

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2025-1-59-67

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА, ХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАНАЛЬНЫМИ МАТРИЦАМИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Астафьев Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и прикладной математики Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: Alexandr.Astafiev@mail.ru

Жизняков Аркадий Львович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программной инженерии Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: lvovich1975@mail.ru

Ежков Дмитрий Алексеевич

студент кафедры физики и прикладной математики Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: Ejkov.Dmitrij@yandex.ru

Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: В статье рассматривается разработка системы сбора, хранения и управления канальными матрицами для построения алгоритмов позиционирования и локализации внутри помещений. Навигация внутри помещений представляет собой сложную задачу из-за множества факторов, таких как многолучевое распространение сигналов, интерференция и динамическая среда. Для повышения точности и надёжности позиционирования предлагается использовать канальные матрицы, которые содержат информацию о состоянии канала связи. Статья описывает архитектуру системы, включающую модули сбора данных, хранения и управления канальными матрицами. Рассматриваются различные технологии, такие как Wi-Fi, Bluetooth и UWB, и их интеграция для получения точных данных о состоянии канала. В работе предлагается структура базы данных, позволяющая организовывать сбор, хранение и обработку канальных матриц, вне зависимости от типа используемого оборудования и его количества. Также поддерживается маркировка данных для разметки данных в рамках экспериментов. В заключении рассматриваются проекты, в реализации которых использовалась предложенная система. Заключение подчёркивает перспективы дальнейшего развития системы и её потенциальное применение в различных областях, таких как робототехника, умные дома, медицина и безопасность.

Ключевые слова: информация о состоянии канала связи, WiFi, канальные матрицы, позиционирование и локализация внутри помещений, MIMO.

Введение

Совершенствование информационных технологий неизбежно приводит к повышению требований к методам и алгоритмам, которые в них применяются. Прикладные информацион-

ные технологии плотно вошли в нашу повседневную жизнь и проникли в каждую сферу человеческой деятельности. Одной из таких сфер является позиционирование и навигация. Если организация навигации в открытом про-

странстве не составляет сложности, за счёт использования глобальных систем навигации, то навигация в закрытом пространстве всё ещё осложняется такими факторами как: многолучевое распространение сигналов, интерференция, помехи, ограниченная видимость, динамическое изменение среды, сложности калибровки и т.д. Таким образом, построение систем позиционирования и навигации внутри помещений требует комплексного подхода, включающего использование различных технологий, разработку сложных алгоритмов и обеспечение высокой точности, надёжности и безопасности. Исходя из этого, автоматизация процессов разработки новых алгоритмов позиционирования и навигации, за счёт разработки системы сбора, хранения и управления канальными матрицами, является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка системы сбора, хранения и управления канальными матрицами для построения алгоритмов позиционирования и локализации внутри помещений. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести обзор научно-технической литературы по теме исследования.
2. Рассмотреть состав информации о состоянии канала связи и формат канальной матрицы.
3. Провести проектирование системы сбора, хранения и маркировки данных.
4. Провести программную реализацию предложенных алгоритмов.
5. Провести экспериментальные исследования с использованием предлагаемой системы.

В зависимости от специфики решаемой проблемы, существующие методы локализации человека внутри помещения можно разделить на две большие группы: основанные на системе нательных датчиков (таких как смартфоны, радиочастотные метки и т.д.) и без использования нательных датчиков. Эти подходы также имеют названия активной и пассивной локализации [1]. Несмотря на разницу подхо-

дов при разработке алгоритмов используются следующие технологии:

1. Системы технического зрения [2–6].
2. Системы передачи радиосигналов [7–12].
3. Специализированные системы датчиков (инфракрасные датчики, инерциальные датчики, датчики магнитного поля и т.д.) [13–14].

Системы технического зрения решают много прикладных задач. Например, система ISANA [2] — это система навигации на основе зрения для людей с нарушениями зрения в помещениях. Предлагаемый прототип системы состоит из мобильного устройства Google Tango, умной трости с клавиатурой и двумя вибромоторами. Тянь и др. [3] разработали систему, которая помогает слепым людям ориентироваться в помещениях. Предлагаемая система состоит из модуля обнаружения дверей и модуля распознавания текста. Отдельный модуль для обнаружения дверей состоит из детектора границ Канни и детектора углов на основе свойств кривизны. Бай и др. [4] разработали систему навигации на основе зрения для людей с нарушениями зрения, используя облачную вычислительную платформу. Предлагаемый прототип состоит из стереокамеры, установленной на шлеме, смартфона, веб-приложения и облачной платформы. Bookmark [5] — это система навигации в помещении без использования инфраструктуры, которая использует существующие штрихкоды книг в библиотеке и облегчает поиск с помощью сканирования штрихкодов книг в библиотеке. Тюкин и др. [6] предложили систему навигации в помещении для автономных мобильных роботов. Предложенная система использует подход, основанный на обработке изображений, для навигации робота в помещениях. Система состоит из «простой монокулярной телевизионной камеры» и «цветных маячков».

