СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ/SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION

DOI: https://doi.org/10.60797/itech.2024.3.1

ОПТИМИЗАЦИЯ КАНАЛА MIMO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RIS

Научная статья

Чурашов А.М.[1,] *, Локтев Д.А.[2], Пащенко П.П.[3], Федосеев С.А.[4], Баженов А.Э.[5], Малахов С.В.[6]
[1, 2, 3, 4, 5, 6] Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ubelwertyas[at]gmail.com)

Аннотация

В современных мобильных сетях наблюдается рост потребностей в высоких скоростях передачи данных, что ставит перед индустрией вызов улучшить производительность коммуникационных систем. Одним из ключевых решений является применение технологии MIMO (множественный вход-множественный выход), которая позволяет увеличить пропускную способность каналов. Однако с увеличением использования MIMO возникают новые проблемы, включая увеличение корреляции каналов, что негативно сказывается на производительности систем. Для решения этих проблем предлагается инновационное решение – внедрение реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей (RIS). Это позволяет оптимизировать производительность системы, регулируя фазу и амплитуду отражаемых сигналов. В данном исследовании проведена симуляция системы MIMO с RIS, результаты которой показывают увеличение скорости передачи данных и эффективного ранга канала. Полученные данные подтверждают потенциал RIS для оптимизации беспроводных коммуникационных сетей, что открывает новые перспективы в области развития телекоммуникационных технологий.

Ключевые слова: реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (RIS), множественный вход-множественный выход (MIMO), измерение, радиоэлектронное средство (РЭС), эффективный ранг, метод на основе кодовой книги (МСА), передатчик, приёмник.

MIMO CHANNEL OPTIMIZATION USING RIS

Research article

Churashov A.M.[1,] *, Loktev D.A.[2], Pashchenko P.P.[3], Fedoseev S.A.[4], Bazhenov A.E.[5], Malakhov S.V.[6]
[1, 2, 3, 4, 5, 6] Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (ubelwertyas[at]gmail.com)

Abstract

In today's mobile networks, there is an increasing demand for high data transmission speeds, challenging the industry to improve the performance of communication systems. One of the key solutions is the use of MIMO (multiple-input-multiple-output) technology, which increases channel capacity. However, as the use of MIMO increases, new challenges arise, including increased channel correlation, which negatively impacts system performance. To address these challenges, an innovative solution is proposed by implementing reconfigurable intelligent surfaces (RIS). This allows to optimize the system performance by adjusting the phase and amplitude of the reflected signals. In this study, a simulation of a MIMO system with RIS is carried out, and the results show an increase in data rate and effective channel rank. The findings confirm the potential of RIS to optimize wireless communication networks, which opens new perspectives in the field of telecommunication technology development.

Keywords: reconfigurable intelligent surface (RIS), multiple input-multiple output (MIMO), sensing, radio-electronic means (REM), effective rank, Electronic Codebook (ECB), transmitter, receiver.

Введение

В последние годы растущее присутствие различных услуг мобильной связи, таких как потоковое видео и онлайн-игры, вызвало значительный всплеск потребности в более высоких скоростях передачи данных. Для удовлетворения растущих потребностей были применены различные технологии. Среди них выделяется технология «множественный вход-множественный выход» (MIMO) как решение для увеличения пропускной способности системы без необходимости использования дополнительных частотных ресурсов. Однако по мере широкого распространения MIMO возникли новые проблемы. В средах распространения, характеризующиеся сильными прямыми линиями (LoS) и ограниченным рассеянием, корреляция в каналах MIMO увеличивается. Это явление ослабляет мультиплексирование MIMO, что приводит к снижению возможности поддержки нескольких потоков данных и, как следствие, к снижению производительности систем связи. Решением может являться RIS, которая может динамически манипулировать электромагнитными волнами [3, С. 2450-2525], [9, С. 8238-8242], что дает возможность настраивать беспроводные каналы [12, С. 4505-4519]. Были проведены некоторые исследования по использованию RIS как части каналов MIMO для повышения достижимой скорости систем [11, С. 3865-3882]. Эти связанные работы демонстрируют способность RIS улучшать достижимые скорости систем MIMO в различных сценариях. Кроме того, RIS можно использовать для улучшения производительности системы за счет прямого повышения эффективного ранга [1, С. 606-610] или минимальное сингулярное значение канала MIMO [13, С. 226-230]. Однако алгоритмы оптимизации, предложенные в вышеупомянутых ссылках, сложны и не могут быть легко применимы к практическим системам, что приводит к отсутствию соответствующих экспериментальных измерений.

