

Исследование устаревания настройки RIS в сценариях с мобильными устройствами¹

А.О. Горбунова*, И.А. Буртаков*,**, А.А. Куреев*,**, Е.М. Хоров*,**

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук
**Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Поступила в редколлегию 01.09.2024 г. Принята 10.10.2024 г.

Аннотация—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) являются перспективной технологией, которая может улучшить пропускную способность и зону покрытия беспроводных сетей. Эффективность RIS зависит от ее конфигурации, которая настраивается с учетом положения передающих и принимающих устройств в пространстве. Со временем настройка RIS может терять актуальность из-за изменения условий окружающей среды, вызванного перемещением устройств и других объектов. В данной работе рассматривается устаревание настройки RIS, полученной с помощью фокусировки и перенаправления отраженного луча в системе с мобильными приемо-передающими устройствами. В работе показано, что различие между необходимым временем перенастройки для компенсации устаревания может достигать сотен миллисекунд для перенаправления и фокусировки. Продемонстрирована ограниченная применимость существующих аналитических выражений для необходимого времени перенастройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: RIS, устаревание канала, временная эволюция, кластерная модель канала, формирование луча, мобильность.

DOI: 10.53921/18195822_2024_24_3_300

1. ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) — многообещающая технология для повышения производительности систем беспроводной связи, позволяющая увеличить мощность полезного сигнала на приемнике, расширить зону покрытия сети и уменьшить интерференцию от других источников сигнала [1]. RIS состоит из большого количества пассивных отражающих элементарных ячеек (англ.: Unit Cell, UC), которые могут менять фазовый сдвиг отраженной от нее электромагнитной волны, например, для формирования отраженного луча и фокусировки его на принимающем устройстве или перенаправления в сторону принимающего устройства. Также, настроенная RIS позволяет повысить надежность передачи данных, чувствительных к падениям производительности системы [2]. Это достигается за счет создания виртуального канала с линией прямой видимости (англ.: Line Of Sight, LOS) между передатчиком (Tx) и приемником (Rx), для чего используются различные алгоритмы настройки фаз UC. Часть известных алгоритмов использует значения канальных матриц системы для формирования набора фаз UC [3–5]. Эти работы предполагают, что значения канальных матриц известны на RIS или на базовой станции, которая имеет соединение с RIS. Из-за своей конструктивной простоты RIS имеет ограниченные возможности получения канальной информации от базовых станций и конечных устройств [6]. Поэтому

¹ Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

с практической точки зрения для управления RIS наиболее интересны алгоритмы настройки, использующие дополнительную информацию о системе, например, о ее геометрической конфигурации [6–8].

Из-за изменения характеристик окружающей среды, вызванной перемещением приемопередающих устройств и других объектов в пространстве, происходит устаревание настройки RIS. Оно влечет за собой падение мощности сигнала на приемнике, что может привести к снижению пропускной способности системы [9] и ее надежности, а также к увеличению задержек при обслуживании трафика реального времени. Однако, настройку RIS нельзя проводить слишком часто, поскольку она занимает время и требует дополнительных канальных ресурсов [10].

Из литературы известны аналитические выражения, позволяющие оценить ширину и глубину луча сигнала, отраженного от RIS [11,12]. Ширина и глубина луча, в свою очередь, могут быть использованы для оценки скорости устаревания настройки RIS. Например, зная скорость движения приемника и ширину луча от RIS, можно оценить время нахождения приемника в этом луче. Однако, область применения этих выражений не исследована, что не позволяет использовать их для всех наиболее распространенных вариантов использования RIS, таких как развертывание в плотной городской застройке. Таким образом, для получения оценок производительности систем с RIS необходимо исследовать скорость устаревания ее настройки с помощью платформы имитационного моделирования.

Данная работа посвящена исследованию устаревания двух основных типов настроек RIS — фокусировки и перенаправления, которые основаны на использовании информации о расположении приемопередающих устройств. С помощью имитационного моделирования в платформе QRIS [13] показано, как размер RIS, расстояние от приемника до RIS, наличие подканала между приемником и передатчиком, а также мобильность приемника влияют на устаревание настроек RIS. Получены оценки периодов перенастройки RIS, которые могут компенсировать устаревание. Помимо этого, в данной работе проводится сравнение результатов моделирования в QRIS с аналитическими выражениями из работ [11,12] и продемонстрированы ограничения их применимости. В работе показано, что расхождение между аналитическим выражением и результатами моделирования может достигать сотен миллисекунд как для малых, так и для больших RIS при наличии в канале рассеивателей сигнала.

Работа устроена следующим образом. В разделе 2 приводится обзор литературы по теме исследования. В разделе 3 представлено описание используемого в статье алгоритма настройки RIS. После этого, в разделе 4 описывается модель системы с RIS, способ расчета канальных матриц, а также оценка ширины луча сигнала, отраженного от RIS. В разделе 5 представлены численные результаты, включающие в себя моделирование в сценариях с мобильным окружением и устройствами. Раздел 6 завершает работу.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существует множество работ, имеющих отношение к устареванию настройки RIS. В работе [14], авторами проведен теоретический анализ и численная оценка воздействия устаревания канала и фазового шума на беспроводные системы, использующие RIS. Авторами данной работы в качестве модели канала использован канал с Райсовскими замираниями (англ.: Rician Fading). Такая же модель канала использована в работе [15], где проведена оценка скорости движущегося пользовательского устройства при его известных координатах. Авторами работы [16] разработан алгоритм отслеживания луча, направленного на движущегося пользователя, при этом применена модель канала с Релеевскими замираниями (англ.: Rayleigh Fading). В работах [17,18] предложены схемы оценки канала с движущимся приемником в системах с поддержкой RIS. В рассмотренных работах [14–18] использованы модели канала с Релеев-

