Информационные процессы, Том 23, № 4, 2023, стр. 600–611.
© 2023 Пойда, Глинский, Тярин, Куреев, Хоров.

Экспериментальное исследование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей с обратной связью от пользовательских устройств[1]

Пойда А.И.*,**, Глинский К.А.*,**, Тярин А.С.*,**, Куреев А.А.*,**, Хоров Е.М.*,**

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

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

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

Поступила в редколлегию 1 ноября 2023 г. Принята 1 декабря 2023 г.

Аннотация—Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: Reconfigurable intelligent surface, RIS) зарекомендовала себя как перспективная технология для увеличения пропускной способности и области покрытия беспроводных сетей путем адаптивного изменения фазы и амплитуды отраженного сигнала. Традиционный подход к настройки RIS основывается на передаче информации о состоянии канала от мобильной станции к базовой станции. Получение информации о состоянии канала подразумевает, что BS настраивает RIS через канал связи BS-RIS. Однако такой подход требует интеграции RIS в инфраструктуру оператора, что затрудняет его развертывание в существующих сетях. В данной работе исследуется альтернативное решение, при котором RIS для настройки использует соединение с мобильной станцией. Такой подход позволяет устанавливать RIS без необходимости информировать оператора или модернизировать базовую станцию. Для исследования применимости предложенного подхода был разработан автономный прототип RIS, настраиваемый без участия базовой станции. Экспериментальные результаты, полученнные в существующей сотовой сети с использованием прототипа показывают, что предложенный подход обеспечивает увеличение пропускной способности в восходящем и нисходящем каналах до двух раз.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Реконфигурируемые Интеллектуальные Поверхности, 5G, LTE.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_600

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие систем сотовой связи приводит к увеличению числа подключенных устройств, создавая спрос на увеличение пропускной способности и производительности сети. Одним из многообещающих решений являются реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS), которые могут адаптивно управлять беспроводным каналом и оптимизировать путь распространения сигнала. RIS — двумерная поверхность, состоящая из субволновых пассивных элементов (англ.: Unit Cell, UC), способных динамически регулировать фазу и амплитуду отраженной электромагнитной (ЭМ) волны.

Для корректной работы RIS необходимо правильно конфигурировать сдвиг фаз на UC. Создание алгоритма настройки RIS, позволяющего легко внедрить RIS в беспроводные локальные сети и в системы сотовой связи, является одной из ключевых задач [1]. Многие работы [2–4] предлагают алгоритмы настройки, использующие матрицу канала между базовой

[1] Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

станцией (англ.: Base Station, BS) и мобильной станцией (англ.: Mobile Station, MS). Однако, получение матриц канала требует передачи большого числа пилотных сигналов, что уменьшает спектральную эффективность всей системы. Кроме того, такие алгоритмы предполагают, что BS способна управлять конфигурацией RIS. Это вынуждает оператора обеспечивать доставку служебных сообщений путем внедрения новых функций в программное обеспечение. Более того, оператор должен развернуть в своей сети сами устройства RIS. В результате это приводит к тому, что интеграция RIS в инфраструктуру оператора становится трудоемкой и дорогостоящей.

Существует другой класс алгоритмов [5, 6], производящих настройку на основе мощности сигнала на MS. Такой подход предполагает наличие канала обратной связи (КОС) между RIS и MS. Однако в существующих работах не описывается механизм передачи информации с MS на RIS. Например, в [7] предлагается разработать и включить КОС в будущие стандарты сотовых систем. К сожалению, такое решение оттягивает внедрение RIS в системы сотовой связи и не дает возможности использовать RIS в сетях прошлых поколений. В связи с этим разработка независимого от технологии КОС между RIS-MS имеет решающее значение, поскольку она делает развертывание RIS более гибким.

Важно отметить, что применение RIS не ограничено только сотовыми сетями. Так, в работе [8] рассматривается сеть Wi-Fi, где настройка RIS производится с помощью алгоритма MUSIC на основе специальных пилотных сигналов. Однако применение пилотных сигналов не только требует внесения изменений в стандарт, но так же снижает пропускную способность сети. Поэтому важно, чтобы алгоритм настройки мог быть реализован на основе существующих стандартов.

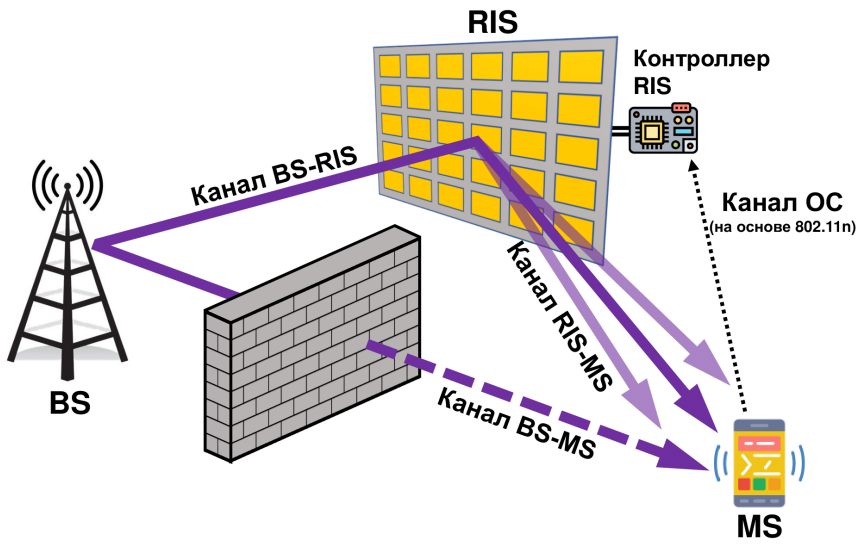

Рис. 1. Сотовая сеть с RIS, подключенным к MS через канал обратной связи.

