

УДК 621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.034](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.034)

Моделирование и оптимизация размещения передающих устройств в беспроводной системе связи

Т.В. Аветисян¹✉, К.А. Минаев², А.П. Преображенский², Ю.П. Преображенский²

¹Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж,
Российская Федерация

²Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В работе рассматривается задача распространения сигнала внутри помещения. При решении данной задачи рассматривалось несколько этапов. На первом этапе была построена модель распространения электромагнитной волны через стену. Использовался подход, базирующийся на геометрической оптике. Для расчета степени поглощения требуется учитывать диэлектрическую и магнитную проницаемость материала стены. Чтобы обеспечить автоматизацию процесса вычислений, была написана программа на языке C++, которая дает возможности для того, чтобы быстро определить значения мощностей при заданных условиях. Исследовано затухание радиосигнала в зависимости от угла падения на стену. На втором этапе рассмотрена задача по определению уровня распространяющейся электромагнитной волны в различных точках внутри помещения. На третьем этапе рассмотрена задача оптимизации размещения передающего устройства внутри помещения. Был использован метод случайного поиска с последовательным сужением области определения значений. При этом требовалось применение метода сеток, являющегося локальным методом оптимизации. Для каждого участка сетки использовался метод золотого сечения. В итоге, после реализации нескольких десятков тысяч итераций, было определено оптимальное размещение передающего устройства. Научно-практическая значимость работы состоит в разработке комплексного алгоритма оптимизации размещения передающих устройств в помещении на основе вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: беспроводная связь, распространение электромагнитных волн, поглощение электромагнитных волн, оптимизация, мощность сигнала, затухание сигнала.

Для цитирования: 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1504> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.034

Modeling and optimization of the placement of transmitting devices in a wireless communication system

T.V. Avetisyan¹✉, K.A. Minaev², A.P. Preobrazhenskiy², Yu.P. Preobrazhenskiy²

¹College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

²Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The paper considers the problem of signal propagation indoors. Several stages were considered in solving this problem. At the first stage, a model of electromagnetic wave propagation through the wall was built. An approach based on geometric optics was used. To calculate the degree of absorption, it is necessary to take into account the dielectric and magnetic permeability of the wall material. In order to automate the calculation process, a program was written in C++, which makes it possible to quickly determine the power values under given conditions. The attenuation of the radio signal depending on the angle of incidence on the wall is investigated. At the second stage, the tasks of determining the level of a propagating electromagnetic wave at various points inside the room are considered. At the third stage, the problem of optimizing the placement of the transmitting device inside the room is considered.

A random search method was used with a sequential narrowing of the range of values. At the same time, the use of a local optimization method of the grid method was required. For each section of the grid, a local optimization method was used, which was the golden ratio method. As a result, after the implementation of several tens of thousands of iterations, the optimal placement of the transmitting device was determined. The scientific and practical significance of the work lies in the development of a complex algorithm for optimizing the placement of transmitting devices in the room based on a computational experiment.

Keywords: wireless communication, electromagnetic wave propagation, electromagnetic wave absorption, optimization, signal strength, signal attenuation.

For citation: 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1504> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.034 (In Russ.).

Введение

Сейчас одна из основных задач в области телекоммуникаций связана с тем, чтобы создать мобильную связь на базе качественного, быстрого и стабильного сигнала. Актуальность исследования моделей распространения Wi-Fi сигнала и, впоследствии, метода оптимизации расположения передающих устройств (в том числе, использующих технологию Wi-Fi) обусловлена востребованностью использования подобных методов внутри крупных компаний и предприятий с целью повысить эффективность передачи данных. Ежесекундно большая часть человечества обменивается данными, будь то текстовое сообщение или отчет по работе.

Несмотря на то, что на настоящий момент существуют модели распространения электромагнитных волн для различных условий, а также программные продукты, в которых они реализованы, не созданы алгоритмы, которые для произвольной геометрии помещений позволяли бы обеспечить оптимальное размещение передающих устройств. Это требует проведения соответствующих исследований и обуславливает актуальность рассматриваемой задачи.

В данной работе мы ознакомимся с физической стороной расчета при оценках распространения Wi-Fi сигнала на частоте 5 ГГц и проведем оптимизацию расположения Wi-Fi передающего устройства внутри помещения.

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма, на основе которого осуществляется процесс моделирования и оптимизации размещения передающих устройств в беспроводной системе связи.

