

Проектирование сети Интернета вещей на основе многокритериальной оптимизации и информационного моделирования здания¹

И. А. Иванов*, А. Эбрахим*

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
i.ivanov@hse.ru, aebraхim@hse.ru

Поступила в редакцию 01.11.2025 г. Принята 10.12.2025 г.

Аннотация—В статье предложен метод планирования расположения точек доступа и шлюзов внутри зданий для построения сетей Интернета вещей. Основа метода — использование информации из информационной модели здания, что даёт возможность легко учитывать как геометрию, так и физико-технические характеристики строительных элементов при расчёте распространения радиосигнала. В данной работе для решения задач оптимизации применяется генетический алгоритм U-NSGA-III. Расчёты затухания сигнала выполняются с применением модели Мотли–Кинана. Экспериментальная проверка на реальном объекте показала положительные результаты и подтвердила прикладной потенциал разработанного решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Информационная модель здания, Интернет вещей, IfcOpenShell, U-NSGA-III, Мотли–Кинан, румоо.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_787

1. ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные технологии стали неотъемлемой частью как повседневной, так и профессиональной среды, предлагая значительные преимущества в виде удобства эксплуатации и снижения затрат. Сегодня такие сети взаимодействуют с широким спектром устройств — от персональных гаджетов (ноутбуков, смартфонов, планшетов) до компонентов автоматизированных систем в промышленности и быту. Это способствует формированию беспроводных сенсорных инфраструктур, предназначенных для сбора данных, мониторинга и управления, что, в свою очередь, служит основой для практической реализации концепции Интернета вещей (IoT). При этом количество устройств IoT постоянно растёт, что предъявляет повышенные требования к пропускной способности и надёжности таких сетей. Эффективность и производительность любой беспроводной сети во многом зависят от продуманного размещения точек доступа и шлюзов, их оптимального количества и типа. Наиболее правильным подходом при развертывании сетевого оборудования является выбор мест установки таким образом, чтобы минимизировать затухание сигнала в целевых зонах покрытия, обеспечивая достаточный уровень сигнала при минимальных затратах ресурсов. Для обеспечения высокой эффективности беспроводных сетей при размещении сетевых устройств необходимо учитывать особенности

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00299, <https://rscf.ru/project/24-19-00299/>

помещения и физические характеристики материалов, из которых выполнены различные элементы конструкции. Внутренние преграды, такие как стены или мебель, значительно ослабляют радиосигнал и могут создавать серьезные препятствия, влияя на уровень затухания и, как следствие, на стабильность и качество связи.

Кроме того, использование современных высокочастотных беспроводных технологий (например, миллиметровых волн в сетях 5G) обостряет указанные проблемы: более короткая длина волн приводит к ещё большим потерям при прохождении препятствий, что требует особо тщательного учёта материалов и геометрии пространства при планировании сети.

Информационное моделирование зданий (BIM, Building Information Modeling) понимается как цифровая технология представления объектов строительства и инфраструктуры в виде данных, пригодных для обработки программными средствами. Такая модель объединяет геометрические параметры внутренних пространств и конструктивных элементов с их физическими и техническими характеристиками. Такая детализация позволяет проводить точные инженерные расчёты, включая моделирование распространения радиосигналов с учётом коэффициентов ослабления различных преград, что особенно важно при проектировании беспроводных сетей в рамках IoT-систем. Кроме того, технология BIM представляет собой комплексную модель, включающую различные категории информации: элементы конструкции (окна, двери, перегородки и др.), производственные и строительные процессы, материальные и трудовые ресурсы, финансово-нормативные показатели (разрешения, бюджетные ограничения), сведения об участниках проекта (архитекторы, заказчики) и объединения элементов по функциональным и инженерным признакам [1]. Существуют многочисленные области и способы, посредством которых технологии BIM и IoT могут принести взаимную пользу. В частности, в работе [2] выделены три основные области взаимодействия: эксплуатация и мониторинг зданий, управление охраной труда и безопасностью, а также логистика и управление строительными процессами. Также описаны пять методов интеграции данных BIM и IoT.

В рамках данного исследования особое внимание уделяется применению BIM-технологий для задачи определения оптимальных точек размещения сетевых устройств в помещениях. Это направление рассматривается как основополагающее при проектировании беспроводной инфраструктуры. Статья включает четыре основных раздела: обзор современных методов размещения оборудования в помещениях, описание разработанного программного решения, анализ результатов его экспериментального тестирования и выводы по работе.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Научная литература содержит широкий спектр подходов к автоматизированному определению размещения сетевых устройств в помещениях. Так, в работе [3] предложен эвристический метод оценки зон покрытия, учитывающий как параметры локализации, так и качество сигнала, при этом используется модель Мотли–Кинана для учёта влияния препятствий. В исследовании [4] оптимизация расположения точек доступа в распределённых системах типа Massive MIMO направлена на минимизацию суммарной мощности передачи с учётом диаграмм направленности антенн и особенностей окружающей среды. Ряд других исследований опирается на итеративные или алгоритмические методы. Например, в [5] применяется алгоритм K-Means кластеризации для анализа распределения трафика и выбора позиций точек доступа с целью исключения зон с недостаточным покрытием, а в [6] рассматривается задача о покрытии множества (set cover) и задача расположения с максимальным покрытием (MCLP, Maximal-Coverage Location Problem) для нахождения оптимального числа и расположения Wi-Fi точек доступа на университете кампусе с учётом максимального охвата и минимизации затрат. В исследовании [7] предложено применение методов нелинейного программирования для построения моделей и оптимизации размещения передающих устройств с целью снижения потерь

