

# Сравнение эффективности алгоритмов статистической настройки RIS<sup>1</sup>

И.А. Буртаков<sup>\*,\*\*\*</sup>, А.А. Куреев<sup>\*,\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук

<sup>\*\*</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

<sup>\*\*\*</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Поступила в редколлегию 01.11.2024 г. Принята 07.12.2024 г.

**Аннотация**—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) являются перспективной технологией, которая может улучшить пропускную способность и увеличить зону покрытия беспроводных сетей. Эффективность RIS зависит от ее конфигурации, которая настраивается с учетом положения передающих и принимающих устройств в пространстве, а также канальной информации. Среди различных классов алгоритмов настройки RIS выделяются алгоритмы *статистической настройки* RIS. Алгоритмы из этого класса позволяют производить настройку RIS, используя только информацию о мощности сигнала на приемнике, что позволяет использовать их на RIS в уже развернутых системах сотовой связи. Алгоритмы статистической настройки не подразумевают никаких входных данных или моделей, кроме информации о мощности принятого сигнала, и, следовательно, их можно легко реализовать в режиме plug-and-play. В данной работе исследуется производительность различных алгоритмов статистической настройки RIS, рассматривается скорость настройки RIS, зависимости отношения сигнал-шум на приемнике от битности управляющего элемента ячейки RIS и от уровня шума.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** RIS, слепая настройка, статистическая настройка, оценка канала, формирование луча.

DOI: 10.53921/18195822\_2024\_24\_4\_350

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) являются ключевой технологией для повышения производительности систем беспроводной связи будущего [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. За счет этого RIS позволяет увеличить мощность полезного сигнала на приемнике, расширить зону покрытия сети и уменьшить интерференцию от других источников сигнала. Также 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 базовой станцией (англ.: Base Station, BS) и мобильным устройством (англ.: Mobile Station, MS), для чего используются различные алгоритмы настройки фаз UC.

<sup>1</sup> Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

Чтобы полностью использовать потенциал RIS, необходимо проводить настройку RIS, варьируя фазовые сдвиги отраженной электромагнитной волны на каждой УС. Большинство существующих методов настройки RIS основаны на двухэтапной процедуре. Вначале каскадный канал BS-RIS-MS оценивается с помощью пилотных сигналов в нисходящем или восходящем канале [3, 4], а затем коэффициенты отражения каждой УС выбираются при помощи алгоритмов оптимизации [5]. Однако в соответствии со стандартами современных систем сотовой связи пилотные сигналы предназначены для оценки канала между BS и MS без настройки RIS. Таким образом, оценка каналов, задействующих RIS, требует значительных модификаций текущих сотовых протоколов. Более того, для настройки большого количества УС на RIS требуется радикальное увеличение числа пилотных сигналов для оценки многомерных каналов BS-RIS, RIS-MS или каскадного канала BS-RIS-MS [3], что влечет за собой чрезмерно высокие накладные расходы для существующих систем.

Чтобы обеспечить применение RIS в текущих и будущих системах беспроводной связи недавние исследовательские работы предлагают разработку более практичных подходов к настройке RIS, основанных на использовании методов математической статистики. В частности, вместо того, чтобы полагаться на пилотные сигналы, коэффициенты отражения RIS можно настраивать на основе множества измерений мощности принятого сигнала на MS [6, 7]. Эти значения можно определить в существующих системах сотовой связи, например, из мощности принятого опорного сигнала (англ.: Reference Signal Received Power, RSRP). Преимуществом данного типа настройки RIS является то, что он не требует дополнительных пилотных сигналов и полностью совместим с существующими технологиями сотовой связи.

Задача статистической настройки RIS сходна с задачей оптимизации черного ящика нулевого порядка (англ.: zero-order black box) [9]. Существует множество работ, посвященных аналитическому исследованию алгоритмов статистической настройки RIS [6–11, 15, 16]. Однако данные алгоритмы еще не сравнивались по скорости настройки RIS, которая является важным показателем эффективности внедрения RIS, особенно в существующие системы сотовой связи с ненулевым шумом в канале.

В данной работе проводится исследование скорости настройки RIS с использованием алгоритмов статистической настройки из работ [6, 7, 10, 11, 15]. Кроме этого, в данной работе проводится сравнительное исследование вышеуказанных алгоритмов статистической настройки в терминах устойчивости к шуму и зависимости эффективности от числа управляющих бит УС.

Работа устроена следующим образом. Раздел 2 описывает модель рассматриваемой беспроводной системы с RIS. В разделе 3 приводится описание исследуемых алгоритмов статистической настройки RIS. В разделе 4 представлены численные результаты. Раздел 5 завершает работу.

