

Базовые принципы построения и работы реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей¹

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

^{*} *Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия*

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

Поступила в редколлегию 01 ноября 2023 г. Принята 21 ноября 2023 г.

Аннотация—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable In-telligent Surfaces, RISs) представляют собой перспективный класс устройств, способных повысить пропускную способность и увеличить область покрытия беспроводных сетей будущего. На текущий момент представлены различные типы таких устройств, состоящие из разных элементов, которые могут быть использованы для таких целей, как поглощение сигнала, увеличение пропускной способности, фазовая манипуляция. Это приводит к отсутствию единой концепции и непониманию, какими функциональными возможностями обладают конкретные поверхности. Целью данной работы является устранение данного пробела с помощью описания одной из наиболее широко используемых структур RIS и принципов ее работы, которые позволяют сформулировать основные функциональные возможности RIS.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность, RIS, мета-поверхность, 6G

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_488

1. ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surfaces, RISs) представляют собой перспективный класс устройств, потенциально способных повысить пропускную способность и увеличить область покрытия беспроводных сетей. RIS демонстрирует свою эффективность как в одноантенных системах связи [1, 2], так и в многоантенных [3]. Прирост пропускной способности при использовании RIS может наблюдаться как в помещениях [4, 5], так и в городской застройке [6, 7]. Особенно сильный эффект ожидается для систем связи, работающих в миллиметровом и терагерцовом диапазонах [8, 9].

RIS является регулярной плоской структурой, состоящей из элементарных ячеек (англ.: Unit Cell, UC), которые могут управлять амплитудой и/или фазой отражаемой электромагнитной (ЭМ) волны при подаче на них управляющих внешних сигналов с помощью контроллера. Основными компонентами UC являются отражающий элемент и управляющий чип: в качестве отражающего элемента часто используются патч-антенна, а в качестве управляющего чипа — PIN-диод или варикап. В литературе существует большое количество работ, посвященных исследованию RIS, в которых под RIS понимают разные устройства, в частности, реконфигурируемые метаповерхности очень сложной структуры, например на основе жидких кристаллов [10]. Данные работы не описывают, чем обусловлен выбор конкретной конструкции RIS, и не дают детальных объяснений принципов работы используемого прототипа. В

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

свою очередь, именно структура RIS определяет ее функциональные возможности, такие как отклонение луча [11], поглощение [12] или фазовая манипуляция отраженного сигнала [13].

Существует большое количество обзорных работ, в которых описывается устройство RIS, [14, 15, 16, 17, 18, 19], однако большинство из них являются сложными для первого ознакомления и не дают полного представления о работе RIS. Например, в работе [14] дано общее описание структуры RIS, в работе [17] дано описание обобщенного закона Снэлла, лежащего в основе работы RIS, а выбор фазового сдвига обычно описывается только в экспериментальных работах, например, [20, 21, 22, 23].

Целью данной работы является описание структуры RIS, основанной на патч-антеннах и изложение основных принципов ее работы, которые позволяют спроектировать RIS для увеличения области покрытия сети и снижение интерференции соседних устройств. Приведенная в работе структура RIS является наиболее перспективной на данный момент для использования в сетях Wi-Fi [6], а также в системах связи пятого (5G) [24] и шестого (6G) [25] поколений.

Работа организована следующим образом. В разделе 2 описывается структура RIS на основе патч-антенн. В разделе 3 представлены принципы работы RIS. В разделе 4 описываются особенности выбора значения фазового сдвига между падающей и отражаемой ЭМ волнами для каждой УС. В разделе 5 обсуждаются возможности RIS по управлению распространения ЭМ волны. Наконец, в разделе 6 приведено заключение к данной работе.

2. СТРУКТУРА RIS НА ОСНОВЕ ПАТЧ-АНТЕНН

На данный момент RIS на основе патч-антенн является самой популярной среди исследователей, что обосновывается простотой конструкции и низкой стоимостью [3]. Общий вид RIS на основе патч-антенн (далее просто RIS) представлен на рис. 1. Управление RIS осуществляется с помощью приложения напряжений смещений на каждую УС. За подачу управляющего напряжения смещения отвечает контроллер RIS, в качестве которого используется микроконтроллер или программируемая логическая интегральная схема.