при обеспечении покрытия заданного множества приёмников. В работе [8] внимание уделено задаче повышения спектральной эффективности в условиях эксплуатации внутри зданий за счёт совместной оптимизации координат и выходной мощности базовых станций. В исследовании [9] разработан гибридный метод, сочетающий интерполяцию Кrigинга с алгоритмом оптимизации серых волков (GWO, Grey Wolf Optimizer) в рамках многокритериальной робастной оптимизации. Такой подход позволяет одновременно минимизировать энергопотребление при передаче и максимизировать зону покрытия, контролируя перекрытия сигналов и снижая вычислительные затраты за счёт приближённого моделирования покрытия. В работе [10] представлена методика робастной оптимизации беспроводных локальных сетей с учётом колебаний пропускной способности каналов и мобильности пользователей, направленная на повышение энергоэффективности при сохранении требуемого качества обслуживания.

Современные разработки в этой области всё чаще интегрируют инструменты машинного обучения и искусственного интеллекта. В работе [11] представлен подход, в котором глубокое обучение с подкреплением используется совместно с трассировщиком лучей и детализированной 3D-моделью геопространственной среды для оптимизации углов наклона антенн в сотовых сетях. Такой метод позволяет быстро и масштабируемо подбирать параметры, обеспечивая высокое качество покрытия по сравнению с традиционными алгоритмами поиска. В работе [12] предложен эффективный метод трёхмерной трассировки лучей для моделирования распространения радиоволн внутри зданий на частоте 28 ГГц. Результаты моделирования продемонстрировали хорошее согласие с экспериментальными измерениями, что делает данный подход перспективным для расчёта уровня принимаемого сигнала в условиях высокочастотных сетей 5G.

В работе [13] предложен интеллектуальный фреймворк цифрового двойника, интегрирующий BIM, беспроводные IoT-датчики, цифровую обработку сигналов и экспертные методы структурного анализа для мониторинга и визуализации деформаций строительных конструкций в режиме реального времени. Подобные системы ориентированы на повышение качества данных и наглядности отображения поведения конструкций, что создаёт основу для разработки инструментов, применимых и к задачам планирования беспроводной инфраструктуры. В исследовании [14] представлена система мониторинга городских объектов в реальном времени, в которой данные от IoT-сенсоров интегрируются с BIM-моделью через Autodesk Forge API для выявления аномалий и оптимизации обслуживания. В работе [15] предложена методика оптимизации размещения датчиков температуры и CO₂ для обеспечения теплового комфорта и мониторинга качества воздуха в многозональных помещениях с учётом ограниченных возможностей проведения полевых измерений. Подход опирается на BIM-модель, учитывает сезонные изменения, параметры систем вентиляции и сценарии занятости, а также использует вычислительную гидродинамику, генетический алгоритм и методы машинного обучения. В исследовании [16] представлен быстрый метод оптимизации размещения датчиков (FSPO, Fast Sensor Placement Location Optimization), основанный на локально-чувствительном хешировании, позволяющий быстро отсеивать избыточные кандидатные позиции для установки сенсоров в умных зданиях.

Новизна предлагаемого метода заключается в объединении вычислительной простоты модели Motli–Кинана, традиционно применяемой в двумерной постановке, с использованием трёхмерных BIM-моделей здания. В отличие от ряда существующих подходов, основанных на эвристиках или характеристиках трафика и локализации (например, [3, 5]), предложенное решение использует BIM как структурированный источник сведений о геометрии и материалах преград, что позволяет учитывать особенности внутренней среды без проведения предварительных измерений. Формальные постановки типа set cover/MCLP [6] и методы матема-

тической оптимизации [7] обеспечивают строгую формализацию задачи, однако существенно усложняются при учёте детальной трёхмерной геометрии помещений.

Физически более точные модели на основе трассировки лучей [12] и их сочетания с методами искусственного интеллекта [11] позволяют получать высокоточные оценки покрытия, но требуют значительных вычислительных ресурсов и сложной подготовки исходных данных. В данной работе применяется компромиссный подход: используется IFC/BIM-модель, вычислительно простая модель Мотли–Кинана [17], расширенная на трёхмерный случай, и решается многокритериальная задача оптимизации (качество связи и количество устройств) эволюционным методом U-NSGA-III с реализацией в библиотеке rumpo [18]. Это делает метод пригодным для практического проектирования IoT-сетей при изменениях планировки или состава устройств.

3. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Система состоит из трёх модулей (Рис. 1):

- Препроцессор
- Калькулятор потерь сигнала
- Планировщик

В рамках разработанного инструмента препроцессор реализован с использованием языка программирования Python и опирается на функциональность библиотеки IfcOpenShell. Эта библиотека с открытым исходным кодом предназначена для обработки файлов в формате Industry Foundation Classes (IFC), признанного международного стандарта представления данных в системах BIM. Применение IFC позволяет оперировать детализированной моделью здания, содержащей данные о геометрии элементов, их взаимном расположении и физических характеристиках. Такая структурированная информация служит надёжной основой для проведения инженерных симуляций и аналитических расчётов, связанных с функциональным зонированием и внутренней организацией объекта.