## 2. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ С RIS

Рассмотрим систему связи в нисходящем канале, состоящую из одноантенных BS и MS, а также RIS с  $M$  УС. RIS оснащен контроллером, который отвечает за регулировку фаз УС и прием сообщений о принимаемой мощности на MS по отдельному беспроводному каналу управления. Пусть  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ ,  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$  и  $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  обозначают матрицы подканалов BS-MS, RIS-MS и BS-RIS соответственно. Матрица поворота фаз на RIS представлена в виде диагональной матрицы  $\Phi \in \mathbb{C}^{M \times M}$  с элементами  $\Phi_{nn} = e^{j\varphi_n}$ ,  $n \in \{1, \dots, M\}$ . В реальных RIS фазовый сдвиг каждой УС может принимать значение из конечного дискретного набора. Пусть  $b$  обозначает число бит, используемых для равномерного квантования непрерывного фазового сдвига  $\varphi_n \in [0, 2\pi)$ . Следовательно, множество возможных дискретных фазовых сдвигов каждого УС можно представить как  $\Omega_K = \{0, \frac{2\pi}{K}, \dots, (K-1)\frac{2\pi}{K}\}$ , где  $K = 2^b$ . Пусть

$\boldsymbol{\varphi} \in \Omega_K^M$  обозначает вектор дискретных фазовых сдвигов на всех УС. Тогда матрица канала в основной полосе частот  $\tilde{\mathbf{H}}$  связи с помощью RIS между BS и MS может быть выражена как

$$\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{R}\Phi(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{T} + \mathbf{H}. \quad (1)$$

Принятый на MS сигнал  $\mathbf{y}$  определяется как

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\varphi}) = \sqrt{W}\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\varphi})s + \mathbf{n}, \quad (2)$$

где  $W$  — мощность передачи BS,  $s$  — сигнал передачи с единичной мощностью, а  $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2\mathbf{I})$  — гауссовский шум с мощностью  $\sigma^2$ .

Отношение сигнал-шум (англ.: Signal-to-Noise Ratio, SNR) на MS записывается как

$$f(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{P_t |\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\varphi})|^2}{\sigma^2}. \quad (3)$$

Целью настройки RIS является максимизация SNR на MS посредством оптимизации фазовых сдвигов УС. Данную задачу можно сформулировать в следующем виде

$$\max_{\boldsymbol{\varphi}} f(\boldsymbol{\varphi}), \text{ s.t. } \varphi_n \in \Omega_K, n \in \{1, \dots, M\}. \quad (4)$$

Задача (4) включает в себя  $M$  дискретных переменных и является невыпуклой, и, следовательно, ее крайне сложно решить, особенно при больших  $M$  и  $b$ . Пространство поиска аргумента  $\boldsymbol{\varphi}$  имеет мощность  $K^M = (2^b)^M$ , что чрезвычайно много даже для умеренных значений  $M$  и  $b$ . В следующем разделе представлены подходы к решению данной задачи.

### 3. АЛГОРИТМЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ

Согласно обзорному исследованию [16], алгоритмы статистической настройки RIS можно разделить на три группы, основываясь на методах сбора и обработки RSRP. Первая группа состоит из алгоритмов, использующих прегенерированные лучи (англ.: Codebook-Based Beamforming). Вторая группа включает в себя алгоритмы *слепой настройки* луча от RIS (англ.: Blind Beamforming). Третьей группой являются алгоритмы *восстановления канала* на основе RSRP (англ.: Channel Recovery). Алгоритмы из первой группы, включая [17–21], широко используются в случае высокой разреженности канальной матрицы, когда выбор наилучшего луча, направленного в определенную точку пространства, является эффективным решением для настройки RIS. Алгоритмы настройки RIS класса слепой настройки опираются на методы математической статистики и численной оптимизации для получения оптимальной конфигурации RIS с использованием собранных RSRP без необходимости какой-либо явной оценки информации о состоянии канала (англ.: Channel State Information, CSI). В подходе восстановления канала матрица канала сначала оценивается на основе собранных RSRP, а затем RIS настраивается с использованием некоторых существующих методов оптимизации для настройки RIS, когда матрица канала известна, таких как [22, 23].

Для настройки RIS рассматриваемые алгоритмы используют набор конфигураций RIS в дискретные моменты времени  $\mathcal{T} = \{t \in \mathbb{N} \cup \{0\}, t \leq T\}$ , где  $T$  — полное число измерений мощности. Каждый  $t \in \mathcal{T}$  соответствует измерению мощности  $P_t = 20 \log_{10} |\mathbf{y}(\boldsymbol{\varphi}_t)|$  на MS с вектором дискретных фазовых сдвигов  $\boldsymbol{\varphi}_t$  на RIS.