Системы и алгоритмы, основанные на обработке радиосигналов, используют такие технологии как: Wi-Fi, Bluetooth, BLE, RFID, UWB и прочие. Несмотря на большое разнообразие

технологий, при их обработке в основном применяются методы получения уровня сигнала (RSSI), измерение угла прибытия, задержки времени и извлечение канальных матриц, входящих в состав информации о состоянии канала связи.

FreeNavi [7] — это система навигации в помещении без использования карт, которая опирается на «отпечатки» Wi-Fi у каждого входа в помещение. Наряду с «отпечатками» Wi-Fi для создания виртуальных карт помещения использовались следы перемещения пользователей между двумя ориентирами. Для создания виртуальных карт, а также для локализации в помещении был применён алгоритм наименьшей общей подпоследовательности (LCS) [8], который находит сходства между «отпечатками» Wi-Fi.

Джин-Ву и др. [9] предложили систему локализации внутри помещений, которая использует CNN для снятия отпечатков пальцев по Wi-Fi. Поскольку колебания RSS и проблемы с многолучевостью могут вызывать ошибки в оценке местоположения, обучение с небольшим количеством данных может привести к разработке неэффективных моделей. В предлагаемом методе использовались двумерные радиокарты в качестве входных данных для обучения модели CNN.

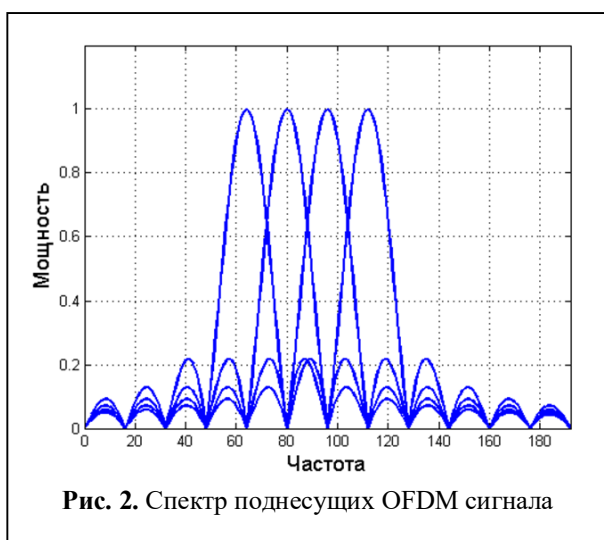
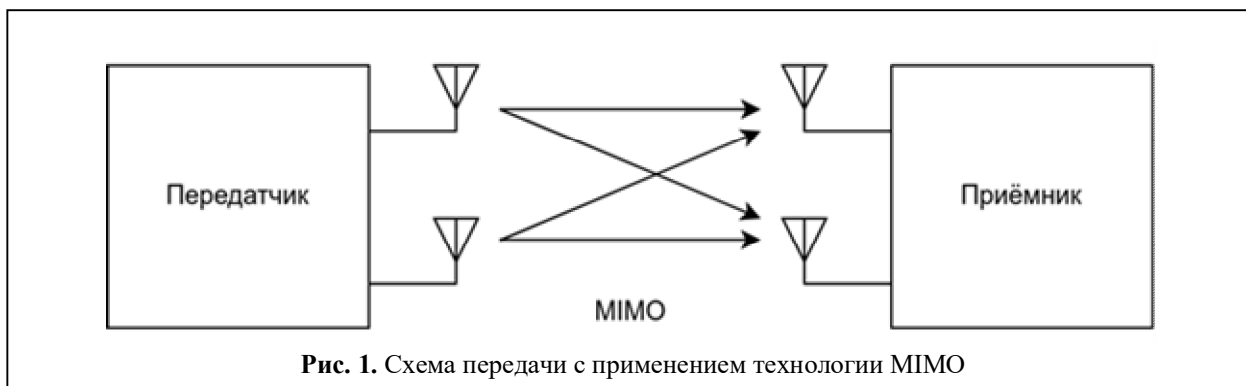
Гибридная навигационная система, сочетающая магнитное согласование (MM), PDR и дактилоскопию Wi-Fi, была предложена в [10]. Поскольку такие системы сочетают в себе различные подходы, пользователь может даже перемещаться по регионам, где сигнал Wi-Fi слабый или окружающая среда имеет нечёткие магнитные характеристики. Местоположение пользователя определялось путём вычисления наименьшего значения средней абсолютной разницы между предполагаемым отпечатком пальца или магнитным профилем и заранее определённым значением соответствующего кандидата в базе данных. Для реализации предложенного навигационного алгоритма были интегрированы метод определения ориентации [11] и метод PDR [12]. Для улучшения

результатов Wi-Fi и MM были введены три отдельных уровня контроля качества с использованием фильтра Калмана на основе PDR. Результаты показали, что предложенный метод обеспечивает точность 3,2 м в регионах с достаточным количеством точек доступа и 3,8 м в регионах с небольшим количеством точек доступа.