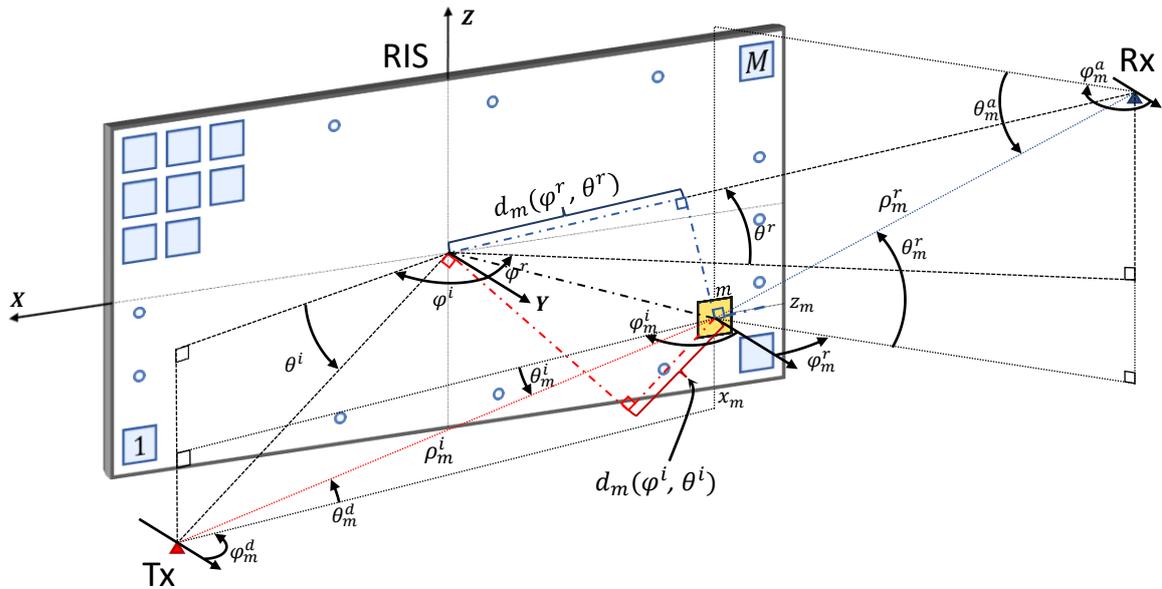


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой системы с RIS.

скими или с Райсовскими замираниями, которые хорошо известны в литературе и просты как в теоретическом, так и в имитационном моделировании. Однако, вышеупомянутые модели не учитывают пространственную корреляцию канала настройки RIS [19]. При использовании данных моделей каналов все собственные значения матриц пространственной корреляции равны и ранги матриц максимальны. Однако в коррелированных каналах ранг может быть меньше, а собственные значения не идентичны, что значительно влияет на моделирование изменяющегося во времени LOS-канала, и, как следствие, устаревание настройки RIS.

Данного недостатка лишены геометрические стохастические модели канала с RIS (англ.: Geometric Stochastic Channel Model, GSCM) [13, 20, 21]. Однако, с помощью данных моделей не проведено исследование устаревания настройки RIS.

Существует класс работ [11, 12, 22, 23], исследующих настройку RIS в ближней и дальней зонах, основываясь на геометрической и волновой оптике. В данных работах исследована ширина и глубина луча от RIS в зависимости от размера RIS и его взаимного расположения относительно других устройств в системе. Однако, в данных работах рассмотрен RIS в свободном пространстве, что не позволяет проводить оценку производительности в сценариях с наличием отражателей в пространстве.

Таким образом, в рассмотренной литературе не затронут вопрос устаревания настройки RIS в моделях канала, позволяющих проводить реалистичные оценки производительности беспроводных систем с мобильными устройствами. Для решения вышеуказанного вопроса в данной работе проводится моделирование системы с RIS в платформе моделирования QRIS [13], основанной на геометрической стохастической модели канала QuaDRiGa [24]. QRIS можно использовать для оценки производительности беспроводных систем с RIS в различных сценариях с любым количеством RIS, передатчиков и приемников.

3. НАСТРОЙКА RIS

3.1. Алгоритмы фокусировки и перенаправления

В данной работе исследуется устаревание настройки RIS, полученной с помощью алгоритмов фокусировки и перенаправления. Рассмотрим алгоритм фокусировки луча от RIS. Под

фокусировкой понимается настройка фазовых конфигураций УС на основе информации о геометрии системы для максимизации мощности сигнала на приемнике. Все геометрические параметры системы изображены на рис. 1.

При настройке RIS с использованием фокусировки предполагается, что электромагнитные волны, отраженные от RIS, распространяются в свободном пространстве. Кроме этого предполагается, что устройству, отвечающему за управление RIS (контроллеру), известны азимутальный угол φ , зенитный угол θ и расстояние ρ до приемника (Rx).

Для описания работы алгоритмов настройки RIS используется оценка амплитуды эффективного поля в точке расположения Rx. Предположим, что УС не меняют амплитуду сигнала и RIS состоит из M УС. Тогда амплитуда однополяризованной электромагнитной волны дается следующим выражением [25]:

$$E_{\text{Rx}}(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{m=1}^M \frac{e^{j\alpha_m}}{\rho_m^i \rho_m^r} e^{-jk_0(\rho_m^i + \rho_m^r)} + E_0, \quad (1)$$

где ρ_m^r — расстояние от m -ой УС до Rx, ρ_m^i — расстояние от m -ой УС до Tx (см. рис. 1), $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число в вакууме для длины волны λ , α_m — значение фазового сдвига на m -той УС, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_M)$, E_0 — поле, формируемое Tx на Rx без участия RIS.