## 3.1. Алгоритмы слепой настройки

Работа [6] является одной из наиболее известных работ, использующих RSRP для слепой настройки RIS. В данной работе предлагается алгоритм *RFocus*, основанный на процедуре мажоритарного голосования. *RFocus* подходит для оптимизации RIS с 1-битными UC, которые могут иметь только два состояния для фазовых сдвигов: ON для  $\pi$  рад фазового сдвига и OFF для 0 рад фазового сдвига. Основная идея *RFocus* заключается в сравнении мощности  $P_t$  каждого измерения при случайной конфигурации  $\varphi_t \in \Omega_K^M$ ,  $t \in \mathcal{T}$  с накопленным медианным значением: если мощность, когда выбранный элемент  $m$  находится в определенном состоянии, оказывается выше медианы, то алгоритм добавляет голос за то, чтобы этот элемент находился в этом состоянии в конечной конфигурации. Затем *RFocus* выбирает состояние рассматриваемой UC на основе группы, где средняя измеренная MS мощность выше.

Развитием алгоритма *RFocus* является работа [7], где авторы представляют алгоритм условного выборочного среднего (англ.: Conditional Sample Mean, CSM), который использует условное математическое ожидание полученных RSRP для поиска оптимальной конфигурации RIS.

Вначале алгоритм CSM генерирует случайные конфигурации RIS из  $\Omega_K^M$  для любого момента  $t \in \mathcal{T}$ . Далее, пусть  $\mathcal{A}_{m,k} \subset \mathcal{T}$  обозначает подмножество всех тех  $t$ , у которых  $\varphi_{t,m} = k \frac{2\pi}{K}$ , то есть

$$\mathcal{A}_{m,k} = \left\{ t : \varphi_{t,m} = k \frac{2\pi}{K}, t \in \mathcal{T} \right\}, 0 \leq k \leq K - 1.$$

CSM вычисляет условное среднее значение измерения мощности  $P_t$ , обусловленное каждым  $\mathcal{A}_{m,k}$ , то есть,

$$\widehat{\mathbb{E}} \left[ P \mid \varphi_{T,m} = k \frac{2\pi}{K} \right] = \frac{1}{|\mathcal{A}_{m,k}|} \sum_{t \in \mathcal{A}_{m,k}} P_t.$$

Наконец, сдвиг фазы  $m$ -ой UC задается как

$$\varphi_{T,m}^{\text{CSM}} = \arg \max_{\omega \in \Omega_K} \widehat{\mathbb{E}} [P \mid \varphi_{T,m} = \omega], \quad m = 1, \dots, M.$$

CSM имеет много модификаций, которые расширяют его подход на настройку нескольких RIS [24–27], применение в системах несколькими пользователями [9], предварительную компенсацию эффекта Доплера [28] и настройку RIS с использованием обучения с подкреплением [10].

Дополнительно в работе [7] подробно проанализирован простой подход к выбору лучшей конфигурации RIS — Random Maximum Sampling (RMS). Идея RMS заключается в применении случайных конфигураций RIS во все моменты  $t \in \mathcal{T}$  с фазами, равномерно распределенными по дискретным фазовым сдвигам, заданным на  $\Omega_K$ . RIS использует конфигурацию, которая дает наибольшую мощность принятого сигнала, то есть

$$\varphi_T^{\text{RMS}} = \varphi_{t^*} \text{ где } t^* = \arg \max_{t \in \mathcal{T}} P_t.$$

Однако алгоритмы из работ [6, 7] показывают низкую производительность в случае, когда канал от BS до MS достаточно слабый [29]. Эта проблема решена в работах [29, 30]. Тем не менее все вышеупомянутые алгоритмы используют случайные конфигурации RIS для сбора статистической информации о системе. Поскольку случайные конфигурации создают на RIS луч с низким коэффициентом усиления, рассматриваемые выше алгоритмы не позволяют передавать данные во время настройки RIS, что значительно снижает производительность таких систем.

В работе [10] показано, что слепое формирование луча от RIS можно интерпретировать как  $\epsilon$ -жадный алгоритм [38] для решения задачи многорукого бандита. Следуя этой идеологии, авторы работы [10] используют метод градиентного семплирования GS (англ.: Gradient Sampling) [39] для оптимизации фазовых сдвигов UC.