Библиотека IfcOpenShell широко применяется для автоматизированной обработки BIM-данных. Например, в работе [19] продемонстрировано, как с её помощью и при интеграции с Python можно автоматически получать структурные модели железобетонных конструкций из архитектурных BIM-моделей, что позволяет снизить количество ошибок, сократить трудозатраты и повысить точность проектирования. В исследовании [20] показана возможность автоматического извлечения как геометрических, так и акустических параметров из файлов IFC для интеграции с инструментами расчёта акустического комфорта, что значительно ускоряет процесс оценки и повышает его точность. Эти примеры подтверждают универсальность IfcOpenShell и её востребованность как в академических, так и в промышленных приложениях.

На этапе предварительной обработки инструмент извлекает из IFC-модели ключевую информацию, необходимую для построения симуляции. В частности, идентифицируются пространственные координаты элементов, выполняющих функции датчиков и исполнительных устройств, при условии их обозначения как IfcSensorType и IfcActuatorType. Также анализируются сведения о строительных материалах, заложенные в модель, что позволяет учесть их влияние на распространение сигнала. Дополнительно производится геометрическая интерпретация объекта: извлекаются габариты здания, а также топология таких конструктивных элементов, как стены, окна и перекрытия.

Трехмерное пространство делится на ячейки с использованием шага дискретизации β , так что трехмерные координаты индексов (u_p, v_p, w_p) точки $p = (x, y, z)$ могут быть выражены как:

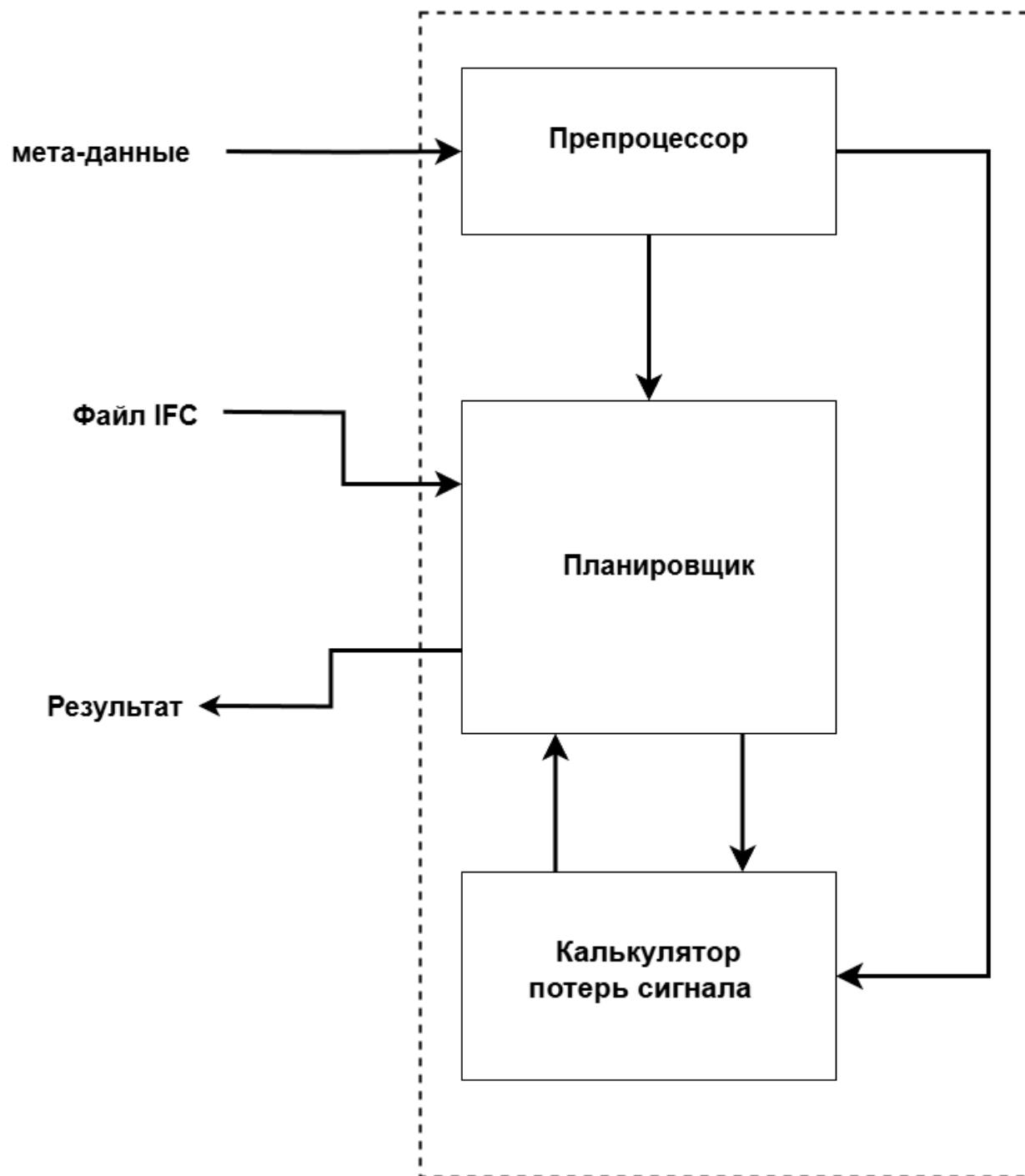


Рис. 1. Компоненты системы.

