

УДК 004.725

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.013

Построение оптимизационной модели беспроводной внутренней сети для использования технологии интернета вещей

Сиротинин Анатолий Андреевич, Володько Ольга Станиславовна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, *slitch@icm.krasn.ru*

Аннотация. В работе предложен подход для построения оптимальной беспроводной сенсорной сети внутри помещения для технологии интернета вещей. Для повышения энергоэффективности сети используется гибридная структура сети на основе стандартов Wi-Fi и ZigBee. Преимуществом предложенного подхода является то, что сеть проектируется на трехмерной модели здания, учитывая затухания сигнала не только в стенах, но и в перекрытиях этажей. Для оптимального расположения связующих и сенсорных узлов предлагается использовать комбинацию радиоволнового (модели Мотли-Кинана) и оптимизационного (генетического алгоритма) методов.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, модель Мотли-Кинана, уровень мощности сигнала, интернет вещей, ячеистые сети, задача оптимизации, генетические алгоритмы

Цитирование: Сиротинин А.А. Построение оптимизационной модели беспроводной внутренней сети для использования технологии интернета вещей / А.А. Сиротинин, О.С. Володько // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 2(34). – С. 135-143. – DOI: 10.25729/ESI.2024.34.2.013.

Введение. В настоящее время существует проблема организации беспроводной сенсорной сети для технологии интернета вещей [1, 2]. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) является перспективным инструментом для создания безопасного и комфортного автоматизированного рабочего пространства. Важными преимуществами БСС являются отсутствие кабельной инфраструктуры, малые размеры устройств, низкое энергопотребление, встроенный радиоинтерфейс, достаточно высокая вычислительная мощность и относительно низкая стоимость. БСС – это распределенная система миниатюрных электронных устройств (сетевых узлов), таких, как датчики дыма, открытия дверей, влажности, протечки, температуры и исполнительных устройств. Такая сеть собирает данные о параметрах среды и передает их на сервер по узлам связи с помощью беспроводного подключения. Несколько узлов такой сети выступают в качестве шлюзов (хабов), которые осуществляют связь с глобальной сетью. БСС имеет тип ячеистой структуры, с базовыми точками доступа, выступающими в роли ведущих, прерывание связи с которыми ведет к потере данных и не позволяет оперативно предпринимать действия по устранению нештатного изменения параметров. Поскольку большинство параметров от датчиков являются критически важными для пользователя, необходимо обеспечить стабильную и надежную работу сети.

В устройствах интернета вещей для обмена данными внутри помещений самыми распространенными являются стандарты Wi-Fi, Bluetooth, Z-Wave, Thread и ZigBee [3–5]. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки. Например, Wi-Fi имеет преимущество в универсальности, при этом недостатками являются высокая стоимость качественного современного оборудования и высокое энергопотребление. Bluetooth имеет небольшой радиус действия, но низкое энергопотребление, особенно у версии LE (Low Energy), и низкую скорость передачи данных. ZigBee [6] является промежуточным вариантом, так как имеет низкое энергопотребление, радиус действия сопоставим с Wi-Fi, но скорость передачи существенно ниже. Плюсом стандартов ZigBee и Wi-Fi (нового поколения) является то, что стандарты имеют ячеистую, самоорганизующуюся структуру и большинство точек доступа оснащены одновременно модулями ZigBee и Wi-Fi. Стандарт Z-Wave работает на более низкой частоте, что является преимуществом и недостатком одновременно. Низкая частота

передатчика позволяет распространять сигнал на большие расстояния при той же мощности, но при этом существенно снижаются скорость передачи и количество передаваемой информации. Thread является прямым конкурентом ZigBee, но с обновленными алгоритмами шифрования AES-CCM. Его существенным недостатком является малая распространенность.

