

УДК 004.021

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.005)

Проектирование беспроводной локальной сети в помещении с применением цифрового двойника и алгоритма автоматизированной расстановки точек доступа

М.Е. Шорохов✉, В.В. Печенкин

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Российская Федерация*

Резюме. В статье рассматривается способ проектирования беспроводной локальной сети с использованием цифрового двойника помещения. Рассматриваются возможности цифрового двойника для упрощения хранения и синхронизации данных о структуре помещения и расположении устройств. Описывается разработанная структура здания, которая включает в себя этажи, хранящие информацию о координатах и моделях точек доступа, устройств пользователей и препятствий. Информация на этажах разделена на соответствующие слои, что позволяет иметь быстрый доступ к любым данным по координатам. Также в статье рассматривается реализация алгоритма для автоматизированной расстановки точек доступа в помещении. Алгоритм включает в себя систему «агентов», где каждая точка доступа выступает отдельной сущностью, пытающейся выполнить поставленные условия в своей области. В зависимости от установленного проектировщиком количества итераций, начального количества точек доступа, точности и ограничений можно получить разные результаты. Таким образом, результат работы алгоритма позволяет оценить различные ситуации и выбрать наиболее подходящий вариант расстановки точек доступа в помещении с учетом всех поставленных условий. При помощи разработанных инструментов проектировщик может наглядно увидеть, как при помощи алгоритма были расположены точки доступа, как сигнал от каждой точки распространяется по помещению и выполняются ли все условия для размещенных в помещении устройств.

Ключевые слова: беспроводная локальная сеть, проектирование беспроводной локальной сети, BIM-технологии, цифровой двойник, алгоритм автоматизации, расстановка точек доступа.

Для цитирования: Шорохов М.Е., Печенкин В.В. Проектирование беспроводной локальной сети в помещении с применением цифрового двойника и алгоритма автоматизированной расстановки точек доступа. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1852> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.005

Indoor wireless LAN design using digital twin and automated AP placement algorithm

М.Е. Shorokhov✉, V.V. Pechenkin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation

Abstract. The article discusses a method for designing a wireless local area network using a digital twin of a room. It considers the capabilities of a digital twin to simplify the storage and synchronization of data on the structure of the room and the location of devices. It describes the developed structure of the building, which includes floors storing information on the coordinates and models of access points, user devices and obstacles. The information on the floors is divided into corresponding layers, which allows for quick access to any data by coordinates. The article also discusses the implementation of an algorithm for the automated placement of access points in the room. The algorithm includes a system of "agents", where each access point acts as a separate entity trying to fulfill the set conditions in its area. Depending on the number of iterations set by the designer, the initial number of access points, accuracy

and limitations, different results can be obtained. Thus, the result of the algorithm allows you to evaluate various situations and choose the most suitable option for arranging access points in the room, taking into account all the set conditions. Using the developed tools, the designer can clearly see how the access points were located using the algorithm, how the signal from each point spreads throughout the room, and whether all the conditions for the devices located in the room are met.

Keywords: wireless local area network, wireless local area network design, BIM-technologies, digital twin, automation algorithm, placement of access points.

For citation: Shorokhov M.E., Pechenkin V.V. Indoor wireless LAN design using digital twin and automated AP placement algorithm. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1852> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.005

Введение

Проектирование беспроводных локальных сетей с последующей автоматизацией процессов является одной из актуальных тем для исследований по оптимизации и автоматизации процедур их построения. В настоящее время исследования этой проблематики активно развиваются. В работах описываются способы и системы проектирования беспроводных локальных сетей при помощи автоматической или ручной расстановки точек доступа, методы оптимизации топологии беспроводных сетей с учетом распространения сигнала и заданного уровня нагрузки, определения оптимального количества точек доступа [1, 2]. Подобные задачи могут быть сформулированы для различных прикладных областей, например, в работе [3] предлагается решение задачи оптимального размещения сенсоров наблюдения за сложной пространственной сценой с целью минимизации слепых зон.