Таким образом, целью данной работы является разработка и исследование автономного RIS, способного работать без связи с BS (см. рис. 1). В рамках работы получены следующие результаты:

– Разработан КОС MS-RIS для передачи измерений мощности принимаемого сигнала от MS к RIS. На основе программно-определяемой радиосистемы (англ.: Software-Defined Radio, SDR) в качестве MS показано, что система обеспечивает измерение до 50 конфигураций в

секудну. Показано как предложенный механизм КОС может быть адаптирован под работу в сетях Wi-Fi.
- Предложен геометрический алгоритм настройки RIS для максимизации мощности сигнала на MS, поддерживающий работу с КОС.
- Разработан прототип RIS, совместимый с существующей сетью LTE.
- Получены экспериментальные результаты, демонстрирующие увеличение пропускной способности смартфона по нисходящей (англ.: Downlink, DL) и восходящей (англ.: Uplink, UL) линиям связи до двух раз в сценариях внутри и вне помещений. Настройка прототипа производится с помощью разработанных КОС и алгоритма настройки.

Остальная часть статьи организована следующим образом. Раздел 2 описывает прототип RIS, реализацию КОС и процедуру измерения мощности сигнала. В разделе 3 представлен алгоритм для настройки RIS. В разделе 4 приводятся экспериментальные результаты, а раздел 5 завершает статью.

2. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА RIS

2.1. Аппаратная часть прототипа RIS

Разработанный прототип RIS состоит из 12×16 UC размером 480×640 мм^2 с расстоянием между ними 40 мм. В конструкции использована трехслойная структура: верхний металлический слой, в котором находится патч-антенна в форме квадрата со стороной 25,5 мм и PIN-диод, средний слой из стеклотекстолита FR4 и металлический нижний слой для заземления [17].

PIN-диод имеет два рабочих состояния (ON и OFF), что обеспечивает 1-битное фазовое квантование. Размеры патч-антенны были подобраны с помощью CST Microwave Studio для достижения разницы фазового сдвига π между состояниями ON и OFF на частоте 2,605 ГГц, совпадающей с центральной частотой LTE Band 38. Однако, в реальной среде возможны отклонения от разницы фазового сдвига π вызванные, например, различными неидельностями UC [18] или защитным покрытием RIS [19].

Для упрощения и удешевления конструкция RIS является модульной и состоит из четырех суб-RIS, каждый из которых имеет 48 UC с независимой настройкой фазы через микроконтроллер Arduino MEGA 2560. В качестве контроллера RIS (англ.: RIS Controller, RC) используется Raspberry Pi 4, подключенный к Arduino и поддерживающий сетевое соединение Wi-Fi для управления и связи с внешними устройствами.

2.2. Измерение мощности сигнала для настройки RIS

В сетях LTE механизм получения информации о состоянии канала является неотъемлемой частью стека протоколов сотовой сети. Он позволяет UE информировать сеть о текущих условиях канала, чтобы BS могла корректировать параметры передачи. В сети с поддержкой RIS измерения качества канала также необходимы для настройки RIS. В рамках данной работы в качестве метрики для настройки используется мощность принимаемого опорного сигнала (англ.: Reference Signal Received Power, RSRP) RSRP.

RSRP измеряется по всей ширине канала путем усреднения мощности опорных сигналов соты (англ.: Cell specific Reference Signals, CRS), передаваемых в каждом подкадре нисходящего канала длительностью 1 мс. Однако точное положение и количество подкадров нисходящего канала в одном кадре зависит от структуры кадра LTE, назначаемой базовой станцией. Следовательно, если период выборки меньше одного кадра, период между последовательными измерениями RSRP необходимо подстраивать для каждой отдельной структуры кадра. Чтобы

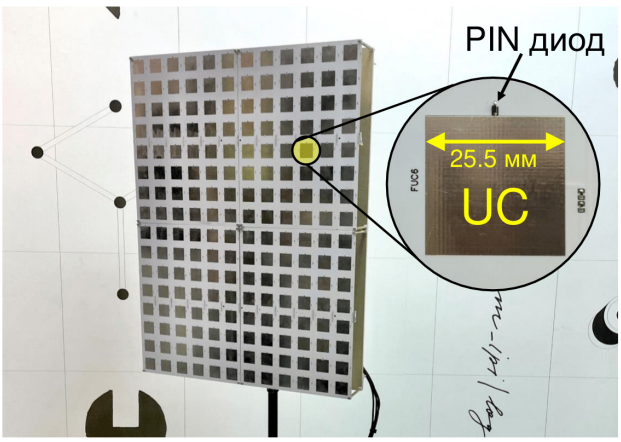

Рис. 2. Разработанный прототип RIS, состоящий из 12 × 16 ячеек на основе PIN-диодов.

гарантировать, что механизм настройки RIS не зависит от выбранных параметров передачи, в качестве частоты измерений RSRP был выбран 1 кадр LTE (10 мс).

