

УДК 621.396.41

М. Исса, Д.Я. Суханов

## Расширение зоны покрытия при связи вне прямой видимости ММО с использованием пассивных ретрансляторов

Для системы связи с множеством излучателей и множеством приемников (ММО) в городах слепые зоны в тени высоких зданий могут снизить качество связи. Эту проблему можно решить путем размещения пассивных ретрансляторов. Распределение этих ретрансляторов в ММО-связи должно быть оптимизировано, чтобы максимально охватить целевую зону. Предлагается подход, основанный на алгоритме неотрицательных наименьших квадратов для оптимизации распределения минимального количества ретрансляторов в ММО-связи вне прямой видимости. Рассматриваются пассивные ретрансляторы, состоящие из двух параболических антенн, соединенных через гибкий кабель. Путём численного моделирования представлен пример применения данного метода для типичной городской застройки. Получено оптимальное распределение ретрансляторов для покрытия заданной области минимальным количеством ретрансляторов.

**Ключевые слова:** ММО, вне прямой видимости, NNLS, слепые зоны, пассивный ретранслятор.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-4-7-12

Технологии ММО повышают пропускную способность радиоволнового канала связи [1]. Однако в условиях отсутствия прямой видимости слепые зоны, в которых блокируется радиоволна от базовых станций из-за высоких зданий или естественных препятствий, могут значительно снизить качество связи [2]. Ранее были разработаны различные подходы для расширения покрытия и доступа к слепым зонам в связи ММО. В [3, 4] активные ретрансляторы используются для расширения покрытия и улучшения качества канала в системах мобильной связи 5G. Для расширения покрытия также предлагаются отражающие поверхности [5].

Авторы [6] предложили «MilliMirroг» – полностью пассивную метаповерхность, изготовленную с помощью 3D-печати. «MilliMirroг» может изменять форму и направлять лучи миллиметровых волн в аномальных направлениях для освещения слепых зон. В [7] предложены реконфигурируемые интеллектуальные поверхности для обеспечения контролируемого и сфокусированного отражения в направлении приемника, когда отсутствует связь в прямой видимости. Использование пассивных ретрансляторов для улучшения радиопокрытия внутри здания также исследуется во многих работах [8, 9].

Авторы [10] предложили размещать пассивные ретрансляторы на стенах, чтобы улучшить интернет-покрытие в домах в сельской Африке и снизить затухание в стене. Предлагаемый пассивный ретранслятор состоит из двух антенн, размещенных по обеим сторонам стены, две антенны соединены кабелем с пассивным фазовращателем. В [11] представлен и исследован массив пассивных ретрансляторов, который может отражать падающую мощность под определенным углом для устранения слепых зон для системы фиксированного беспроводного доступа 5G.

В [12, 13] система ретрансляторов на основе параболических рефлекторов (рис. 1) используется для манипулирования средой распространения как при прямой видимости, так и при ММО-связи без прямой видимости. В [12] предложен алгоритм со-

ответствующего распределения ретрансляторов для расширения покрытия в условиях отсутствия прямой видимости.

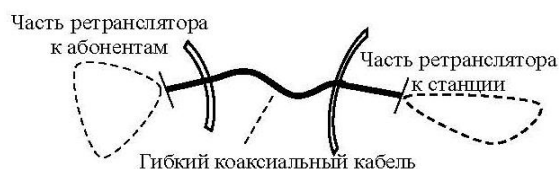


Рис. 1. Пассивный ретранслятор, состоящий из двух параболических антенн, соединённых гибким кабелем

В этой статье предлагается использовать пассивный ретранслятор, показанный на рис. 1, для расширения зоны покрытия в условиях связи вне прямой видимости. Ретрансляторы используются для непосредственной связи с абонентами или в качестве промежуточного звена для максимально возможного расширения зоны покрытия.

Расположение и направление ретрансляторов оптимизируются с использованием алгоритма неотрицательных наименьших квадратов (NNLS). Проверка предложенного подхода производится численным расчетом. Результаты показывают, что в условиях отсутствия прямой видимости предложенный алгоритм позволяет расширить зону покрытия, а также оптимизировать количество ретрансляторов, их местоположение и направление в соответствии с их вкладом в покрытие целевой области.