В связи с тем, что для функционирования беспроводных сетей, включая сенсорные, требуются точки доступа, то при выборе их мест расположения должны учитываться конструктивные особенности здания, материалы конструкций и отделки. Для решения проблемы оптимального расположения точек доступа предлагаются как различные готовые программные пакеты [7], которые позволяют оценивать уровень мощности сигнала в зависимости от физических свойств окружающей среды, так и методы поиска размещения точек доступа для обеспечения оптимальной зоны покрытия сигнала. В то же время, программные пакеты имеют недостатки, которые не позволяют использовать их большинству людей. Крупные производители оборудования, например, Cisco [8], D-Link [9], предоставляют собственные программные решения, рассчитанные только под собственные продукты. Существуют программные пакеты, рассматривающие точки доступа от разных производителей, но они предлагают пользователю минимальный набор опций за высокую стоимость [10–12]. Кроме того, имеющиеся программные пакеты в основном рассматривают двумерные модели помещений и учитывают фиксированные типы препятствий из встроенных информационных таблиц, не позволяя делать поправку, например, на слои декоративной отделки.

В литературе существуют различные способы для постановки задач оптимального размещения беспроводных точек доступа в сенсорных сетях и методов их решения. Эти методы разделяются на детерминированные и стохастические. В детерминированных методах гарантируется достижение глобального или, по крайней мере, локального минимума, в то время, как в стохастических алгоритмах минимум достигается только с некоторой вероятностью. Однако, стохастические методы быстрее находят глобальный оптимум по сравнению с детерминированными, особенно, когда найти глобальный оптимум – сложная вычислительная задача. К детерминированным относятся, например, такие методы, как методы перебора, алгоритмы теории графов [13, 14]. К стохастическим относятся алгоритмы, вдохновленные природой, например, оптимизации роя частиц, муравьиные и генетические алгоритмы [15].

Для решения задачи оптимального расположения точек доступа необходимо комбинировать радиоволновое моделирование с подходящими оптимизационными методами, например, такими, как генетические алгоритмы. Что касается радиоволновых моделей, в большинстве исследований используется модель простых логарифмических потерь на расстоянии (LDPL) [16, 17], которая не учитывает затуханий в стенах и перекрытиях в отличие от моделей распространения лучей [18] или более практической модели Мотли-Кинана [19]. Преимущества эмпирических моделей (например, модели Мотли-Кинана) перед детерминистическими моделями распространения (например, моделью трассировки лучей) включают вычислительную эффективность, небольшое количество параметров и простоту применения [20]. Дополненная модель Мотли-Кинана, предложенная в [21], учитывает затухания сигнала в стенах и перекрытиях этажей и показывает более точные результаты, чем мультистенная модель COST 231 [22].

Целью настоящей работы является построение оптимальной БСС ячеистой структуры внутри помещений для технологии интернета вещей. Предложенная БСС рассматривается на примере здания научного института.

1. Беспроводная сенсорная сеть. Для проектирования сети предлагается структура БСС, показанная на рис. 1. Для обеспечения надежности и отказоустойчивости сеть должна быть построена следующим образом: каждый сенсор должен видеть хотя бы два связующих узла (хаба), каждый хаб должен видеть хотя бы ещё один хаб, в случае отказа ведущего узла (лидера) любой из хабов может взять на себя право быть ведущим. Вывод данных в интернет осуществляется через хаб, работающий в режиме шлюза. Благодаря этим условиям ячеистый тип сетей легко масштабируется и являются очень надёжным.

