — это двумерная структура, состоящая из элементарных ячеек (англ.: unit cell), где каждая ячейка может задавать требуемый фазовый сдвиг отраженной электромагнитной (ЭМ) волне относительно падающей волны [1]. Таким образом, RIS способна отражать ЭМ волны в нужном направлении, благодаря чему возможно усиление сигнала на приемном устройстве или, например, подавление помех. Данный принцип работы схож с вогнутым зеркалом, кривизну и направление которого можно менять. При использовании RIS увеличивается пропускная способность и зона покрытия сети. Задание необходимого фазового сдвига требует небольшое количество энергии, что делает RIS энергоэффективней, чем активные ретрансляторы. Также RIS можно устанавливать на больших поверхностях таких, как стены или потолки внутри помещений, здания и вывески [2].

На текущий момент представлено большое количество прототипов RIS [3–6]. Однако, только незначительное количество работ уделяет внимание различным неидеальностям элементарной ячейки, которые приводят к паразитным явлениям. Они могут быть вызваны припоем на контактах управляющего чипа, переходными отверстиями, несоответствием размеров с изначально заданными при изготовлении платы RIS и т.д. Например, в работе [7] наблюдается сдвиг резонансной частоты из-за припоя на компонентах, используемых для поверхностного монтажа. Проводные соединения в таких управляющих чипах, как интегральная схема специального назначения, создают свои паразитные сопротивления и индуктивности [8]. На импеданс отражающего элемента влияет значение угла падения входящей ЭМ волны. Также при увеличении угла падения, влияние состояний управляющего чипа на отражение уменьшается,

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

что было экспериментально подтверждено в работе [9]. По отдельности некоторые из вышеописанных паразитных явлений уже были исследованы в литературе. Однако, исследований, посвященных изучению влияния всех этих явлений в совокупности в одном устройстве RIS, обнаружено не было, что является важной открытой задачей. Заметим, что наличие нескольких неидеальностей не всегда приводит к увеличению искажений, поскольку они могут частично взаимно компенсироваться.

Указанный пробел в исследовании неидеальностей RIS заполняется в данной работе, где изучается независимое и совместное влияние различных неидеальностей элементарной ячейки на ее характеристики. При этом рассматривается одна из наиболее распространенных типов элементарных ячеек, основанная на PIN-диодах, эффективность которых показана в работах [3, 4].

Дальнейшее изложение работы устроено следующим образом. В разделе 2 описывается общая структура RIS и элементарной ячейки. Далее, в разделе 3 приведены результаты моделирования АЧХ и ФЧХ неидеальных элементарных ячеек. В разделе 4 сформулированы основные выводы работы.

2. СТРУКТУРА RIS

Общий вид RIS можно представить в виде плоской периодической пластины, которая состоит из одинаковых элементов, называемых элементарными ячейками, см. рис. 1. Именно строение элементарной ячейки определяет основные характеристики и функции RIS.

Главными компонентами элементарной ячейки являются управляющий чип (англ.: tunable chip) и отражающий элемент (англ.: reflecting element) [11]. Управляющий чип контролирует импеданс отражающего элемента, что влияет на фазовый сдвиг и амплитуду отраженной ЭМ волны, а отражающий элемент физически отражает ЭМ волну. В качестве управляющего чипа используют PIN-диод [12], варикап [6], радиочастотный переключатель [13]. В качестве отражающего элемента используют металлическую прямоугольную патч-антенну с размерами порядка $\lambda/2$, где λ — длина ЭМ волны, с которой должна взаимодействовать RIS. Более точно размеры патч-антенны и самой элементарной ячейки можно рассчитать в таких средах моделирования, как CST Studio [14], Ansys HFSS [15].

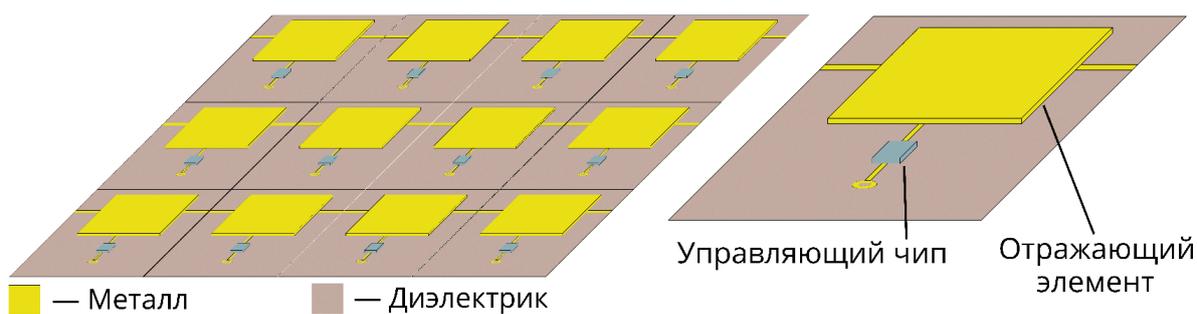


Рис. 1. Структура RIS.