### Конфигурация ретранслятора и диаграмма направленности

Предлагаемый пассивный ретранслятор состоит из двух частей. Оба представляют собой параболические отражатели с антеннами в фокусе. Первая часть направлена на базовую станцию в прямой видимости, а вторая часть направлена на абонентов. Первая часть антенны соединена со второй частью антенны гибкой микроволновой соединительной линией. Длина линии выбирается в соответствии с требованиями к размещению первой и второй частей.

Предлагаемый пассивный ретранслятор имеет следующие преимущества:

- не применяются активные радиоэлектронные компоненты или фазовращатели, ретранслятор полностью пассивный. Части ретранслятора направляются вручную в требуемую область;
- выбор размера параболического рефлектора позволяет задавать ширину луча;
- возможность использования разных поляризаций для двух частей ретранслятора обеспечивает предотвращение интерференции между прямой волной и волной от пассивного ретранслятора. При одинаковых поляризациях, если две волны не совпадают по фазе, может уменьшиться амплитуда поля. Кроме того, размещение рядом двух ретрансляторов с ортогональной поляризацией позволяет удвоить количество независимых каналов связи ММО.

Диаграмма направленности параболического рефлектора определяется его размером и полем облучающей антенны, расположенной в фокусе параболы. Могут использоваться различные облучающие антенны, например, дипольный облучатель Герца, волноводный облучатель и рупорный облучатель [14]. Поле дальней зоны параболического отражателя можно аппроксимировать полем излучения круглой апертуры [12]

$$E(\phi) = G \frac{J_1(\pi D \sin \phi / \lambda)}{\pi D \sin \phi} \frac{2\lambda}{r} \exp(ikr), \quad (1)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка;  $D$  – диаметр апертуры параболической антенны ретранслятора на стороне абонента;  $r$  – расстояние между ретранслятором и местоположением абонента;  $k$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $G$  – коэффициент усиления ретранслятора;  $\phi$  – угол между положением абонента и ретранслятором относительно направления основного луча ретранслятора в сторону абонента.

#### Алгоритм оптимизации для расширения охвата в средах ММО вне прямой видимости

Результатом алгоритма оптимизации должны быть координаты и направления минимального количества ретрансляторов, обеспечивающих интенсивность поля, пропорциональную вероятности нахождения абонентов в заданной области.

Явления отражения, преломления и дифракции вызывают не прямое распространение передаваемых сигналов, что можно использовать для расширения охвата слепых зон. Ранее авторы в [12] предложили алгоритм поиска размещения и направления для каждого ретранслятора на основе максимизации интенсивности поля в заданных областях.

В этой статье применение пассивных ретрансляторов для связи вне прямой видимости обобщается за счет использования промежуточных пассивных ретрансляторов с высоким усилением и направленностью для расширения покрытия на большие расстояния. Идея состоит в том, что эти промежуточные ретрансляторы имеют связь в пределах прямой видимости с базовой станцией, а также связь в пре-

делах прямой видимости с другими ретрансляторами, которые отвечают за покрытие удаленных областей.

Ретрансляторы могут непосредственно облучать абонентов или работать в качестве промежуточного звена между базовой станцией и другими ретрансляторами для максимального расширения зоны покрытия.

Местоположения и направления ретрансляторов оптимизируются с использованием алгоритма, основанного на неотрицательном алгоритме наименьших квадратов. Рассматриваются неотрицательные весовые коэффициенты для каждого возможного ретранслятора, которые вычисляются в ходе оптимизации. Если весовой коэффициент ретранслятора окажется ниже определённого порога, то данный ретранслятор устраняется. Объяснение NNLS описано в [15].

Для предлагаемого алгоритма определения оптимального количества, координат и направления ретрансляторов требуется задать три входных параметра:

1. Пространственное статистическое распределение абонентов  $D(x_m, y_m)$  со значениями от 0 до 1 для определения важности местоположения каждого  $m$ -го абонента,  $m = 1 \dots M$ . Каждое значение пропорционально вероятности занятия соответствующего местоположения абонентами.