RIS и MIMO

RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) – представляет собой массив элементов, каждый из которых может независимо от других производить требуемый сдвиг отражённой электромагнитной волны по фазе, а также, возможно, увеличивать его амплитуду *рис.1*. Регулируя фазу и амплитуду на всех элементах массива, можно достигать изменения направления суммарной отражённой электромагнитной волны с концентрацией луча в определённом направлении. Каждый элемент RIS может состоять из множества составных частей, которые называются ячейками элемента. Ячейки элемента могут иметь разную форму и разные размеры. Если все элементы RIS выполнены из одинакового набора ячеек и если они расположены в определённом повторяющемся порядке, то расстояние между одинаковыми ячейками в соседних элементах называется «периодом метаповерхности» (metasurface period).

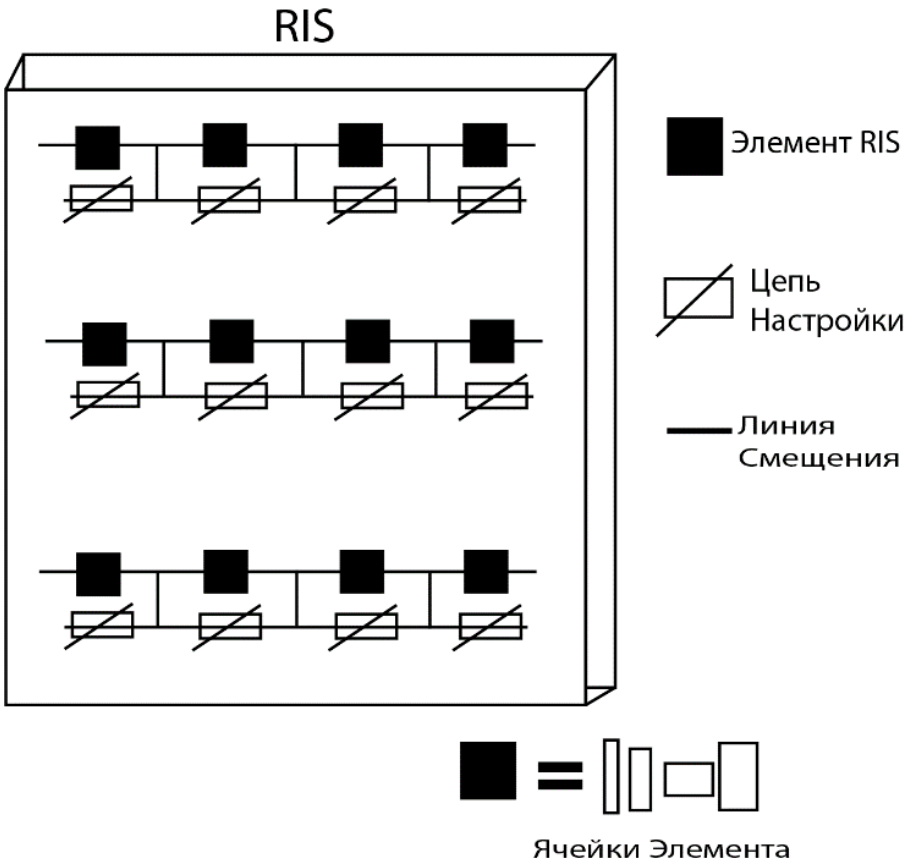

Рисунок 1 - Схематическое изображение RIS
DOI: https://doi.org/10.60797/itech.2024.3.1.1

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – это передовая технология в области беспроводных коммуникаций, которая использует несколько антенн как на стороне передачи, так и на стороне приема, для одновременной передачи и приема множества независимых данных через один и тот же радиочастотный канал. В системах MIMO сигнал разделяется на несколько потоков, которые передаются через различные антенны, а затем собираются на принимающей стороне. Эта технология позволяет эффективно использовать многопутевые эффекты в радиоканале, улучшает качество связи, увеличивает пропускную способность и повышает надежность передачи данных. MIMO также обеспечивает возможность применения методов обработки сигналов, таких как пространственное мультиплексирование, пространственная обработка сигналов и формирование лучей, для оптимизации производительности беспроводных систем связи.