Рассмотрим элементарную ячейку RIS, показанную на рис. 2 и использующую PIN-диод. Для определенности положим, что она предназначена для работы в полосе LTE band 38 (2595 – 2615 МГц). Эффективность такой ячейки показана, в частности, в работах [3, 4].

На верхнем слое располагаются квадратная металлическая патч-антенна из меди толщиной 35 мкм и PIN-диод (BAR6302VH6327). Нижний слой полностью металлический и используется

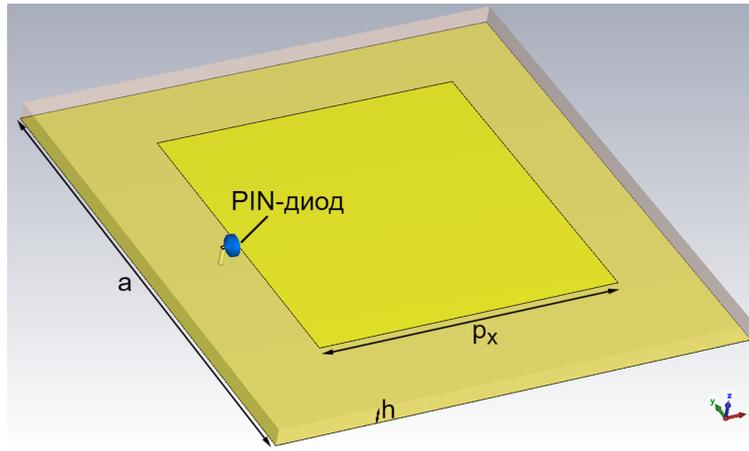


Рис. 2. Структура элементарной ячейки.

для заземления. В качестве подложки (средний слой) используется FR-4, который является стандартным материалом при производстве печатных плат с диэлектрической проницаемостью 4,5. Один контакт PIN-диода подключен к краю патч-антенны, а другой подключен к нижнему слою через переходное отверстие с внешним диаметром 0,6 мм и внутренним 0,3 мм. Остальные размеры элементарной ячейки, которые изображены на рис. 2, обладают следующими значениями $a = 40$ мм, $p_x = 25,2$ мм, $h = 1,5$ мм.

Поскольку PIN-диод обладает только двумя различными состояниями, то он может создать только два различных значения фазовых сдвига. Таким образом можно добиться однобитового квантования по фазе, т.е. принять одно состояние PIN-диода как фазовый сдвиг на 0° , а другое — на 180° . В данной элементарной ячейке, размеры патч-антенны подобраны так, чтобы между двумя состояниями PIN-диода без учета неидеальностей разница фазовых сдвигов составляла 180° в центральной частоте band 38 (2605 МГц). В состоянии прямого смещения (ON) PIN-диод представляет собой эквивалентную схему последовательного подключения резистора ($R = 2$ Ом) и индуктивности ($L = 0,6$ нГн), что представлено на рис. 3(а). В состоянии обратного смещения (OFF) эквивалентная схема PIN-диода является последовательным подключением емкости ($C = 0,3$ пФ) и индуктивности ($L = 0,6$ нГн), что представлено на рис. 3(б).

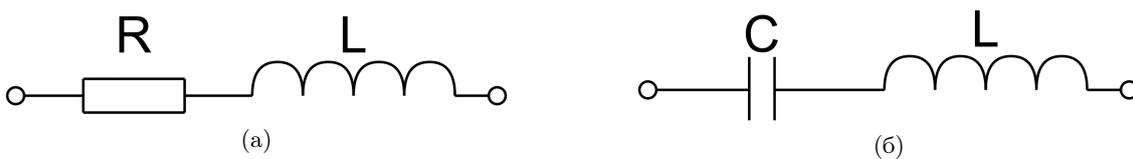


Рис. 3. Эквивалентные схемы PIN-диода в состояниях прямого (а) и обратного (б) смещения.

Данная структура не учитывает наличие объектов, которые присутствуют в составе реальной элементарной ячейки, например, цепь питания управляющего чипа. Однако, они также оказывают свое влияние на ФЧХ и АЧХ элементарной ячейки.