В большинстве случаев проектирование беспроводной локальной сети осуществляется проектировщиком, который, основываясь на своем опыте, планирует всю локальную сеть [4]. При проектировании крупных помещений или целых зданий, а также при измерениях и тестах появляется шанс упустить некоторые детали и в результате получить неоптимально построенную сеть, не подходящую по требованиям или не учитывающую все ограничения и пространственные факторы [5]. Такие трудности планирования беспроводной локальной сети подчеркивают необходимость разрабатываемого программного обеспечения, которое автоматически моделирует и конфигурирует беспроводные локальные сети на основе установленных требований и ограничений.

В процессе проектирования проводятся различные измерения, учитывается множество факторов, происходит оценка производительности локальной беспроводной сети в зависимости от структуры помещения, области покрытия, используемой несущей частоты сигнала, возможные помехи, требования пользователей к качеству локальной сети, виды работ, в которых используется сеть [6, 7]. Существуют различные алгоритмы, позволяющие определить оптимальное расположение точек доступа с учетом затухания сигнала при прохождении препятствий [8], однако предлагаемые подходы лишь частично учитывают сложность окружения и самой проектируемой инфраструктуры передачи данных.

Автоматизация процессов проектирования беспроводной локальной сети в помещении

Для создания комплексной системы проектирования системы беспроводной передачи данных с учетом пространственных характеристик помещения эффективным подходом является использование BIM-технологий (Building Information Modeling) и технологий цифрового двойника. Основной областью применения BIM-технологий

является строительство. На раннем этапе проектирования создается цифровая модель объекта, которая может быть проанализирована, что позволит устранить возможные ошибки проектирования на раннем этапе. Однако после завершения строительства здания данные BIM практически не используются из-за потери их актуальности при наличии реально существующего здания или несовместимости имеющихся в модели данных с другими системами, связанными уже с эксплуатацией сооружения. Использование цифрового двойника (ЦД) здания, помещения его модель данных может быть синхронизирована с текущим состоянием здания и учитывать различные эксплуатационные факторы, которые не присутствовали в модели BIM [9]. Данные ЦД могут быть использованы для моделирования сценариев, бизнес-процессов и проектирования комплексных систем, где важно учитывать не только план помещения [10, 11]. ЦД в этом смысле может быть использован как на этапе проектирования здания, так и на этапе его дальнейшей эксплуатации, совмещая в себе данные BIM и пространственные факторы, влияние эксплуатационных характеристик, физических процессов и некоторых других факторов. Еще одним важным свойством ЦД является возможность хранения структуры помещения с добавленными в помещениях препятствиями распространению сигнала, информации об устройствах пользователей, точках доступа и их параметрах, а также оценок качества соединения, вычисленных по различным метрическим характеристикам.

Однако в представленных выше исследованиях не уделяется должного внимания инструментарию формирования карты трехмерной сцены, ее влиянию на качество покрытия и эффективность распространения сигнала.

Целью настоящего исследования является разработка нового метода проектирования беспроводной локальной сети в помещении, который использует в процессе проектирования цифровой двойник помещения, и за счет этого позволяющего добиться упрощения работы с данными и синхронизации всех изменений в планировке помещения. Одной из составляющих этого метода является новый алгоритм автоматизации расстановки точек доступа беспроводной сети в помещении при проектировании, который опирается на использование ЦД здания или конкретного помещения. Предложенный далее алгоритм включает в себя систему «агентов», которые представляют собой точки доступа и за указанное количество итераций пытаются сформировать решение, удовлетворяющее заданным ограничениям. Такой подход позволяет добиться уменьшения вычислительной сложности задачи, увеличения возможности масштабирования предлагаемого решения для оптимального размещения точек доступа беспроводной локальной сети в сложных трехмерных сценах.