К сожалению, доступные на рынке устройства, такие как смартфоны, не предоставляют пользователю значения RSRP с требуемой частотой, что сильно замедляет настройку RIS. Для достижения максимальной скорости настройки в работе применяется SDR, позволяющая обеспечить до 100 измерений RSRP в секунду. Однако, согласно стандарту LTE [9] устройства измеряют канал в каждом кадре. Таким образом, производители аппаратного и программного обеспечения имеют возможность предоставлять пользователю значения RSRP с достаточной частотой.

В сетях Wi-Fi измерение мощности сигнала на MS может быть реализовано на основе Beacon кадров, периодически рассылаемых точкой доступа.

2.3. КОС между RIS и MS

В сети LTE КОС обеспечивает передачу измеренных значений RSRP от MS к RC. Как только MS измеряет RSRP, она отправляет это значение в RC. После получения RSRP RC меняет конфигурацию RIS для следующего измерения. Для передачи информации КОС использует протокол транспортного уровня TCP. Для реализации беспроводного соединения КОС построен на основе сети 802.11n, где RC выступает в качестве точки доступа, а MS — в качестве станции.

На рис. 3 показана развертка по времени всех этапов работы протокола КОС. Настройка RIS синхронизируется с передачей кадров LTE, и каждый кадр играет свою роль: один для измерения RSRP (кадр измерения), а другой для передачи измерений и настройки RIS (кадр конфигурации). На каждый кадр конфигурации может приходиться более одного кадра измерения. Однако в разделе 4 показано, что одного кадра измерения на каждый кадр конфигурации достаточно для получения точной настройки RIS.

Кадр конфигурации состоит из трех этапов: измерение RSRP, отправка сообщения ZeroMQ и настройка конфигурации RIS. На первом этапе SDR обрабатывает полученные пилотные сигналы из предыдущего кадра измерения. Эта процедура занимает менее 1 мс. Вторым шагом является передача значения RSRP на RC. Задержка на передачу находится в пределах 2–5 мс в свободном канале, но увеличивается в занятом канале, и вместо Wi-Fi можно использовать Bluetooth, чтобы гарантировать ту же задержку, а также снизить энергопотребление. Последний шаг — настройка конфигурации RIS — занимает не более 2 мс. Защитный интервал предназначен для защиты от редкого увеличения времени передачи по Wi-Fi на втором этапе.

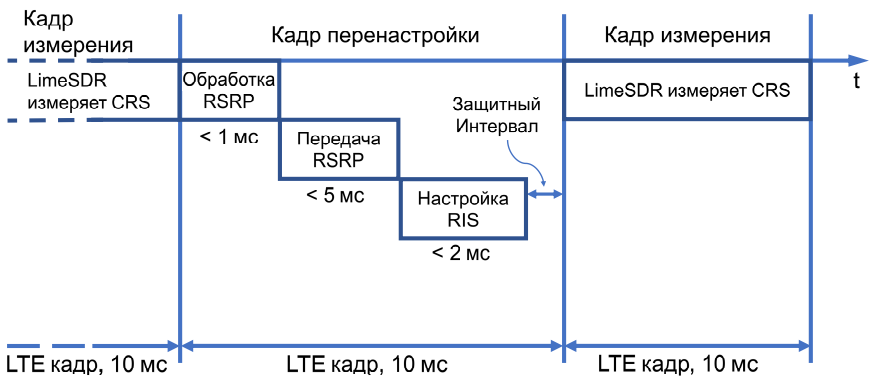

Рис. 3. Схеха работы канала обратной связи.

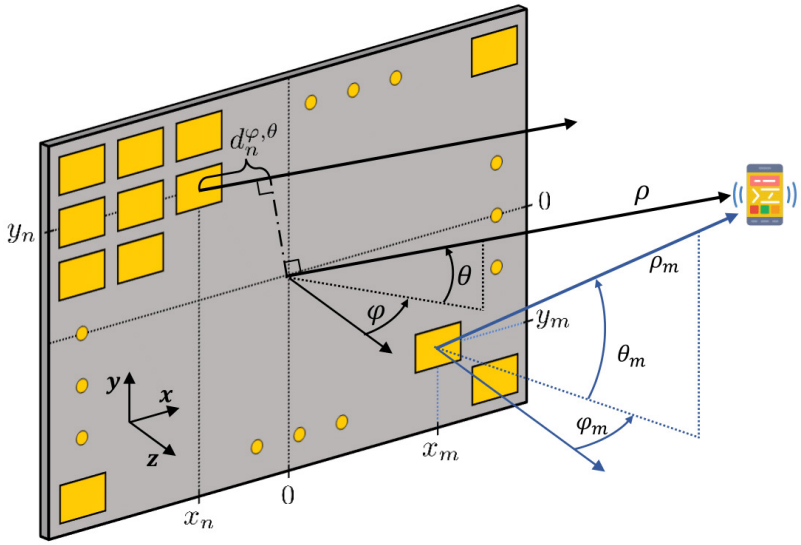

Рис. 4. Геометрия системы с RIS.

Во время передачи RSRP и реконфигурации RIS SDR не оценивает RSRP и ждет начала следующего кадра LTE. При использовании разработанного КОС для обмена данными между прототипом RIS и SDR обеспечивается частота обновления конфигураций RIS до 50 раз в секунду.