При настройке предполагается, что Tx и Rx обладают всенаправленными диаграммами направленности, рассеяние поля на каждой УС также моделируется как всенаправленное. Данное предположение используется только для работы алгоритма настройки. При вычислении матриц канала используются реалистичные диаграммы направленности, которые могут быть получены с помощью CST Microwave Studio [13].

Фокусировка RIS осуществляется путем выбора фазовых сдвигов УС, которые являются решением следующей оптимизационной задачи.

$$\arg \max_{\hat{\boldsymbol{\alpha}}} |E_{\text{Rx}}(\hat{\boldsymbol{\alpha}})| \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \hat{\alpha}_m \in \Omega, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2b)$$

где $\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_M)$ — дискретные значения фазовых сдвигов на RIS, Ω — множество возможных дискретных фазовых сдвигов УС. В данной работе предполагается, что $\Omega = \{0, 1\}$ в силу использования в качестве управляющего элемента PIN-диода [26, 27] с двумя состояниями.

Для нахождения решения $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^*$ задачи (2) вначале предположим, что фазовые сдвиги на каждой УС являются непрерывными. Тогда непрерывное решение задачи (2) для каждой УС, при котором сигналы от всех УС синфазны на Rx, задается выражением

$$\alpha_m^* = k_0 \rho_m^r + k_0 \rho_m^i + \angle E_0, \quad (3)$$

где $\angle E_0$ — добавочная общая фаза для всех УС, необходимая для обеспечения синфазности поля, сформированного RIS, и поля E_0 . Поскольку $\angle E_0$ на практике не известна, то представим набор фаз УС в виде

$$\boldsymbol{\alpha}(\psi) = (\alpha_1(\psi), \dots, \alpha_m(\psi), \dots, \alpha_M(\psi)), \quad (4)$$

где

$$\alpha_m(\psi) = k_0 \rho_m^r + k_0 \rho_m^i + \psi \quad (5)$$

для всех $\psi \in \Psi = \{\psi_g = \psi_0 + g\Delta\psi \mid g \in \mathcal{G}\} \subset [0, 2\pi)$, где ψ_0 — начальное значение фазы, $\Delta\psi$ — шаг по фазе, $\mathcal{G} \subset \mathbb{N}$. После этого для всех $\psi \in \Psi$, $m = \overline{1, M}$ проведем округление $\alpha_m(\psi)$ до ближайшего по значению элемента из Ω , т.е. получим значения

$$\hat{\alpha}(\psi) = (\hat{\alpha}_1(\psi), \dots, \hat{\alpha}_m(\psi), \dots, \hat{\alpha}_M(\psi)),$$

где

$$\hat{\alpha}_m(\psi) = \arg \min_{\omega \in \Omega} |\alpha_m(\psi) - \omega|, \psi \in \Psi.$$

Поскольку значение ψ , максимизирующее выражение (2), не может быть определено на RIS из геометрической конфигурации системы, то далее выполним перебор по полученным $\hat{\alpha}(\psi)$, $\psi \in \Psi$ [28], позволяющий получить приближенное $\hat{\alpha}^*$, максимизирующее выражение (2). На практике подбор значения ψ проводим при помощи обратной связи от Rx или Tx, например, по значениям мощности сигнала на приемнике при заданной конфигурации RIS и значении ψ .

Алгоритм перенаправления является частным случаем фокусировки, однако при перенаправлении не учитываются расстояния от каждой УС до Tx и Rx. Поэтому, значения фазовых сдвигов необходимо выразить через известные углы направлений на Tx и Rx.

3.2. Оценка ширины луча

Если Rx является мобильным, то при движении он выходит из луча, сформированного RIS, что приводит к устареванию настройки RIS. Для оценки ширины луча, формируемого RIS в точке фокусировки, можно использовать аналитические выражения, представленные в работах [11, 12], в которых RIS рассматривается как пространственный фильтр [29]. Пусть центр RIS расположен в начале координат, УС с всенаправленными диаграммами направленности расположены с периодом $\frac{\lambda}{2}$ в прямоугольной решетке в плоскости Oхz. Если M_x — число УС по Oх, M_z — число УС по Oz, то нормализованное усиление антенной решетки RIS дается выражением

$$G_{\text{RIS},r} = \text{sinc}^2\left(M_x \frac{Dx_r}{\lambda F}\right) \text{sinc}^2\left(M_z \frac{Dz_r}{\lambda F}\right) [\text{дБ}], \quad (6)$$

где $(0, F, 0)$ — точка фокусировки RIS, (x_r, F, z_r) — точка наблюдения, λ — длина волны излучения, D — длина стороны УС.

Половина ширины луча в радианах на уровне α дБ может быть получена следующим образом

$$BW_{\alpha}^{\text{ang}} = \arctan\left(\frac{x_r^{(\alpha)}}{F}\right) [\text{рад.}], \quad (7)$$

где значение координаты $x_r^{(\alpha)}$ соответствует уменьшению $G_{\text{RIS},r}$ на α дБ. Задавая требуемый уровень α и приравнявая его к выражению для $G_{\text{RIS},r}$, можно численно найти соответствующее значение $x_r^{(\alpha)}$ и далее величину BW_{α}^{ang} согласно выражению (7). Выражение (7) можно использовать для оценки ширины луча от RIS в простых сценариях, например в свободном пространстве, не прибегая к имитационному моделированию.