Авторы работы [31] предлагают вероятностный байесовский метод настройки RIS. Однако авторы этой работы используют очень простую модель параметризации беспроводного канала для дальнейшей оценки его параметров, что ограничивает применимость работы [31] к реалистичным моделям канала. Кроме того, авторы предполагают, что канал между BS и MS полностью заблокирован. Данное предположение оправдано в случае систем миллиметрового диапазона частот, однако является значительным допущением для систем sub-6 ГГц [16].

В статье [11] представлен алгоритм настройки RIS, основанный на минимизации кросс-энтропии [12, 13]. Идея этого алгоритма заключается в итеративном улучшении конфигурации RIS с использованием выборки по важности (англ.: Importance Sampling) [14]. А именно, на первом шаге алгоритм генерирует большое количество случайных конфигураций RIS в соответствии с дискретным равномерным фазовым распределением на каждой UC. Затем алгоритм собирает соответствующие показатели производительности RSRP, используя конфигурации, сгенерированные на первом шаге, и сортирует их в порядке убывания относительно значения RSRP. Наконец, алгоритм обновляет фазовое распределение на каждом UC на основе RSRP из некоторого верхнего квантиля для генерации лучших новых случайных конфигураций на следующей итерации. Поскольку этот алгоритм использует собранные данные только из некоторого верхнего квантиля по значениям RSRP, он требует большого количества измерений RSRP при различных конфигурациях RIS для сбора информации, что снижает скорость настройки RIS.

На основе приведенного обзора для анализа выбраны следующие алгоритмы слепой настройки: RFocus [6], CSM, RMS [7], GS [10], CE [11].

### *3.2. Алгоритмы восстановления канала*

Статьи [15, 33] описывают класс алгоритмов восстановления матрицы канала с использованием измерений мощности. Авторы восстанавливают корреляционную матрицу SISO-канала, решая задачу минимизации ее ранга (англ.: Low-Rank-Approaching, LRA) с использованием собранных значений мощности в качестве ограничений. Применяются методы дробного программирования (англ.: fractional programming) и чередующейся оптимизации (англ.: alternating optimization). Оценка матрицы канала получается как численное решение задачи LRA. После этого алгоритм из работы [37] используется для получения конфигурации RIS. Для снижения вычислительной сложности также разработан приближенный алгоритм LRA (англ.: Approximate LRA, ALRA). Вышеупомянутые алгоритмы используют случайные конфигурации RIS для получения информации о системе, что требует генерации большого количества измерений, поскольку вся собранная информация распределяется между всеми UC. Кроме того, использование случайных конфигураций снижает устойчивость к шуму. Чтобы решить эту проблему, авторы предлагают устойчивые к шуму модификации упомянутых алгоритмов, называемые устойчивым LRA (англ.: Robust LRA, RLRA) и устойчивым ALRA (англ.: Robust ALRA, RALRA), которые призваны быть устойчивыми к шуму и ошибке квантования при измерениях мощности. Однако данные модификации имеют большое количество гиперпараметров, которые необходимо устанавливать для каждого сценария отдельно, что значительно снижает универсальность этих решений.

Другой способ восстановить информацию о канале — использовать нейронные сети. Авторы [34, 35] предлагают однослойную нейронную сеть для оценки матрицы канала на основе случайных конфигураций обучения RIS. Одним из примеров использования этого подхода

является задача улучшения покрытия с помощью RIS [36] в заданной области, где RIS настроена для максимизации средней производительности нескольких пользователей в заданной области. Описываемое решение с однослойной нейронной сетью имеет общие недостатки с методами, подобными LRA, но имеет худшую производительность [16], поэтому в данной работе мы ограничимся сравнением с алгоритмами типа LRA.

Таким образом, среди алгоритмов восстановления канала для анализа выбраны ALRA и RALRA [15]. Для сравнения с алгоритмами на основе прегенерированных лучей выбран алгоритм NBL (англ.: Narrow Beam Linear) из работы [21]. При использовании данного алгоритма RIS формирует направленные лучи в пространстве. RIS последовательно перебирает лучи по дискретной пространственной сетке и выбирает луч с наибольшим значением мощности RSRP. Верхняя граница производительности описанной системы с RIS получается путем оптимизации конфигурации RIS на основе идеального знания CSI с помощью алгоритма, предложенного в [37].