В сети Wi-Fi рассылка Beacon-кадров происходит с применением случайного доступа к среде, но не чаще определенного интервала времени. В связи с этим, RIS будет находиться в текущем состоянии до тех пор пока MS не отправит значение мощности сигнала. Интервала времени между соседними Beacon-кадрами достаточно для перенастройки RIS.

3. АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ RIS

В этом разделе ставится оптимизационная задача, соответствующая процессу поиска оптимальной конфигурации RIS, максимизирующей мощность сигнала на на MS. Для решения задачи разработан алгоритм настройки, обеспечивающий формирование луча отраженного сигнала в направлении MS.

В работе рассматривается упрощенная модель электрического поля. Обозначим конфигурацию RIS вектором $\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (\hat{\alpha}_1, \ldots, \hat{\alpha}_M)$, где $\hat{\alpha}_m \in \{0, \pi\}$ — дискретный фазовый сдвиг m-го UC, M – число UC в RIS. Модель предполагает, что поле в точке $\mathbf{r}$ является суперпозицией отраженной от RIS волны $E^{\mathbf{r}}_{\text{ref}}$ и поля прямого канала BS-MS $E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}$:

$$E^{\mathbf{r}} = E^{\mathbf{r}}_{\text{ref}}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}) + E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{r} = (\varphi, \theta, \rho)$ — рассматриваемая точка относительно геометрического центра RIS в сферических координатах, как показано на рис. 4.

Сперва рассмотрим отраженную компоненту $E^{\mathbf{r}}_{\text{ref}}$ и ее связь с конфигурацией RIS. Согласно модели из статьи [10], напряженность поля отраженной от RIS волны может быть рассчитано согласно следующему уравнению:

$$E^{\mathbf{r}}_{\text{ref}}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}) = \sum_{m}^{M} |E^{\text{inc}}_m| e^{j\angle E^{\text{inc}}_m} e^{j\hat{\alpha}_m} e^{-jk_0|\mathbf{r}_m|} G(\varphi_m, \theta_m), \tag{2}$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число в вакууме, $|E^{\text{inc}}_m|$ и $\angle E^{\text{inc}}_m$ — амплитуда и фаза падающей волны в m-ом UC, $\mathbf{r}_m = (\varphi_m, \theta_m, \rho_m)$ — вектор от m-ой UC до точки $\mathbf{r}$, φ_m, θ_m и ρ_m обозначают азимутальный угол, угол места и длину вектора $\mathbf{r}_m$, $G(\varphi_m, \theta_m)$ — амплитудный коэффициент диаграммы направленности UC в направлении к точке наблюдения.

Так как RIS не влияет на компоненту $E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}$, то за изменение поля $E^{\mathbf{r}}$ отвечает только $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$. В результате задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \max_{\hat{\boldsymbol{\alpha}}} \quad & \left| E^{\mathbf{r}}_{\text{ref}}(\hat{\boldsymbol{\alpha}}) + E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}} \right| \\ \text{s.t.} \quad & \hat{\alpha}_m \in \{0, \pi\},\ m = \overline{1, M}. \end{aligned} \tag{3}$$

Однако, в рамках данной работы имеются следующие ограничения. Во-первых, ни $E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}$, ни фактическая позиция MS, расположенной в точке $\mathbf{r}$, не известны на RIS. Во-вторых, MS измеряет RSRP, а не амплитуды электрического поля. Для решения задачи с упомянутыми ограничениями предлагается искать приближенное решение (3) путем итерации по специально сгенерированному набору конфигураций RIS, где для каждого состояния MS измеряет RSRP [11]. Такой набор конфигураций будет называться кодовой книгой.

Теперь рассмотрим, как устроена кодовая книга. Изначально кодовая книга состоит из всех возможных конфигураций RIS $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$, число которых равно 2^M для однобитной RIS. Для уменьшения количества необходимых конфигураций рассмотрим последовательность упрощений, обеспечивающих переход от полного перебора к поиску по пространственным координатам.

Сперва обобщим задачу оптимизации (3) на непрерывные сдвиги фаз $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \ldots, \alpha_M)$, где $\alpha_m \in [0, 2\pi]$. Тогда оптимальное решение для точки $\mathbf{r}$ принимает вид

$$\alpha^{\mathbf{r}}_m = -\angle E^{\text{inc}}_m + k_0\rho_m + \angle E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}. \tag{4}$$

Такая конфигурация $\boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{r}} = (\alpha_1, \ldots, \alpha_M)$ обеспечивает синфазность отраженной и прямой волн в точке $\mathbf{r}$. Таким образом, поскольку задача оптимизации (3) физически выполняет фокусировку и подбор фазы отраженного сигнала, $\boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{r}}$ полностью определяется такими параметрами как $\{\rho_m \mid m = \overline{1, M}\}$, $\{\angle E^{\text{inc}}_m \mid m = \overline{1, M}\}$ и $\angle E^{\mathbf{r}}_{\text{dir}}$. В результате, общее количество параметров непрерывной оптимизации равно $(2M + 1)$.