4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ С RIS

Для получения оценки производительности системы с RIS в сценарии, отличном от свободного пространства, необходимо использовать модель канала, которая учитывает изменение

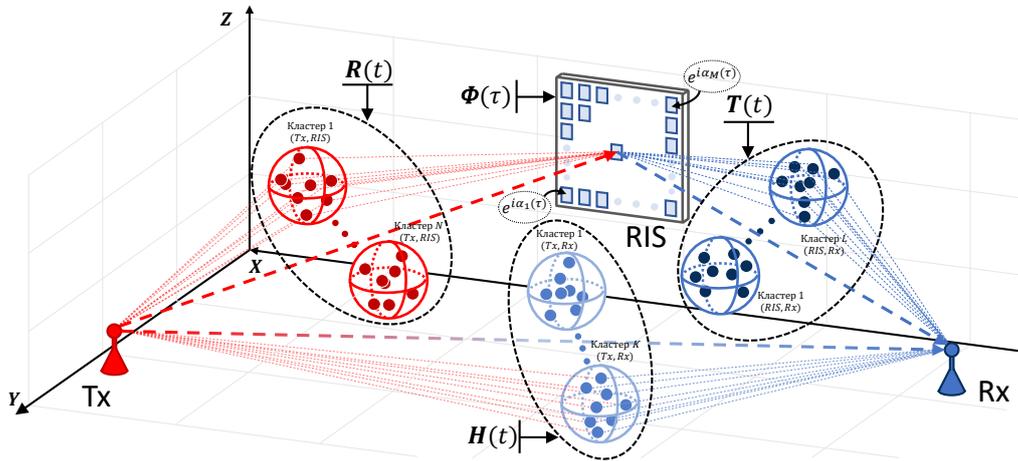


Рис. 2. Рассматриваемая среда Tx, Rx и RIS с произвольным количеством кластеров.

во времени положения RIS Tx, Rx и объекты окружения. В данной работе для получения характеристик канала, используется платформа моделирования QRIS [13].

В QRIS процесс рассеивания сигнала в пространстве моделируется при помощи кластеров. При падении на кластер луч от Tx или RIS разбивается на несколько подлучей с различными фазами и амплитудами [30]. При этом другие параметры подлучей, отраженных от одного кластера, например, задержки, практически не отличаются. Параметры кластера, такие как задержка, углы отклонения и прибытия луча определяются на основе статистических распределений, полученных из измерений в реальном канале. QRIS учитывает временную эволюцию, движение Tx, Rx, эффект Доплера, модель рождения-гибели кластеров, модель дрейфа кластеров [24]. Кроме этого, QuaDRiGa содержит встроенные таблицы параметров для различных сценариев, что позволяет гибко использовать QRIS для оценки производительности систем связи с RIS с различными параметрами окружения.

Рассмотрим SISO-систему (англ.: Single Input Single Output) Tx, Rx и RIS, состоящим из M УС. Исходно QuaDRiGa предназначена для работы с системами из передатчиков и приемников. Поэтому в ней напрямую нельзя смоделировать сценарий, связанный с RIS, поскольку он является одновременно приемным и передающим устройством. В связи с этим, в QRIS RIS представляется как две копии антенного массива, размещенные в одной и той же точке пространства [31]. Одна из копий является принимающим устройством для подканала (Tx, RIS), а вторая — передающим для подканала (RIS, Rx). При построении модели системы с RIS, отдельно рассматриваются подканалы (Tx, RIS), (RIS, Rx) и (Tx, Rx), см. рис. 2. Каждый из этих подканалов представляется как MIMO-канал (англ.: Multiple Input Multiple Output). Результирующая матрица $\tilde{\mathbf{H}}(t)$ суперпозиции подканала (Tx, Rx) и канала через RIS зависит от матриц подканалов между устройствами: $\mathbf{T}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ — вектор из коэффициентов подканала (Tx, RIS), где t — текущее модельное время, $\mathbf{R}(t) \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ — вектор из коэффициентов подканала (RIS, Rx), $\mathbf{H}(t) \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ — коэффициент подканала (Tx, Rx). Фазовый сдвиг на УС моделируется диагональной матрицей $\Phi(\tau) = \text{diag}(e^{j\alpha_1(\tau)}, \dots, e^{j\alpha_M(\tau)})$, где $\tau \leq t$ — время текущей настройки RIS, то есть момент времени, в который была получена матрица Φ при помощи одного из алгоритмов настройки, описанных в разделе 3. Так как в общем случае τ не совпадает с t , настройка RIS может не соответствовать текущему состоянию канала и с ростом t при фиксированном τ является устаревающей. Таким образом, итоговая матрица выглядит следующим образом

$$\tilde{\mathbf{H}}(t) = \mathbf{R}(t)\Phi(\tau)\mathbf{T}(t) + \mathbf{H}(t). \quad (8)$$

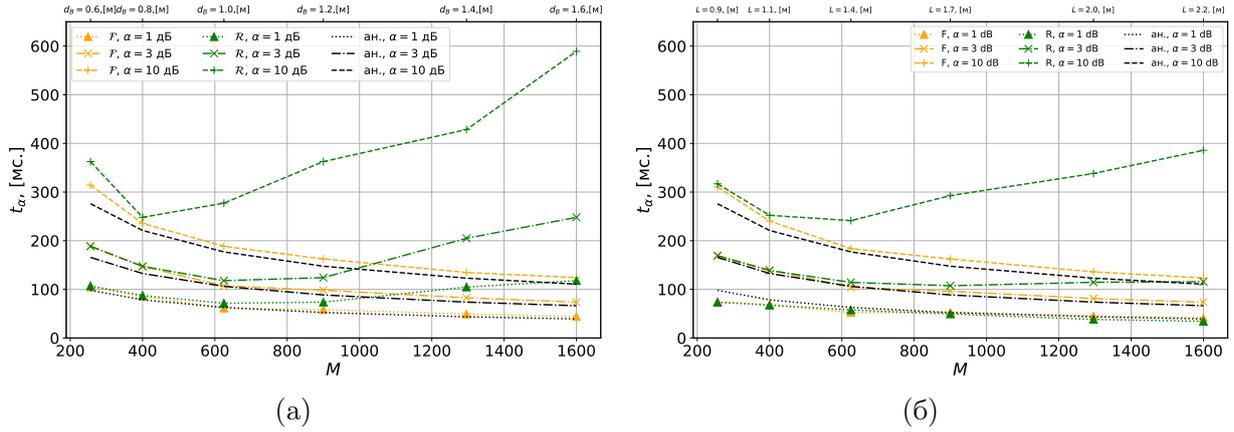


Рис. 3. Зависимость времени перенастройки RIS от M в сценарии (а) Freespace, (б) UMi без подканала (Tx, Rx), $d_{IR} = 3$ м.