Целью данной работы является исследования характеристик элементарной ячейки при варьировании размеров патч-антенны, цепи питания PIN-диода и при учете неидеальностей элементарной ячейки. Под неидеальностями элементарной ячейки RIS будем понимать объекты, которые вдобавок к патч-антенне и управляющему чипу присутствуют в реальной элементарной ячейке. В данной работе исследуются следующие неидеальности: наличие цепи питания

PIN-диода, различные размеры отступов данной цепи от патч-антенны, отклонения размеров патч-антенн и цепи питания PIN-диода. Выбор данных неидеальностей обосновывается возможными ошибками при производстве платы RIS, а также присутствием у каждой элементарной ячейки цепи питания управляющего чипа с различными параметрами.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕИДЕАЛЬНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Исследуем свойства идеальной элементарной ячейки, описанной в разделе 2, с помощью имитационного моделирования в среде CST Studio.

Далее исследование влияния неидеальностей на ФЧХ и АЧХ элементарной ячейки разделено на следующие этапы. Сначала в подразделе 3.1 моделируется элементарная ячейка без неидеальностей. Далее в подразделе 3.2 изучается влияние отклонения размеров патч-антенны. Следующим этапом является исследование влияния наличия цепи питания PIN-диода в подразделе 3.3. Далее в подразделах 3.4 и 3.5 изучаются влияния варьирования размеров цепи питания PIN-диода. Завершающим этапом является исследование влияния совокупности неидеальностей элементарной ячейки в подразделе 3.6. На каждом этапе оговаривается, какой параметр элементарной ячейки меняется, остальные параметры при этом считаются постоянными.

3.1. Моделирование идеальной элементарной ячейки

В данном подразделе моделируется элементарная ячейка без неидеальностей. Описанная в разделе 2 структура моделируется в среде CST Studio. Результаты моделирования в виде ФЧХ и АЧХ элементарной ячейки представлены на рис. 4.

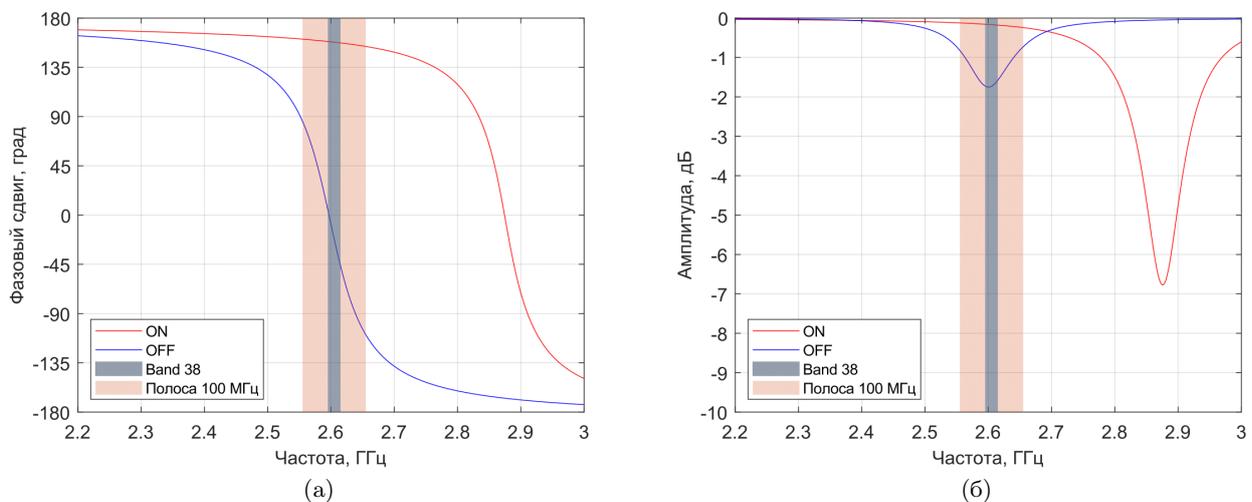


Рис. 4. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки без неидеальностей для состояний ON и OFF.

Из результатов моделирования видно, что разность фазовых сдвигов между состояниями ON и OFF составляет приблизительно 180° . Однако, на краях band 38 наблюдаются отклонения от идеальных 180° в центральной частоте 2605 МГц. На частоте 2595 МГц разность фазовых сдвигов составляет приблизительно 154° , а на частоте 2615 МГц — 204° . Данные отклонения на краях полосы объясняются узкополосностью патч-антенны с PIN-диодом, что демонстрируется в работе [16]. Значение коэффициента отражения по амплитуде уменьшается на не более чем 0,15 дБ относительно значения в центральной частоте во всей полосе. Так

как отклонения фазовых сдвигов от 180° не более 45° и уменьшение по амплитуде составляет не более 1 дБ, то они считаются в пределах нормы в рамках однобитового квантования по фазе и не должны оказать сильного влияния на работу RIS [17]. Поэтому полученные выше результаты будем считать идеальными и в дальнейшем будем считать отклонения от них.