Общее рассмотрение модели распространения электромагнитной волны от передающего устройства

Будем считать, что при распространении электромагнитной волны через стену в помещении источник сигнала является изотропным. Электромагнитная волна распространяется от точки A , имея мощность P_A . При этом ее направление составляет некоторый угол относительно внешней поверхности стены φ (Рисунок 1).

Будем использовать метод геометрической оптики при описании распространения электромагнитной волны. Электромагнитная волна будет распространяться от точки A изотропным способом по сфере, имеющей радиус R_l . Обозначим пространство, в котором она распространяется, оно соответствует среде 1).

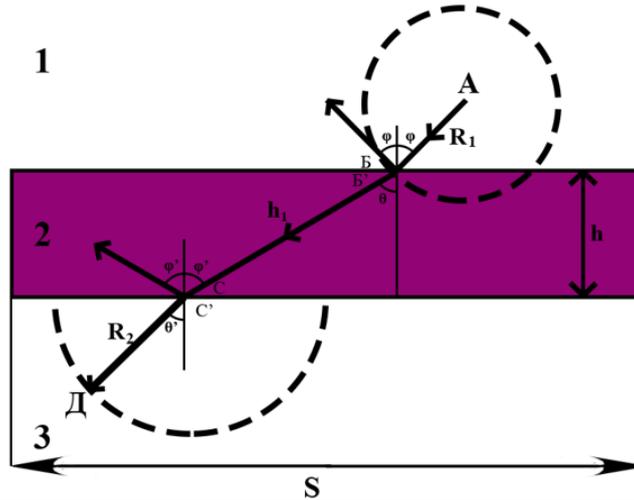


Рисунок 1 – Иллюстрация распространения электромагнитной волны через стену, являющуюся препятствием

Figure 1 – An illustration of the propagation of an electromagnetic wave through a wall that is an obstacle

Тогда точке Б будет соответствовать сигнал, который имеет мощность $P_B = \frac{P_A}{L_1}$. При этом L_1 – рассматривается как затухание сигнала, которое будет соответствовать свободному пространству. Оно равно:

$$L_1 = \frac{16\pi^2 R_1^2}{\lambda^2}, \quad (1)$$

в ходе расчетов учитывалось, что λ – длина волны.

Подставим и получим общий вид формулы мощности сигнала в точке Б:

$$P_B = \frac{P_A \lambda^2}{16\pi^2 R_1^2}. \quad (2)$$

Далее сигнал попадает во вторую среду (это среда 2). В нашем случае это препятствие в виде стены. Электромагнитная волна преломляется под углом θ . При этом мы получим мощность $P_{B'} = T_1^2 P_B$. В рассматриваемом выражении T_1 – рассматривается как коэффициент преломления электромагнитной волны от стены. Он определяется так: $T_1 = \frac{2Z_2 \cos \varphi}{Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \theta}$, для сред 1 и 2 можно указать Z_1 , Z_2 – характеристические сопротивления $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$, $Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$. Когда ведется их расчет, требуется подставлять значения соответствующей диэлектрической и магнитной проницаемости $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu_1, \mu_2$.

Будем считать, что источник электромагнитных волн располагается в воздухе ($\mu_1 = \varepsilon_1 = 1$). Стену рассматриваем как состоящую из немагнитного диэлектрика ($\mu_2 = 1$). Она характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью ε . В таком случае коэффициент преломления: $T_1 = \frac{2 \cos \varphi}{\cos \varphi + \sqrt{\varepsilon} \sin^2 \varphi}$.

Если анализировать точку Б', которая соответствует внутренней границе стены, то тогда мощность можно рассчитать на основе формулы $P_{B'} = \frac{P_A \lambda^2}{16\pi^2 R_1^2} \left(\frac{2Z_2 \cos \varphi}{Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \theta} \right)^2$.

В дальнейшем электромагнитная волна распространяется к точке С'. При этом можно выделить соответствующий угол θ . Для его определения мы можем применить закон Снеллиуса [1]:

$$k_2 \sin \theta = k_1 \sin \varphi, \quad (3)$$

в ходе расчетов считаем, что k_1 и k_2 – показатели преломления сред 1, 2: $k_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$, $k_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}$.

Осуществив преобразования, мы получим

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}, \quad (4)$$

$$\theta = \arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}. \quad (5)$$

Погонное затухание $a_n = 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} t g \delta$ дает возможности для определения потерь электромагнитной волны, которая распространяется от точки B' под углом θ в точку C . При этом $t g \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Внутри стены длина пути, по которому идет электромагнитная волна, рассчитывается так: $h_1 = \frac{h}{\cos \theta}$ [2].