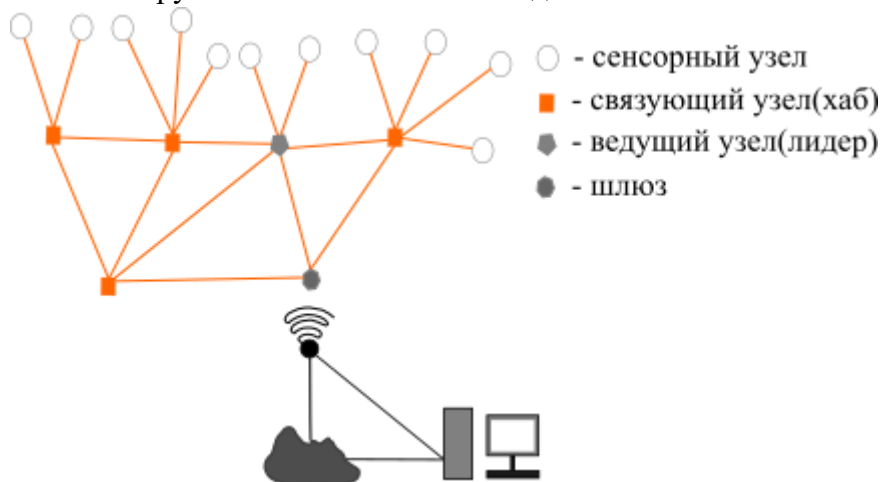


Рис. 1. Структура беспроводной сенсорной сети

В настоящей работе стандарт Wi-Fi используется для соединения ведущего узла с хабами и хабов между собой. При этом хабы могут располагаться как в пределах одного этажа, так и на разных этажах. Таким образом, рассматривается трехмерная модель здания. Сенсоры будут связываться с хабами по стандарту ZigBee для увеличения энергоэффективности сети.

2. Оценка уровня мощности сигнала. Для получения начальной картины покрытия уровнем мощности сигнала Wi-Fi контрольных точек, в качестве которых выбраны несколько хабов, в обследуемом здании методом измерений была построена цифровая модель. В качестве радиоволновой модели для расчета уровней мощности сигнала была выбрана дополненная модель Мотли-Кинана. Для обследуемого здания проведено сравнение измеренных уровней мощности сигнала с рассчитанными по дополненной модели Мотли-Кинана, чтобы убедиться в точности расчетов.

Уровень мощности сигнала стандарта Wi-Fi по модели Мотли-Кинана [23] в зоне прямой видимости рассчитывается следующим образом:

$$RSS(d) = RSS(d_0) - 10a \log \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (1)$$

где $RSS(d)$ – мощность сигнала (RSS – Received Signal Strength) (дБм), определяемая устройством на расстоянии d от точки доступа, $RSS(d_0)$ – мощность сигнала (дБм), измеренная на расстоянии $d_0 = 1$ м от точки доступа, a – коэффициент, учитывающий потери сигнала в окружающей среде.

В работе [21] представлена дополненная модель Мотли-Кинана, которая учитывает также затухание сигнала в стенах, перегородках и межэтажных перекрытиях:

$$RSS(d) = RSS(d_0) - 10a \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sum_{r=1}^L l_r \omega_r + FAF, \quad (2)$$

где L – количество стен, l_r – количество стен с затуханием ω_r , FAF – затухание в межэтажном перекрытии (таблица 1). Усредненные значения затуханий приведены в таблице 2 [24].

Для получения начальной картины уровня мощности сигнала от беспроводных точек доступа в здании научного института методом измерений была проведена оценка уровней мощности сигнала от точек доступа 802.11n. В качестве примера рассмотрены уровни

мощности сигнала на 4-ом этаже. На рис. 2 (а) показано покрытие уровнем мощности сигнала 4-го этажа от всех точек доступа, на рис. 2 (б) – уровень мощности сигнала с отключенными точками доступа 4-ого этажа, на рис. 2 (в) – уровень мощности только от точек доступа 4-го этажа, на рис. 2 (г) – покрытие уровнем мощности сигнала на 3-ем этаже от точек доступа 4-го этажа. В дальнейшем измеренные уровни мощности сигналов были использованы для валидации с рассчитанными по дополненной модели Мотли-Кинана (2).

Таблица 1. Зависимость FAF от количества этажей

Этаж	FAF, дБ
1	-12,9
2	-18,7
3	-24,4
4	-27

Таблица 2. Затухания сигнала Wi-Fi при прохождении через препятствия

Класс препятствия	Затухание, дБ
Несущая стена (30,5 см)	-20-25
Межкомнатная стена (15 см)	-15-20
Бетонная плита перекрытия	-15-25
Монолитное железобетонное перекрытие	-20-25
Деревянная стена	-10

Для валидации уровней мощности сигналов был проведен расчёт по модели Мотли-Кинана для шести контрольных точек, находящихся в различных условиях:

1. Контрольная точка находится в прямой видимости от точки доступа, поляризация вертикальная.
2. Контрольная точка находится за межкомнатной стеной, поляризация вертикальная.
3. Контрольная точка находится под точкой доступа этажом ниже, поляризация вертикальная.
4. Контрольная точка находится в прямой видимости, горизонтальная поляризация.
5. Контрольная точка находится за межкомнатной стеной, горизонтальная поляризация.
6. Контрольная точка находится под точкой доступа этажом ниже, горизонтальная поляризация.