Также на графике выделена полоса 100 МГц, которая может быть использована в сетях LTE при агрегации каналов (англ.: carrier aggregation) или же при использовании сетей 5G (без учета работы в другом частотном диапазоне). Стоит отметить, что разности фазовых сдвигов на границах данной полосы равняются 75° и 263° из чего можно сделать вывод, что данную структуру RIS не стоит использовать в такой полосе. Поэтому, далее будем рассматривать характеристики элементарной ячейки только в полосе band 38, в которой ее использование имеет смысл.

3.2. Исследование влияния отклонения размеров патч-антенны

Первым исследовалось влияние отклонения размеров патч-антенн p_x смоделированной ячейки RIS от произведенной. Данная ошибка связана с неидеальностью производства печатных плат. При изготовлении печатной платы соблюдается определенный класс точности, который и определяет разброс геометрических размеров от идеального значения [18]. Обычно при производстве плат выполняется третий или четвертый класс точности, для которых разброс размеров составляет 0,1 мм и 0,05 мм, соответственно. На рис. 5 представлены результаты моделирования при варьировании размера p_x на 0,1 мм.

Для удобства анализа полученных АЧХ и ФЧХ в таблице 1 представлены значения разностей фазовых сдвигов состояний ON и OFF при варьировании размера p_x для центральной (2605 МГц) и крайних (2595 и 2615 МГц) частот band 38.

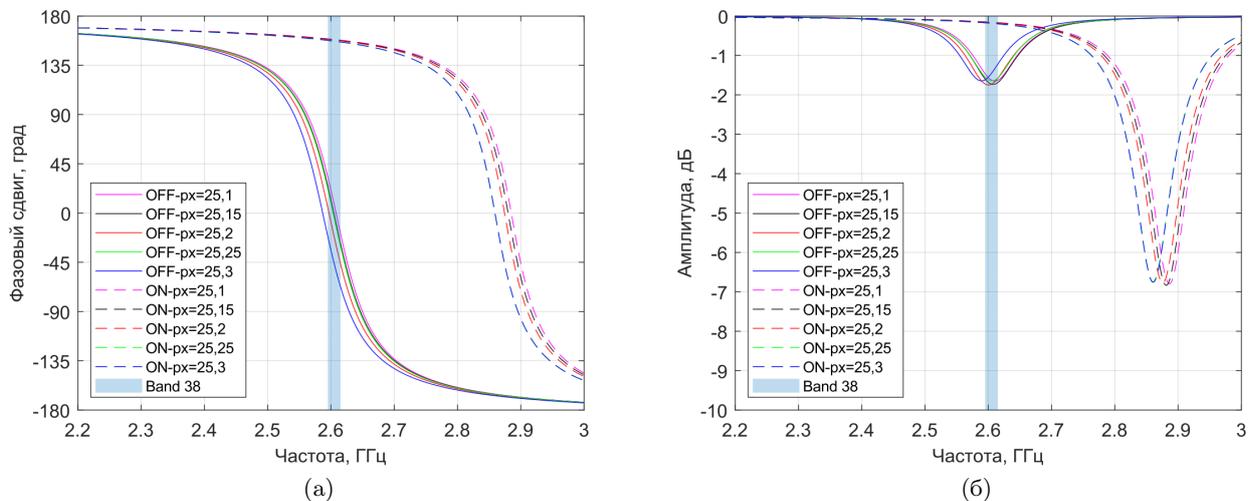


Рис. 5. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF при варьировании размера патч-антенны p_x (указан в мм).

Таблица 1. Разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF при различных значениях p_x .

Частота, МГц	$p_x=25,1$ мм	$p_x=25,15$ мм	$p_x=25,2$ мм	$p_x=25,25$ мм	$p_x=25,3$ мм
2595	127°	135°	154°	136°	179°
2605	151°	160°	180°	161°	203°
2615	177°	185°	204°	187°	224°

Как видно из результатов моделирования, данное явление приводит к отклонению разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF от 180° максимум на 53° , что является критичным. Значение коэффициента отражения по амплитуде меняется незначительно и уменьшается на не более чем 0,11 дБ во всей полосе. Данные отклонения вызваны сдвигом резонансной частоты из-за изменения размеров патч-антенны. Одним из способов частичного устранения этого эффекта является повышение класса точности при изготовлении печатных плат RIS.

3.3. Исследование влияния наличия цепи питания PIN-диода

Исследуем влияние наличия цепи питания PIN-диода. На рис. 6 представлена элементарная ячейка с учётом данной цепи с параметрами $b_{x1} = 0,8$ мм, $b_{x2} = 20$ мм, $b_y = 1,3$ мм. Размер патч-антенны p_x при этом равен 25,2 мм.