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В исследуемом сценарии центральная частота  $f_c = 2,605$  ГГц, что соответствует  $\lambda = 0,12$  м, мощность передатчика BS  $W = 46$  дБм, число элементов RIS  $M = 100$ , число бит управления UC  $b = 2$ , мощность шума  $\sigma^2 = -100$  дБм, если явно не обозначено иное. Массив элементов RIS моделируется прямоугольной антенной решеткой с числом UC  $M = M_x \times M_z$  и периодом  $\frac{\lambda}{2}$  [40]. Для расчета матриц каналов с RIS используется тип UC 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) [41], где  $q = 0,285$  — нормирующий коэффициент, который гарантирует, что эффективная площадь UC в направлении нормали к ней равна  $(\frac{\lambda}{2})^2$  [42], на BS и MS используются всенаправленные диаграммы направленности излучения. Геометрический центр RIS расположен в точке  $(0, 0, 5)$ , нормаль к поверхности RIS направлена вдоль оси  $x$ , BS имеет координаты  $(200, 0, 20)$ , позиция MS генерируется случайным образом в квадрате  $(x = [5, 11], y = [-3, 3], z = 2)$ . Все размеры представлены в метрах. В данной работе для получения матриц канала используется платформа моделирования QRIS [43]. Сценариями окружения для подканалов BS-MS, BS-RIS, RIS-MS являются UMi NLOS O2I, UMi LOS O2I, Indoor LOS/NLOS соответственно [44].

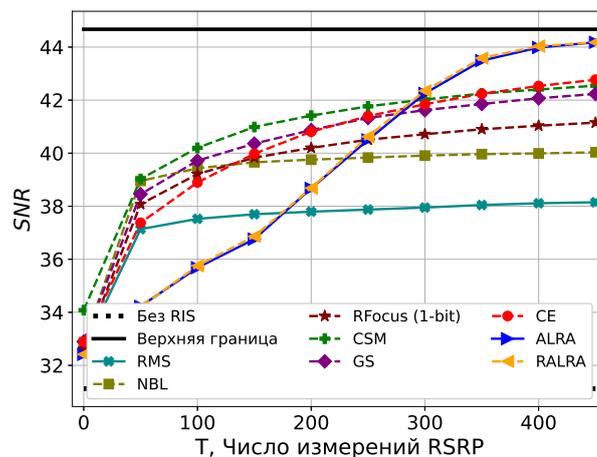


Рис. 1. Зависимость достижимого SNR от числа измерений RSRP.

Рассмотрим зависимость достижимого SNR от числа измерений RSRP  $T$  для различных алгоритмов. Проанализируем вначале поведение алгоритмов класса слепой настройки. Из рисунка 1 видно, что алгоритмы CSM и GS вначале превосходят CE, что объясняется требованием большого числа измерений RSRP для эффективной работы алгоритма CE. Однако при  $T \approx 400$  CE начинает превосходить все остальные алгоритмы класса слепой настройки. Алгоритмы из класса восстановления канала, ALRA и RALRA, при малых значениях  $T$  значительно уступают в эффективности всем остальным алгоритмам, поскольку решение задачи оптимизации является крайне неточным при малом  $T$ , что не дает провести точную настройку RIS по грубо оцененной матрице канала. Однако эффективность этих алгоритмов быстро растет с увеличением  $T$  и практически достигает верхней границы эффективности при  $T \approx 450$ . Эффективность данных алгоритмов практически одинакова, поскольку преимущества RALRA над ALRA проявляются только при высоком уровне шума  $\approx -85$ дБм [15]. В рассматриваемом сценарии алгоритм настройки NBL, использующий лучи от RIS, показывает меньшую эффективность, чем все алгоритмы, кроме лучшей случайной настройки (RMS), поскольку в данном сценарии с большой вероятностью отсутствует луч прямой видимости от RIS до MS.

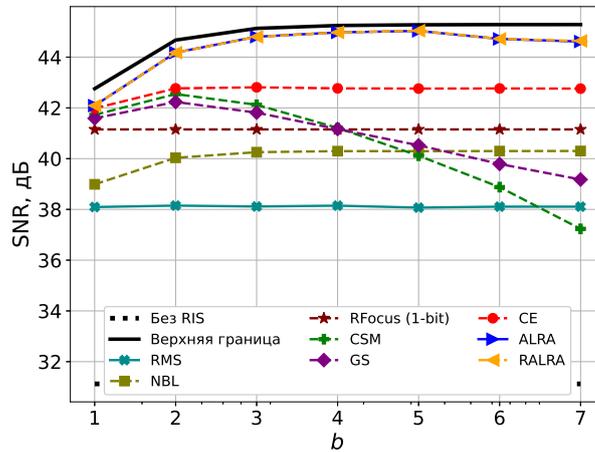


Рис. 2. Зависимость достижимого SNR от числа управляющих бит UC.