Для 1-го случая уровень мощности сигнала рассчитывается по формуле (1), где $a = 20$ дБ – стандартное значение затухания в воздухе для частоты 2,4 ГГц, $RSS(d_0) = -39$ дБм, $d = 4$ м и тогда $RSS(d) = -51$ дБм.

Для случаев 2–6 уровень мощности сигнала рассчитывается по формуле (2):

Для 2-го случая уровень мощности сигнала $RSS(d) = -68$ дБм, где $RSS(d_0) = -39$ дБм, $d = 5$ м, $l_r = 1$, $\omega_r = -15$ дБ.

Для 3-го случая уровень мощности сигнала $RSS(d) = -68$ дБм, где $RSS(d_0) = -39$ дБм, $d = 6,4$ м, $FAF = -12,9$ дБ.

Для 4-го случая уровень мощности сигнала $RSS(d) = -70$ дБм, где $RSS(d_0) = -37,5$ дБм, $d = 7,8$ м, $l_r = 1$.

Для 5-го случая уровень мощности сигнала $RSS(d) = -72$ дБм, где $RSS(d_0) = -37,5$ дБм, $d = 9$ м, $l_r = 1$.

Для 6-го случая уровень мощности сигнала $RSS(d) = -62$ дБм, где $RSS(d_0) = -37$ дБм, $d = 4$ м, $FAF = -12,9$ дБ.