5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При получении всех численных результатов в данной работе центральная частота $f_c = 5,3$ ГГц, что соответствует $\lambda = 0,058$ м, мощность передатчика $P_{Tx} = 30$ дБм. Предполагаем спектральную мощность шума равной -173 дБм/Гц с коэффициентом шума 9 дБ, что дает мощность шума $\sigma^2 = -85$ дБм в полосе 80 МГц. Массив элементов RIS моделируется прямоугольной антенной решеткой с числом УС $M_x \times M_z$ и периодом $\frac{\lambda}{2}$ [32]. Для расчета матриц каналов с RIS используется тип УС с нормированной диаграммой направленности мощности излучения $F(\theta) = \cos^{2q}(\theta)$, $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ и усилением $G = \pi$ (5 дБи) [33], где $q = 0,285$ — нормирующий коэффициент, который гарантирует, что эффективная площадь УС в направлении нормали к ней равна $A_{UC} = (\frac{\lambda}{2})^2$ [34], на Tx и Rx используются всенаправленные диаграммы направленности излучения.

Для мобильного Rx рассматриваются сценарий свободного пространства (Freespace) и сценарий открытого городского пространства (UMi). Движение Rx осуществляется в плоскости Oxy с постоянной скоростью $V = 1$ км/ч по окружности радиуса d_{IR} вокруг RIS в секторе $\pm \frac{\pi}{4}$ относительно нормали к центру RIS, сигнал от Tx падает нормально на RIS. Координаты устройств Tx $(-25, 0, 2)$ м, Rx $(-d_{IR} \sin(\theta), d_{IR} \cos(\theta), 2)$ м и RIS $(0, 0, 2)$ м, где $\theta \in [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$, $d_{IR} \in \{3, 5, 10\}$ м.

В сценарии UMi с мобильным Rx эволюция канала во времени обеспечивается дрейфом кластеров и изменением взаимного расположения устройств в пространстве. Перенастройка RIS проводится в момент времени, когда происходит изменение мощности сигнала на Rx на α дБ относительно значения предыдущей настройки. Такой метод перенастройки позволяет проанализировать среднее время существования настройки RIS t_α , при которой мощность сигнала на приемнике совершает скачки не более чем на α дБ. Значения t_α , полученные при помощи моделирования, сравниваются с аналитической моделью времени выхода Rx из луча от RIS, полученными при помощи выражения (7). Если Rx движется по окружности радиуса d_{IR} со скоростью V вокруг RIS в угловом секторе Θ , то время BW_α^{sec} прохождения половины ширины луча уровня α равно

$$BW_\alpha^{sec} = \frac{BW_\alpha^{ang}}{2\pi} \frac{\Theta d_{IR}}{V} [c]. \quad (9)$$

Перейдем к рассмотрению среднего времени перенастройки t_α для фокусировки и перенаправления, полученному с нулевым подканалом (Tx, Rx) в сценариях Freespace и UMi, ре-

зультаты для которых изображены на рис. 3(а) и рис. 3(б) соответственно. Для сценария UMi для NLOS подканала (Tx, Rx) $K_{\mu, \text{UMi}}^{\text{NLOS}} = -100$ дБ, для LOS подканалов (Tx, RIS) и (RIS, Rx) распределение K -фактора логнормальное с $K_{\mu, \text{UMi}}^{\text{LOS}} = 9$ дБ, $K_{\sigma, \text{UMi}}^{\text{LOS}} = 5$ дБ.

С ростом M кривые \mathcal{F} сходятся с аналитической моделью в обоих сценариях и для всех значений α с точностью до 10%. Время перенастройки снижается при увеличении M , поскольку область фокусировки становится меньше в силу увеличения фокусирующей способности RIS. Расхождение между кривыми \mathcal{F} и аналитической моделью на рис. 3(а) при малых M связано с тем, что аналитическая модель (7) предполагает возможность задавать фазы на УС непрерывно по всей поверхности RIS. Поэтому с ростом M расхождение, вызванное этим предположением, уменьшается в силу уменьшения гранулярности RIS. Этим же объясняется тот факт, что на рис. 3(а) аналитическая модель для всех значений M и α показывает время перенастройки меньшее, чем получается при моделировании.

Кривые \mathcal{R} при малых M похожи по поведению на кривые \mathcal{F} , поскольку Rx находится в дальнем поле RIS. Однако, с увеличением M появляется большая расхожимость между кривыми \mathcal{F} и \mathcal{R} , так как алгоритм перенаправления создает широкий луч, в котором дольше остается Rx. Кроме этого, расхождение между \mathcal{F} и \mathcal{R} тем больше, чем больше значение α . Этот факт связан с тем, что при использовании перенаправления луча допустимая область, в которой мощность на Rx не падает более чем на α дБ, увеличивается с ростом α быстрее, чем при использовании фокусировки [11]. Большее расхождение для $\alpha = 10$ дБ по сравнению с другими α при малых M для \mathcal{F} связано с тем, что при выводе аналитической модели (7) предполагается, что смещение точки наблюдения из точки фокусировки на координату x_r происходит в плоскости параллельной RIS, в то время как в рассматриваемом сценарии Rx движется по окружности. Расхождение между \mathcal{R} и аналитической моделью не превышает 10% при $\alpha \leq 3$ дБ и $M \leq 900$.