Далее, рассмотрим влияние числа управляющих бит UC  $b$  на достижимый SNR на рис. 2. Параметры эксперимента аналогичны рис. 1, используется  $T = 450$  измерений мощности RSRP. Из данного эксперимента видно, что среди алгоритмов класса слепой настройки с ростом числа бит в эффективности не теряют алгоритмы CE и RMS. Это связано с тем, что данные алгоритмы при сборе информации о мощности не делят ее между всеми состояниями всех UC, а оптимизируют настройку RIS в целом. В то же время алгоритмы CSM и GS теряют в эффективности, поскольку делят собранную информацию между всеми возможными состояниями всех UC. Алгоритмы класса восстановления канала показывают в этом эксперименте высокую эффективность и лишь немного теряют в производительности при переходе с  $b = 5$  на  $b = 6$ . Это связано с тем, что при большем числе управляющих бит становится сложнее различить значения мощности, полученные при близких значениях фазовых сдвигов UC. Поэтому оценка канала при помощи алгоритмов ALRA и RALRA становится менее точной. Эффективность алгоритма NBL не убывает с ростом  $b$ , поскольку построение луча становится более точным.

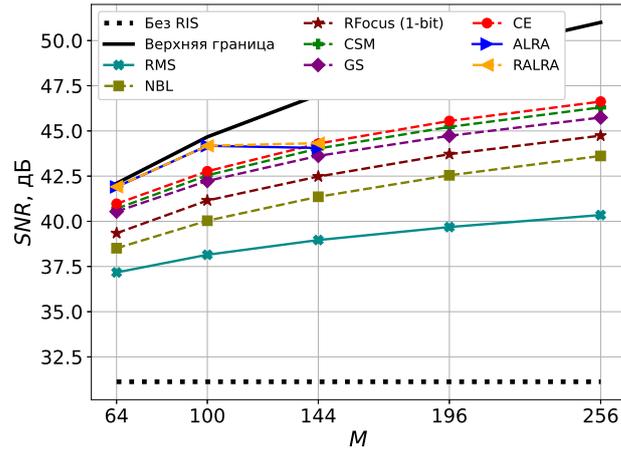


Рис. 3. Зависимость достижимого SNR от числа УС.

Рассмотрим влияние числа УС  $M$  на производительность системы с RIS, используя  $T = 450$  измерений мощности RSRP. Из рис. 3 видно, что эффективность всех алгоритмов класса слепой настройки монотонно растет при увеличении числа УС  $M$ . Однако расстояние от верхней границы достижимого SNR до кривых, соответствующих классу алгоритмов слепой настройки, тоже растет. Это связано с тем, что RIS с большим числом УС требует большего числа измерений мощности  $T$  для эффективного проведения настройки, а в данном сценарии число  $T$  фиксировано. В то же время, эффективность алгоритмов класса восстановления канала снижается при увеличении  $M$ , поскольку данный класс алгоритмов требует большего числа измерений мощности при увеличении  $M$  по сравнению с алгоритмами класса слепой настройки. В силу высокой вычислительной сложности алгоритмов ALRA и RALRA результаты для  $M > 144$  получить не представляется возможным [9].

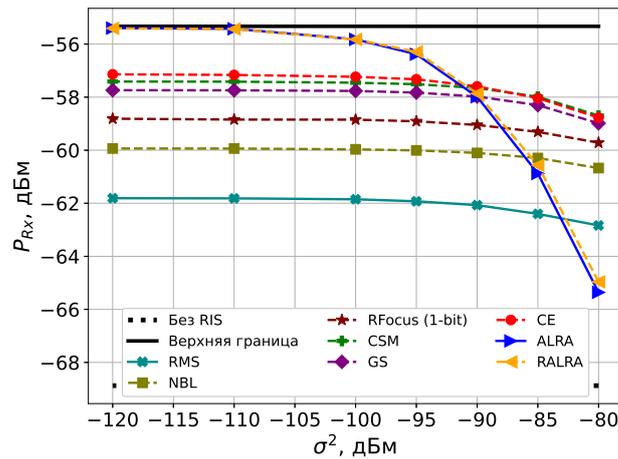


Рис. 4. Зависимость достижимой мощности сигнала на MS от мощности шума.