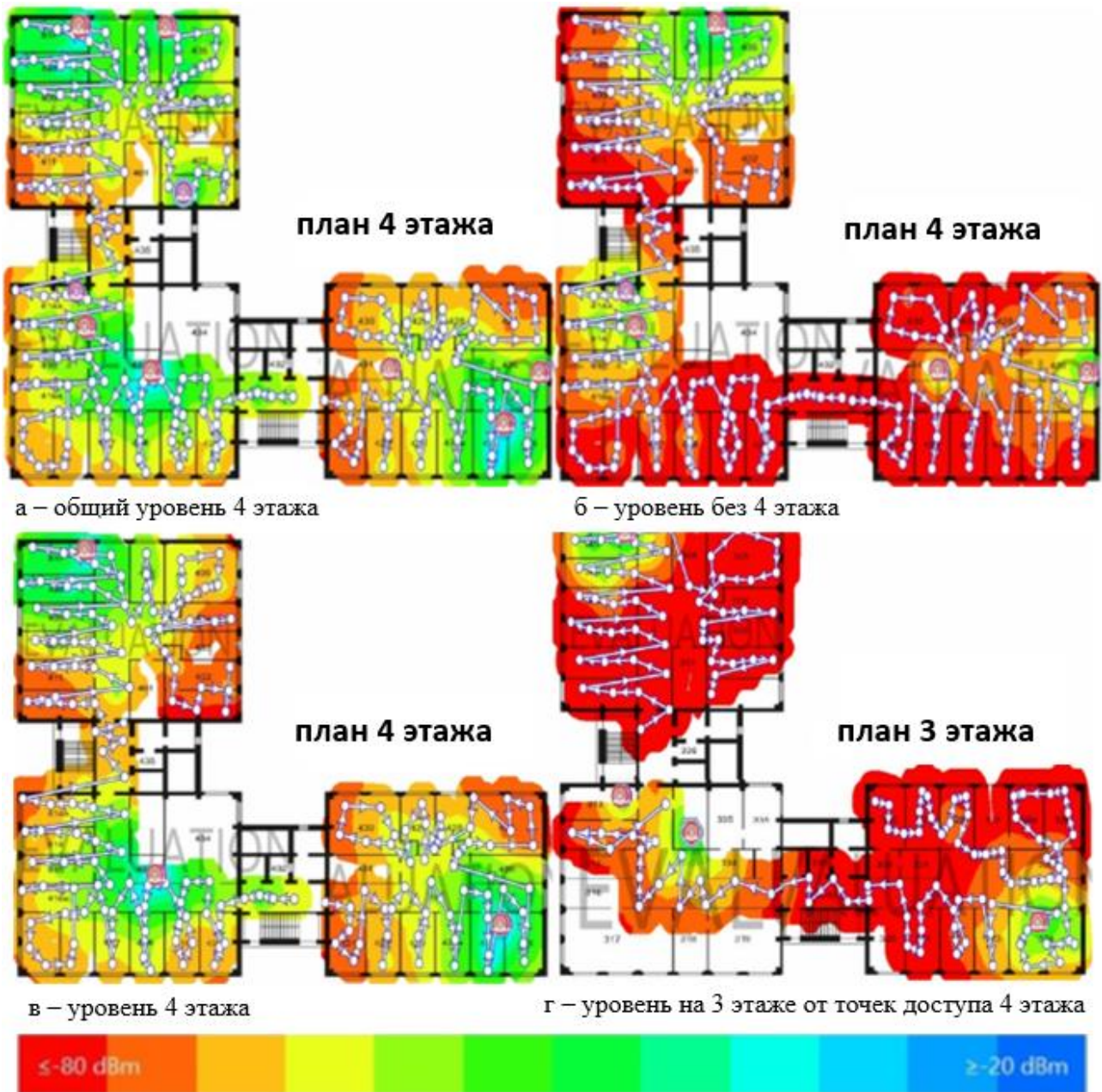


Рис. 2. Уровень мощности сигнала на 4-ом этаже здания

Валидация, измеренных уровней мощности сигнала с рассчитанными по дополненной модели Мотли–Кинана, показала соответствие значений с минимальной погрешностью 2 дБ.

После получения полной картины состояния беспроводных сетей в здании, выделены параметры, которые необходимо оптимизировать и будет поставлена соответствующая задача оптимизации. В качестве начальных данных в задаче оптимизации предполагается использовать скорости, определенные в зависимости от уровней мощности сигнала, которые рассчитаны по дополненной модели Мотли–Кинана. (таблица 3).

Таблица 3. Зависимость скорости от уровня мощности сигнала

Скорость, Мбит/с	Уровень мощности, дБм
150	-59
100	-78
50	-87
0	-97

3. Задача оптимизации. Поставим задачу оптимизации для оптимального расположения беспроводных точек доступа (хабов) [25]. Задача оптимизации заключается в оптимальной расстановке хабов с учётом максимально возможной скорости передачи данных и минимально возможных затрат на оборудование и коммуникации.

Определим начальные условия. Так как качественное оборудование для беспроводной передачи данных стоит довольно дорого, то первым условием зададим снизить количество хабов, оптимально расположив их в здании. Вторым важным условием будет скорость передачи данных с контрольной точки, она должна стремиться к максимуму.

Предположим, что есть несколько зон с хорошим уровнем приема. Определяем приоритет для каждой из них. Также следует установить минимальную скорость для любой зоны. Таким образом, имеем N_c ячеек, для которых необходимо задать приоритет F_j и минимальную скорость V_j . Для начала нам необходимо разбить обследуемый объект на клетки, количество клеток будет N_p , в каждой клетке можно разместить хаб N_{tr} , для каждого хаба нужно учесть стоимость коммуникаций, которая известна и равна C_i : $1 \leq i \leq N_p$, также известна стоимость хаба C_k : $1 \leq k \leq N_c$. Определяем матрицу X булевых переменных x_{ik} . Значение переменной x_{ik} , равное 1, означает, что хаб k -типа помещен в i -й клетке, а значение, равное 0, означает его отсутствие. Таким образом, необходимо получить максимальную скорость в максимальном количестве клеток в соответствии с приоритетами, при минимальных затратах. Запишем условия:

$$V_j(X)F_j \rightarrow \max, \quad V_j \geq V_{\min j}, \quad \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_{tr}} (C_i + C_k)x_{ik} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{k=1}^{N_{tr}} x_{ik} \leq 1, \forall i \in [1; N_p], \quad x_{ik} \in \{0,1\}, \forall i \in [1; N_p], \forall k \in [1, N_{tr}].$$

Здесь $V_j(X)$ – скорость в контрольной точке i (таблица 3), F_j – приоритет i -й контрольной точки, N_p – возможные места для установки хабов, N_{tr} – количество хабов, $V_{\min j}$ – минимально необходимая скорость.