Тогда затухание электромагнитной волны в стене:

$$L_2 = h_1 a_n = \frac{h 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} t g \delta}{\cos \theta}. \quad (6)$$

Найдем мощность сигнала в точке C , используя формулу (5):

$$P_C = \frac{P_B}{L_2} = \frac{P_A \lambda^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos \theta}{4\pi^2 R_1^2 h 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} t g \delta (Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \theta)^2}. \quad (7)$$

Электромагнитная волна распространяется под углом θ' : $P_{C'} = T_2^2 P_C$. При этом коэффициент преломления $T_2 = \left(\frac{2Z_1 \cos \theta}{Z_1 \cos \theta + Z_2 \cos \theta'} \right)$.

Для расчета угол θ' используем выражение:

$$k_2 \sin \theta = k_1 \sin \theta'. \quad (8)$$

Тогда:

$$\sin \theta' = \frac{k_2 \sin \theta}{k_1} = \sin \varphi. \quad (9)$$

Поэтому $\theta' = \varphi$. При этом мощность электромагнитной волны на внешней стороне препятствия (сигнал выходит из среды 2) будет равна [3-5]

$$P_{C'} = \frac{P_A \lambda^2 Z_1^2 Z_2^2 \cos^2 \varphi \cos^3 \theta}{\pi^2 R_1^2 (Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \theta)^2 (Z_1 \cos \theta + Z_2 \cos \varphi)^2 h 8,69 \frac{\pi k_2}{\lambda} t g \delta}. \quad (10)$$

Электромагнитная волна для точки C' при мощности $P_{C'}$ будет распространяться в воздухе (среда 3). Чтобы определить затухание, применяем формулу:

$$L_3 = \frac{8\pi^2 R_2^2}{\lambda^2}. \quad (11)$$

В таком случае мощность электромагнитной волны в точке D

$$P_D = \frac{P_{C'}}{L_3}. \quad (12)$$

Приводя к общему виду, используя ранее выведенные формулы (5), (9), (10) и (11), получим формулу (13):

$$P_D = \frac{P_A \lambda^4 \left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right)^2 \left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right)^2 \cos^2 \varphi \cos^3}{8\pi^2 R_1^2 R_2^2 \left(\left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right) \cos \varphi + \left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right) \cos\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right) \right)^2} \times$$

$$\times \frac{\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right)}{\left(\left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right) \cos\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right) + \left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right) \cos \varphi \right)^2 h 8,69 \frac{\pi k^2}{\lambda} t g \delta}. \quad (13)$$

Имея мощность сигнала в конечной точке Д и в начальной точке А, мы можем вычислить общую потерю сигнала (14) за пройденный путь [6, 7]:

$$L_D = \frac{P_A}{P_D} = \frac{8\pi^2 R_1^2 R_2^2 \left(\left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right) \cos \varphi + \left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right) \cos\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right) \right)^2}{\lambda^4 \left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right)^2 \left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right)^2 \cos^2 \varphi \cos^3} \times$$

$$\times \frac{\left(\left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right) \cos\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right) + \left(\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right) \cos \varphi \right)^2 h 8,69 \frac{\pi k^2}{\lambda} t g \delta}{\left(\arcsin \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \varphi}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}\right)}. \quad (14)$$

Пример расчета мощности и затухания Wi-Fi сигнала

Получив общую модель распространения Wi-Fi сигнала, мы на ее основе сможем рассчитать мощность принимаемого сигнала и уровень затухания сигнала в заданных условиях.

Рассмотрим следующую ситуацию. На расстоянии $R_1=3$ метра от электроизоляционной бетонной стены ($\varepsilon_2 = 7,2$; $\mu_2 = 1$; $t g \delta = 0,084$), толщиной $h=0,22$ м расположен Wi-Fi-роутер мощностью 20 дБм с коэффициентом усиления антенны 5 дБи, что дает нам выходную мощность $P_A=63,2$ дБм раздающего сигнала в воздухе ($\varepsilon_2 = 1$; $\mu_2 = 1$). Принимающая антенна находится по ту сторону этой стены на расстоянии $R_2=5$ метров. Третьей средой также будем считать воздух. Рассматривая Wi-Fi роутер стандарта IEEE 802.11ac, использующего частоту 5 ГГц, можем сказать, что длина волны его сигнала $\lambda = 0,06$ метров.

Имея исходные данные, рассчитаем затухание и мощность сигнала, который попадет на принимающую антенну в данных условиях, используя формулы (13) и (14). Для того, чтобы автоматизировать процесс вычислений, была написана программа на языке C++, которая позволила быстро определить значения мощностей при заданных условиях.