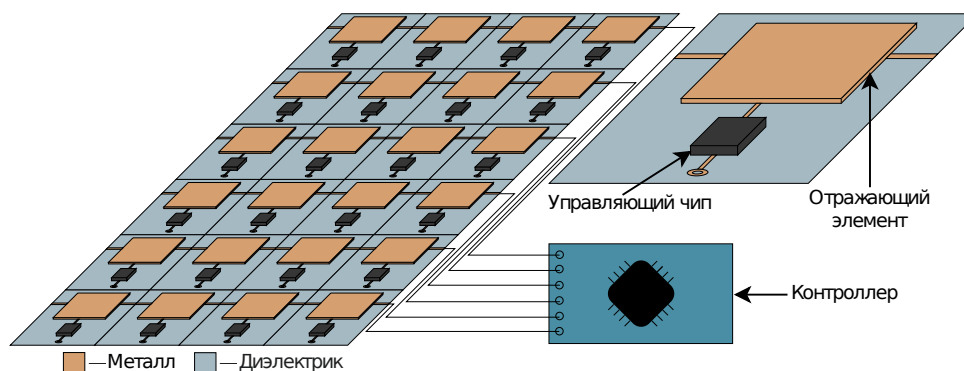


Рис. 1. Общий вид структуры RIS.

УС обладает многослойной структурой, состоящей минимум из трех слоев, поэтому для изготовления RIS обычно используют текстолит хотя бы с двумя слоями металлизации. Рассмотрим далее структуру УС, изображенную на рис. 1 и состоящую из двух слоев металла и одного слоя диэлектрика между ними. На верхнем слое находится отражающий элемент, который соединен с управляющим чипом. Управляющий чип может располагаться как на верхнем слое [26], так и на нижнем [27]. В качестве отражающего элемента используется металлическая патч-антенна, размеры которой определяют частоту ЭМ волны, с которой будет работать

RIS. Размеры патч-антенны порядка $\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}}$, где λ — длина ЭМ волны, с которой взаимодействует RIS, а ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика УС. Управляющий чип является микросхемой или полупроводниковым прибором, с помощью которого можно менять импеданс УС для управления фазой и амплитудой отраженной ЭМ волны. Подробнее процедура управления фазой и амплитудой рассмотрена в разделе 3.

Ниже слоя с отражающим элементом располагается слой с диэлектриком, важными характеристиками которого являются диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь и толщина. Диэлектрическая проницаемость отвечает за усиление отраженной ЭМ волны — чем ниже диэлектрическая проницаемость, тем выше усиление. Тангенс угла потерь определяет угол, на который отличается сдвиг фаз между током и напряжением в реальных радиоэлементах относительно идеальных элементов, поэтому чем он меньше, тем меньше потери энергии в УС. Для минимизации потерь при отражении, необходимо использовать диэлектрик, у которого значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь близки к нулю. На практике текстолиты, которые используются при изготовлении RIS, обладают значениями диэлектрической проницаемости в диапазоне от 2 до 4,5 и тангенса угла потерь от 0,0009 до 0,0037 [4, 11, 20, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33]. Чаще всего слой диэлектрика выполняется из стеклотекстолита FR4 [28, 30, 33] или F4B [11, 31].

Ниже диэлектрика находится слой металла для заземления. Можно использовать и большее количество слоев, например, под коммутацию элементов с контроллером. Однако такие RIS в данной работе не рассматриваются.