Однако измерение $\angle E^{\text{inc}}_m$ является трудной задачей, так как RIS не производит обработку падающего сигнала. В подавляющем большинстве сценариев расстояние между RIS и BS значительно превышает длину волны и, кроме того, пространственное положение RIS выбирается пользователем самостоятельно. Поэтому делается предположение, что падающая волна

является плоской и падает на плоскость RIS по нормали. Это приводит к тому, что все UC имеют общий $\angle E_m^{\text{inc}} = \angle E_0^{\text{inc}}$. Благодаря тому, что $\angle E_0^{\text{inc}}$ и $\angle E_{\text{dir}}^{\mathbf{r}}$ теперь не зависят от m, их можно объединить в общую добавку фазы ψ, отвечающую за синфазность волн. В результате оптимальное решение (4) преобразуется в

$$\alpha_m^{\mathbf{r}} = k_0 \rho_m + \psi, \tag{5}$$

что приводит к уменьшению количества параметров оптимизации до $(M+1)$: $\{\rho_m \mid m = \overline{1, M}\}$ и ψ.

Еще одним упрощением является переход от фокусировки к перенаправлению. Максимизация амплитуды поля в точке $\mathbf{r}$ обеспечивает фокусировку луча. Однако, в дополнение к нахождению углового направления φ и θ, для этого также требуется найти фокусное расстояние, что увеличивает сложность кодовой книги. Более того, фокусировка луча работает только в ближнем поле, но не в дальнем [12]. Поскольку расположение MS в дальнем поле RIS является распространенным сценарием, переход от фокусировки к перенаправлению является уместным. Конфигурация RIS, приводящая к перенаправлению на φ, θ, расчитывается следующим образом [13]:

$$\alpha_m^{\varphi,\theta,\psi} = k_0 d_m^{\varphi,\theta} + \psi, \tag{6}$$

где $k_0 d_m^{\varphi,\theta}$ — набег фазы для m-й UC относительно геометрического центра RIS, а $d_m^{\varphi,\theta}$ — оптическая разность хода. Для m-й UC с координатами x_m и y_m разность хода расчитывается как $d_m^{\varphi,\theta} = (x_m \sin\varphi \cos\theta + y_m \sin\theta)$ (см. рис. 4). Поскольку RIS обладает информацией о расположении всех UC, количество параметров кодовой книги снижается до трех: φ, θ и ψ.

После вышеупомянутых упрощений окончательная конфигурация RIS $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\varphi,\theta,\psi}$ соответствует дискретизации $\boldsymbol{\alpha}^{\varphi,\theta,\psi} = (\alpha_1^{\varphi,\theta,\psi}, \ldots, \alpha_M^{\varphi,\theta,\psi})$. Традиционный подход для вычисления $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\varphi,\theta,\psi}$ заключается в дискретизации $\boldsymbol{\alpha}^{\varphi,\theta,\psi}$ до ближайшей дискретной точки 0 или π [14]

$$\hat{\alpha}_m^{\varphi,\theta,\psi} = \begin{cases} 0, & \alpha_m^{\varphi,\theta,\psi} \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}] \\ \pi, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{7}$$

Чтобы сделать размер кодовой книги конечным, предлагается строить кодовую книгу по декартову произведению множеств Φ, Θ и Ψ, которые построены следующим образом: $\Phi = \{\varphi_k = \varphi_0 + k\Delta\varphi \mid k \in \mathcal{K}\}$, $\Theta = \{\theta_p = \theta_0 + p\Delta\theta \mid p \in \mathcal{P}\}$ и $\Psi = \{\psi_g = \psi_0 + g\Delta\psi \mid g \in \mathcal{G}\}$, где $\Delta\varphi$, $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ – шаги сетки пераметров.

Наконец, алгоритм настройки формулируется следующим образом. Для каждого элемента кодовой книги $(\varphi, \theta, \psi) \in \Phi \times \Theta \times \Psi$ RIS вычисляет $\boldsymbol{\alpha}^{\varphi,\theta,\psi}$ в соответствии с (6) и выставляет конфигурацию $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\varphi,\theta,\psi}$ в соответствии с (7), затем MS измеряет RSRP, соответствующий текущему $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\varphi,\theta,\psi}$ и, наконец, отправляет значение RSRP на RIS по каналу обратной связи. После получения значений RSRP для всех элементов кодовой книги, приближенным решением (3) считается $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\varphi,\theta,\psi}$, обеспечивающее максимальную мощность сигнала на MS. Таким образом, работа алгоритма сводится к решению задачи максимизации мощности сигнала на MS:

$$\begin{aligned} \max_{(\varphi,\theta,\psi)} \quad & \mathrm{P}_{\text{MS}} \\ \text{s.t.} \quad & (\varphi, \theta, \psi) \in \Phi \times \Theta \times \Psi \end{aligned} \tag{8}$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения эффективности применения RIS проведены экспериментальные измерения в сети LTE оператора МТС с использованием SDR и смартфона. В рамках работы рассматривается частотный диапазон Band 38 с шириной канала 20 МГц и центральной частотой 2,605 ГГц.

В связи с изменением канальных условий во времени и невозможностью быстро настраивать RIS с помощью смартфона, эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе SDR действует как MS, а RIS использует предложенный алгоритм настройки, чтобы максимизировать RSRP путем нахождения φ, θ, ψ. В качестве SDR используется LimeSDR с одной антенной. На втором этапе смартфон устанавливается на место SDR, причем RIS сохраняет конфигурацию, выбранную на первом этапе. В качестве смартфона используется OPPO Reno 5 с четырьмя антеннами, использующий Android 13. Кодовая книга для экспериментов построена на основе следующих параметров: $\varphi_0 = -40°$, $\Delta\varphi = 4°$, $\mathcal{K} = \overline{1, 20}$; $\theta_0 = -10°$, $\Delta\theta = 10°$, $\mathcal{P} = \{0, 1, 2\}$ и $\psi_0 = 0°$, $\Delta\psi = 12°$, $\mathcal{G} = \overline{1, 30}$. Время, необходимое для перебора всех конфигураций из кодовой книги, составляет 36 с при скорости перебора 50 конфигураций в секунду. Данное время может быть значительно сокращено с помощью использования, например, более широких лучей. Однако уменьшение размера кодовой книги выходит за рамки данной работы.