Взаимодействие между MIMO и RIS

Взаимодействие между технологиями MIMO и RIS связано с использованием множества антенн и рефлективной поверхности для улучшения беспроводной связи. Технология MIMO использует множество антенн для передачи и приема данных, обеспечивая параллельную передачу нескольких потоков информации. Это позволяет увеличить пропускную способность канала и повысить эффективность передачи данных путем использования пространственной и временной многопутевой передачи.

С другой стороны, технология RIS представляет собой поверхность, на которой размещены множество активных элементов, способных регулировать фазу и амплитуду отражаемых сигналов. Эти элементы позволяют создавать контролируемые фазовые и амплитудные изменения в отраженных сигналах, что может использоваться для оптимизации характеристик канала связи.

Взаимодействие между MIMO и RIS заключается в том, что RIS может быть использована для активного влияния на многопутевой канал связи, который обычно используется в MIMO системах. Путем правильного настройки фазы и амплитуды отраженных сигналов с помощью RIS, можно изменить характеристики канала связи, такие как амплитуда,

фаза, угол прихода и временная задержка. Это в свою очередь может улучшить пропускную способность, надежность и покрытие беспроводных коммуникационных систем.

Технологии оптимизации MIMO

В области оптимизации MIMO (Multiple Input Multiple Output) существует несколько технологий, которые используются для улучшения производительности и эффективности беспроводных коммуникационных систем. Примеры некоторых технологий:

1. Пространственное мультиплексирование (Spatial Multiplexing): Эта техника позволяет увеличить пропускную способность канала путем одновременной передачи нескольких независимых потоков данных через различные антенны. Это достигается за счет использования пространственного разнообразия канала.

2. Пространственная обработка сигналов (Spatial Signal Processing): Осуществляется с помощью алгоритмов обработки сигналов, которые позволяют эффективно управлять сигналами, полученными от различных антенн, для улучшения качества приема и снижения уровня помех.

3. Формирование лучей (Beamforming): Эта технология позволяет направлять сигналы в определенные направления с помощью фазовой регулировки сигналов на различных антеннах. Таким образом, можно увеличить сигнал-шумовое отношение и улучшить качество связи в конкретных направлениях.

4. Обратная связь (Feedback): Используется для оценки канала связи и передачи информации обратно на передатчик для адаптивного изменения параметров передачи данных, таких как мощность и кодирование, для оптимальной работы MIMO системы.

5. Преобразование пространственного времени (Space-Time Coding): Эта техника позволяет использовать пространственное разнообразие и временное разнообразие для увеличения надежности передачи данных и уменьшения влияния помех и искажений канала.

Путем комбинирования этих технологий можно добиться оптимальной производительности и эффективности систем MIMO в различных условиях и средах передачи данных.

Развертывание системы связи MIMO с поддержкой RIS

В данном разделе рассматривается модель канала MIMO с поддержкой RIS, которая изображена на Рис. 2. Также будет упомянут эффективный метод оптимизации RIS, называемый алгоритмом максимальной перекрестной замены (MCA), для повышения эффективного ранга канала MIMO для увеличения скорости передачи данных. Для этого будет использоваться системное моделирование и рассмотрение метода (MCA) с целью проверки эффективности RIS в повышении эффективного ранга и скорости передачи данных.