3. ПРИНЦИПЫ АНОМАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ RIS

Опишем взаимодействие RIS с ЭМ волной. Для этого рассмотрим падение плоской монохроматической ЭМ волны в приближении дальнего поля на поверхность RIS, как показано на рис. 2. Главным процессом взаимодействия ЭМ излучения с RIS является отражение, при этом верхний слой RIS выступает в роли отражающей поверхности. Пусть Δx — расстояние между соседними УС, Φ — фазовый сдвиг на одной из этих УС, а $\Delta\Phi$ — разность фазовых сдвигов между ними. Создание скачков фазовых сдвигов между соседними УС приводит к разрыву и непостоянству фазы по всему верхнему слою RIS. В таком случае классический закон отражения, при котором углы падения и отражения равны, не работает, т.е. происходит *аномальное отражение*. Такое явление описывается обобщенным законом Снэлла для отражения [34], который можно выразить следующим образом:

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{2\pi n} \frac{\Delta\Phi}{\Delta x}, \quad (1)$$

где θ_i — угол падения; θ_r — угол отражения; n — показатель преломления среды распространения ЭМ волны; λ — длина волны. При $\frac{\Delta\Phi}{\Delta x} = 0$ выражение (4) принимает вид классического закона отражения.

Поскольку фазовый сдвиг каждой УС RIS управляется независимо, то с помощью выражения (4) можно определить, какую разность фазовых сдвигов необходимо создать между соседними УС. Разность фазовых сдвигов, необходимая для отражения ЭМ волны на угол θ_r при падении под углом θ_i , равна:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n \Delta x}{\lambda} (\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i)). \quad (2)$$

Рассмотрим, каким образом с помощью настройки RIS можно обеспечить требуемую разность фазовых сдвигов. Предполагается, что размеры УС меньше длины ЭМ волны, с которой

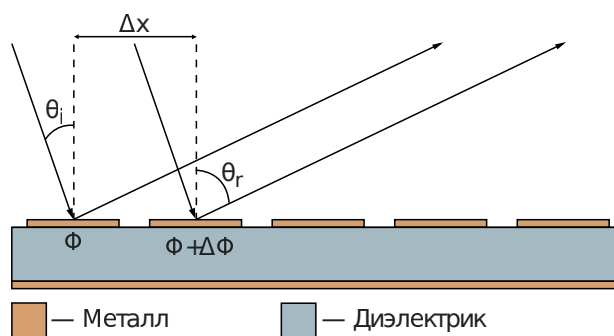


Рис. 2. Отражение ЭМ волны от RIS.

взаимодействует RIS, поэтому ее можно рассматривать как линию передачи [35]. Тогда с помощью выражения для коэффициента отражения можно найти, при каких значениях импеданса на соседних элементах будет достигаться заданная разность фазовых сдвигов между ними при заданной круговой частоте ω падающего ЭМ излучения. Комплексный коэффициент отражения $\Gamma(\omega)$ УС определяется ее входным импедансом Z_{in} , который включает в себя импедансы управляющего чипа и отражающего элемента, и волновым сопротивлением вакуума Z_o , которое является постоянным и равно 377 Ом:

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} = |\Gamma|e^{i\Phi(\Gamma)}, \quad (3)$$

где $|\Gamma|$ — коэффициент отражения по амплитуде, а $\Phi(\Gamma)$ — разность фаз между падающей и отраженной ЭМ волной, т.е. фазовый сдвиг. Тогда разность фазовых сдвигов, которая задается между соседними элементами с номерами n и $n + 1$ выражается как

$$\Delta\Phi = \Phi_n(\Gamma) - \Phi_{n+1}(\Gamma).$$

Для расчета Γ используются такие среды ЭМ анализа, как CST Microwave Studio [36], HFSS [37], где рассчитываются амплитудно- и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) УС. ФЧХ позволяет определить значение фазового сдвига $\Phi(\Gamma)$ на требуемой частоте, а АЧХ — значение коэффициента отражения $|\Gamma|$. Таким образом, после определения фазового сдвига из ФЧХ и коэффициента отражения из АЧХ с помощью выражений (2) и (3) можно получить зависимость между входным импедансом Z_{in} и желаемым углом отражения θ_r :

$$\theta_r = \arcsin \left(\frac{\lambda}{2\pi n \Delta x} \left(\text{Arg} \left(\frac{Z_{in,n} - Z_o}{Z_{in,n} + Z_o} \right) - \text{Arg} \left(\frac{Z_{in,n+1} - Z_o}{Z_{in,n+1} + Z_o} \right) \right) + \sin(\theta_i) \right). \quad (4)$$

4. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ЗНАЧЕНИЙ СДВИГА ФАЗ

Диапазон фазового сдвига зависит от используемого в УС управляющего чипа. Для обеспечения непрерывного диапазона от 0 до 2π можно использовать аналоговый фазовращатель. Однако использование фазовращателей в составе RIS приводит к использованию высокого аналогового напряжения, которое трудно получить в маломощных схемах, а также к снижению мощности отраженного сигнала по сравнению с мощностью падающего сигнала [3]. Альтернативой аналоговому фазовращателю является варикап. Данный элемент позволяет варьировать значение разности фаз в широком непрерывном диапазоне и обеспечивает меньшее ослабление отраженной от RIS ЭМ волны. Также для снижения стоимости RIS и упрощения ее конструкции используются элементы, способные изменять фазу отраженной ЭМ волны на

ограниченный набор фиксированных значений. Для регулировки разности фазовых сдвигов, описанной выражением (2), с помощью данных элементов используется фазовое квантование.

В случае однобитного фазового квантования можно использовать следующее выражение:

$$\Delta\Phi_q = \begin{cases} \pi, & \text{если } \pi/2 \leq \Delta\Phi \leq 3\pi/2, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $\Delta\Phi_q$ — квантованное значение разности фазовых сдвигов. Для его реализации используют PIN-диод [38, 7], радиочастотный коммутатор с двумя линиями передачи [3, 39] или варикап (при использовании двух управляющих напряжений) [2, 40]. На рис. 3 в качестве примера представлены АЧХ и ФЧХ однобитной УС с PIN-диодом, полученные при моделировании в CST Studio. Как видно из результатов моделирования, на частоте 2605 МГц достигается разность между двумя состояниями PIN-диода, равная 180° , что соответствует однобитному квантованию по фазе. Стоит отметить, что в реальных условиях возможны отклонения от 180° градусов, вызванные различными неидеальностями УС [41] или ее защитным покрытием [42]. Для достижения большего количества состояний необходимо использовать более сложные структуры УС, содержащие, например, варикап (при использовании нескольких управляющих напряжений) [13], радиочастотный коммутатор и несколько линий передач [3] или несколько PIN-диодов [30].

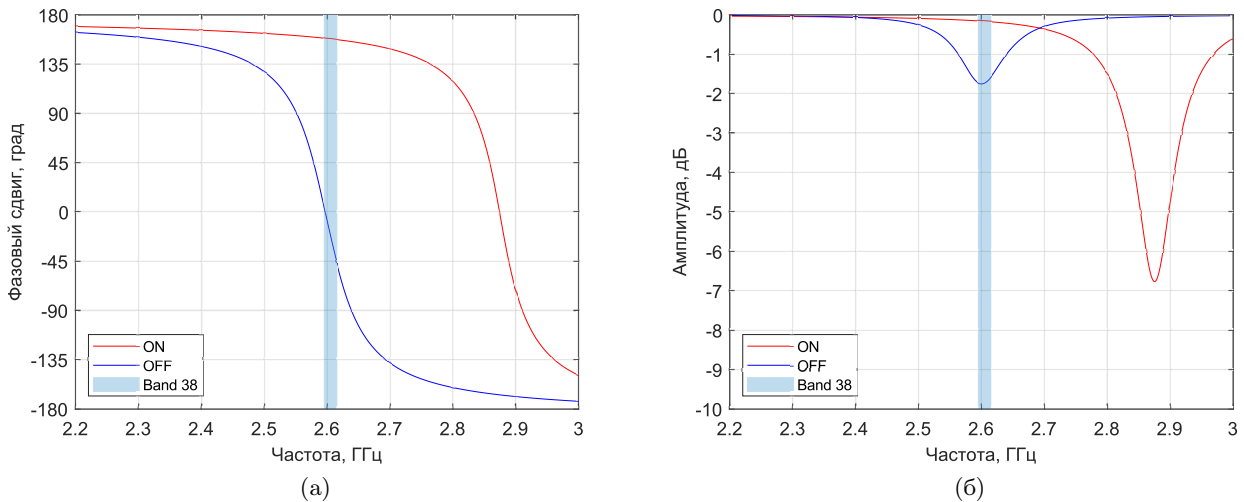


Рис. 3. ФЧХ (а) и АЧХ (б) элементарной ячейки для состояний ON и OFF.