4.1. Сценарии

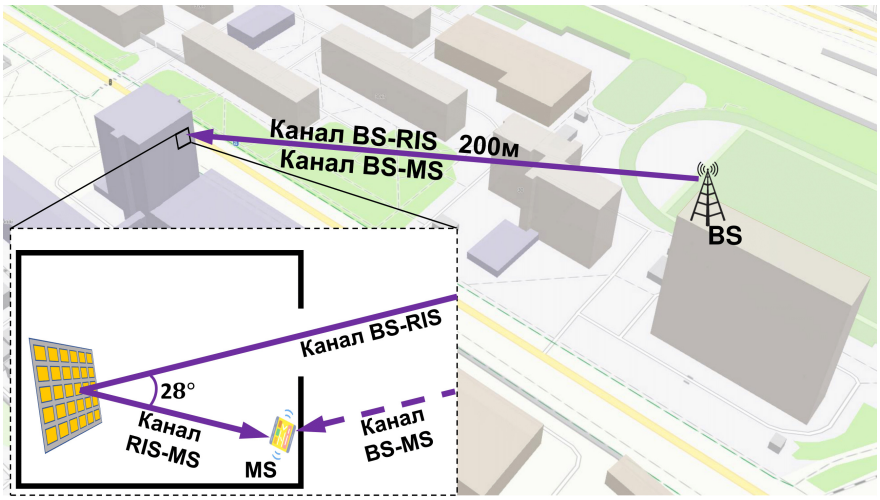

Рис. 5. Схема сценария indoor.

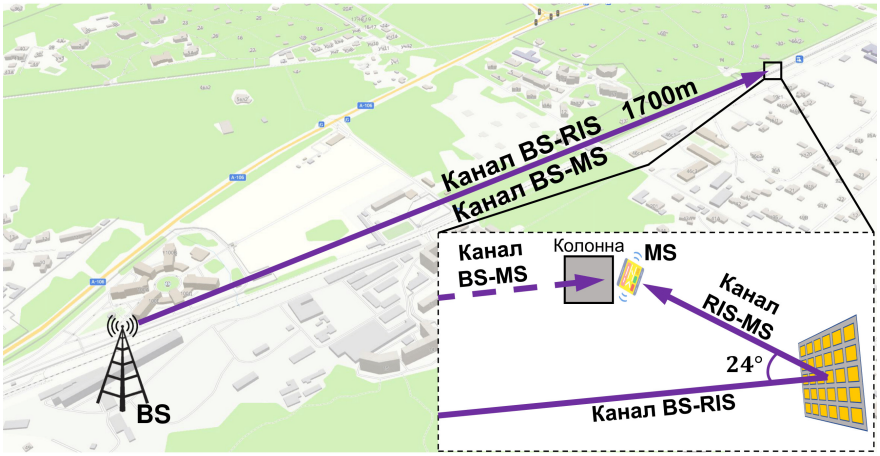

Рис. 6. Схема сценария outdoor.

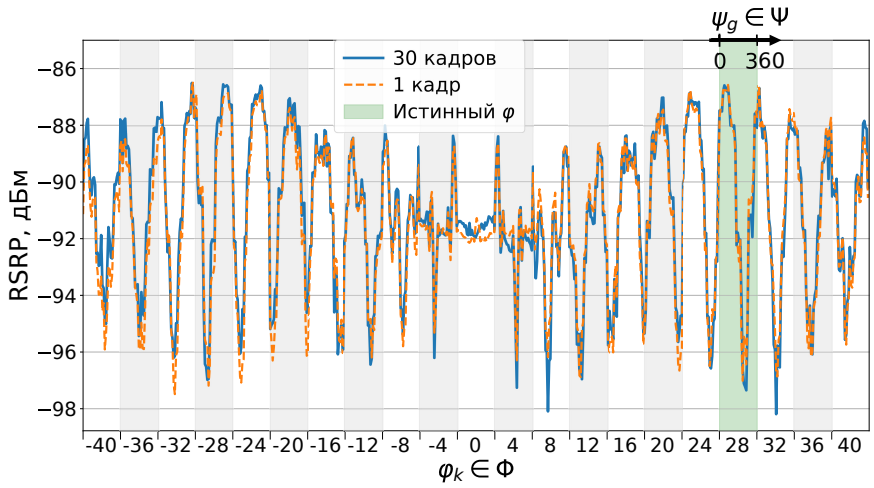

Рис. 7. Зависимость RSRP на SDR от φ и ψ. Каждому значению φ_k соответствует полный набор значений ψ_g

Результаты получены для двух сценариев: внутри и вне помещения, называемые далее indoor и outdoor, соответственно. На рис. 5 изображен сценарий indoor, в котором MS и RIS расположены на верхнем этаже офисного здания. BS расположена на расстоянии 200 м на крыше соседнего здания. Сценарий обеспечивает прямую видимость через окно между BS и RIS. Прямой канал BS-MS заблокирован стеной, поэтому канал RIS-MS становится основным. MS расположен на уровне геометрического центра RIS. Расстояние между RIS и MS составляет 3 м, а азимутальный угол равен 28°.