Округлим до сотых и занесем полученные данные в Таблицы 1, 2:

Таблица 1 – Затухание сигнала Wi-Fi в зависимости от угла падения его на препятствие
Table 1 – Attenuation of the Wi-Fi signal depending on the angle of its incidence on an obstacle

№	Угол падения φ	Затухание сигнала
1	0°	80,92 дБм
2	30°	83,05 дБм

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

3	45°	84,58 дБм
4	60°	86,86 дБм
5	70°	89,36 дБм
6	80°	94,18 дБм

Таблица 2 – Мощность сигнала Wi-Fi в зависимости от угла падения его на стену
Table 2 – The power of the Wi-Fi signal depends on the angle of its incidence on the wall

№	Угол падения φ	Мощность сигнала
1	0°	-47,72 дБм
2	30°	-49,85 дБм
3	45°	-51,38 дБм
4	60°	-53,66 дБм
5	70°	-56,17 дБм
6	80°	-60,98 дБм

В среднем принимающий сигнал равен примерно -57 дБм, что является хорошим, стабильным сигналом.

Представим графическим образом (Рисунок 2, Рисунок 3) зависимости значений затухания и мощности распространяющегося сигнала от угла падения его на стену:

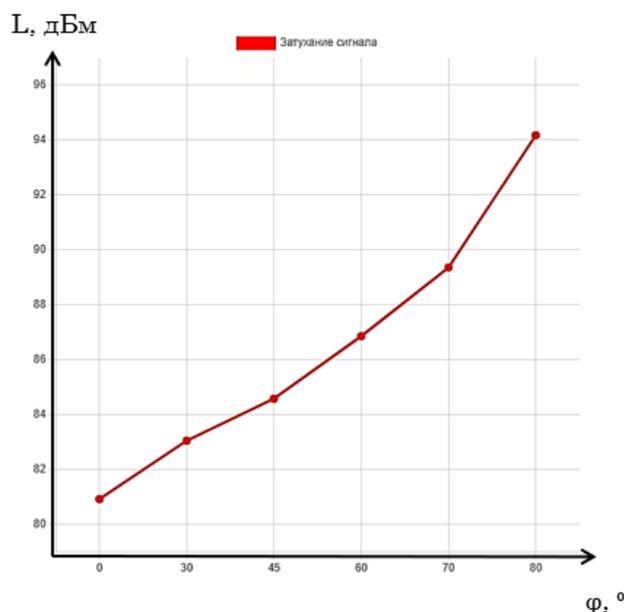


Рисунок 2 – Иллюстрация зависимости значений мощности сигнала от угла падения (в дБм)
Figure 2 – An illustration of the dependence of the signal power values on the angle of incidence used (in dBm)

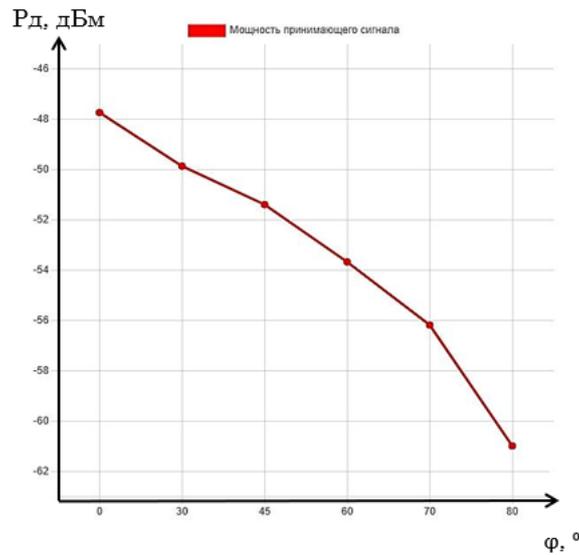


Рисунок 3 – Иллюстрация зависимости значений мощности сигнала от угла падения (в дБм)
Figure 3 – An illustration of the dependence of the signal power values on the angle of incidence used (in dBm)

На основе приведенной выше математической модели мы получили результаты, которые были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований прохождения сигнала через бетонную стену, проведенных в Воронежском Институте Высших Технологий [8]. Исследования в работе [8] позволили определить величины затуханий сигналов. Сопоставление проводилось для определения адекватности предлагаемой нами модели. Выявлено, что результаты исследований совпадают с точностью до 1 дБ.