Наконец, рассмотрим влияние мощности шума  $\sigma^2$  на мощность сигнала на MS. Из рис. 4 видно, что эффективность алгоритмов класса слепой настройки практически не снижается

при увеличении мощности шума с  $-120$  дБм до  $-95$  дБм. В то же время алгоритмы ALRA и RALRA значительно теряют в производительности при увеличении шума, что объясняется невозможностью точно решить задачи оптимизации с зашумленными ограничивающими условиями. Хотя модификация RALRA разработана для повышения устойчивости к шуму, она показывает незначительное увеличение производительности относительно ALRA при высоком уровне шума.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен сравнительный анализ статистических алгоритмов настройки RIS, основанных на сборе информации о мощности принятого сигнала RSRP. Оценена скорость настройки RIS, зависимости отношения сигнал-шум на приемнике от битности управляющего элемента ячейки RIS и от уровня шума. Показано отличие в производительности алгоритмов различных классов: слепой настройки, восстановления канала и регенерированных лучей. В работе продемонстрировано, что алгоритмы из класса восстановления канала, ALRA и RALRA, позволяют быстрее достичь производительности, близкой к верхней границе, однако являются более восприимчивыми к шуму, чем алгоритмы класса слепой настройки RIS. Кроме этого, в работе показано, что часть алгоритмов из класса слепой настройки, например, CSM и GS, значительно теряет в эффективности при большом числе управляющих бит UC. При увеличении числа элементов RIS и фиксированном количестве измерений мощности RSRP алгоритмы ALRA и RALRA быстрее теряют в эффективности по сравнению с алгоритмами из класса слепой настройки. Таким образом, открытой задачей является создание алгоритма настройки RIS, использующего измерения мощности RSRP, который не уступал бы по достижимому значению SNR алгоритмам класса восстановления канала, а по шумоустойчивости - алгоритмам слепой настройки. Кроме этого необходимо, чтобы такой алгоритм не терял в эффективности при увеличении числа бит UC.

## 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. 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. Zheng B., You C., Zhang R. Fast channel estimation for IRS-assisted OFDM //IEEE Wireless Communications Letters. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 580-584.
5. Zheng B. et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 1035-1071.
6. Arun V., Balakrishnan H. RFocus: Beamforming using thousands of passive antennas //17th USENIX symposium on networked systems design and implementation (NSDI 20). – 2020. – С. 1047-1061.
7. Ren S. et al. Configuring intelligent reflecting surface with performance guarantees: Blind beamforming //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Т. 22. – №. 5. – С. 3355-3370.
8. Wang W., Zhang W., Xiong H. Model-Free Configuration of Intelligent Reflecting Surfaces: Toward Pervasive Adaptability and Enhanced Robustness //IEEE Wireless Communications. – 2023. – Т. 31. – №. 2. – С. 142-148.
9. Xu F. et al. Blind Beamforming for Coverage Enhancement with Intelligent Reflecting Surface //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2024.

10. Lai W., Shen K. Blind Beamforming for Intelligent Reflecting Surface: A Reinforcement Learning Approach //ICASSP 2024-2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2024. – С. 8956-8960.
11. Chen T. et al. Model-free Optimization and Experimental Validation of RIS-assisted Wireless Communications under Rich Multipath Fading //IEEE Wireless Communications Letters. – 2023.
12. Dvorkin, G.D. Geometric Interpretation of the Entropy of Sofic Systems //Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 2. – С. 115-127.
13. Golubev, G.K. Overparameterized Maximum Likelihood Tests for Detection of Sparse Vectors//Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 1. – С. 41-56.
14. Uglovskii, A.Y. and Melnikov, I.A. and Alexeev, I.A. and Kureev, A.A. Effective Error Floor Estimation Based on Importance Sampling with the Uniform Distribution //Problems of Information Transmission. – 2023. – Т. 59. – №. 4. – С. 217-224.
15. Yan G., Zhu L., Zhang R. Power Measurement Enabled Channel Autocorrelation Matrix Estimation for IRS-Assisted Wireless Communication //arXiv preprint arXiv:2407.20252. – 2024.
16. Wu Q. et al. Intelligent surfaces empowered wireless network: Recent advances and the road to 6G //Proceedings of the IEEE. – 2024.
17. Jamali V. et al. Power efficiency, overhead, and complexity tradeoff of IRS codebook design—Quadratic phase-shift profile //IEEE Communications Letters. – 2021. – Т. 25. – №. 6. – С. 2048-2052.
18. Wang J. et al. Hierarchical codebook-based beam training for RIS-assisted mmWave communication systems //IEEE Transactions on Communications. – 2023. – Т. 71. – №. 6. – С. 3650-3662.
19. Wei X. et al. Codebook design and beam training for extremely large-scale RIS: Far-field or near-field? //China Communications. – 2022. – Т. 19. – №. 6. – С. 193-204.
20. Alexandropoulos G. C. et al. Near-field hierarchical beam management for RIS-enabled millimeter wave multi-antenna systems //2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). – IEEE, 2022. – С. 460-464.
21. Poyda A. et al. Fast Wide Beam Adjustment of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Practical Deployments //IEEE Access. – 2024.
22. Yan G., Zhu L., Zhang R. Passive reflection optimization for IRS-aided multicast beamforming with discrete phase shifts //IEEE Wireless Communications Letters. – 2023. – Т. 12. – №. 8. – С. 1424-1428.
23. 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. – Т. 38. – №. 11. – С. 2604-2620.
24. Xu F. et al. Coordinating multiple intelligent reflecting surfaces without channel information //IEEE Transactions on Signal Processing. – 2023. – Т. 72. – С. 31-46.
25. Lai W. et al. Blind Beamforming for Intelligent Reflecting Surface in Fading Channels without CSI //arXiv preprint arXiv:2305.18998. – 2023.
26. Yao J. et al. Blind beamforming for multiple intelligent reflecting surfaces //ICC 2023-IEEE International Conference on Communications. – IEEE, 2023. – С. 871-876.
27. Xu F. et al. Blind Beamforming for Multiple-IRS Assisted Wireless Transmission //2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). – IEEE, 2023. – С. 136-140.
28. Han F. et al. Blind beamforming for RIS-aided high-speed train communication with Doppler pre-compensation //2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). – IEEE, 2023. – С. 1-6.
29. Wang W. et al. Adaptive Beamforming for Non-Line-of-Sight IRS-Assisted Communications without CSI //2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE, 2023. – С. 1-6.