Сценарий outdoor изображен на рис. 6. RIS и MS расположены на железнодорожной платформе, BS расположена на вышке в 1700 м от MS. Расстояние между RIS и MS составляет 3,5 м, а азимутальный угол равен 24°. Как и в предыдущем сценарии, между BS и RIS имеется прямая видимость, а канал BS-MS заблокирован металлической колонной, что снижает мощность прямой связи на 15 дБ.

4.2. Настройка RIS

Сперва рассмотрим влияние длительности измерений на точность алгоритма EBS. На рис. 7 показаны значения RSRP для последовательности конфигураций RIS в сценарии indoor. Чтобы упростить анализ, поиск производится только по двум параметрам φ и ψ, в то время как $\theta = 0°$. Последовательность конфигураций в кодовой книге выглядит следующим образом: для каждого $\varphi \in \Phi$ перебираются все $\psi \in \Psi$. Значения RSRP получены на основе усреднения по 30 кадрам LTE и без усреднения. Результаты показывают, что измерение RSRP по одному LTE кадру обеспечивает такую же производительность, как и при усреднении по 30 кадрам. Таким образом, для оценки каждой конфигурации RIS достаточно только одного измерения RSRP.

Отметим, что без усреднения время, необходимое для перебора всех конфигураций из кодовой книги, составляет 36 с. Данное время может быть значительно сокращено с помощью использования, например, более широких лучей. Однако уменьшение размера кодовой книги выходит за рамки данной работы.

Теперь проанализируем процесс настройки RIS. Во-первых, значения RSRP симметричны относительно $\varphi = 0$. Эта симметрия вызвана однобитным RIS, создающим паразитный симметричный луч [10] в дополнение к основному лучу. Амплитуды этих лучей равны. Во-вторых, RSRP изменяется гармонически. Этот эффект является наглядной демонстрацией интерфе-

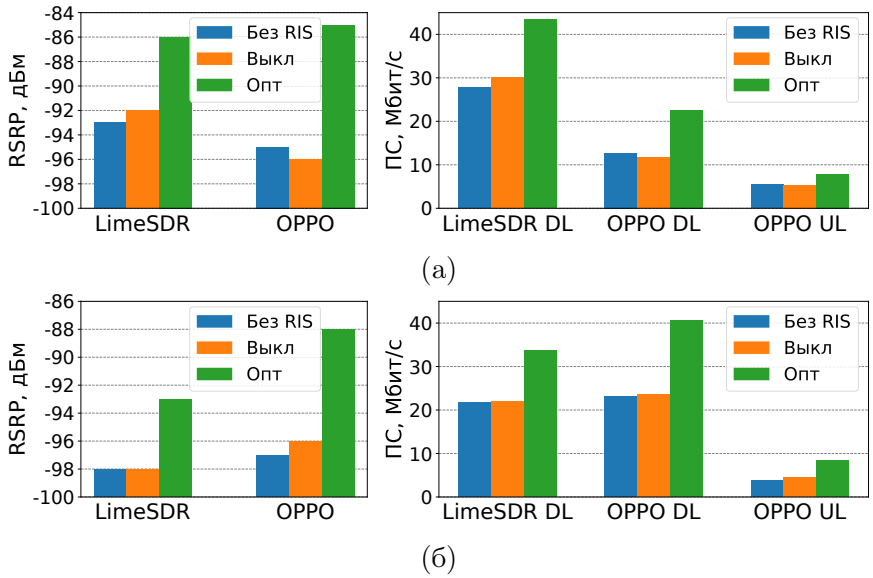

Рис. 8. Значения RSRP и пропускной способности (ПС) для SDR и смартфона в зависимости от состояния RIS для (а) indoor и (б) outdoor сценариев.

ренции между прямым каналом BS-MS и каналом RIS-MS. Локальные максимумы RSRP соответствуют синфазной суперпозиции сигналов от RIS и BS, а локальные минимумы RSRP соответствуют фазовому сдвигу на 180° между ними. Наконец, локальные максимумы вблизи фактического положения MS ($\varphi = 28°$) имеют близкие значения. Это связанно с большой шириной луча. Большее количество UC позволяет уменьшить ширину луча.

4.3. Измерения RSRP и пропускной способности

Для демонстрации эффективности автономного RIS измерены RSRP и пропускная способность DL/UL. Для измерения описанных метрик на SDR применяется программное обеспечение srsRAN-4G. RSRP на смартфоне измеряется с помощью собственного приложения использующего Android API. Пропускная способность DL и UL на смартфоне измеряется с помощью SpeedTest.

На рис. 8 показаны результаты в обоих сценариях для трех состояний RIS: (i) без RIS, (ii) с RIS, в котором все UC находятся в выключенном состоянии (Выкл), и (iii) с RIS, настроенным помощью разработанного алгоритма (Опт).