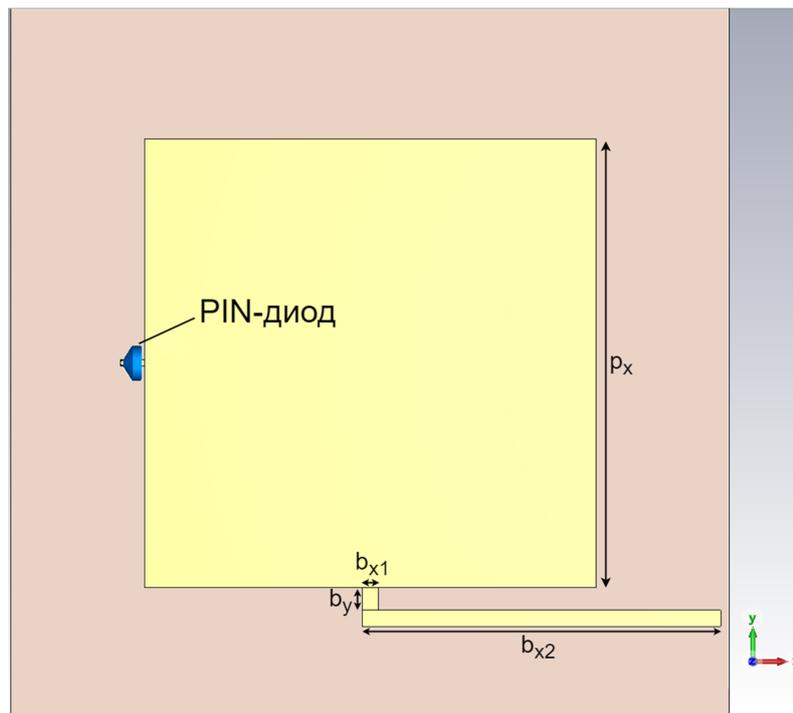


Рис. 6. Вид сверху на элементарную ячейку с цепью питания PIN-диода.

Данная цепь находится на том же слое, что и патч-антенна, поэтому она является паразитным отражателем. На рис. 7 представлены АЧХ и ФЧХ элементарной ячейки с учетом цепи питания. Разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF составляют 119° , 145° , 172° для частот 2595 МГц, 2605 МГц и 2615 МГц, соответственно. Таким образом, максимальное отклонения данных разностей от требуемой величины в 180° составляет 61° , что превышает максимально допустимое значение. При этом коэффициент отражения по амплитуде уменьшается, но не более чем на 1,08 дБ во всей полосе. Также на АЧХ в состоянии ON с цепью питания появляется изгиб, однако он находится вне рабочего диапазона частот RIS. Для того чтобы уменьшить влияние цепи питания PIN-диода, необходимо изменить размер патч-антенны p_x . Также можно использовать большее количество слоев металлизации при проектировании элементарной ячейки и провести данную цепь питания на слое отличного от верхнего, что уменьшит ее влияние. Однако, это приведет к усложнению конструкции RIS и удорожанию ее стоимости. Таким образом учет цепи питания является необходимым при проектировании элементарной ячейки RIS.

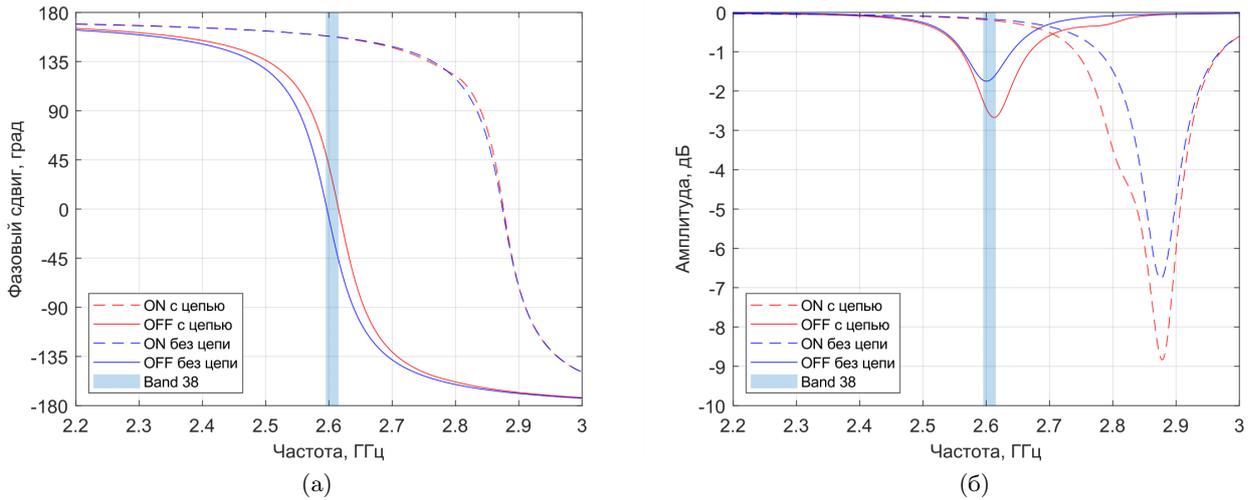


Рис. 7. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF с учетом наличия цепи питания PIN-диода.