Оценка распространения Wi-Fi сигнала внутри помещения

Обобщим нашу модель отдельного препятствия для моделирования распространения радиосигнала в помещении. В качестве помещения рассмотрим квартиру из 4 комнат. План квартиры представлен на Рисунке 4.

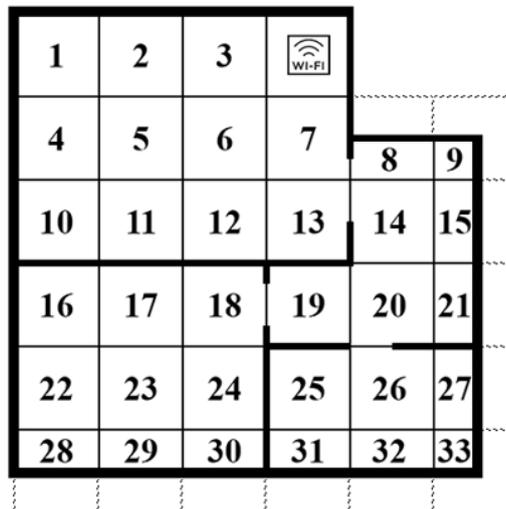


Рисунок 4 – План рассматриваемой квартиры
Figure 4 – The plan of the apartment in question

Разобьем квартиру на одинаковые квадраты, пронумеруем их, а затем в каждом из них мы проведем расчет мощности и затухания сигнала. В рассматриваемом случае стены состоят из кирпича ($\varepsilon_2 = 5,86; \mu_2 = 1; tg\delta = 0,116$) и имеют толщину $h = 0,11$ метра. Остальное пространство – воздух ($\varepsilon_1 = 1; \mu_1 = 1$) Wi-Fi роутер TP-Link Archer C6U AC1200 MU-MIMO расположен в верхнем правом квадрате верхней комнаты. Обозначим его в Таблице 3 квадратом 0. Параметры R_1 и R_2 будут зависеть от расстояния между центрами квадратов, которое равно 2 метрам. Роутер распространяет сигнал на частоте 5 ГГц.

Используя ранее выведенные формулы, вычислим показатели затухания и мощности в каждом квадрате и занесем их в таблицу:

Таблица 3 – Показатели мощности и затухания сигнала в квартире
Table 3 – Indicators of power and signal attenuation in the apartment

Номер квадрата	Мощность, P [дБм]	Затухание, L [дБм]
1	-41,99	71,98
2	-38,46	68,46
3	-32,44	62,44
4	-42,44	72,44
5	-39,43	69,43
6	-35,45	65,46
7	-32,44	62,44
8	-42,26	75,40
9	-46,04	79,24
10	-43,58	73,58
11	-41,46	71,46
12	-39,43	79,43
13	-38,46	68,46
14	-47,69	80,89
15	-71,29	104,49
16	-51,27	84,47
17	-47,7	80,9
18	-44,88	78,08
19	-43,78	76,98
20	-42,44	72,44
21	-74,73	107,93
22	-58,09	91,29
23	-55,68	88,88

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

24	-53,97	87,17
25	-76,33	109,53
26	-62,35	95,55
27	-82,6	115,8
28	-61,03	94,23
29	-59,33	92,53
30	-58,18	91,38
31	-85,87	119,07
32	-67,57	100,78
33	-93,03	126,23

На Рисунке 5 показано распределение мощности по выделенным квадратам.

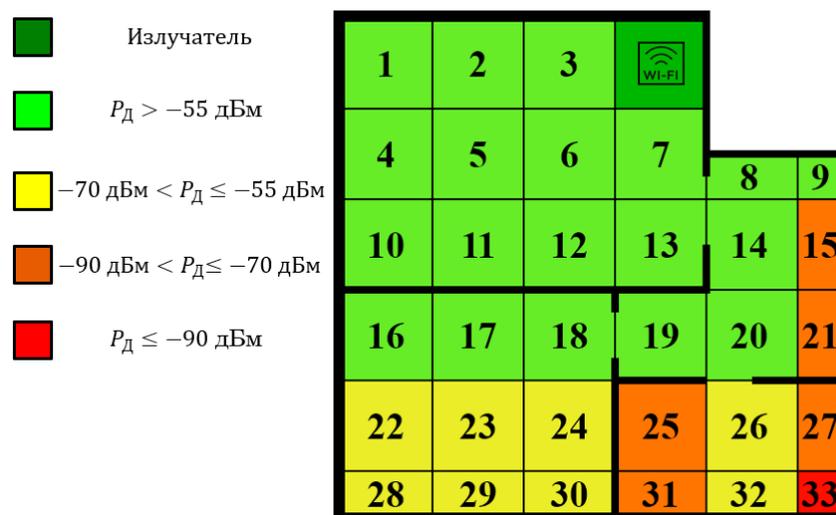


Рисунок 5 – Распределение мощности по выделенным квадратам
Figure 5 – Power distribution over the selected squares