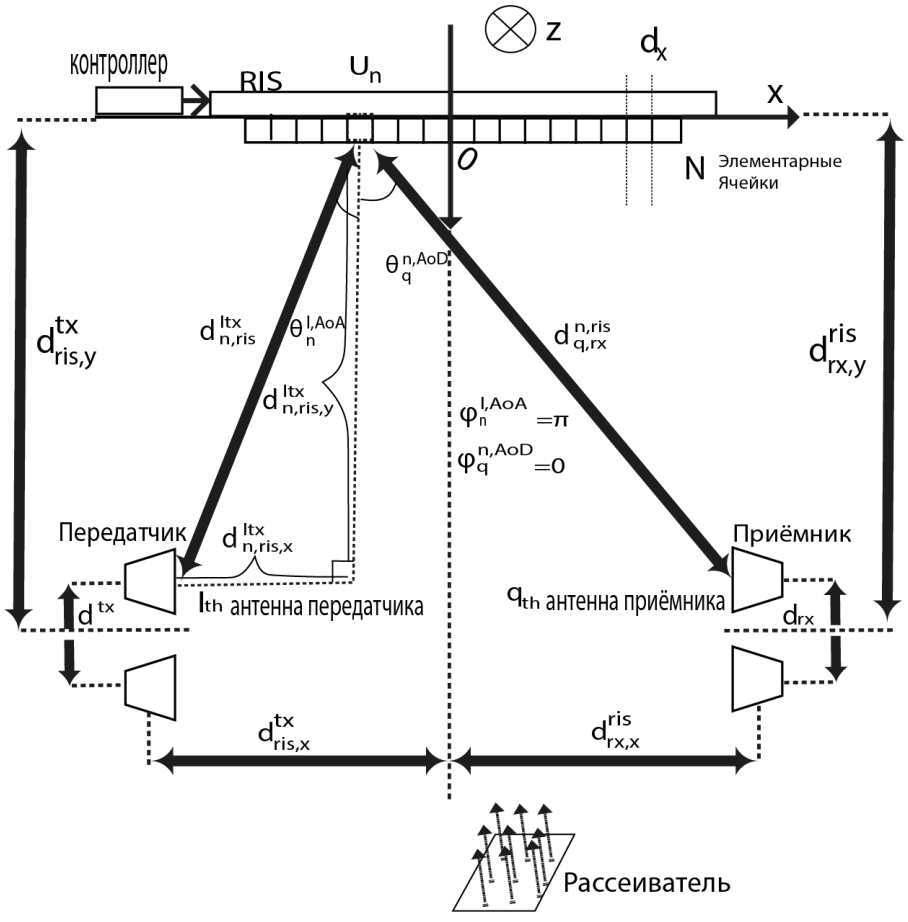

Рисунок 2 - Модель системы связи 2 MIMO с поддержкой RIS 2×2

DOI: https://doi.org/10.60797/itech.2024.3.1.2

Системное моделирование

Рассмотрим систему связи с множественным входом и множественным выходом (MIMO), в которой используется реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (RIS), как показано на Рис.2. У передатчика и приемника по L и Q антенн соответственно. RIS состоит из N ячеек. Весь MIMO-канал между передатчиком и приемником состоит из канала, усиленного RIS, и канала без участия RIS, который можно моделировать следующим образом:

$$\mathrm{H} = \sqrt{aH_{rx}^{ris}\Gamma\mathrm{H}_{ris}^{tx}} + \sqrt{a-1}\left(\sqrt{\frac{K}{1+K}}\mathrm{H}_{Los} + \sqrt{\frac{1}{1+K}}\mathrm{H}_{NLoS}\right)$$

$H_{rx}^{ris}\Gamma\mathrm{H}_{ris}^{tx}$

RIS – вспомогательный канал

$$\left(\sqrt{\frac{K}{1+K}}\mathrm{H}_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{1+K}}\mathrm{H}_{NLoS}\right)$$

Канал без посторонней помощи

Где $H_{ris}^{tx} \in \mathbb{C}^{N\times L}$ и $H_{rx}^{tx} \in \mathbb{C}^{Q\times N}$ представляют канал между передатчиком и RIS, и канал между RIS и приемником соответственно. $\Gamma \in \mathbb{C}^{N\times N}$ является диагональной матрицей, состоящей из коэффициентов отражения каждой ячейки. $H_{LoS} \in \mathbb{C}^{Q\times L}$ и $H_{HLoS} \in \mathbb{C}^{Q\times L}$ представляют линию прямой видимости (LoS) и пути без прямой видимости (NLoS) между передатчиком и приемником соответственно. $\alpha \in (0,1)$ обозначает отношение мощности канала с помощью RIS, то есть отношение мощности $H_{ris}^{tx}\Gamma H_{ris}^{tx}$ в общем канале **H**. K – это фактор Рисена неиспользуемого канала без RIS. Конкретно, канал между передатчиком и RIS можно выразить следующим образом:

$$\mathrm{H}_{ris}^{tx} = \begin{bmatrix} h_{1,ris}^{1,tx} & h_{1,ris}^{2,tx} & \cdots & h_{1,ris}^{L,tx} \\ h_{2,ris}^{1,tx} & h_{2,ris}^{2,tx} & \cdots & h_{2,ris}^{L,tx} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,ris}^{1,tx} & h_{N,ris}^{2,tx} & \cdots & h_{N,ris}^{L,tx} \end{bmatrix}$$