3.4. Исследование влияния варьирования размера b_y цепи питания PIN-диода

Исследуем влияние варьирования размера b_y цепи питания PIN-диода. Как показано в разделе 3.3, данная цепь участвует в отражении ЭМ волны вместе с патч-антенной. Однако, так как у каждой элементарной ячейки своя независимая цепь питания PIN-диода, то разводка платы предполагает четыре разных размера b_y у различных элементарных ячеек. Значения этих размеров составляют 1,3 мм, 2,6 мм, 3,9 мм и 5,2 мм. На рис. 8 представлены результаты моделирования при варьировании размера b_y на эти значения.

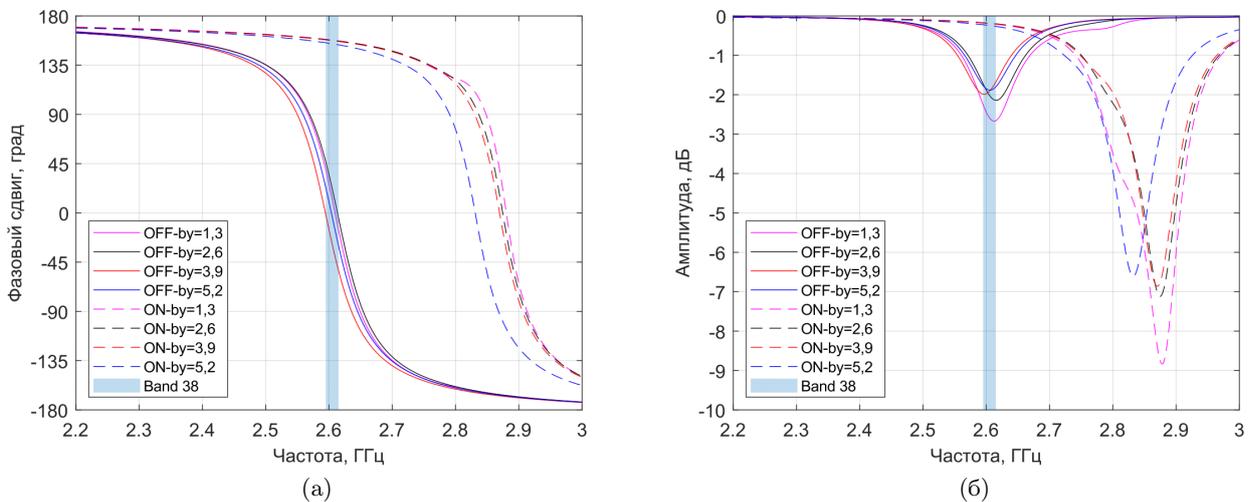


Рис. 8. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF при варьировании размера цепи питания PIN-диода b_y (указан в мм).

В таблице 2 представлены значения разностей фазовых сдвигов состояний ON и OFF при варьировании размера b_y цепи питания PIN-диода для частот 2595 МГц, 2605 МГц и 2615 МГц.

Результаты моделирования демонстрируют, что коэффициент отражения по амплитуде уменьшается относительно элементарной ячейки из раздела 3.3 на не более чем 0,05 дБ во всей

Таблица 2. Разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF при различных значениях b_y .

Частота, МГц	$b_y=1,3$ мм	$b_y=2,6$ мм	$b_y=3,9$ мм	$b_y=5,2$ мм
2595	119°	112°	160°	133°
2605	145°	136°	186°	158°
2615	172°	162°	209°	184°

полосе. Разность фазовых сдвигов ON и OFF ухудшается при этом максимум на 7°. Тогда, если скорректировать размер патч-антенны, чтобы скомпенсировать влияние цепи питания, то отклонение разности фазовых сдвигов находится в пределах нормы.

3.5. Исследование влияния отклонения толщины цепи питания PIN-диода

Исследуем влияние отклонения толщины цепи питания PIN-диода b_{x1} смоделированной ячейки RIS от произведенной. Причина данного отклонения аналогична отклонению размеров патч-антенны и заключается в неидеальности изготовления печатных плат. На рис. 9 представлены результаты моделирования при варьировании размера b_{x1} на 0,1 мм.