2. Множество всех возможных размещений и направлений ретрансляторов. Обозначим  $N$  – количество всех рассматриваемых вариантов ретрансляторов;  $\mathbf{p}_n$  – координаты  $n$ -го ретранслятора и  $\alpha_n$  – угол направления второй части ретранслятора,  $n = 1 \dots N$ . Заранее определенные места размещения должны гарантировать, что первая часть каждого используемого ретранслятора может установить связь с базовой станцией или с промежуточным ретранслятором в прямой видимости.

3. Матрица  $\mathbf{A}_{N \times M}$ , описывающая интенсивность поля  $n$ -го ретранслятора для  $m$ -го абонента, где каждая строка  $A_n$  содержит интенсивность в местоположениях абонентов  $(x_m, y_m)$ , создаваемую ретранслятором с заданным местоположением  $\mathbf{p}_n$  и направлением  $\alpha_n$ . Распределенная интенсивность рассчитывается с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD). Суммарная интенсивность поля в области размещения абонентов рассчитывается как взвешенная сумма интенсивностей всех ретрансляторов:

$$w_m = \sum_n A_{n,m} c_n,$$

где  $c_n$  – весовой коэффициент  $n$ -го ретранслятора. Рассматривается суммирование полей по интенсивности, поскольку заранее не известна форма сигналов, и их можно считать случайными.

Потребуем, чтобы ретрансляторы обеспечивали интенсивность поля, пропорциональную распределению абонентов  $D_m = D(x_m, y_m)$ . Введём обозна-

чение  $W_m = \gamma \sum_n A_{n,m} c_n$ , где коэффициент  $\gamma$  имеет размерность, обратную интенсивности. Коэффициент  $\gamma$  неизвестен. Включим его в весовой коэффициент, введя обозначение  $C_n = \gamma c_n$ , тогда

$$W_m = \sum_n A_{n,m} C_n. \quad (2)$$

Метод NNLS используется для нахождения неотрицательных размерных коэффициентов  $C_n$  из (2), обеспечивая минимизацию выражения:

$$\|D - AC\|^2. \quad (3)$$

В результате будут определены коэффициенты  $C_n \geq 0$ , описывающие вклад каждого ретранслятора при оптимальном охвате всех абонентов.

NNLS основан на методе наименьших квадратов с ограничением области поиска решения только неотрицательными значениями. Ограничение поиска неотрицательных значений связано с суммированием полей по интенсивности, поскольку интенсивность не может быть отрицательной.

Если  $C_n$  окажется меньше заданного порога, то соответствующий ретранслятор устраняется. Может определяться из требований минимизации количества ретрансляторов. То есть выбирается достаточно высоким, чтобы оставить только требуемое количество ретрансляторов с наибольшей значимостью.

В итоге алгоритм оптимального размещения ретрансляторов состоит из следующих шагов:

1. Задать пространственное распределение вероятности присутствия абонентов  $D(x_m, y_m)$ .

2. Задать все возможные положения ретрансляторов и их направлений  $\{p_n, \alpha_n\}$ .

3. Вычислить интенсивность поля от ретранслятора  $\{p_n, \alpha_n\}$  в области абонентов путём численного моделирования распространения волн.

4. Сформировать матрицу  $A_{N \times M}$ , описывающую интенсивность поля  $n$ -го ретранслятора в точке размещения  $m$ -го абонента.

5. Методом NNLS вычислить весовые коэффициенты  $C_n$  для оптимального охвата всех абонентов пропорционально вероятности их наличия.

6. Отбросить ретрансляторы, весовой коэффициент  $C_n$  которых меньше заданного порога.

### Моделирование и обсуждение

Рассмотрена часть г. Томска (Россия) для анализа сценария связи вне прямой видимости, как показано на рис. 2. Статистическое пространственное распределение абонентов  $D$  показано на рис. 3. Количество вероятных положений абонентов  $M = 36248$ . Координаты абонентов выбраны с шагом 1,6 м. Видно, что базовая станция не может установить связь прямой видимости с абонентами.