В дальнейшем задача оптимизации может быть расширена с учетом расстановки сенсоров, подключенных по стандарту ZigBee. Для решения задачи оптимизации планируется применить различные виды генетических алгоритмов [1, 26]. В последующих работах будут представлены решения соответствующих задач оптимизации.

Заключение. В работе предложен подход для построения оптимальной БСС для технологии интернета вещей. Предложенный подход рассматривается на примере здания научного института. Одним из преимуществ данного подхода является то, что БСС проектируется на трехмерной карте здания с учетом затухания сигнала не только в стенах, но и в перекрытиях этажей. Кроме того, для повышения энергоэффективности сети за основу взята гибридная структура сети, в которой технология Wi-Fi используется для связи хабов со шлюзом и хабов между собой, а технология ZigBee будет использоваться для соединения сенсоров с хабами. Начальные данные для решения задачи оптимизации получены с помощью расчетов по дополненной модели Мотли-Кинана, валидация которой была проведена на основе измерений, проведенных в обследуемом здании. Для оптимального расположения хабов поставлена задача оптимизации, которая в дальнейшем будет расширена с учётом расстановки сенсоров. Решение задачи оптимизации будет выполнено с использованием генетических алгоритмов.

Таким образом, предложен подход, который может позволить построить оптимальную БСС для технологии интернета вещей внутри помещений.

Список источников

1. Srinidhi N.N., Kumar S.M.D., Venugopal K.R. Network optimizations in the Internet of Thing: A review. *Engineering science and technology, an international journal*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 1-21.
2. Арефьев А.В. Проблемы построения больших локальных сетей интернета вещей / А.В. Арефьев, О.В. Афанасьева, Н.А. Вешев и др. // *Известия Тульского государственного университета*, 2022. – Т. 10. – С. 261-267.
3. Jia M., Komeily A., Wang Y., Srinivasan R.S. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in construction*, 2019, vol. 101, pp. 111-126.
4. Wang W., Capitaneanu S.L., Marinca D. et al. Comparative analysis of channel models for industrial IoT wireless communication. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 91627-91640.
5. Соловьева В.О. Подходы к построению ячеистых сетей / В.О. Соловьева // *Информационные технологии, системный анализ и управление*, 2021. – С. 354-358.
6. Adi P.D.P., Sihombing V., Siregar V.M.M. et al. A performance evaluation of ZigBee mesh communication on the Internet of Things (IoT), 3rd East Indonesia conference on computer and information technology (eiconcit), *ieee*, 2021, pp. 7-13.
7. Pendão C., Moreira A. Automatic RF interference maps and their relationship with Wi-Fi positioning errors, *International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*. IEEE, 2019, pp. 1-8.
8. CISCO. Available at: <https://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/Manage.html#wp999519> (accessed: 09/20/2023).
9. D-Link. Available at: <https://www.dlink.ru/tools/wi-fi/> (accessed: 09/19/2023).
10. Tamograph. Available at: <https://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey/> (accessed: 09/20/2023).
11. Ekahau. Available at: <https://www.ekahau.com> (accessed: 09/17/2023).
12. iBwave. Available at: <https://www.ibwave.com/ibwave-design> (accessed: 09/20/2023).
13. Тайк А.М. Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей. / А.М. Тайк, С.А. Лупин, Ю.Ф. Вагапов // *International journal of open information technologies*, 2016. – Т. 4(9). – С.80-86.
14. Priyadarshi R., Gupta B. and Anurag A. Wireless sensor networks deployment: a result-oriented analysis. *Wireless personal communications*, 2020, vol. 113, pp.843-866.
15. Singh A., Sharma S., Singh J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Computer science review*, 2021, vol 39, p.100342.
16. Valadares D.C.G., de Araújo J.M.F.R. et al. E.U.K., 802.11g signal strength evaluation in an industrial environment. *Internet of Things*, 2020, vol 9, p.100163.
17. Zhao B., Zheng C., Ren X., et al. An optimization method combining RSSI and PDR data to estimate distance between smart devices. *TechRxiv*, 2020, DOI:10.36227/techrxiv.13488738.v1.
18. El-Maghrabi H.M., A standard ray tracing technique for predicting signal strength of wireless sensor network in smart building. *Progress in electromagnetics research letters*, 2022, vol 105, pp.79-84.
19. Tian Y., Huang B., Jia B., et al. Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization. *Journal of Network and computer applications*, 2020, vol 164, p. 102673.
20. Kar K., Datta S., Pal M., et al. Motley Keenan model of in-building coverage analysis of IEEE 802.11 n WLAN signal in electronics and communication engineering department of National Institute of Technology Durgapur. In 2016 international conference on microelectronics, computing and communications (MicroCom), IEEE, 2016, pp. 1-6.
21. Zhang Y., Wang F., Shen Y. et al. A study of indoor distributed calculation model of mobile communication. *Information computing and applications: second international conference, Qinhuangdao, China. Proceedings, Part I 2*, 2011, pp. 458-465.
22. Andrade C.B., Hoefel R.P. F. IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models. *CCECE, Calgary, Canada*, 2010, pp. 1-6, DOI:10.1109/CCECE.2010.5575205.
23. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz. *Electronics Letters*, 1988, vol. 24, no. 12, pp. 763-764.
24. Ахметшин Д.А. Постановка математической задачи организации бесшовной беспроводной сети по технологии WiFi с фильтрацией контента / Д.А. Ахметшин, Д. Ку, Н.К. Нуриев и др // *Современные наукоемкие технологии*, 2019. – №. 11. – С. 15-23.
25. Kazakovtsev L.A. Wireless coverage optimization based on data provided by built-in measurement tools. *World applied sciences journal*, 2013, 22, pp. 08-15.
26. Hu J., Goodman E. Wireless access point configuration by genetic programming. *Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation, IEEE*, 2004, vol. 1, pp. 1178-1184.