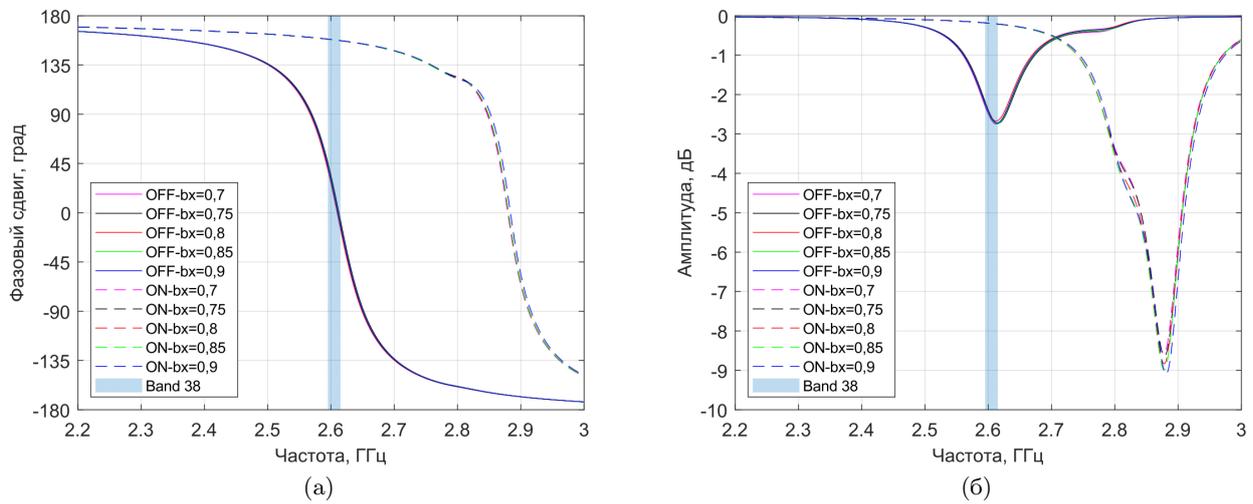


Рис. 9. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF при варьировании размера b_{x1} (указан в мм).

В таблице 3 представлены значения разностей фазовых сдвигов состояний ON и OFF при варьировании размера b_{x1} .

Таблица 3. Разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF при различных значениях b_{x1} .

Частота, МГц	$b_{x1}=0,7$ мм	$b_{x1}=0,75$ мм	$b_{x1}=0,8$ мм	$b_{x1}=0,85$ мм	$b_{x1}=0,9$ мм
2595	119°	113°	119°	116°	117°
2605	144°	137°	145°	141°	142°
2615	172°	165°	172°	169°	169°

Как видно из результатов моделирования кривые почти не различимы, и данный эффект не вносит значительного вклада в отклонения разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF и значения коэффициента отражения по амплитуде.

3.6. Исследование влияния совокупности неидеальностей элементарной ячейки

Проведем исследование влияния совокупности неидеальностей элементарной ячейки. Для этого рассмотрим элементарную ячейку с цепью питания PIN-диода $p_x = 25,1$ мм, $b_{x1} = 0,75$ мм и $b_y = 2,6$ мм. При данных параметрах достигается максимально возможное отклонение разности фазовых сдвигов состояний ON и OFF от 180° . На рис. 10 представлены АЧХ и ФЧХ указанной элементарной ячейки, полученные в результате моделирования.

Представленные результаты, позволяют сделать вывод, что коэффициент отражения по амплитуде уменьшается не более, чем на 0,5 дБ во всей полосе, что можно считать допустимым. Однако разность фазовых сдвигов состояний ON и OFF составляет 93° , 113° , 136° для частот 2595 МГц, 2605 МГц и 2615 МГц, соответственно. Таким образом максимальное отклонение от 180° составляет приблизительно 87° , что является очень высоким значением и RIS с такими элементарными ячейками может быть неэффективна.