В качестве множества возможного размещения ретрансляторов ( $p_n$ ) рассматриваются точки на крышах первого ряда зданий, как показано на рис. 2, где базовая станция может установить связь прямой видимости с ретрансляторами, а также ретрансляторы не затеняют друг друга.

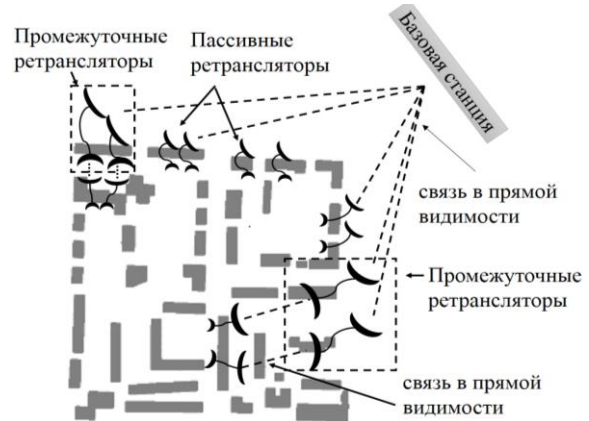


Рис. 2. Схема размещения ретрансляторов для связи ММО вне прямой видимости

Две области  $R3$  и  $R4$  (рис. 3) находятся далеко от первого ряда зданий с множеством зданий посередине. Для передачи сигнала в эти области используются промежуточные ретрансляторы, как показано на рис. 2. Первая часть и вторая часть каждого промежуточного ретранслятора имеют связь в пределах прямой видимости с высоким усилением и направлением с базовой станцией и другим ретранслятором соответственно.

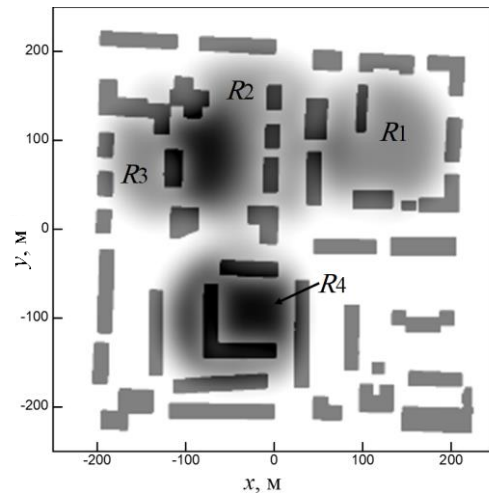


Рис. 3. Пространственное распределение вероятности наличия абонентов  $D(x, y)$

Ретрансляторы распределяются по крышам, как показано на рис. 4. Для каждого местоположения ретранслятора тестируются разные варианты направления второй части ретранслятора. Общее количество вариантов (местоположения и направления ретрансляторов) составляет  $N = 125$ .

Для каждого местоположения и направления вычисляется поле ретранслятора методом FDTD. На рис. 5 показан результат расчёта интенсивности поля методом FDTD для ретранслятора в точке  $x = -60$  м,  $y = 200$  м. Для упрощения решения рассматривалась двумерная модель, что не принципиально для сути предлагаемого алгоритма. В качестве сигнала рассматривался короткий биполярный импульс с частотой до 100 МГц. Интенсивность поля в каждой точке вычислялась как интеграл по времени от квадрата

амплитуды поля. Согласно теореме Парсевала, данная интенсивность равна суммарной интенсивности во всём диапазоне частот.