В сценарии indoor, изображенном на рис. 8 (а), настроенный RIS увеличивает RSRP SDR на 7 дБ по сравнению со случаем без RIS, а RIS в состоянии Выкл дает прирост в 1,2 дБ. Для смартфона прирост RSRP выше и составляет 10 дБ, однако выключенный RIS снижает RSRP на 1 дБ в виду наложения сигналов в противофазе. Различия в изменениях RSRP связаны с различной формой и количеством антенн. Что касается пропускной способности, оптимальная конфигурация почти удваивает пропускную способность DL с 11,6 до 22,6 Мб/с и увеличивает пропускную способность UL на 44%: с 5,4 до 7,9 Мб/с для смартфона.

Результаты в сценарии outdoor представлены на рис. 8 (б). Настроенный RIS увеличивает RSRP на 5 дБ для SDR и 9 дБ для смартфона в сравнении с отсутствием RIS. Кроме того, RIS удваивает пропускную способность UL смартфона с 3,9 Мб/с до 8,4 Мб/с, в то время как пропускная способность DL увеличивается с 23,6 до 40,6 Мб/с. В данном сценарии RIS в состоянии Выкл повышает как RSRP, так и пропускную способность обоих устройств.

Результаты демонстрируют, что настроенный RIS значительно повышает производительность сотовой сети, даже если настройка производится на основе информации от MS. Полностью выключенная RIS, в свою очередь, дает вклад не более 1 дБ в RSRP, причем в таком состоянии RIS способна снизить как принимаемую мощность, так и пропускную способность. Полученные результаты демонстрируют, что RIS, настраиваемая на основе значений RSRP от MS, является жизнеспособной концепцией, улучшающей производительность сотовых сетей при значительном упрощении развертывания по сравнению с RIS, управляемой с BS.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена реализация концепции сотовой системы с поддержкой RIS, в которой настройка RIS основана на обратной связи от MS, а оператору неизвестно о наличии RIS. Разработан беспроводной канал обратной связи для отправки измерений RSRP от MS к RIS для проведения настройки. Канал обратной связи обеспечивает отправку до 50 значений RSRP в секунду. Для проверки эффективности предложен алгоритм настройки RIS, который максимизирует RSRP на MS. Измерения смартфона OPPO Reno 5 в сценариях внутри и вне помещения демонстрируют, что RIS дает прирост RSRP до 10 дБ. Более того, RIS обеспечивает прирост пропускной способности DL до 100% и UL до 110%. Таким образом, обратная связь RIS-MS является жизнеспособной концепцией, которая может значительно упростить развертывание RIS в существующих системах сотовой связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Q. et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial //IEEE Transactions on Communications. – 2021. – Т. 69. – №. 5. – С. 3313-3351.
2. Jung M. et al. On the optimality of reconfigurable intelligent surfaces (RISs): Passive beamforming, modulation, and resource allocation //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. – Т. 20. – №. 7. – С. 4347-4363.
3. Zheng B., Zhang R. Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM: Channel estimation and reflection optimization //IEEE Wireless Communications Letters. – 2019. – Т. 9. – №. 4. – С. 518-522.
4. Yang Y. et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: Protocol design and rate maximization //IEEE Transactions on Communications. – 2020. – Т. 68. – №. 7. – С. 4522-4535.
5. Ren S. et al. Configuring intelligent reflecting surface with performance guarantees: Blind beamforming //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022.
6. Li J. et al. Coverage enhancement of 5G commercial network based on reconfigurable intelligent surface //2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). – IEEE, 2022. – С. 1-5.
7. YUAN Y. et al. Recent progress in research and development of reconfigurable intelligent surface //ZTE Communications. – 2022. – Т. 20. – №. 1. – С. 3-13.
8. 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.
9. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband. – Academic press, 2013.
10. 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.
11. Zou Y., Rave W., Fettweis G. Analog beamsteering for flexible hybrid beamforming design in mmwave communications //2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – IEEE, 2016. – С. 94-99.

12. Yurduseven O., Assimonis S. D., Matthaiou M. Intelligent reflecting surfaces with spatial modulation: An electromagnetic perspective //IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – T. 1. – C. 1256-1266.

13. Ang P., Eleftheriades G. V. A passive redirecting Van Atta-type reflector //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – T. 17. – №. 4. – C. 689-692.

14. You C., Zheng B., Zhang R. Channel estimation and passive beamforming for intelligent reflecting surface: Discrete phase shift and progressive refinement //IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2020. – T. 38. – №. 11. – C. 2604-2620.

15. 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

16. 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.

17. 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)

18. 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.)

19. 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.

Experimental Study of Reconfigurable Intelligent Surfaces with Feedback from Users

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

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) have emerged as a promising technology to enhance the throughput and coverage of wireless networks by adaptively adjusting the phase and amplitude of reflected signals. The conventional approach to configuring RIS relies on transmitting channel state information from a Mobile Station (MS) to a Base Station (BS), with the BS subsequently adjusting the RIS through the BS-RIS communication channel. However, this approach necessitates integrating RIS into the operator's infrastructure, posing challenges for deployment in existing networks. This paper explores an alternative solution where RIS is configured using a connection with the MS. This approach allows deploying RIS without the need to inform the operator or upgrade the BS. To investigate the feasibility of proposed approach, an autonomous RIS prototype is developed for configuration without BS involvement. Experimental results are conducted in an existing cellular network using the prototype demonstrate a twofold increase in throughput in both uplink and downlink channels. The study reveals that the proposed RIS configuration mechanism can be applied in contention-based access networks, such as Wi-Fi. This alternative approach offers a flexible and efficient solution for deploying RIS technology in various wireless communication scenarios.

KEYWORDS: RIS, 5G, LTE.