Для сценария UMi на рис. 3(б) аналитическая модель при $\alpha = 1$ дБ и малых M находится выше, чем результаты моделирования. Этот факт объясняется тем, что аналитическая модель не учитывает наличие в пространстве кластеров, отраженные сигналы которых вносят помехи LOS-лучу, соединяющему Tx и Rx через RIS, что снижает необходимый период перенастройки RIS. С ростом α аналитическая модель оказывается расположена ниже, чем результаты моделирования, поскольку влияние лучей от кластеров усредняется при большем времени существования настройки и главную роль снова начинает играть LOS-луч, проходящий через RIS. При увеличении M для любого α описываемый эффект исчезает так как LOS-луч становится подавляющим относительно влияния лучей от кластеров. Аналогично объясняется тот факт, что на рис. 3(б) при $\alpha \in \{1, 3\}$ дБ расхождение между фокусировкой и перенаправлением более 10% наступает при больших значениях M , чем на рис. 3(а).

Таким образом, в сценарии с нулевым подканалом **H** расхождения между аналитической моделью и кривыми \mathcal{F} , полученными при моделировании, в первую очередь вызваны дискретными фазами элементов RIS и наличием для сценария UMi кластеров-отражателей. Расхождение между \mathcal{F} и аналитической моделью превышает 10% при в относительно небольшой области параметров, в то время как \mathcal{R} расходится с аналитической моделью при всех M для $\alpha = 10$ дБ и при $M \geq 900$ для $\alpha = 3$ дБ.

Перейдем к рассмотрению результатов аналогичного сценария с $d_{\text{IR}} = 10$ м. На рис. 4(а) при $\alpha = 10$ дБ и малых значениях M расхождение с аналитической моделью больше, чем на рис. 3(а). Этот эффект объясняется тем, что при большем расстоянии $d_{\text{IR}} = 10$ в сфокусированном RIS появляются более крупные домены из УС с одной и той же дискретной фазой. В противоположность этому, аналитическая модель предполагает непрерывную по всей плоскости RIS фазу, что и вызывает значительную разницу. Расхождение кривых для \mathcal{F} и \mathcal{R} наступает при больших M , чем было на рис. 3(а) поскольку при больших M начинают про-

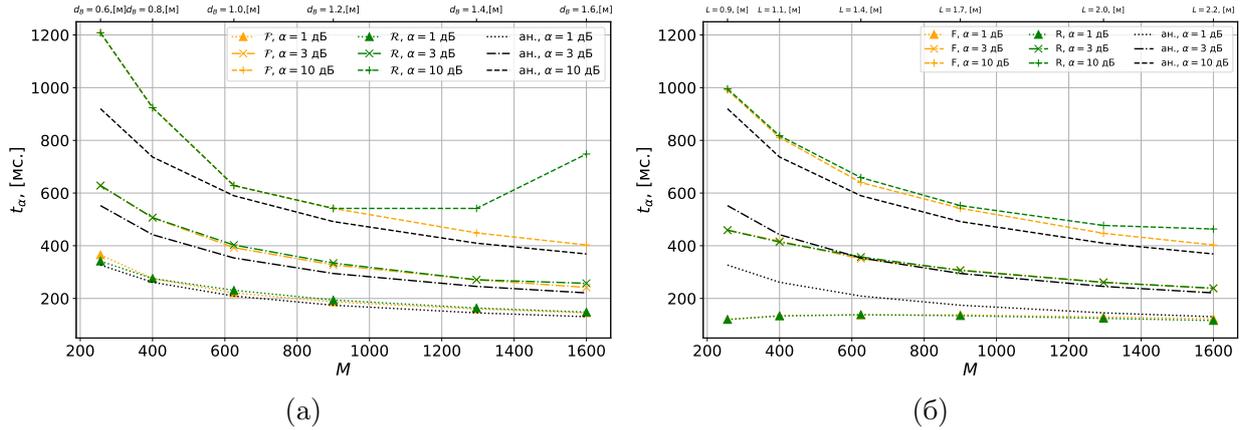


Рис. 4. Зависимость времени перенастройки RIS от M в сценарии (а) Freespace, (б) UMi без подканала (Tx, Rx), $d_{IR} = 10$ м.

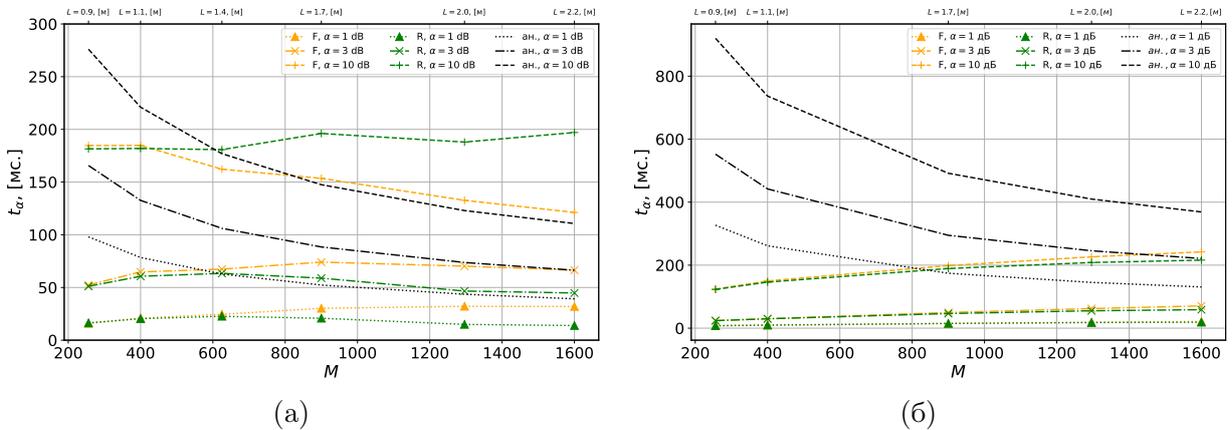


Рис. 5. Зависимость времени перенастройки RIS от M в сценарии UMi с подканалом (Tx, Rx), (а) $d_{IR} = 3$ м, (б) $d_{IR} = 10$ м.