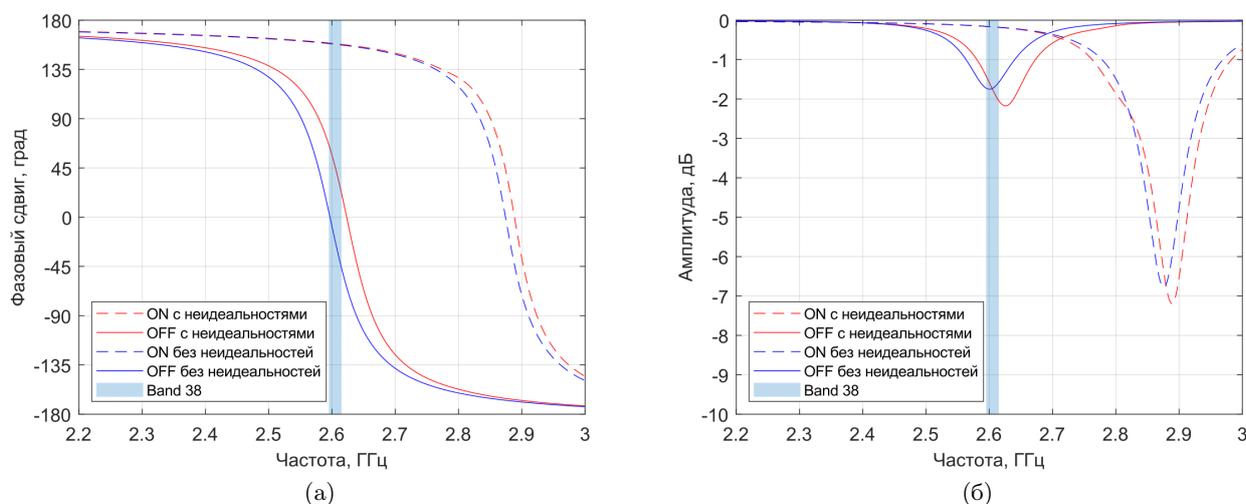


Рис. 10. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF с учетом нескольких неидеальностей одновременно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показано, что при разработке RIS действительно стоит учитывать неидеальности элементарной ячейки. В частности, присутствие цепи питания PIN-диода оказывает значительное влияние на разность фазовых сдвигов. Этот эффект можно компенсировать на этапе проектирования. Для компенсации можно скорректировать размер патч-антенны или использовать структуру с большим числом слоев металлизации, что усложняет проектирование элементарной ячейки и делает дороже производство RIS.

Отклонение размеров патч-антенны и цепи питания от заданных возникают уже на этапе производства, но значительное влияние на значение разности фазовых сдвигов оказывает только варьирование размеров патч-антенны. Частично устранить этот эффект можно, повысив класс точности при изготовлении печатных плат RIS, однако это может значительно увеличить стоимость их производства.

Совокупное влияние нескольких неидеальностей может усиливать искажение фазовых сдвигов до 87° , что может привести к нестабильной работе RIS, однако борьба с этими искажениями требует дальнейшего исследования. В дальнейшей работе будет исследоваться влияние данных отклонений на пропускную способность систем связи с RIS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan C. et al. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions //IEEE Communications Magazine. – 2021. – Т. 59. – №. 6. – С. 14-20.
2. Liu Y. et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities //IEEE Communications Surveys Tutorials. – 2021. – Т. 23. – №. 3. – С. 1546-1577.
3. Zhang L. et al. Space-time-coding digital metasurfaces //Nature communications. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 1-11.
4. Xiao Q. et al. Beam Scanning at Ka-Band by Using Reflective Programmable Metasurface //2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2019. – С. 1-3.
5. Dai L. et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results //IEEE access. – 2020. – Т. 8. – С. 45913-45923.
6. Araghi A. et al. Reconfigurable intelligent surface (ris) in the sub-6 ghz band: Design, implementation, and real-world demonstration //IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 2646-2655.
7. Pitilakis A. et al. Multi-functional metasurface architecture for amplitude, polarization and wavefront control //arXiv preprint arXiv:2204.03962. – 2022.
8. Abadal S. et al. Programmable metamaterials for software-defined electromagnetic control: Circuits, systems, and architectures //IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 6-19.
9. Chen W. et al. Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold? //IEEE Communications Letters. – 2020. – Т. 24. – №. 9. – С. 2060-2064.
10. Access E. U. T. R. User Equipment (UE) radio transmission and reception //3GPP TS. – 2011. – Т. 36. – С. V10.
11. Gong S. et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey //IEEE Communications Surveys Tutorials. – 2020. – Т. 22. – №. 4. – С. 2283-2314.
12. Amri M. M., Tran N. M., Choi K. W. Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: adaptive beamforming and experimental validations //IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 147442-147457.
13. Dunna M. et al. ScatterMIMO: Enabling virtual MIMO with smart surfaces //Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – 2020. – С. 1-14..
14. CST STUDIO SUITE®, CST AG, Germany, www.cst.com.
15. High Frequency Structure Simulator (HFSS), Ansoft Corporation, Pittsburgh
16. Kaina N. et al. Hybridized resonances to design tunable binary phase metasurface unit cells //Optics express. – 2014. – Т. 22. – №. 16. – С. 18881-18888.
17. Kamoda H. et al. 60-GHz electrically reconfigurable reflectarray using pin diode //2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – IEEE, 2009. – С. 1177-1180.
18. ГОСТ Р. 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции //Москва: Стандартинформ. – 2010.

Study of the characteristics of reconfigurable intelligent surfaces with imperfect unit cells

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

Reconfigurable intelligent surfaces are a promising direction for the development of future wireless networks. Such surfaces consist of unit cells, by changing the state of which it is possible to control the reflection of the incident signal. By now, the impact of cell imperfection on its reflecting properties has not been studied in detail. This work aims to fill this gap.

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