Оптимизация размещений Wi-Fi-передающего устройства внутри помещения методом сеток

Используя предлагаемую методику оценки уровней сигнала внутри помещения, перейдем к задаче оптимизации. Рассмотрим то же помещение квартиры. Наша цель – расположить роутер так, чтобы внутри квартиры сигнал распространялся как можно более эффективно, то есть, чтобы в каждой точке принимаемый сигнал испытывал как можно меньшее затухание.

Для решения такой задачи будем использовать метод случайного поиска с последовательным сужением области определения значений. На каждом из участков сетки применяем метод сеток (Рисунок 6). Для каждого участка сетки применим метод золотого сечения, который относится к методам локальной оптимизации [9]. Целевая

функция при расчете методом локальной оптимизации: $Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10 \lg \frac{P_{расч}}{P_i}$, где $P_{расч}$ – вычисляемая мощность в каждом участке сетки, а P_i – пороговая минимальная мощность. Физический смысл этой целевой функции состоит в том, что чем больше параметр $P_{расч}$, тем лучше при прочих равных условиях размещение передающего устройства, причем равенство прочих условий понимается в смысле ограничений на остальные параметры. Целевую функцию необходимо максимизировать.

Квадраты разбиваем на более мелкие участки сетки. При этом каждая сторона в этой сетке равна 67 см.

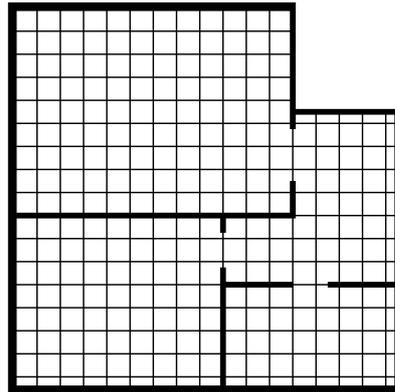


Рисунок 6 – План квартиры, разбитый на более мелкие участки
 Figure 6 – The plan of the apartment, divided into smaller sections

Всего для данного помещения необходимо было реализовать порядка 80 000 итераций. Поэтому, для выполнения поставленной задачи алгоритм эффективного расположения передающего устройства (роутера) был реализован в созданной программе с использованием алгоритма Брезенхема [10,11]. Блок-схема алгоритма разработанной программы изображена на Рисунке 7.

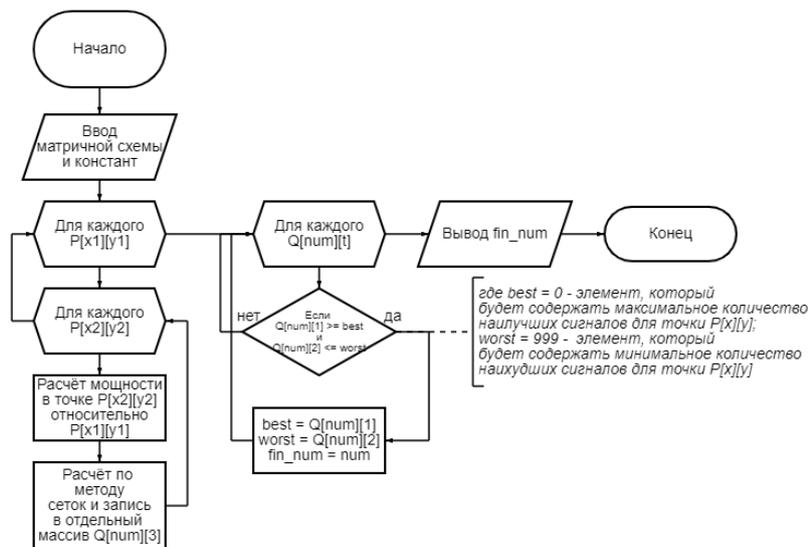


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма расчета наиболее эффективного расположения передающего устройства на основе метода сеток

Figure 7 – Flowchart of the algorithm for calculating the most efficient location of the transmitting device using the grid method

В качестве маркеров свободного пространства на схеме мы используем единицы, маркеров стен – двойки, маркеров неисследуемого пространства – минус единицы. Таким образом, используя метод локальной оптимизации и метод сеток, мы вычислили, что самой эффективной точкой расположения передающего устройства (роутера) является участок сетки под номером 142 и находится в 8 строке и 6 столбце (Рисунок 8).