$$u_p = \left\lfloor \frac{x_p - x_{\min}}{\beta} \right\rfloor + 1 \in \{1, \dots, N_u\},$$

$$v_p = \left\lfloor \frac{y_p - y_{\min}}{\beta} \right\rfloor + 1 \in \{1, \dots, N_v\},$$

$$w_p = \left\lfloor \frac{z_p - z_{\min}}{\beta} \right\rfloor + 1 \in \{1, \dots, N_w\}.$$

Результаты передаются в блок планировщика и блок калькулятора потерь сигнала. Калькулятор потерь сигнала отвечает за определение потерь, которые сигнал испытывает при прохождении от источника до приёмника. Текущая реализация использует метод Мотли-Кинана [17]:

$$l = l_0 + 10n \log(d) + \sum_{i=1}^C k_{c_i} l_{c_i}.$$

где:

- l_0 : эталонные потери на расстоянии 1 м.
- k_{c_i} : количество стен типа i
- l_{c_i} : потери сигнала при прохождении через стену типа i .
- n : коэффициент затухания уровня принимаемого сигнала.
- C : общее количество типов стен.

Чтобы выявить препятствия на пути распространения сигнала, между передающим и приёмным устройствами прокладывается прямая, при этом используется трёхмерная модификация алгоритма Брезенхэма [21]. Определяются точки линии, принадлежащие стена, и рассчитываются соответствующие потери сигнала при пересечении стены. Зная мощность передатчика ε_{TPO} устройства и потери сигнала, уровень сигнала ε может быть вычислен как:

$$\varepsilon = \varepsilon_{TPO} - l$$

Блок планировщика отвечает за определение наилучшего количества сетевых устройств и их эффективного размещения. Предположим, что:

- \mathcal{T} : множество точек доступа, шлюзов или других сетевых устройств, используемых для сбора данных с датчиков. Координаты устройства $\tau \in \mathcal{T}$ обозначаются как u_τ , v_τ , w_τ . В процессе оптимизации, если $u_\tau = 0$ or $v_\tau = 0$ or $w_\tau = 0$ это означает, что устройство τ физически не устанавливается.
- \mathcal{S} : множество датчиков или исполнительных устройств, данные которых должны быть собраны. Координаты датчика $s \in \mathcal{S}$, обозначаются как u_s , v_s , w_s .
- $s_{u_b v_b w_b}^a$: уровень сигнала, передаваемого устройством a и принимаемого в точке b .
- λ_τ : чувствительность приёмника устройства τ .
- λ_s : чувствительность приёмника датчика s .
- $\chi_{s\tau}$: бинарная управляющая переменная, принимающая значение 1, если датчик s закреплён за устройством τ , и 0 в противном случае.

Для обеспечения допустимости решений, получаемых в результате процесса оптимизации, вводится совокупность ограничений:

Ограничение 1: все переменные решения находятся в пределах диапазона:

$$0 \leq u_\tau \leq N_u, \forall \tau \in \mathcal{T},$$

$$0 \leq v_\tau \leq N_v, \forall \tau \in \mathcal{T},$$

$$0 \leq w_\tau \leq N_w, \forall \tau \in \mathcal{T},$$

$$0 \leq \chi_{s\tau} \leq 1, \forall s \in \mathcal{S}, \forall \tau \in \mathcal{T}.$$

Ограничение 2: минимальный уровень сигнала обеспечивается на обоих концах любого канала связи:

$$\varepsilon_{u_\tau v_\tau w_\tau}^s \geq \chi_{s\tau} \delta(u_\tau v_\tau w_\tau) \tau_\tau, \forall \tau \in \mathcal{T}, \forall s \in \mathcal{S},$$

$$\varepsilon_{u_s v_s w_s}^\tau \geq \chi_{s\tau} \delta(u_\tau v_\tau w_\tau) \tau_s, \forall \tau \in \mathcal{T}, \forall s \in \mathcal{S}.$$

где

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \neq 0, \\ 0, & \text{если } x = 0. \end{cases}$$

Ограничение 3: назначение датчика к шлюзу или точке доступа происходит только в случае, если уровень сигнала датчика максимальен на этом шлюзе или точке доступа среди всех датчиков:

$$\chi_{sh} \left[s_{u_\tau v_\tau w_\tau}^s - \max_{\tau \in \mathcal{T}} (s_{u_\tau v_\tau w_\tau}^s) \right] = 0, \forall \tau \in \mathcal{T}, \forall s \in \mathcal{S}.$$

Ограничение 4: каждый датчик может быть назначен только одному шлюзу или точке доступа:

$$\sum_{\tau \in \mathcal{T}} \chi_{s\tau} = 1, \forall s \in \mathcal{S}.$$

Используются две целевые функции:

Целевая функция 1: максимизация уровня принимаемого сигнала

$$\Phi = \max \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\tau \in \mathcal{T}} \chi_{s\tau} s_{u_s v_s w_s}^\tau + \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\tau \in \mathcal{T}} \chi_{s\tau} s_{u_s v_s w_s}^s \right).$$

Целевая функция 2: минимизация потребности в инфраструктуре точек доступа или шлюзов

$$\Xi = \min \sum_{\tau \in \mathcal{T}} \delta(u_\tau v_\tau w_\tau).$$

Для решения задачи многокритериальной оптимизации, возникающей при размещении сетевых устройств, в исследовании использовались эволюционные методы. В качестве базового инструмента был выбран алгоритм U-NSGA-III (Unified Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III), применение которого позволяет учитывать сразу несколько показателей эффективности системы и находить компромиссные варианты конфигурации сети. Реализация и практическое использование алгоритма осуществлялись с помощью библиотеки ruttoo [18], которая содержит удобные механизмы для построения и анализа эволюционных алгоритмов.

В случаях, когда алгоритм U-NSGA-III формирует несколько решений, для выбора наилучшего применяется метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Эти инструменты позволяют ранжировать альтернативы по степени близости к идеальному решению. Все параметры, необходимые для корректной работы как алгоритма оптимизации, так и процедуры выбора, передаются в планировщик с использованием формата JSON.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работоспособности предложенного метода была построена информационная модель рассматриваемого здания в среде BricsCAD с учётом планировки помещений и характеристик ограждающих конструкций. Полученная BIM-модель была экспортирована в формат IFC и использовалась как входные данные для разработанного инструмента (рис. 2).

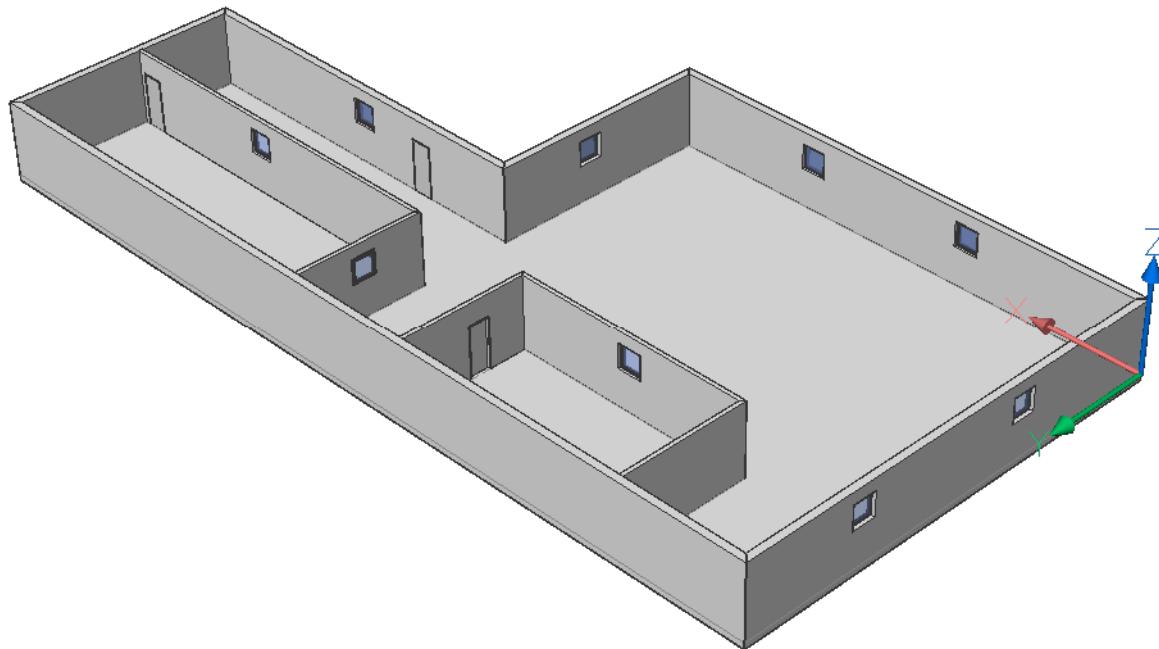


Рис. 2. Трёхмерная BIM-модель рассматриваемого здания.

Экспериментальная установка включала модули на базе ESP32 со встроенным Wi-Fi, разделённые на две группы: датчики, передающие сообщения с заданной (случайно выбираемой) периодичностью, и точки доступа, принимающие и агрегирующие данные. Интервалы передачи задавались в диапазоне 0,2–10 с, рабочая частота составляла 2,4 ГГц. В течение 24 ч регистрировались значения RSSI, а также события устойчивости связи; данные сохранялись в CSV на SD-карты и далее анализировались офлайн. Размещение точек доступа вычислялось разработанным планировщиком на основе IFC-модели и расчёта потерь сигнала (модель Мотли–Кинана) с учётом строительных преград.

В ходе испытаний рассматривались два характерных сценария пространственного размещения датчиков. На рис. 3 и 4 показаны положения датчиков (зелёные прямоугольники) и рассчитанные инструментом точки доступа (красные прямоугольники). Для обоих сценариев метод сформировал размещение, обеспечивающее устойчивую связь на всей целевой области, что подтверждается наблюдаемыми значениями RSSI и отсутствием разрывов соединения в течение суток.