Таким образом можно регулировать фазовые сдвиги на всех элементах RIS как в непрерывном диапазоне, так и в заданном дискретном множестве, добиваясь тем самым различных манипуляций с падающей ЭМ волной.

5. ВОЗМОЖНОСТИ RIS ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЭМ ВОЛНЫ

В разделе 3 показано, что *аномальное отражение* является основным физическим принципом, лежащим в основе работы RIS. С помощью регулировки импеданса каждой УС аномальное отражение позволяет выполнять большую часть преобразований ЭМ волны. Рассмотрим наиболее известные из них.

Отклонение луча. Под отклонением луча понимается отражение, при котором не работает классический закон отражения. В этом случае угол отражения может быть любым заранее

заданным, при условии соблюдения обобщенного закона Снэлла (2). Отклонения луча в заданном заранее направлении можно добиться с помощью создания одинаковой разности фазовых сдвигов между соседними элементами. Чаще всего RIS используют именно для отклонения луча [11, 31, 43]. Оно позволяет отражать сигнал от передатчика напрямую к приемнику, что позволяет повысить мощность сигнала на нем.

Формирование луча (фокусирование). С помощью формирования луча можно добиться фокусирования ЭМ волны, отраженной от RIS, в определенной точке пространства. Так как отраженная ЭМ волна должна сфокусироваться в одну точку, а падение ЭМ волны происходит под одним углом, то в отличие от *отклонения луча*, при котором на соседних УС создается одинаковая разность фазовых сдвигов, для реализации формирования луча на соседних УС нужно создавать различные разности фазовых сдвигов. Используя выражение (2), можно определить какие фазовые сдвиги нужно создать на каждой УС для реализации формирования луча. На данный момент большинство авторов демонстрируют в своих прототипах именно эту функцию [11, 28, 29].

Фазовая манипуляция. Фазовая манипуляция — один из видов фазовой модуляции, при которой фаза несущего колебания меняется скачкообразно в зависимости от информационного сообщения. Данная функция реализуется через сопоставление каждой фазы из дискретного набора со своей битовой последовательностью. Чаще всего фазовую манипуляцию реализуют в RIS с варикапами ввиду возможности регулировки фазы в широком диапазоне, например, в работе [13]. Архитектура RIS с реализацией данной функции проще, но предоставляет сопоставимую производительность с системой приемник-передатчик, где передатчик выполняет фазовую манипуляцию.

Разделение луча. С помощью разделения луча при отражении одного падающего луча получается несколько основных разнонаправленных лучей. Оно представлено в работах [29, 31]. Для реализации разделения луча авторы поочередно подают напряжение питания и заземляют колонки УС с помощью PIN-диодов, создавая таким образом два основных луча при отражении. В работе [31] авторы используют его для уменьшения волн обратного рассеяния (англ.: backscatter). Кроме этого, разделение луча может быть использовано для многопользовательской передачи, когда каждый из лучей, отраженных от RIS, фокусируется на отдельном пользовательском устройстве.

Поглощение. Поглощение является единственным преобразованием ЭМ волны не основанным на аномальном отражении. С помощью RIS можно добиться поглощения падающей ЭМ волны с коэффициентом поглощения более 90% [12, 44] в заданном диапазоне частот. Для его реализации входной импеданс каждой УС настраивается практически равным импедансу свободного пространства, чтобы коэффициент отражения (3) стремился к нулю. RIS с PIN-диодами позволяет реализовать поглощение в узкой полосе частот шириной до 5 МГц [33] в независимости от несущей частоты. Однако, если требуется поглощение в более широкой полосе частот, необходимо использовать RIS с варикапом [44]. Поглощение позволяет использовать RIS в качестве сенсора, например, для определения угла падения и поляризации ЭМ волны [45, 46]. Также поглощение позволяет использовать RIS для сбора энергии (англ.: energy harvesting) [47], обеспечивая ее дополнительным питанием.