являться эффекты ближнего поля. Аналитическая модель имеет разницу с \mathcal{R} более 10% при $M \geq 1296$, $M \leq 400$ и $\alpha = 10$ дБ. При $\alpha = 3$ дБ оба алгоритма настройки расходятся с аналитической моделью более чем на 10% при $M \leq 400$. Для всех значений M при $\alpha = 1$ дБ расхождение обоих алгоритмов с аналитической моделью не превышает 10%.

Для сценарии UMi на рис. 4(б) большое расхождение с аналитической моделью при $\alpha = 10$ дБ и малых M отсутствует, поскольку при малых M аналогичный эффект из сценария Freespace компенсируется наличием подлучей от кластеров. При $\alpha \in \{1, 3\}$ дБ и малых M расхождение с аналитической моделью для обоих алгоритмов больше, чем на рис. 3(а) так как на рис. 4(а) расстояние от RIS до Rx больше, а значит слабее LOS-луч через RIS и подлучи от кластеров имеют большее значение. Аналогично рис. 3(а), этот эффект ослабевает с ростом M . Как и на рис. 4(а), значительное расхождение между \mathcal{F} и \mathcal{R} наступает при больших M так как при больших M начинают проявляться эффекты ближнего поля.

Перейдем к рассмотрению сценарию с ненулевым подканалом (Tx, Rx). На рис. 5(а) при $M \leq 900$ расхождение с аналитической моделью имеют кривые \mathcal{F} для всех α , так как подканал через RIS недостаточно мощный по сравнению с подканалом (Tx, Rx). Однако с ростом M для всех α кривые \mathcal{F} приближаются к аналитической модели ввиду того, что подканал через RIS становится достаточно мощным. При $\alpha \in \{1, 3\}$ дБ кривые \mathcal{F} находится выше, чем

кривые \mathcal{R} . Этот факт связан с тем, что мощность сигнала на приемнике больше при фокусировке, чем при перенаправлении, что дает каналу через RIS возможность преобладать над подканалом (Tx, Rx) и дольше поддерживать необходимый уровень мощности на Rx. Кроме этого, при $\alpha \in \{1, 3\}$ дБ и $d_{IR} = 10$ м допустимая ширина луча для перенаправления и фокусировки примерно одинакова. При $\alpha = 10$ дБ фокусировка обеспечивает меньшее t_α , чем перенаправление. Это связано с тем, что при $\alpha = 10$ дБ перенаправление создает значительно более широкий луч чем фокусировка. На рис. 5(а) кривые \mathcal{F} с $\alpha \in \{1, 3\}$ дБ сначала растут с ростом M так как усиливается канал через RIS, но потом начинают снижаться и сходятся с аналитической модели так как канал через RIS начинает окончательно преобладать над подканалом (Tx, Rx) и в силу вступает эффект уменьшения области фокусировки. Для данного сценария аналитическая модель расходится с \mathcal{F} менее чем на 10% при $M \geq 1296$.

Аналогично результатам рис. 5(а), на рис. 5(б) кривые \mathcal{F} расположены выше чем \mathcal{R} . Кривые \mathcal{F} и \mathcal{R} отличаются не более, чем на 10% и растут с ростом M так как усиливается канал через RIS и эффекты ближнего поля не проявляются. С аналитической моделью не сходится ни одна кривая, а фокусирующей способности RIS даже с $M = 1600$ не хватает, для преобладания канала через RIS. Таким образом, в сценарии с ненулевым подканалом (Tx, Rx) аналитическая модель может служить оценкой времени перенастройки только при больших значениях M и малых расстояниях от RIS до Rx.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовано влияние расстояний между устройствами, количества УС и периода перенастройки RIS на скорость устаревания настроек RIS, полученных при помощи алгоритмов фокусировки и перенаправления. Для получения канальных матриц использована платформа моделирования QRIS с мобильными/статичными устройствами и эволюционирующими во времени параметрами кластеров. В работе показано, что различия между алгоритмами фокусировки и перенаправления как в статическом, так и в мобильном сценарии проявляются при размере RIS порядка расстояния от RIS до приемника. При использовании перенаправления в статическом сценарии увеличение периода перенастройки незначительно влияет на характеристики системы вследствие крайне стабильного по фазе виртуального LOS-канала между Tx и Rx через RIS. В то же время в случае мобильных устройств, различие между перенаправлением и фокусировкой зависит от значения допустимого снижения мощности луча, причем расхождение с аналитической моделью растет с увеличением допустимого падения мощности. Аналитическая модель применима для оценки необходимого периода перенастройки только при использовании фокусировки для RIS из сотен УС при нулевом канале (Tx, Rx).

Результаты данной работы показывают, что при изучении беспроводных сетей с RIS для получения реалистичных оценок необходимого времени перенастройки RIS нельзя пренебречь наличием подканала (Tx, Rx). Кроме этого, в данной работе показано, что поведение системы с RIS в кластерной модели канала значительно отличается от поведения этой же системы в свободном пространстве, даже если каналы имеют LOS-луч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ETSI GR RIS, “Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements,” V1.1.1, April 2023
2. Khorov E. et al. Boosting TCP & QUIC Performance in mmWave, Terahertz, and Lightwave Wireless Networks: A Survey //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023.