Для достижения цели исследования необходимо разработать программное обеспечение, включающее в себя следующие модули:

- конструктор помещения, позволяющий указать положение и материалы стен и других препятствий, а также положение и требования к сети пользовательских устройств;
- цифровой двойник помещения на основе спроектированной трехмерной модели помещения, расположения устройств, сетевых свойств устройств и точек доступа и требований владельцев устройств;
- реализация алгоритма автоматизированной расстановки точек доступа на основе полученных данных цифрового двойника, который позволит распределять точки доступа внутри помещения с учетом заданных критериев качества доступа, расположения устройств и пространственных ограничений.

Реализация цифрового двойника помещения для проектирования беспроводной локальной сети

Структура разрабатываемого цифрового двойника помещения представлена на Рисунке 1.

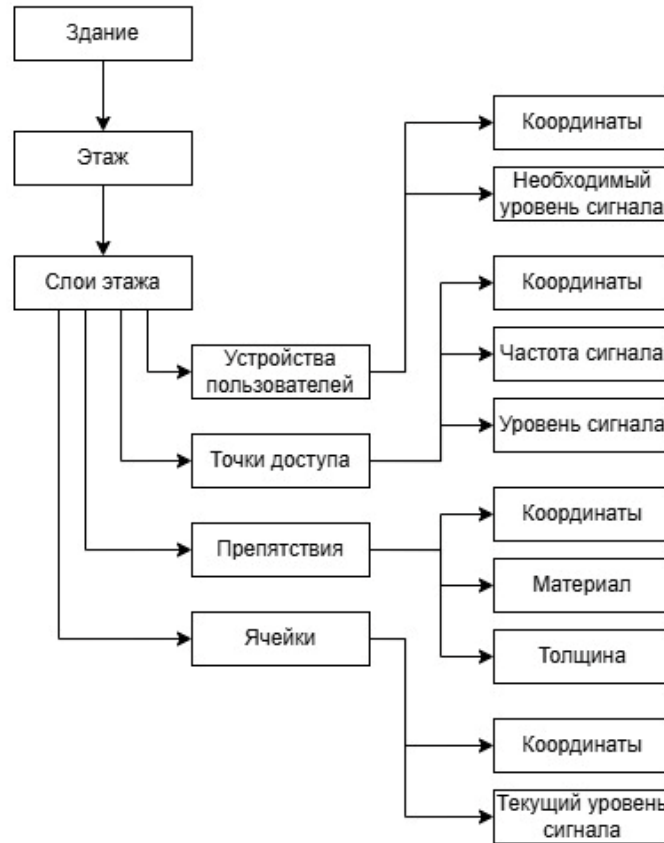


Рисунок 1 – Структура цифрового двойника
 Figure 1 – Structure of a digital twin

Изображенная структура включает в себя следующие элементы:

- BuildingModel – модель здания, содержащая в себе список этажей;
- FloorModel – модель этажа, содержащая в себе информацию о ячейках, устройствах, точках доступа и других объектах в виде списков, разделенных на слои;
- SpreadCellModel – модель ячейки, в которой хранится нормализованное значение уровня сигнала. Значение рассчитывается в процессе работы и учитывает все условия и пространственные ограничения;
- ObstacleModel – модель препятствия, которая содержит информацию о конкретном препятствии: материал, толщина и положение;
- AccessPointDeviceModel – модель точки доступа, которая содержит всю необходимую информацию о конкретной точке доступа: частота, уровень сигнала и другие параметры;
- UserDeviceModel – модель устройства пользователя, которая содержит всю необходимую информацию о конкретном устройстве: приоритет уровня сигнала, соответствие установленным требованиям и другие параметры.

Координаты устройств, препятствий и других объектов являются связующим элементом между объектами на слоях в пределах одного этажа здания. Благодаря такой структуре можно легко получить доступ к объекту на любом этаже, зная его координаты.

Также на основе координат объекта можно узнать о его окружении на остальных слоях – препятствиях и других устройствах. Разделение содержимого этажа по слоям реализовано с целью упростить и оптимизировать поиск устройств, точек доступа и других объектов.