Сиротинин Анатолий Андреевич. Аспирант, институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, AuthorID: 1215100, SPIN: 9617-6083, slitch@icm.krasn.ru, 660036, Россия, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44.

Володько Ольга Станиславовна. Кандидат физико-математических наук, институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, м.н.с., AuthorID: 907835, SPIN 8080-9331, ORCID 0000-0002-0580-9103, osv@icm.krasn.ru, 660036, Россия, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44.

UDC 004.725

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.013

Building an optimization model of a wireless internal network for using internet of things technology

Anatoliy A. Sirotinin, Olga S. Volodko

Institute of computational modeling SB RAS,

Russia, Krasnoyarsk, slitch@icm.krasn.ru

Abstract. In the paper, an approach for project an optimal wireless sensor network indoors for the technology of the Internet of Things is proposed. To improve the energy efficiency of the network is used a hybrid network structure based on Wi-Fi and ZigBee standards. The advantage of the approach is that the network is designed on a three-dimensional model of the building, given the attenuation of the signal not only in the walls, but also in the floors. The combination of radio-wave (Motley-Keenan model) and optimization (genetic algorithm) methods for optimal arrangement of connecting and sensory nodes is used.

Keywords: wireless sensor network, Motley-Keenan model, signal strength, Internet of Things, mesh networks, optimization problem, genetic algorithms

References

1. Srinidhi N.N., Kumar S.M.D., Venugopal K.R. Network optimizations in the Internet of Thing: A review. Engineering science and technology, an international journal, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 1-21.
2. Arefyev A.V., Afanasyeva O. V., Veshev N. A. et al. Problemy postroyeniya bol'shikh lokal'nykh setey interneta veshchey [Problems of building large local networks of the Internet of Things]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Tula state university], 2022, vol. 10, pp. 261-267.
3. Jia M., Komeily A., Wang Y., Srinivasan R.S. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. Automation in construction, 2019, vol. 101, pp. 111-126.
4. Wang W., Capitaneanu S.L., Marinca D. et al. Comparative analysis of channel models for industrial IoT wireless communication. IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 91627-91640.
5. Solovyova V.O. Podkhody k postroyeniyu yacheistykh setey [Approaches to the construction of mesh networks]. Informatsionnyye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravleniye [Information technologies, system analysis and management], 2021, pp. 354-358.
6. Adi P.D.P., Sihombing V., Siregar V.M.M. et al. A performance evaluation of ZigBee mesh communication on the Internet of Things (IoT), 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT), IEEE, 2021, pp. 7-13.
7. Pendão C., Moreira A. Automatic RF interference maps and their relationship with Wi-Fi positioning errors, International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN). IEEE, 2019, pp. 1-8.
8. CISCO. Available at: <https://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/Manage.html#wp999519> (accessed: 09/20/2023).
9. D-Link. Available at: <https://www.dlink.ru/tools/wi-fi/> (accessed: 09/19/2023).
10. Tamograph. Available at: <https://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey/> (accessed: 09/20/2023).
11. Ekahau. Available at: <https://www.ekahau.com> (accessed: 09/17/2023).
12. iBwave. Available at: <https://www.ibwave.com/ibwave-design> (accessed: 09/20/2023).