Где $h_{n,ris}^{l,tx}$ это коэффициент канала между l_{th}(l = 0, 1, …, L) антенной передатчика и n_{th}(n = 0, 1, …, N) блоком элементов U_n. Предположим, что как передатчик, так и приемник находятся в ближней зоне отражающей поверхности, но в дальней зоне от каждого блока элементов РЭС. Учитывая потери распространения беспроводного сигнала между ними, коэффициент канала можно моделировать как:

$$h_{n,ris}^{l,tx} = \sqrt{\frac{G_{tx}F\left(\theta_n^{l,AoA},\varphi_n^{l,AoA}\right)d_x d_z}{4\pi\left(d_{n,ris}^{l,tx}\right)^2}} \times e^{-j2\pi d_{n,ris}^{l,tx}/\lambda}$$

Где G_{tx} означает усиление каждой передающей антенны, $\theta_n^{l,AoA}$ и $\varphi_n^{l,AoA}$ обозначает угол прихода (AoA) от l_{th} передающей антенны к ячейке это нормализованная диаграмма направленности мощности каждой ячейки. d_x и d_x Обозначают ширину и длину каждой ячейки, соответственно. $d_{n,ris}^{l,tx}$ обозначает расстояние между l_{th} и передающей антенной и ячейкой U_n, и λ представляет собой длину волны.

Эффективный ранг MIMO

Эффективный ранг – это понятие из области линейной алгебры и матричных вычислений, которое используется для оценки информационной емкости системы или матрицы. В контексте беспроводных коммуникаций и технологий MIMO (Multiple Input Multiple Output). Эффективный ранг будет использоваться в качестве показателя для оценки ортогональности среди подканалов MIMO. Эффективный ранг канала MIMO **H** между передатчиком и приемником может быть выражен как:

$$\mathrm{erank}(H) = \exp\left(\sum_{i=1}^{\mathrm{rank}(H)} -\sigma_i' n \sigma_i'\right)$$

где erank(**H**) – ранг канала MIMO, а $\sigma_i'=\sigma_i/\sum_i\sigma_i$ – нормализованное сингулярное значение.

Включение RIS в качестве компонента канала MIMO позволяет оптимизировать конфигурацию RIS для улучшения эффективного ранга канала MIMO **H**, тем самым улучшая ортогональность подканалов и общую производительность системы. Таким образом, цель оптимизации можно сформулировать следующим образом:

maximize erank(H)

subject to $\forall\phi_n\in\Xi_b$,n=1,2,…,N.

Оптимизация RIS методом (MCA)

MCA – метод на основе кодовой книги, который выбирает лучшие конфигурации из кодовой книги и генерирует оптимальные конфигурации путем перекрестной замены частей этих лучших конфигураций.

Процедура оптимизации RIS с помощью MCA описывается следующим образом.

8.1. Перебор генерируемых оптимальных конфигураций

В MCA сначала генерируется набор *T* случайных конфигураций фазы RIS, т.е. $\Psi=\{\phi_1,\ldots,\phi_T\}$. Затем RIS настраивается в соответствии с этими *T* случайными конфигурациями и получается соответствующий эффективный ранг канала MIMO **H**. Кроме того, *T* случайные конфигурации RIS сортируются в порядке возрастания на основе их индивидуальных эффективных рангов, и две верхние конфигурации выбираются в качестве родительского набора, Ψ_{parent}. Чтобы сгенерировать новый набор конфигураций фазы RIS для следующего шага алгоритма, необходимо выразить соответствующий родительский набор: $\Psi_{parent}=\{\phi_{max}, \phi_{submax}\}$ где ϕ_{max} и ϕ_{submax} представляют

конфигурацию RIS с наивысшим и вторым по величине эффективным рангом соответствующего канала MIMO **H** в наборе Ψ соответственно.

8.2. Перекрестное обменное наложение родительских конфигураций

Производится генерации потомков конфигурации фаз RIS, обозначаемые как $\Psi son = \phi_1^{son}, \phi_2^{son}, \ldots, \phi_{2N_{new}}^{son}$ путем последовательной перекрестной замены конструкций фаз первых N_{new} элементарных ячеек из родительских конфигураций $\{\Phi_{max},\Phi_{submax}\}$.

После применения каждой новой сгенерированной конфигурации потомков к RIS вычисляется соответствующий эффективный ранг канала MIMO **H**.

Симуляция и результат

Для симуляций модели системы связи 2 MIMO с поддержкой RIS 2×2 воспользуемся интерактивной средой вычислений и программирования (MATLAB).