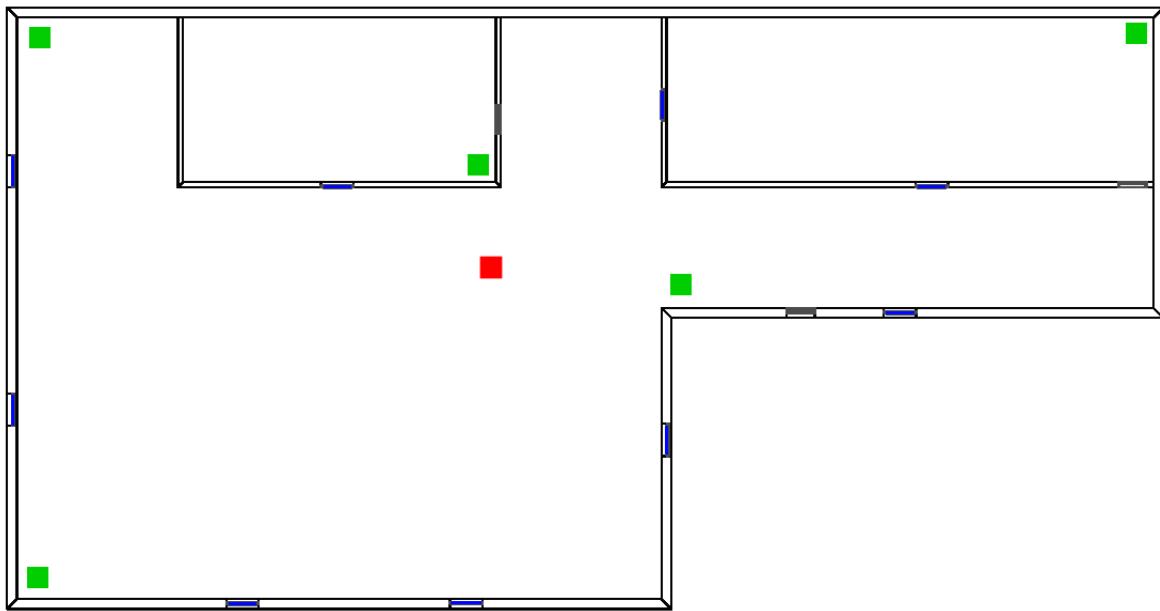


Рис. 3. Сценарий 1: размещение датчиков (зелёные) и рассчитанной точки доступа (красная).

Чтобы количественно подтвердить эффективность метода, в табл. 1 приведены сводные метрики покрытия и качества связи по результатам 24-часовых наблюдений для каждого сценария. В таблице $|S|$ обозначает число датчиков, $|T|$ — число точек доступа, предложенное планировщиком для выбранной конфигурации. В качестве минимально допустимого порога покрытия задано $r_{\min} = -70$ дБм: при RSSI выше этого значения связь рассматривается как достаточная для нормальной эксплуатации сети.

Метрика C_{sensors} показывает долю датчиков, для которых медианный за 24 ч уровень RSSI не ниже порога r_{\min} . Такой способ оценки позволяет учесть типичное качество связи для каждого датчика, не завися при этом от единичных кратковременных отклонений. Параметр r_{worst} отражает наиболее неблагоприятный случай за весь период наблюдения — минимальное значение RSSI среди всех датчиков и всех моментов времени. На его основе вычисляется минимальный запас по порогу $\Delta_{\text{worst}} = r_{\text{worst}} - r_{\min}$: чем выше Δ_{worst} , тем выше устойчивость сети к изменениям среды (перемещение людей, изменение положения мебели, многолучевость).

Для контроля стабильности соединения фиксировалось число разрывов связи: разрывом считался эпизод, когда RSSI опускается ниже r_{\min} и затем возвращается выше r_{\min} . Дополнительно приведена максимальная доля времени, в течение которой сигнал находился ниже порога. Для более наглядной интерпретации качества связи указаны доли датчиков, у которых медианный RSSI за сутки достигает уровней ≥ -65 и ≥ -60 дБм (условно «хороший» и «очень хороший» уровень в помещении). Наконец, квантили Р5, Р50 и Р95 медианных значений RSSI