Рис. 4. Распределение ретрансляторов по крышам зданий

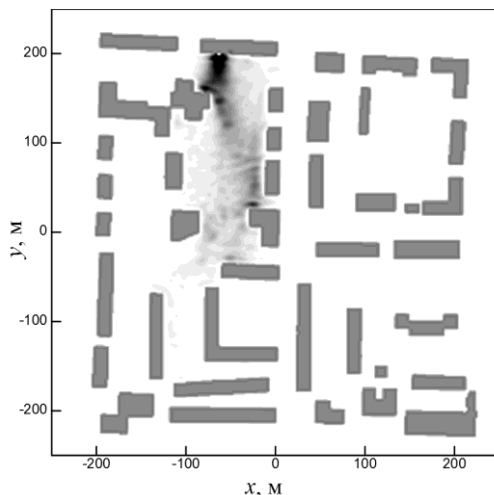


Рис. 5. Результат численного моделирования интенсивности поля методом FDTD для одного ретранслятора

На основе вычисления интенсивностей для всех вариантов ретрансляторов строится матрица **A**. После применения NNLS  $C_n$  описывает вес каждого ретранслятора и определяет, насколько он способствует охвату абонентов.

В данном примере вклад каждого варианта в охват абонентов считается приемлемым, если он составляет не менее 15% от максимального вклада из рассмотренных вариантов. После устранения ретрансляторов с малым весом из 125 вариантов осталось 15 вариантов. Зона покрытия, полученная от этих 15 ретрансляторов, показана на рис. 6. Видно, что целевые области охвачены.

При использовании промежуточных ретрансляторов зона покрытия распространяется на отдаленные регионы, как показано на рис. 6. Промежуточные ретрансляторы устанавливаются отдельно после алгоритма оптимизации, если в результате останутся ретрансляторы, недоступные напрямую для базовой станции.

Полученный результат размещения ретрансляторов представляется оптимальным, поскольку

обеспечивает охват заданных областей минимальным количеством ретрансляторов.

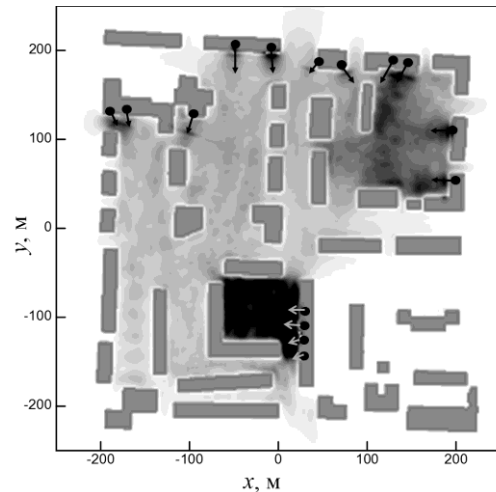


Рис. 6. Результат применения алгоритма NNLS: результирующая зона покрытия – суммарная интенсивность поля

### Заключение

Предложено применение пассивных ретрансляторов для расширения покрытия и доступа к слепым зонам в MIMO-связи. Рассматриваемый ретранслятор состоит из двух частей, соединенных гибким кабелем. Каждая часть представляет собой параболический рефлектор с антенной в фокусе. Эти ретрансляторы используются либо для непосредственного охвата абонентов, либо в качестве промежуточного звена между базовой станцией и другими ретрансляторами.

Подход, основанный на неотрицательном алгоритме наименьших квадратов, используется для оптимизации распределения ретрансляторов в среде распространения. Оптимизация обеспечивает пропорциональное соответствие интенсивности поля и распределения абонентов в пространстве. Если вклад ретранслятора в освещение пользователей меньше заранее определенного порога, ретранслятор не используется.

Численное моделирование для определения полей ретрансляторов позволяет учесть существенные эффекты отражения и дифракции в конкретной обстановке. За счёт метода наименьших квадратов определяется минимальное множество ретрансляторов, обеспечивающих наибольший вклад в охват области вероятного расположения абонентов.

Применимость метода была проверена численно на примере части г. Томска, что показало возможность оптимального расширения зоны покрытия с минимальным количеством ретрансляторов.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

### Литература

1. Hampton J.R. Introduction to MIMO Communications. – NY: Cambridge University Press, 2014. – 288 p.
2. cDERSA: Cognitive D2D enabled relay selection algorithm to mitigate blind-spots in 5G cellular networks /

A. Iqbal, M. Rahim, R. Hussain, A. Noorwali, M.Z. Khan, A. Shakeel, I.L. Khan, M.A. Javed, Q.U. Hasan, S.A. Malik // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 89972–89988.