Таким образом, RIS можно использовать для большого количества преобразований ЭМ волны. Однако стоит отметить, что многие из них определяются архитектурой RIS. Поскольку тестирование прототипов с различными архитектурами дорого и трудозатратно, можно использовать платформы имитационного моделирования, в которые можно интегрировать характеристики УС, разработанной в CST, например QRIS [48, 49].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

RIS является перспективным устройством для внедрения в системы беспроводной связи. В данной работе рассмотрена общая структура RIS на основе патч-антенн, являющейся самой популярной и простой. Объяснен принцип аномального отражения, лежащий в основе работы RIS и позволяющий реализовать множество возможностей по изменению ЭМ волны, таких как, например, формирование луча и поглощение. Благодаря им возможно повышение пропускной способности и увеличение области покрытия сети. Также с их помощью можно определять углы прихода падающего сигнала, чтобы производить настройку RIS. Данная работа должна помочь разработчикам и исследователям при разработке прототипов RIS и стандартизации этого многообещающего устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arun V., Balakrishnan H. RFocus: Beamforming Using Thousands of Passive Antennas. NSDI, 2020, pp. 1047–1061.
2. Araghi A. et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 GHz band: Design, implementation, and real-world demonstration. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 2646–2655.
3. Dunna M. et al. ScatterMIMO: Enabling virtual MIMO with smart surfaces. *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2020, pp. 1–14.
4. Alexandropoulos G. C., Shlezinger N., Del Hougne P. Reconfigurable intelligent surfaces for rich scattering wireless communications: Recent experiments, challenges, and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 28–34.
5. 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.
6. Pei X. et al. RIS-aided wireless communications: Prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 8627–8640.
7. Trichopoulos G. C. et al. Design and evaluation of reconfigurable intelligent surfaces in real-world environment. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, vol. 3, pp. 462–474.
8. 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
9. Huang C. et al. Multi-hop RIS-empowered terahertz communications: A DRL-based hybrid beamforming design. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39, no. 6, pp. 1663–1677.
10. Foo S. Liquid-crystal reconfigurable metasurface reflectors. *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, IEEE, 2017, pp. 2069–2070.
11. Zhang L. et al. Space-time-coding digital metasurfaces. *Nature communications*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 4334.
12. Kim H. K., Lee D., Lim S. Frequency-tunable metamaterial absorber using a varactor-loaded fishnet-like resonator. *Applied optics*, 2016, vol. 55, no. 15, pp. 4113–4118.
13. Tang W. et al. Programmable metasurface, based RF chain, free 8PSK wireless transmitter. *Electronics letters*, 2019, vol. 55, no. 7, pp. 417–420.
14. Gong S. et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 2283–2314.
15. Dajer M. et al. Reconfigurable intelligent surface: Design the channel, A new opportunity for future wireless networks. *Digital Communications and Networks*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 87–104.

16. Pan C. et al. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions. *IEEE Communications Magazine*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 14–20.
17. Liu Y. et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577.
18. Sharma T., Chehri A., Fortier P. Reconfigurable intelligent surfaces for 5G and beyond wireless communications: A comprehensive survey. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 24, pp. 8219.
19. Tapio V. et al. Survey on reconfigurable intelligent surfaces below 10 GHz. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, vol. 2021, pp. 1–18.
20. Tran N. M. et al. A novel coding metasurface for wireless power transfer applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, pp. 4488
21. Hum S. V., Okoniewski M., Davies R. J. Modeling and design of electronically tunable reflectarrays. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 2007, vol. 55, no. 8, pp. 2200–2210.
22. Kamoda H. et al. 60-GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2011, vol. 59, no. 7, pp. 2524–2531.
23. Kamoda H. et al. 60-GHz electrically reconfigurable reflectarray using pin diode. *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IEEE*, 2009, pp. 1177–1180.
24. He J. et al. Beyond 5G RIS mmWave systems: Where communication and localization meet. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 68075–68084.
25. Toumi M., Aijaz A. System performance insights into design of RIS-assisted smart radio environments for 6G. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE*, 2021, pp. 1–6.
26. Zheng P. et al. Field trial measurement and channel modeling for reconfigurable intelligent surface. *Digital Communications and Networks*, 2022.
27. Tewes S. et al. Full-duplex meets reconfigurable surfaces: RIS-assisted SIC for full-duplex radios. *ICC 2022-IEEE International Conference on Communications, IEEE*, 2022, pp. 1106–1111.
28. Xiao Q. et al. Beam Scanning at Ka-Band by Using Reflective Programmable Metasurface. *2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), IEEE*, 2019, pp. 1–3.
29. Yang H. et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–11.
30. Dai L. et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results. *IEEE access*, 2020, vol. 8, pp. 45913–45923.
31. Huang C. et al. Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves. *Advanced Optical Materials*, 2017, vol. 5, no. 22, pp. 1700485.
32. Carrasco E., Barba M., Encinar J. A. X-band reflectarray antenna with switching-beam using PIN diodes and gathered elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, vol. 60, no. 12, pp. 5700–5708.
33. Zhu B. et al. Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 97, no. 5, pp. 051906.
34. Yu N. et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 2011, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337.
35. Liang Y. C. et al. Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks. *Science China Information Sciences*, 2021, vol. 64, pp. 1–21.
36. CST STUDIO SUITE, CST AG, Germany, www.cst.com
37. High Frequency Structure Simulator (HFSS), Ansoft Corporation, Pittsburgh