Симуляция модели включает в себя следующие этапы:

1. Определение параметров системы:

Задаются основные характеристики системы, такие как количество антенн на передатчике и приемнике, частота сигнала, ширина полосы пропускания и параметры RIS.

2. Генерация каналов MIMO и RIS:

Создаются матрицы каналов MIMO и RIS с учетом случайных характеристик, таких как затухание и фазовые сдвиги.

3. Создание данных для передачи:

Генерируются данные, которые будут передаваться через канал MIMO с учетом заданных параметров системы.

4. Моделирование передачи данных:

Используется созданный канал MIMO и RIS для передачи сгенерированных данных, учитывая воздействие RIS на сигналы.

5. Демодуляция и декодирование данных:

Производится прием переданных данных и их демодуляция и декодирование для восстановления передаваемой информации.

6. Оценка производительности системы:

Анализируются полученные данные для оценки производительности системы связи, включая скорость передачи данных и уровень ошибок.

7. Оптимизация параметров RIS:

Проводится оптимизация параметров RIS для улучшения производительности системы.

8. Представление результатов:

На этом этапе результатов симуляции производится подсчет итоговых вычислений для анализа производительности системы.

При соблюдении этапов указанных ранее симулируется модель изображенная на ***Рис.2*** в интерактивной среде вычислений и программирования (MATLAB) и получаются следующие результаты. При использовании одного элемента RIS (H= 16), скорость передачи данных вначале увеличится на 9,6%, а затем стабилизируется на уровне 6,7%. При этом эффективный ранг повысится на 28,1%. При использовании двух элементов RIS (H= 32), произойдет увеличение скорости передачи данных на 13,56%. По итогам полученных результатов было установлено, что канал с поддержкой RIS, приводит к увеличению скорости передачи данных и повышению эффективного ранга, что доказывает и подтверждает эффективность использование RIS в оптимизации MIMO.

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать заключение о том, что использование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей в каналах MIMO является эффективным методом для увеличения производительности беспроводных коммуникационных систем. Это подтверждает потенциал RIS в области оптимизации и повышения эффективности передачи данных, что делает данную технологию перспективной для использования в будущем в гетерогенных сетях с целью повышения спектральной эффективности.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Roy O. The effective rank: A measure of effective dimensionality / O. Roy, M. Vetterli // Proc. 15th Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO). — 2007. — P. 606-610.
2. Perovic N.S. Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces / N.S. Perovic [et al.] // IEEE Trans. Wireless Commun. — 2021. — Vol. 20. — №6. — P. 3865-3882.

3. Di Renzo M. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead / M. Di Renzo [et al.] // IEEE J. Select. Areas Commun. — 2020. — Vol. 38. — №11. — P. 2450-2525.

4. Robert W. Foundations of MIMO Communication / W. Robert. Jr. Heath, L. Angel. — 2018.

5. Peck A. Clark's Essential PACS, RIS and Imaging Informatics / A. Peck.

6. Rains J. RIS-Enhanced MIMO Channels / J. Rains, A. Tukmanov, Q. Abbasi [et al.] // Urban Environments: Experimental Insights. — Glasgow: Watt School of Engineering.

7. Cisco Visual Network Index: Global Mobile Traffic Forecast Update 2016–2021. Technical report. — 2017.

8. Vargauzin V.A. Methods for increasing the energy and spectral efficiency of digital radio communications / V.A. Vargauzin. — 2013.

9. Han Y. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI / Y. Han, W. Tang, S. Jin [et al.] // IEEE Trans. Veh. Technol. — 2019. — Vol. 68. — №8. — P. 8238-8242.

10. Sang J. Coverage enhancement by deploying RIS in 5G commercial mobile networks: Field trials / J. Sang [et al.] // IEEE Wireless Commun., early access. — 2022.

11. Perovic N.S. Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces / N.S. Perovic [et al.] // IEEE Trans. Wireless Commun. —2021. — Vol. 20. — №6. — P. 3865-3882.

12. Chen W. Channel customization for limited feedback in RIS-assisted FDD systems / W. Chen, C.-K. Wen, X. Li [et al.] // IEEE Trans. Wireless Commun. — 2023. — Vol. 22. — №7. — P. 4505-4519.

13. El Mossallamy M.A. On spatial multiplexing using reconfigurable intelligent surfaces / M.A. El Mossallamy [et al.] // IEEE Wirel. Commun. Lett. — 2021. — Vol. 10. — №2. — P. 226-230.