3. Relaying operation in 3GPP LTE: challenges and solutions / C. Hoymann, W. Chen, J. Montojo, A. Golitschek, C. Koutsimanis, X. Shen // *IEEE Communications Magazine*. – 2012. – Vol. 50. – P. 156–162.

4. Relay technologies for WiMAX and LTE-advanced mobile systems / Y. Yang, H. Hu, J. Xu, G. Mao // *IEEE Communications Magazine*. – 2009. – Vol. 47. – P. 100–105.

5. Beyond intelligent reflecting surfaces: Reflective-transmissive metasurface aided communications for full-dimensional coverage extension / S. Zhang, H. Zhang, B. Di, Y. Tan, Z. Han, L. Song // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 2020. – Vol. 69. – P. 13905–13909.

6. MilliMirror: 3D Printed Reflecting Surface for Millimeter-Wave Coverage Expansion / K. Qian, L. Yao, X. Zhang, T.N. Ng // *MobiCom '22: Proceedings of the 28th Annual International Conference on Mobile Computing And Networking*. – 2022. – P. 15–28.

7. Reflecting surfaces for beyond line-of-sight coverage in millimeter wave vehicular networks / K. Heimann, A. Marsch, B. Sliwa, C. Wietfeld // *Proc. IEEE Veh. Netw. Conf.* – 2020. – P. 1–4.

8. Huang Y. Investigation of using passive repeaters for indoor radio improvement / Y. Huang, N. Yi, X. Zhu // *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag.* – 2004. – Vol. 2. – P. 1623–1626.

9. Honma N. Manipulating MIMO propagation environment using tunable passive repeater / N. Honma, Y. Takahashi, Y. Tsunekawa // *Proc. of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. – 2014. – P. 504–506.

10. Lynggaard P. Improving internet coverage in rural Africa by using passive repeaters in the home // *Nordic and Baltic Journal of Information and Communications Technologies*. – 2016. – Vol. 1. – P. 65–80.

11. Passive repeater for removal of blind spot in NLOS path for 5G fixed wireless access (FWA) system / D. Ha, D. Choi, H. Kim, J. Kum, J. Lee, Y. Lee // *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*. – 2017. – P. 2049–2050.

12. Sukhanov D.Y. Manipulating LOS and NLOS MIMO Propagation Environments Using Passive Repeaters / D.Y. Sukhanov, M. Eissa // *Progress In Electromagnetics Research M*. – 2021. – Vol. 105. – P. 195–204.

13. Eissa M. Enhancing performance in a LOS MIMO communication using a passive repeater / M. Eissa, D. Sukhanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2140. – P. 012013.

14. Orfanidis S.J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. – Rutgers University, 2016. – 1413 p.

15. Bro R. A fast non-negativity-constrained least squares algorithm / R. Bro, S.D. Jong // *Journal of Chemometrics*. – 1997. – Vol. 11. – P. 393–401.

#### Исса Махмуд

Аспирант каф. радиофизики радиофизического факультета (РФФ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0003-1647-9688  
Тел.: +7-913-115-09-86  
Эл. почта: mahmoud.eissa@stud.tsu.ru

#### Суханов Дмитрий Яковлевич

Д-р физ.-мат. наук, каф. радиофизики РФФ НИ ТГУ  
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-0805-4543  
Тел.: +7 (382-2) 41-25-83  
Эл. почта: sdy@mail.tsu.ru

Eissa M., Sukhanov D.Y.