Реализация алгоритма автоматической расстановки точек доступа

Разрабатываемый алгоритм автоматизированной расстановки точек доступа беспроводной локальной сети в помещении включает в себя получение и обработку входных данных, начальную расстановку точек доступа и итеративное изменение параметров точек доступа до успешного выполнения всех условий.

К входным данным, на основе которых будет определена последующая работа алгоритма, относятся такие параметры, как начальное количество точек доступа, частота сигнала точек доступа, стартовый уровень сигнала точек доступа, точность выполнения действий в итерациях, допустимый минимум эффективности точек доступа, минимальный коэффициент качества соединения устройств в сети, цифровой двойник помещения с описанием и характеристиками преград и устройств.

Алгоритм включает в себя систему «агентов», где каждая точка доступа является отдельной сущностью. Каждую итерацию агенты выбирают действие, которое должно привести к лучшему результату. В первую очередь, указанное количество точек доступа случайно распределяется вдоль стен по всей области внутри помещения. На данном этапе не учитываются условия выполнения задачи и параметры точек доступа. В ходе итераций алгоритма точки могут перемещаться только вдоль стен. Каждая точка доступа становится агентом системы и может выполнять одно из действий за одну итерацию: проверку состояния устройств, проверку состояния агентов и соответствующих им точек доступа, перемещение точки доступа, изменение уровня сигнала точки доступа, добавление и удаление точки доступа, пропуск итерации. Результаты итераций запоминаются для дальнейшего использования. Если в процессе определенного количества итераций общий результат не улучшается или становится хуже, вводится дополнительный агент с точкой доступа. Он также устанавливается в случайной точке вдоль стен и затем принимает участие в последующих итерациях.

Используемые формулы частично представлены в работе [12], где вычисляется функция полезности агента для оценки его действий, а также коэффициенты эффективности агентов системы.

Выбор действия агентом в текущей итерации определяется формулой эффективности агента в его позиции:

$$E = w_0DD + w_1SL + w_2DA, \quad (1)$$

где DD – коэффициент равноудаленности точки доступа до соседних устройств, SL – коэффициент необходимого качества соединения соседних устройств, DA – коэффициент расстояния текущей точки доступа до точек доступа, расположенных рядом, w_i – влияние коэффициента на общий результат.

В описанных далее формулах используется ступенчатая функция для двух параметров, определенная через функцию Хевисайда следующим образом:

$$f(x, y) = \theta(x - y), \quad (2)$$

где x – первый параметр, y – второй параметр. Функция позволяет получить единицу, когда первый параметр больше второго, и получить ноль, когда первый параметр меньше второго.

Для вычисления коэффициента равноудаленности точки доступа до соседних устройств используется следующая формула:

$$DD = \frac{\sum_{i=0}^j \theta(e - |d_0 - d_i|)}{j}, \quad (3)$$

где e – допустимое значение разности расстояний между устройствами, d_0 – расстояние от точки доступа до ближайшего устройства, d_i – расстояние от точки доступа до текущего устройства, j – количество соседних устройств.

Определение коэффициента необходимого качества соединения соседних устройств осуществляется по формуле:

$$SL = \frac{\sum_{i=0}^j \theta(sl_i - slm_i)}{j}, \quad (4)$$

где sl_i – текущее качество соединения устройства, slm_i – минимально необходимое качество соединения, j – количество соседних устройств.

Коэффициент расстояния текущей точки доступа до точек доступа, расположенных рядом, вычисляется по следующей формуле:

$$DA = \frac{\sum_{i=0}^j \theta(da_i - d_{min})}{j}, \quad (5)$$

где da_i – расстояние от текущей точки доступа до проверяемой точки доступа, d_{min} – допустимое расстояние между точками доступа с учетом их уровней сигнала, j – количество соседних точек доступа.