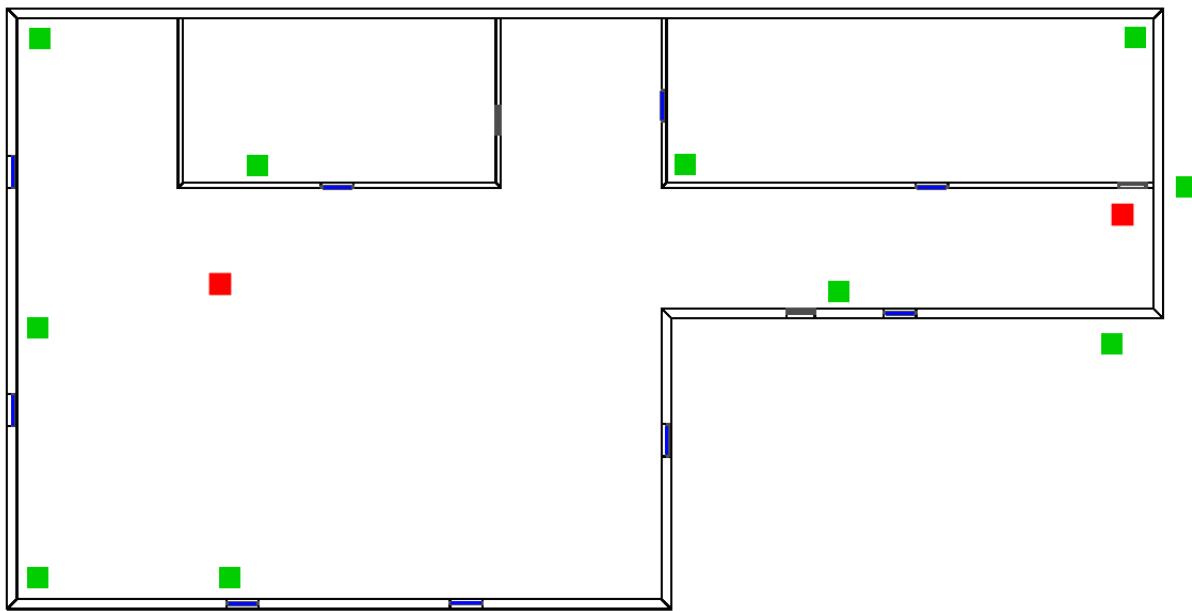


Рис. 4. Сценарий 2: размещение датчиков (зелёные) и рассчитанных точек доступа (красные).

по датчикам позволяют характеризовать распределение качества связи (Р50 соответствует медиане), не опираясь на единичные экстремальные выбросы.

Таблица 1. Сводные показатели покрытия и качества связи по результатам 24-часовых наблюдений.

Показатель	сценарий 1	сценарий 2
Число датчиков $ S $, шт.	5	10
Число точек доступа $ T $, шт.	1	2
Порог покрытия r_{min} , дБм	-70	-70
Доля покрытых датчиков $C_{sensors}$, %	100.0	100.0
Худший RSSI за 24 ч r_{worst} , дБм	-64.0	-57.0
Лучший RSSI за 24 ч, дБм	-37.0	-37.0
Медиана RSSI по датчикам, дБм	-58.0	-50.5
Минимальный запас по порогу Δ_{worst} , дБ	6.0	13.0
Число разрывов соединения, шт.	0	0
Макс. доля времени ниже r_{min} , %	0.00	0.00
Доля датчиков с медианным RSSI ≥ -65 дБм, %	100.0	100.0
Доля датчиков с медианным RSSI ≥ -60 дБм, %	40.0	90.0
P5 медианного RSSI по датчикам, дБм	-63.4	-56.5
P50 медианного RSSI по датчикам, дБм	-58.0	-50.5
P95 медианного RSSI по датчикам, дБм	-46.4	-46.4

Полученные значения подтверждают эффективность метода в обоих сценариях: в каждом случае достигается 100% покрытие по порогу -70 дБм ($C_{sensors} = 100\%$), а также не наблюдается разрывов соединения в течение 24 ч. При этом худшие зафиксированные значения RSSI остаются выше порогового уровня (соответственно, $\Delta_{worst} > 0$), что указывает на наличие запаса по качеству связи и возможность нормальной эксплуатации сети в условиях типичных изменений среды.

Важно отметить, что планировщик подбирает число точек доступа $|T|$ в зависимости от геометрии помещений и пространственного распределения датчиков, то есть адаптирует инфраструктуру под конкретную задачу. Тем самым метод обеспечивает рациональный компромисс