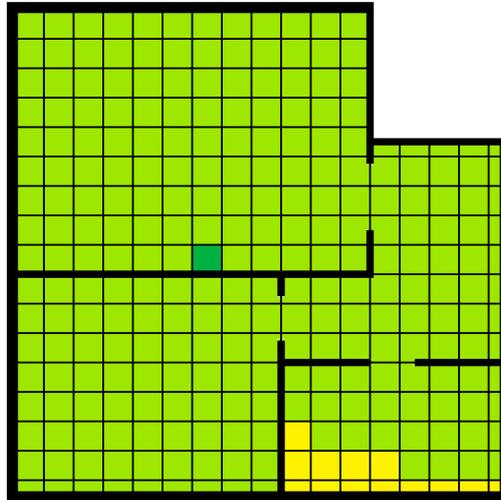


Рисунок 8 – Оптимальное размещение передающего устройства
 Figure 8 – Optimal placement of the transmitting device

Заключение

В ходе исследований было установлено, что сигнал Wi-Fi, проходя от источника к приемнику, постепенно затухает, теряя в мощности. Ключевые показатели влияния – расстояние, которое проходит сигнал; угол падения сигнала на препятствие и непосредственно материал препятствия. Основным результатом данной работы является комплексный алгоритм, базирующийся на комбинации метода геометрической оптики и оптимизации расположения передающего устройства, который включает в себя метод сеток и метод золотого сечения. Научно-практическая значимость работы состоит в том, что можно определить наиболее эффективное расположение передающего устройства внутри помещения с точки зрения получения максимальной мощности сигнала в заданной области пространства. Результаты при этом получаются без необходимости проведения натуральных измерений с учетом характеристик помещения, то есть применяется технология вычислительного эксперимента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нуриллов И.Н., Парамонов А.И. Эффективная связность беспроводной сенсорной сети. *Электросвязь*. 2018;(3):68–74.
2. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Особенности оптимизации беспроводных систем связи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;16(1):68–71. URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=157> (дата обращения: 15.02.2024).
3. Юсупов Р.Р. Моделирование передачи трафика межмашинного взаимодействия в сетях Wi-Fi HaLow с использованием механизма окна ограниченного доступа в режиме с пересечением границ. В сборнике: *Междисциплинарная школа-конференция ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2018» (ИТИС 2018): Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН*

- «Информационные технологии и системы 2018», 25-30 сентября 2018 года, Казань, Россия. М.: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН; 2018. С. 430–439.
4. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ особенностей приема и передачи сигналов в компьютерных сетях. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;16(1):75–78. URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=159> (дата обращения: 15.02.2024).
 5. Гайдамака Ю.В., Самуйлов А.К. Метод расчета характеристик интерференции двух взаимодействующих устройств в беспроводной гетерогенной сети. *Информатика и ее применения*. 2015;9(1):9–14.
 6. Гайдамака Ю.В., Самуйлов А.К., Бегишев В.О., Ковальчуков Р.Н., Молчанов Д.А. Оценка характеристик интерференции при взаимодействии беспроводных устройств в смежных помещениях прямоугольной формы. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2015;9(11):41–45.
 7. Львович И.Я., Чупринская Ю.Л., Аветисян Т.В. Анализ подходов, позволяющих проводить позиционирование объектов. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2021;15(3):42–45. URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=500> (дата обращения: 20.02.2024).
 8. Андросик А.Б., Башкатов А.В., Бистерфельд О.А., Лохманова О.И., Львович И.Я., Мировицкая С.Д., Преображенский А.П., Саушев А.В., Спириин Д.В., Удодов В.Н., Чернов С.С., Шабунина Е.В., Язовцев И.А. *Информационные технологии: приоритетные направления развития*. Новосибирск: Издательство Сибпринт; 2012. 227 с.
 9. Преображенский Ю.П., Аветисян Т.В., Ружицкий Е. Особенности функционирования систем интернета вещей. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2021;15(4):71–74. URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=541> (дата обращения: 21.02.2024).
 10. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2013;(10):153–156 (дата обращения: 21.02.2024).
 11. Львович Я.Е., Карлин П.В., Преображенский Ю.П. Об особенностях моделирования беспроводных сенсорных сетей. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2021;15(4):20–23. URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=527> (дата обращения: 23.02.2024).