В зависимости от полученного результата после вычисления эффективности в текущей позиции, агенту необходимо сделать выбор следующего действия. Если полученное значение ниже минимального допустимого значения эффективности агента, то выбирается действие в зависимости от того, какой из коэффициентов показал наименьшее значение. При наименьшем коэффициенте равноудаленности точки доступа до соседних устройств необходимо переместить точку доступа, выбрав положение, в котором коэффициент равноудаленности покажет более высокое значение. При наименьшем коэффициенте необходимого качества соединения соседних устройств необходимо увеличить уровень сигнала. При наименьшем коэффициенте расстояния текущей точки доступа до соседних точек доступа необходимо увеличить расстояние между точками доступа, выбрав положение, в котором расстояние между текущей точкой доступа и ближайшей к ней соседней точкой доступа увеличится. Если значение эффективности в текущей позиции входит в установленный диапазон, то агент не совершает никаких действий в текущей итерации. В случае, если значение выше единицы, у агента излишняя эффективность в текущей итерации и ему необходимо уменьшить уровень сигнала.

После выполнения действия каждого агента происходит проверка свойства того, что текущее качество соединения удовлетворяет требованиям всех пользовательских устройств в помещении. Оценка решения в текущей итерации алгоритма вычисляется по следующей формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=0}^j \theta(sl_i - slm_i)}{j}, \quad (6)$$

где sl_i – качество соединения текущего устройства, slm_i – минимальное необходимое качество соединения устройства, j – общее количество пользовательских устройств в сети.

Схема алгоритма представлена на Рисунке 2.