#### Extending coverage area in none line-of-sight MIMO communications using passive repeaters

In MIMO communications, high buildings in cities and other obstructions can prevent the propagation of radio waves, resulting in blind spots and poor communications. This problem can be solved using passive repeaters, which, by distributing them in the communication environment, the blind spots can be accessed and the coverage area can be extended. The distribution of these repeaters in the MIMO communication should be optimized in order to maximally cover the target area. In this article, an approach based on non-negative least square (NNLS) algorithm is proposed for optimizing the distribution of the minimum number of repeaters in none-line-of sight (NLOS) MIMO communications. The proposed approach is implemented using passive repeaters consisting of two parabolic antennas connected through a flexible cable. The numerical analysis is performed to verify the validity of the proposed approach, and it is found that the proposed method helps to optimally distribute passive repeaters and extend coverage area with minimum number of repeaters.

**Keywords:** MIMO, non-line-of-sight, NNLS, blind spots, passive repeater.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-4-7-12

#### References

1. Hampton J.R. *Introduction to MIMO communications*. New York, Cambridge University Press, 2014. 288 p.

2. Iqbal A., Rahim M., Hussain R. Noorwali A., Khan M.Z., Shakeel A., Khan I.L., Javed M.A., Hasan Q.U., Malik S.A. cDERSA: Cognitive D2D enabled relay selection algorithm to mitigate blind-spots in 5G cellular networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 89972–89988.

3. Hoymann C., Chen W., Montojo J., Golitschek A., Koutsimanis C., Shen X. Relaying operation in 3GPP LTE: challenges and solutions. *IEEE Communications Magazine*, 2012, vol. 50, pp. 156–162.

4. Yang Y., Hu H., Xu J., Mao G. Relay technologies for WiMAX and LTE-advanced mobile systems. *IEEE Communications Magazine*, 2009, vol. 47, pp. 100–105.

5. Zhang S., Zhang H., Di B., Tan Y., Han Z., Song L. Beyond intelligent reflecting surfaces: Reflective-transmissive metasurface aided communications for full-dimensional coverage extension. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69, pp. 13905–13909.

6. Qian K., Yao L., Zhang X., Ng T.N. MilliMirror: 3D Printed Reflecting Surface for Millimeter-Wave Coverage Expansion. *MobiCom '22: Proceedings of the 28th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2022, pp. 15–28.

7. Heimann K., Marsch A., Sliwa B., Wietfeld C. Reflecting surfaces for beyond line-of-sight coverage in millimeter wave vehicular networks. *Proceedings of IEEE Vehicular Networking Conference*, 2020, pp. 1–4.

8. Huang Y., Yi N., Zhu X. Investigation of using passive repeaters for indoor radio improvement. *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society*, 2004, vol. 2, pp. 1623–1626.

9. Honma N., Takahashi Y., Tsunekawa Y. Manipulating MIMO propagation environment using tunable passive repeater. *Proceedings of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2014, pp. 504–506.

10. Lynggaard P. Improving internet coverage in rural Africa by using passive repeaters in the home. *Nordic and Baltic Journal of Information and Communications Technologies*, 2016, vol. 1, pp. 65–80.

11. Ha D., Choi D., Kim H., Kum J., Lee J., Lee Y. Passive repeater for removal of blind spot in NLOS path for 5G fixed wireless access (FWA) system. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2017, pp. 2049–2050.

12. Sukhanov D.Y., Eissa M. Manipulating LOS and NLOS MIMO Propagation Environments Using Passive Repeaters. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2021, vol. 105, pp. 195–204.

13. Eissa M., Sukhanov D. Enhancing performance in a LOS MIMO communication using a passive repeater. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2140, pp. 012013.

14. Orfanidis S.J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University, 2016. 1413 p.

15. Bro R., Jong S.D. A fast non-negativity-constrained least squares algorithm. *Journal of Chemometrics*, 1997, vol. 11, pp. 393–401.

---

**Mahmoud Eissa**

Postgraduate student, Department of Radiophysics,  
Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (TSU)  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0003-1647-9688  
Phone: +7-913-115-09-86  
Email: mahmoud.eissa@stud.tsu.ru

**Dmitry Y. Sukhanov**

Doctor of Science in Physics and Mathematics,  
Department of Radiophysics, Faculty of Radiophysics, TSU  
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-0805-4543  
Phone: +7 (382-2) 41-25-83  
Email: sdy@mail.tsu.ru