13. Tajk A.M., Lupin S.A., Vagapov YU.F. Primeneniye algoritma perebora dlya optimizatsii topologii besprovodnykh setey [Primeneniye algoritma perebora dlya optimizatsii topologii besprovodnykh setej]. International journal of open information technologies, 2016, 4(9), pp.80-86.
14. Priyadarshi R., Gupta B. and Anurag A. Wireless sensor networks deployment: a result-oriented analysis. Wireless personal communications, 2020, vol. 113, pp.843-866.
15. Singh A., Sharma S., Singh J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey. Computer science review, 2021, vol 39, p.100342.
16. Valadares D.C.G., de Araújo J.M.F.R. et al. E.U.K., 802.11g signal strength evaluation in an industrial environment. Internet of Things, 2020, vol 9, p.100163.
17. Zhao B., Zheng C., Ren X., et al. An optimization method combining RSSI and PDR data to estimate distance between smart devices. TechRxiv, 2020, DOI:10.36227/techrxiv.13488738.v1.
18. El-Maghrabi H.M., A standard ray tracing technique for predicting signal strength of wireless sensor network in smart building. Progress in electromagnetics research letters, 2022, vol 105, pp.79-84.
19. Tian Y., Huang B., Jia B., et al. Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization. Journal of Network and computer applications, 2020, vol 164, p. 102673.
20. Kar K., Datta S., Pal M., et al. Motley Keenan model of in-building coverage analysis of IEEE 802.11 n WLAN signal in electronics and communication engineering department of National Institute of Technology Durgapur. In 2016 international conference on microelectronics, computing and communications (MicroCom), IEEE, 2016, pp. 1-6.
21. Zhang Y., Wang F., Shen Y. et al. A study of indoor distributed calculation model of mobile communication. Information computing and applications: second international conference, Qinhuangdao, China. Proceedings, Part I 2, 2011, pp. 458-465.
22. Andrade C.B., Hoefel R.P. F. IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models. CCECE, Calgary, Canada, 2010, pp. 1-6, DOI:10.1109/CCECE.2010.5575205.
23. Motley A.J., Keenan J.M.P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz. Electronics Letters, 1988, vol. 24, no. 12, pp. 763-764.
24. Ahmetshin D.A., Ku D., Nuriev N.K. et al. Postanovka matematicheskoy zadachi organizatsii besshovnoy besprovodnoy seti po tekhnologii WiFi s fil'tratsiyey kontenta [Statement of the mathematical problem of organizing a seamless wireless network using WiFi technology with content filtering]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern high technology], 2019, no. 11, pp. 15-23.
25. Kazakovtsev L.A. Wireless coverage optimization based on data provided by built-in measurement tools. World applied sciences journal, 2013, 22, pp. 08-15.
26. Hu J., Goodman E. Wireless access point configuration by genetic programming. Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation, IEEE, 2004, vol. 1, pp. 1178-1184.

Sirotnin Anatoly Andreevich. Postgraduate student, the institute of computational modeling of the Siberian Branch of the Russian academy of sciences is a separate division of the FITC KNC SB RAS, SPIN: 9617-6083, AuthorID: 1215100, slitch@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, ICM SB RAS.

Volodko Olga Stanislavovna. Ph. D., the institute of computational modeling of the Siberian Branch of the Russian academy of sciences, junior researcher, ORCID: 0000-0002-0580-9103, SPIN: 8080-9331, AuthorID: 907835, osv@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, ICM SB RAS.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 30.05.2024.

The article was submitted 07/10/2023; approved after reviewing 04/02/2024; accepted for publication 05/30/2024.