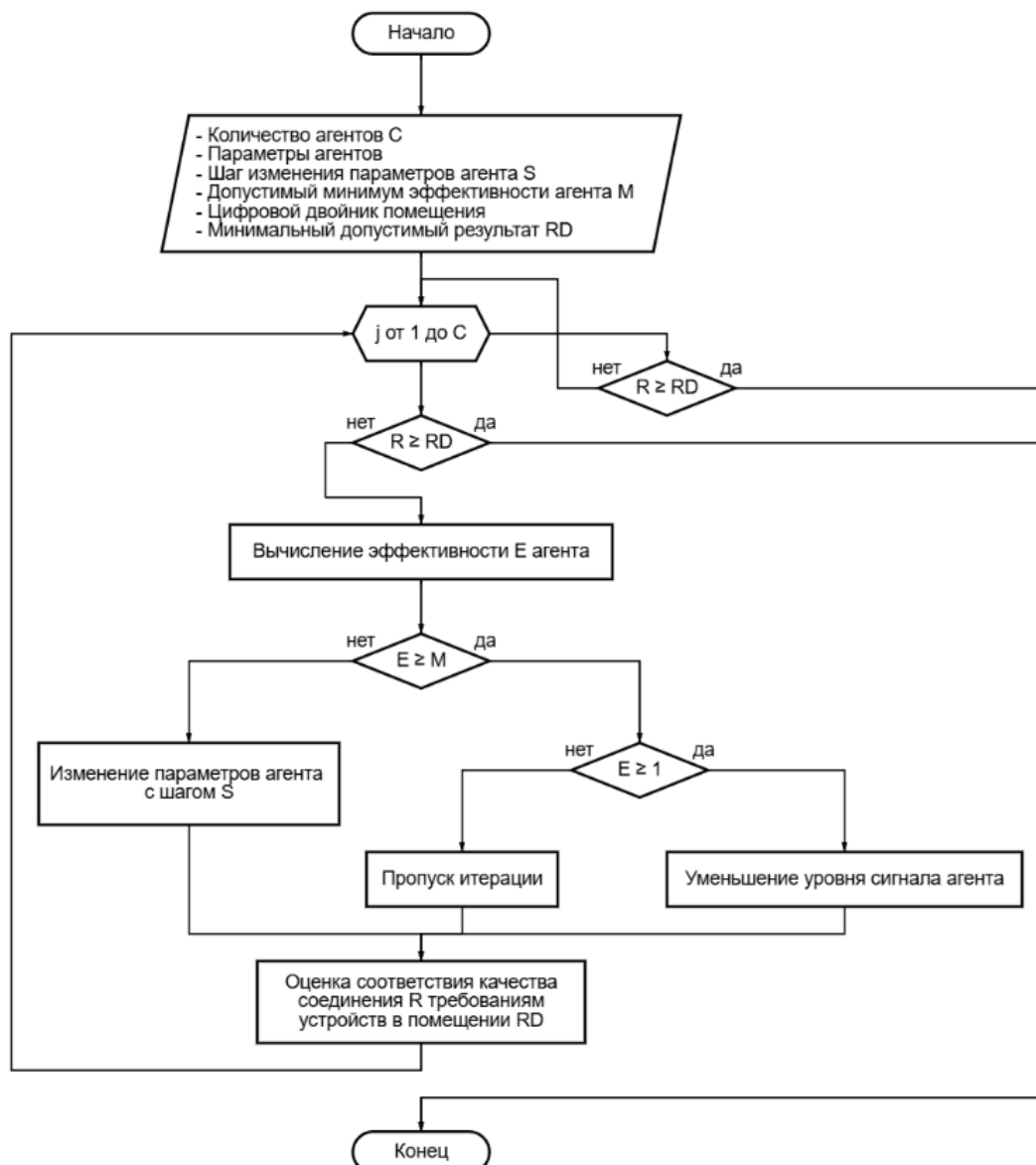


Рисунок 2 – Схема алгоритма
 Figure 2 – Algorithm diagram

Параметр минимального коэффициента качества соединения всех устройств в сети определяет, соответствует ли результат минимальным требованиям. Так, например, если данный коэффициент во входных параметрах равен 0,9, то при вычислении формулы (6) и получении результата выше или равном 0,9, будет считаться, что алгоритм успешно справился с расстановкой точек доступа и достиг необходимого оптимального результата, установленного во входных параметрах.

Если на протяжении определенного числа итераций с момента последнего улучшения результата итоговый результат не меняется или становится хуже, то это может означать либо несогласованность входных данных алгоритма, либо в данном помещении с выбранными устройствами и входными параметрами невозможно спроектировать более оптимальную беспроводную сеть. Применение алгоритма с использованием системы агентов может в редких случаях приводить к неоптимальному результату по причине неудачного распределения агентов или других факторов. Однако проектировщик всегда может изменить входные параметры и запустить алгоритм повторно, чтобы попытаться получить результат лучше предыдущего.

В результате выполнения алгоритма проектировщик видит наглядный результат того, как должны быть расположены точки доступа и какой они должны иметь уровень сигнала и частоту (Рисунок 3). Синим цветом обозначено положение точек доступа, зеленым – устройств с выполненными условиями работы сети, красным – с невыполненными условиями работы сети.