30. Lai W. et al. Adaptive Blind Beamforming for Intelligent Surface //IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2024.
31. Chêne T., Othman G. R. B. Adaptive Bayesian Method for RIS Passive Beamforming //2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – IEEE, 2024. – C. 1-6.
32. Wang W., Zhang W. Intelligent reflecting surface configurations for smart radio using deep reinforcement learning //IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2022. – T. 40. – №. 8. – C. 2335-2346.
33. Yan G., Zhu L., Zhang R. Channel autocorrelation estimation for IRS-aided wireless communications based on power measurements //2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). – IEEE, 2023. – C. 1457-1462.
34. Yan G., Zhu L., Zhang R. Power Measurement Enabled Channel Autocorrelation Matrix Estimation for IRS-Assisted Wireless Communication //arXiv preprint arXiv:2407.20252. – 2024.
35. Sun H. et al. Power-Measurement-Based Channel Autocorrelation Estimation for IRS-Assisted Wideband Communications //arXiv preprint arXiv:2411.00374. – 2024.
36. Sun H. et al. Power Measurement Based Channel Estimation for IRS-Enhanced Wireless Coverage //arXiv preprint arXiv:2405.12432. – 2024.
37. Ren S. et al. A linear time algorithm for the optimal discrete IRS beamforming //IEEE Wireless Communications Letters. – 2022. – T. 12. – №. 3. – C. 496-500.
38. Watkins C. J. C. H. Learning from delayed rewards. – 1989.
39. Sutton R. S. Reinforcement learning: An introduction //A Bradford Book. – 2018.
40. Dunna M. et al. ScatterMIMO: Enabling virtual MIMO with smart surfaces //Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – 2020. – C. 1-14.
41. Nayeri P., Yang F., Elsherbeni A. Z. Reflectarray antennas: theory, designs, and applications. – 2018.
42. 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. – C. 829-835.
43. Burtakov I. et al. QRIS: a QuaDRiGa-based simulation platform for reconfigurable intelligent surfaces //IEEE Access. – 2023.
44. Zhu Q. et al. 3GPP TR 38.901 channel model //the wiley 5G Ref: the essential 5G reference online. – Hoboken, NJ, USA : Wiley Press, 2021. – C. 1-35.

## Performance evaluation of statistical RIS adjustment algorithms

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

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) are a promising technology that can improve the throughput and extend the coverage area of wireless networks. The efficiency of RIS depends on its configuration, which is adjusted taking into account the spatial positions of transmitting and receiving devices, as well as channel information. Among the various classes of RIS adjustment algorithms, *statistical adjustment* can be classified into separate class. Algorithms from this class allow to adjust RIS using only information about the signal power at the receiver. This allows to use them in RIS in already deployed cellular communication systems. Statistical adjustment algorithms do not imply any input data or models except for information about the received signal power. Therefore, they can be easily implemented in plug-and-play mode. In this paper, we investigate the performance of various statistical RIS adjustment algorithms. Namely, we consider the RIS adjustment speed, the dependence of the signal-to-noise ratio on the number of contor bits of the RIS cell element and on the noise level.

**KEYWORDS:** RIS, blind beamforming, statistical reconfiguration, channel estimation, beamforming.