между количеством развёртываемых точек доступа и качеством радиосвязи: инфраструктура не наращивается избыточно, но уровень сигнала остаётся достаточно высоким для стабильной работы сети. Следовательно, предложенный подход может быть использован для практического проектирования внутридомовых IoT-сетей на основе BIM/IFC-данных.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод планирования расположения точек доступа и шлюзов внутри зданий для построения сетей Интернета вещей с использованием информации из информационной модели здания (BIM). Такой подход позволяет учитывать как геометрию, так и физико-технические характеристики строительных элементов при расчёте распространения радиосигнала по модели Мотли–Кинана в трёхмерном пространстве. Для решения многокритериальной оптимизационной задачи применён современный эволюционный алгоритм U-NSGA-III, а в случае получения множества альтернативных решений — метод TOPSIS для выбора наилучшего варианта. Разработанный инструмент реализован на языке Python, что обеспечивает его интеграцию с популярными BIM-платформами и удобство внедрения в существующие рабочие процессы без необходимости специализированного оборудования. Экспериментальная проверка на реальном объекте подтвердила эффективность подхода и его прикладной потенциал, что открывает возможности для дальнейшего развития и масштабирования решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manzoor B., Charef R., Antwi-Afari M.F., Alotaibi K.S., Harirchian E. Revolutionizing Construction Safety: Unveiling the Digital Potential of Building Information Modeling (BIM) // Buildings. MDPI AG, 2025. Vol. 15, № 5. P. 828.
2. Liu X., Antwi-Afari M.F., Li J., Zhang Y., Manu P. BIM, IoT, and GIS integration in construction resource monitoring // Automation in Construction. Elsevier BV, 2025. Vol. 174. P. 106149.
3. Tian Y., Huang B., Jia B., Zhao L. Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization // Journal of Network and Computer Applications. Elsevier BV, 2020. Vol. 164. P. 102673.
4. Zhu Y.-H., Callebaut G., Çalik H., Van der Perre L., Rottenberg F. Energy Efficient Access Point Placement for Distributed Massive MIMO // Network. MDPI AG, 2022. Vol. 2, № 2. P. 288–310.
5. Karima F.A., Shiddiqi A.M. Optimization of Access Point Positioning on Wi-Fi Networks Using the K-Means Clustering Method // JTS. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITS, 2022. Vol. 33, № 1. P. 13.
6. Ali L.M., Khanji O., Özceylan E. Location-Allocation Optimization of Wi-Fi Access Points at Gaziantep University Campus // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Manila, Philippines: IEOM Society International, 2023.
7. Oustry A., Le Tilly M., Clausen T., d'Ambrosio C., Libert L. Optimal deployment of indoor wireless local area networks // Networks. Wiley, 2023. Vol. 81, № 1. P. 23–50.
8. Saha R.K. On Maximizing Energy and Spectral Efficiencies Using Small Cells in 5G and Beyond Networks // Sensors. MDPI AG, 2020. Vol. 20, № 6. P. 1676.
9. Parnianifard A., Mumtaz S., Chaudhary S., Imran M.A., Wuttisittikulkij L. A data driven approach in less expensive robust transmitting coverage and power optimization // Sci Rep. Springer Science and Business Media LLC, 2022. Vol. 12, № 1. P. 17725.
10. Garropo R.G., Nencioni G., Scutellà M.G., Tavanti L. Robust optimisation of green wireless LANs under rate uncertainty and user mobility // Electronic Notes in Discrete Mathematics. Elsevier BV, 2016. Vol. 52. P. 221–228.

11. Wang Z., Isci S., Kanza Y., Kounev V., Shaqalle Y. Cellular Network Optimization by Deep Reinforcement Learning and AI-Enhanced Ray Tracing // Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Spatial Big Data and AI for Industrial Applications. Hamburg, Germany: ACM, 2023. P. 41–50.
12. Hossain F., Geok T.K., Rahman T.A., Hindia M.N., Dimyati K., Ahmed S., Tso C.P., Abd Rahman N.Z. An Efficient 3-D Ray Tracing Method: Prediction of Indoor Radio Propagation at 28 GHz in 5G Network // Electronics. MDPI AG, 2019. Vol. 8, № 3. P. 286.
13. Hu X., Olgun G., Assaad R.H. An intelligent BIM-enabled digital twin framework for real-time structural health monitoring using wireless IoT sensing, digital signal processing, and structural analysis // Expert Systems with Applications. Elsevier BV, 2024. Vol. 252. P. 124204.
14. Yang S.-W., Lee Y., Kim S.-A. Design and Validation of a Real-Time Maintenance Monitoring System Using BIM and Digital Twin Integration // Buildings. MDPI AG, 2025. Vol. 15, № 8. P. 1312.
15. Cheng J.C.P., Kwok H.H.L., Li A.T.Y., Tong J.C.K., Lau A.K.H. BIM-supported sensor placement optimization based on genetic algorithm for multi-zone thermal comfort and IAQ monitoring // Building and Environment. Elsevier BV, 2022. Vol. 216. P. 108997.
16. Yang M., Ge C., Zhao X., Kou H. FSPLLO: a fast sensor placement location optimization method for cloud-aided inspection of smart buildings // J Cloud Comp. Springer Science and Business Media LLC, 2023. Vol. 12, № 1. P. 31.
17. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electron. Lett. (UK). Institution of Engineering and Technology (IET), 1988. Vol. 24, № 12. P. 763–764.
18. Blank J., Deb K. Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python // IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020. Vol. 8. P. 89497–89509.
19. Singh T., Mahmoodian M., Wang S. Enhancing Open BIM Interoperability: Automated Generation of a Structural Model from an Architectural Model // Buildings. MDPI AG, 2024. Vol. 14, № 8. P. 2475.
20. Álvarez-Díaz S., Mulero-Palencia S., Andrés-Chicote M., Martarelli M. An innovative approach to automate BIM data retrieval and processing for building acoustic comfort calculations based on the IFC standard // Building and Environment. Elsevier BV, 2024. Vol. 266. P. 112072.
21. Liu X.-W., Cheng K. Three-dimensional extension of Bresenham's algorithm and its application in straight-line interpolation // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. SAGE Publications, 2002. Vol. 216, № 3. P. 459–463.

IoT Network Design Based on Multiobjective Optimization and Building Information Modeling

I. A. Ivanov, A. Ebraheem

The article proposes a method for planning the placement of access points and gateways inside buildings for constructing Internet of Things networks. The basis of the method is the use of information from a building information model, which makes it possible to easily take into account both the geometry and the physical and technical characteristics of building elements when calculating radio signal propagation. In this work, the U-NSGA-III genetic algorithm is applied to solve optimization problems. Signal attenuation calculations are performed using the Motley–Keenan model. Experimental verification on a real facility demonstrated positive results and confirmed the practical potential of the developed solution.

KEYWORDS: Building Information Model, Internet of Things, IfcOpenShell, U-NSGA-III, Motley–Keenan, pymoo.