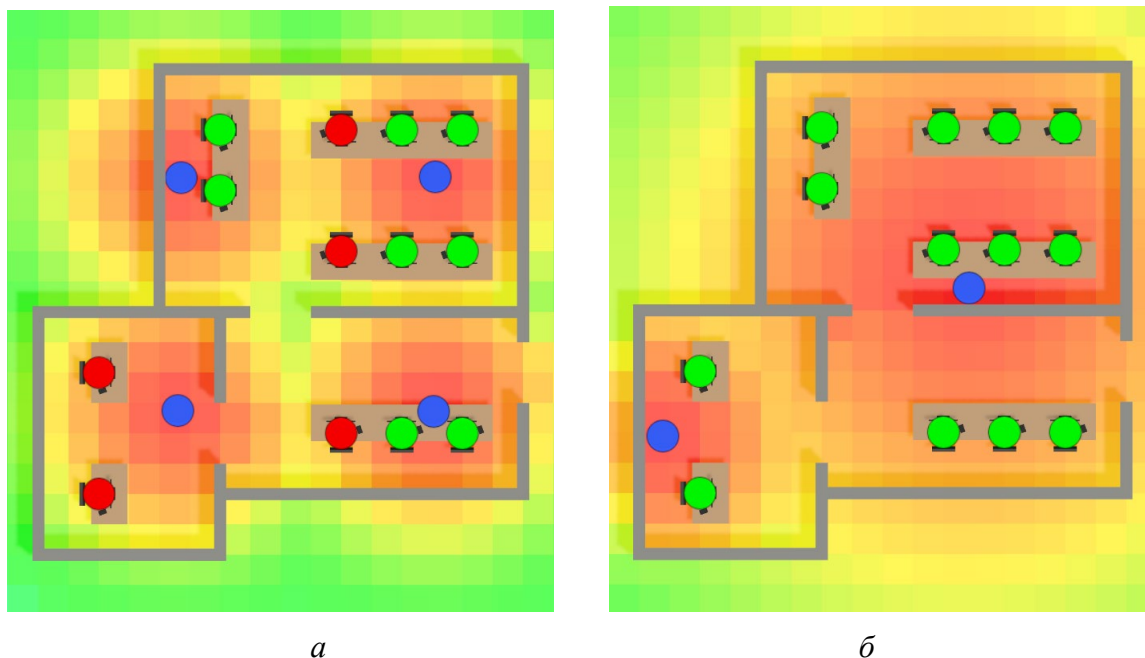


Рисунок 3 – Пример расположения точек доступа в разработанном программном обеспечении при начальном распределении указанного количества (а) и после завершения работы алгоритма (б)
Figure 3 – An example of the location of access points in the developed software with the initial placement of the specified quantity (a) and after the completion of the algorithm (b)

На Рисунке 4 представлен результат работы алгоритма в виде трехмерной тепловой карты с отображением препятствий в помещении:

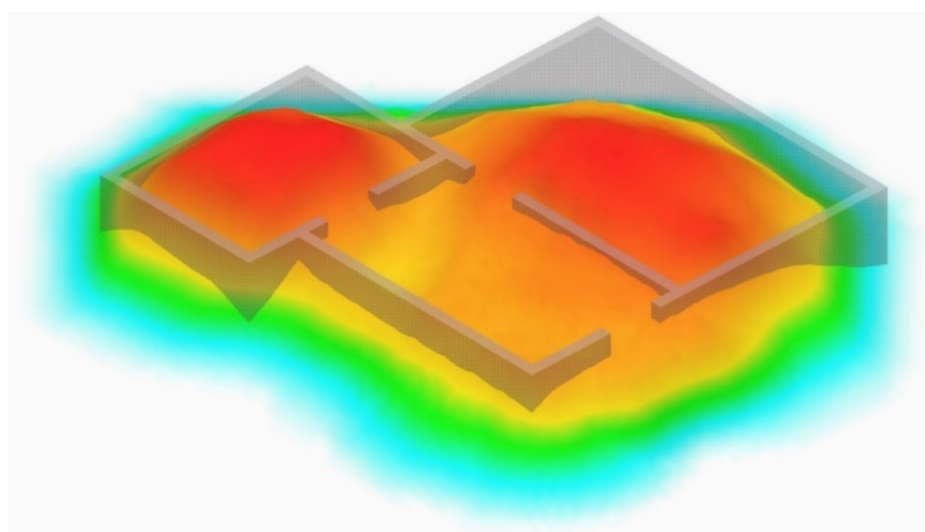


Рисунок 4 – Тепловая карта результата работы алгоритма в разработанном программном обеспечении