38. Amri M. M., Tran N. M., Choi K. W. Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: Adaptive beamforming and experimental validations. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 147442-147457.
39. Sanchez S. G. et al. AirNN: Neural networks with over-the-air convolution via reconfigurable intelligent surfaces. arXiv preprint arXiv:2202.03399, 2022.
40. Tian S., Liu H., Li L. Design of 1-bit digital reconfigurable reflective metasurface for beam-scanning. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 9, pp. 882.
41. Tyarin A. S., Kureev A. A., Khorov E. M. Study of the Characteristics of Reconfigurable Intelligent Surfaces with Imperfect Unit Cells. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, vol. 67, no. Suppl 1, pp. S159-S166. (Тярин А.С., Куреев А.А., Хоров Е.М. Исследование характеристик реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей с неидеальными элементарными ячейками. Информационные процессы, Том 22, №3, 2022, стр. 210–219.)
42. Tyarin A. S., Tronin S. S., Kureev A. A., Khorov E. M. The Influence of Protective Coating on the Characteristics of a Reconfigurable Intelligent Surface. Submitted to *Journal of Communications Technology and Electronics*. (Тярин А.С., Тронин С.С., Куреев А.А., Хоров Е.М. Влияние защитного покрытия реконфигурируемой интеллектуальной поверхности на ее характеристики. Подана в Информационные процессы.)
43. Ptilakis A. et al. A multi-functional reconfigurable metasurface: Electromagnetic design accounting for fabrication aspects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, vol. 69, no. 3, pp. 1440–1454.
44. Zhao J. et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes. *New Journal of Physics*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 043049.
45. Albanese A. et al. MARISA: A self-configuring metasurfaces absorption and reflection solution towards 6G. *IEEE INFOCOM 2022–IEEE Conference on Computer Communications*, IEEE, 2022, pp. 250–259.
46. Liaskos C. et al. ABSense: Sensing electromagnetic waves on metasurfaces via ambient compilation of full absorption. *Proceedings of the Sixth Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, 2019, pp. 1–6.
47. Eteng A. A. et al. A review of metasurfaces for microwave energy transmission and harvesting in wireless powered networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 27518–27539.
48. 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.
49. Burtakov I. A. et al. RIS Configuration Aging in time-varying environment. Submitted to *Journal of Communications Technology and Electronics*.

Fundamentals of Design and Operation of Reconfigurable Intelligent Surfaces

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

Reconfigurable intelligent surface (RIS) is one of the promising technologies that can increase the bandwidth and coverage area of future wireless networks. At the moment, various prototypes as RIS are presented, which consisting of different elements that can be used for such purposes as signal absorption, capacity increase, phase-shift keying. It leads to a lack of a single concept and a misunderstanding of what functionality RIS has. The purpose of this work is to eliminate this gap using the description one of the most widely used RIS structures and RIS operating principles that enables its main features.

KEYWORDS: Reconfigurable intelligent surface, RIS, metasurface, 6G.