3. 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. – С. 250-259.
4. Wu Q., Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design //2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – IEEE, 2018. – С. 1-6.
5. Cai W. et al. Practical modeling and beamforming for intelligent reflecting surface aided wideband systems //IEEE Communications Letters. – 2020. – Т. 24. – №. 7. – С. 1568-1571.
6. Sayanskiy A. et al. A 2D-programmable and scalable reconfigurable intelligent surface remotely controlled via digital infrared code //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2022. – Т. 71. – №. 1. – С. 570-580.
7. Fara R. et al. A prototype of reconfigurable intelligent surface with continuous control of the reflection phase //IEEE Wireless Communications. – 2022. – Т. 29. – №. 1. – С. 70-77.
8. Yurduseven O., Assimonis S. D., Matthaiou M. Intelligent reflecting surfaces with spatial modulation: An electromagnetic perspective //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – Т. 1. – С. 1256-1266.
9. Fernandez M. et al. Codes for Exact Support Recovery of Sparse Vectors from Inaccurate Linear Measurements and Their Decoding //Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 14-21.
10. Zappone A. et al. Overhead-aware design of reconfigurable intelligent surfaces in smart radio environments //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2020. – Т. 20. – №. 1. – С. 126-141.
11. Björnson E., Demir Ö. T., Sanguinetti L. A primer on near-field beamforming for arrays and reconfigurable intelligent surfaces //2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. – IEEE, 2021. – С. 105-112.
12. Björnson E., Sanguinetti L. Power scaling laws and near-field behaviors of massive MIMO and intelligent reflecting surfaces //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – Т. 1. – С. 1306-1324.
13. Burtakov I. et al. QRIS: a QuaDRiGa-based simulation platform for reconfigurable intelligent surfaces //IEEE Access. – 2023.
14. Jiang W., Schotten H. D. Performance impact of channel aging and phase noise on intelligent reflecting surface //IEEE Communications Letters. – 2022. – Т. 27. – №. 1. – С. 347-351.
15. Xie L., Yu X., Song S. Intelligent reflecting surface-aided maneuvering target sensing: True velocity estimation //2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – IEEE, 2022. – С. 1-6.
16. Tian X., Sun Z. Fast beam tracking for reconfigurable intelligent surface assisted mobile mmWave networks //arXiv preprint arXiv:2102.11414. – 2021.
17. Mao Z., Peng M., Liu X. Channel estimation for reconfigurable intelligent surface assisted wireless communication systems in mobility scenarios //China Communications. – 2021. – Т. 18. – №. 3. – С. 29-38.
18. Zhang Y. et al. Performance analysis of reconfigurable intelligent surface assisted systems under channel aging //Intelligent and Converged Networks. – 2022. – Т. 3. – №. 1. – С. 74-85.
19. Björnson E., Sanguinetti L. Rayleigh fading modeling and channel hardening for reconfigurable intelligent surfaces //IEEE Wireless Communications Letters. – 2020. – Т. 10. – №. 4. – С. 830-834.
20. Sun Y. et al. A 3D non-stationary channel model for 6G wireless systems employing intelligent reflecting surfaces with practical phase shifts //IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – С. 496-510.

21. Dvorkin G. et al. Geometric Interpretation of the Entropy of Sofic Systems //Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 2. – С. 115-127.
22. de Jesus Torres A., Sanguinetti L., Björnson E. Near-and far-field communications with large intelligent surfaces //2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. – IEEE, 2020. – С. 564-568.
23. Björnson E., Sanguinetti L. Utility-based precoding optimization framework for large intelligent surfaces //2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. – IEEE, 2019. – С. 863-867.
24. Jaeckel S. et al. F. Burkhardt, E. Eberlein,“QuaDRiGa-Quasi Deterministic Radio Channel Generator,” User Manual and Documentation. – Tech. Rep. v2. 2.0, Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2019.
25. Matsuno H. et al. Practical Evaluation Method of Large Size IRS: Synthesis of Reflection Pattern of Sub-IRS //IEEE Access. – 2023.
26. 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. – Т. 67. – №. Suppl 1. – С. S159-S166.
27. Tyarin A. S., Kureev A. A., Khorov E. M. Fundamentals of Design and Operation of Reconfigurable Intelligent Surfaces. Journal of Communications Technology and Electronics, 2023.
28. Yang X., Wen C. K., Jin S. MIMO detection for reconfigurable intelligent surface-assisted millimeter wave systems //IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2020. – Т. 38. – №. 8. – С. 1777-1792.
29. Dokuchaev N. et al. Near-Ideal Predictors and Causal Filters for Discrete-Time Signals //Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 2. – С. 99-114.
30. Hemadeh I. A. et al. Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Т. 20. – №. 2. – С. 870-913.
31. Basar E., Yildirim I. SimRIS channel simulator for reconfigurable intelligent surface-empowered communication systems //2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). – IEEE, 2020. – С. 1-6.
32. 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.
33. Nayeri P., Yang F., Elsherbeni A. Z. Reflectarray antennas: theory, designs, and applications. – 2018.
34. Ellingson S. W. Path loss in reconfigurable intelligent surface-enabled channels //2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE, 2021. – С. 829-835.

Study on RIS Configuration Aging in Scenarios with Mobile Devices

A.O. Gorbunova, I.A. Burtakov, A.A. Kureev, E.M. Khorov

Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) is a promising technology that can improve the throughput and coverage of wireless networks. The effectiveness of RIS depends on its configuration, which is adjusted taking into account the position of transmitting and receiving devices in space. Over time, the RIS configuration becomes outdated due to changing environmental conditions caused by the movement of devices and other objects. This paper examines the aging of the RIS configuration obtained by focusing or redirecting the reflected beam in a system with mobile devices. The paper shows that the difference in the required reconfiguration time to compensate for aging can reach hundreds of milliseconds for redirection and focusing. The limitations of existing analytical expressions for the required reconfiguration time are demonstrated.

KEYWORDS: RIS, channel aging, time evolution, beamforming, mobile scenario.