Figure 4 – Heat map of the algorithm's output in the developed software

Заключение

Использование цифрового двойника при проектировании беспроводной локальной сети упрощает работу с данными, связанными с помещением и объектами внутри, и позволяет синхронизировать все изменения в планировке и содержимом помещения. Алгоритм автоматизированной расстановки точек доступа беспроводной локальной сети в помещении позволяет проектировщику рассмотреть и оценить различные варианты, указывая разные параметры и ограничения для работы алгоритма. Выбранный подход позволяет более эффективно проектировать беспроводную локальную сеть, легко выбрать наиболее подходящий вариант и сократить количество возможных ошибок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Srikamta N., Namee Kh., Chatngoen K., Boonkuson N., Meny A., Kaewsaeng-On R. A Study of the Accuracy of the Software Site Survey to Find the Appropriate Location to Install the Access Point for Indoor Positioning. In: *2022 20th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE), 23–25 November 2022, Bangkok, Thailand*. IEEE; 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICTKE55848.2022.9983217>
2. Shah S.J.A., Mufti N., Ahmad T. Optimized Coverage and Capacity Planning of Wi-Fi Network based on Radio Frequency Modeling & Propagation Simulation. *International Journal of Innovations in Science & Technology*. 2024;6(5):63–73.
3. Печенкин В.В., Королёв М.С. Оптимизация размещения средств наблюдения в трёхмерной сцене с целью минимизации «слепых зон». *Компьютерная оптика*. 2017;41(2):245–253. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-2-245-253>
Pechenkin V.V., Korolev M.S. Optimal Placement of Surveillance Devices in a Three-Dimensional Environment for Blind Zone Minimization. *Computer Optics*. 2017;41(2):245–253. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-2-245-253>
4. Thaker Mahmood A., Nuri Uçan O. Wireless LAN Design and Future Internet Architecture. *NTU Journal of Engineering and Technology*. 2024;3(1).
5. Bridova I., Moravcik M. A System Approach in a WiFi Network Design. In: *2023 33rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT), 24–26 May 2023, Zilina, Slovakia*. IEEE; 2023. P. 15–20. <https://doi.org/10.23919/FRUCT58615.2023.10142994>
6. Teo S.I.E., Zhou Yu., Yeoh Ju.K.-W. Indoor WiFi Path Loss Model to Estimate Indoor Network Coverage Considering Residential Design. [Preprint]. Smart and Sustainable Built Environment. URL: <https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2023-0131> [Accessed 19th January 2025].
7. Bytyqi S., Jashari B. Experimental Assessment of the Effects of Building Materials on Wi-Fi Signal 2.4 GHz and 5 GHz. *Journal of Computer and Communications*. 2024;12(5):1–10. <https://doi.org/10.4236/jcc.2024.125001>
8. Аветисян Т.В., Минаев К.А., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Моделирование и оптимизация размещения передающих устройств в беспроводной системе связи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.034>
Avetisyan T.V., Minaev K.A., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P. Modeling and Optimization of the Placement of Transmitting Devices in a Wireless Communication System. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.034>
9. Zhang Ya. *Digital Twin: Architectures, Networks, and Applications*. Cham: Springer; 2024. 126 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51819-5>

10. Hakiri A., Gokhale A., Yahia S.B., Mellouli N. A Comprehensive Survey on Digital Twin for Future Networks and Emerging Internet of Things Industry. *Computer Networks*. 2024;244. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110350>
11. Ayidu N.J., Elaigwu V.O. Pathloss Prediction Model in WLAN Propagation. *FUDMA Journal of Sciences*. 2023;7(3):1–5. <https://doi.org/10.33003/fjs-2023-0703-1822>
12. Gibney A.M., Klepal M., Pesch D. A Wireless Local Area Network Modeling Tool for Scalable Indoor Access Point Placement Optimization. In: *SpringSim '10: Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference, 11–15 April 2010, Orlando, FL, USA*. San Diego: Society for Computer Simulation International; 2010. <https://doi.org/10.1145/1878537.1878707>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Печенкин Виталий Владимирович, доктор социологических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, кафедра «Прикладные информационные технологии», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

e-mail: pechenkinvv@sstu.ru

ORCID: [0000-0002-5043-1891](https://orcid.org/0000-0002-5043-1891)

Vitaly V. Pechenkin, Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation.

Шорохов Максим Евгеньевич, аспирант, кафедра «Прикладные информационные технологии», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

e-mail: maksimshorokhov@gmail.com

Maxim E. Shorokhov, Postgraduate, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 09.04.2025; принята к публикации 14.04.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 09.04.2025; accepted for publication 14.04.2025.