REFERENCES

1. Nurilloev I.N., Paramonov A.I. Effective Connectivity Parameter of the Wireless Sensor Network. *Elektrosvyaz' = Electrosvyaz Magazine*. 2018;(3):68–74. (In Russ.).
2. Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. The Features of Optimization of Wireless Communication Systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;16(1):68–71. (In Russ.). URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=157> [Accessed 15th February 2024].
3. Yusupov R.R. Modelirovanie peredachi trafika mezhmashinnogo vzaimodeistviya v setyakh Wi-Fi HaLow s ispol'zovaniem mekhanizma okna ogranichenogo dostupa v rezhime s peresecheniem granits. In: *Mezhdistsiplinarnaya shkola-konferentsiya IPPI RAN «Informatsionnye tekhnologii i sistemy 2018» (ITIS 2018): Sbornik trudov 42-i mezhdistsiplinarnoi shkoly-konferentsii IPPI RAN «Informatsionnye tekhnologii i sistemy 2018», 25-30 September 2018, Kazan, Russia*. М.: Institut problem peredachi informatsii im. A.A. Kharkevicha RAN; 2018. P. 430–439.

4. Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitsky E. The Analysis of Features of Receiving and Transmission of Signals in Computer Networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;16(1):75–78. (In Russ.). URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=159> [Accessed 15th February 2024].
5. Gaidamaka Yu.V., Samuylov A.K. Method for Calculating Numerical Characteristics of Two Devices Interference for Device-To-Device Communications in a Wireless Heterogeneous Network. *Informatika i ee primeneniya = Informatics and Applications*. 2015;9(1):9–14. (In Russ.).
6. Gaidamaka Yu.V., Samuylov A.K., Begishev V.O., Kovalchukov R.N., Moltchanov D.A. Simulation Models for Interference in Rectangular Clusters. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm*. 2015;9(11):41–45. (In Russ.).
7. Lvovich I.Ya., Chuprinskaya Yu.L., Avetisyan T.V. The Analysis of Approaches for Positioning Objects. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2021;15(3):42–45. (In Russ.). URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=500> [Accessed 20th February 2024].
8. Androsik A.B., Bashkatov A.V., Bisterfeld O.A., Lokhmanova O.I., Lvovich I.Ya., Mirovitskaya S.D., Preobrazhenskiy A.P., Saushev A.V., Spirin D.V., Udodov V.N., Chernov S.S., Shabunina E.V., Yazovtsev I.A. *Informatsionnye tekhnologii: prioritetye napravleniya razvitiya*. Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibprint; 2012. 227 p. (In Russ.).
9. Preobrazhenskiy Yu.P., Avetisyan T.V., Ruzhitsky E. The Features of Functioning of Internet of Things Systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2021;15(4):71–74. (In Russ.). URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=541> [Accessed 21st February 2024].
10. Mishin Ya.A. About Computer-Aided Design Systems in Wireless Networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2013;(10):153–156. (In Russ.) [Accessed 21st February 2024].
11. Lvovich Ya.E., Karlin P.V., Preobrazhenskiy Yu.P. About the Features of Simulation of Wireless Sensor Networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2021;15(4):20–23. (In Russ.). URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=527> [Accessed 23rd February 2024].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аветисян Татьяна Владимировна, Tatiana V. Avetisyan, Lecturer, College of преподаватель, Колледж Воронежского Voronezh Institute of High Technologies, института высоких технологий, Воронеж, Voronezh, the Russian Federation. Российская Федерация.
e-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru

Минаев Кирилл Андреевич Kirill A. Minaev, student, Воронежский институт высоких Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж, the Russian Федерация. Federation.
e-mail: pmv_m@mail.ru

Преображенский Андрей Петрович, Andrey P. Preobrazhenskiy, доктор технических наук, профессор, Воронежский Doctor of Technical Sciences, Professor, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Institute of High Technologies, Воронеж, the Russian Федерация. Federation.
e-mail: app@vvt.ru

Преображенский Юрий Петрович, Yuri P. Preobrazhenskiy, Candidate of кандидат технических наук, доцент, Technical Sciences, Associate Professor, Воронежский институт высоких технологий, Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж, Российская Федерация. Voronezh, the Russian Federation.
e-mail: petrovich@vvt.ru

Статья поступила в редакцию 28.01.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2024; принята к публикации 30.03.2024.

The article was submitted 28.01.2024; approved after reviewing 27.03.2024; accepted for publication 30.03.2024.