Ещё одним большим направлением научных исследований является использование инфракрасного излучения. Так, в работе [12] измеряется тепловое излучение на наблюдаемой территории, а в качестве алгоритма локализации используется метод Angle of Arrival. Существуют также коммерчески разработки, занимающиеся производством инфракрасных датчиков, точность которых позволяет локализовать человека, даже если температура наблюдаемой территории близка к температуре человеческого тела. Несмотря на высокую точность для развёртывания систем локализации человека с использованием инфракрасных датчиков требуется прямая видимость и значительные финансовые затраты. В статье [13] представлен подробный обзор современных алгоритмов локализации внутри помещений с использованием исследования магнитного поля.

Несмотря на большое количество предложенных алгоритмов многие из них имеют значительные недостатки. Так, большинство алгоритмов, основанных на техническом зрении, требуют приобретения и соответствующего расположения дорогостоящего оборудования. Системы, основанные на использовании натальных датчиков, также требуют приобретения дополнительных устройств. Среди систем локализации на основе передачи радиосигналов можно выделить только одну технологию, распространение которой, в настоящее время, довольно велико. Это технология WiFi. Исходя из этого, алгоритмы локализации, основанные на технологии WiFi, обладают значительным преимуществом.

Однако, последние работы в области позиционирования и навигации внутри помещений,



сосредоточены на использовании информации о состоянии канала связи и канальных матриц.

Информация о состоянии канала связи и канальные матрицы

Для обеспечения устойчивости связи, устройства, использующие для передачи данных технологию Wi-Fi, определяют информацию о состоянии канала связи. Поскольку эта информация должна полностью описывать распространение сигнала в пространстве, то также

учитываются и такие технологии, как MIMO и OFDM.

MIMO (англ. Multiple-input and multiple-output) — технология, позволяющая использовать для передачи данных множество антенн как на приёмнике, так и на передатчике (рис. 1), благодаря чему значительно увеличивается канал передачи.

OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing) — технология, позволяющая осуществлять параллельную передачу данных на соседних ортогональных поднесущих (рис. 2), что также увеличивает канал передачи, применяя достаточно узкий диапазон частот.

Таким образом, при определении информации о канале связи, необходимо учитывать целый массив данных, включая:

- антенну передатчика;
- антенну приёмника;
- подртогональную поднесущую.

Из этого следует следующая структура пакета данных, описывающих информацию о состоянии канала связи (рис. 3): массив ком-



плексных амплитуд N размерностью $N \times M \times K$, где N — количество принимающих антенн; M — количество передающих антенн; K — количество поднесущих.

Поскольку каждый элемент является комплексной амплитудой, то возможно выделить амплитуду и фазу приходящего сигнала по формулам (1), (2).

$$A = |H_{i,j,k,t}|. \quad (1)$$

$$\Phi = \arg(H_{i,j,k,t}). \quad (2)$$

Проектирование системы сбора, хранения и маркировки данных

Для анализа канальных матриц требуется определение параметров среды (например, количество людей в помещении) в момент приёма очередной матрицы. Именно маркировка и последующее хранение данных является ключевой функцией системы. Однако, для корректной маркировки канальных матриц, её необходимо осуществлять в момент сбора данных.

Поскольку в систему данные поступают с достаточно высокой скоростью то используется реляционная СУБД. Среди существующих СУБД выбран движок баз данных SQLite, т.к. он обеспечивает встраиваемость в приложение, благодаря чему его развёртывание значительно упрощается, и вместе с тем повышается скорость работы.

Ключевым элементом хранимых данных является пакет, содержащий канальную матрицу (в модели данных представлен таблицей `rasket`). Помимо хранимых комплексных амплитуд, пакет обладает следующими двумя ключевыми свойствами:

- метка времени, когда пакет был получен системой;
- маркер, характеризующий параметры среды.

Однако, при сборе разных наборов данных необходимо выделить отдельную структуру, которая бы объединяла пакеты. С одной стороны, это обеспечит логическую структуриза-

цию данных, с другой — облегчит автоматическую маркировку данных, поскольку подсистеме, ответственной за маркировку, не будет требоваться указывать помимо исследуемых характеристик среды ещё и имя и индекс собираемого набора данных. В модели данных эта структура представлена таблицей `experiment`. Т.к. данные могут собираться с разных устройств, то, во-первых, требуется хранить то, какое именно устройство используется в данном датасете, во-вторых — используемую подсистему сбора данных. Допустимые устройства представлены таблицей `hardware`, в которой перечислены, в т.ч., такие ключевые характеристики, как количество доступных антенн и количество используемых устройств поднесущих. Используемые подсистемы сбора и предобработки данных хранятся в виде текстовых полей (`recv_handler` и `preproc_handler`), содержащих названия этих модулей. Кроме того, сохраняются и настройки данных подсистем, задаваемые пользователем в формате JSON (текстовое поле `config`).

Для автоматизированной маркировки данных (а также для возможностей последующего анализа) необходим сбор фотографий в ходе сбора канальных матриц. Путь до фотографий, а также время их сбора хранятся в таблице `image`.

Вся модель данных представлена на рис. 4.

Система построена на основе 4 подсистем (рис. 5).

Благодаря модульности системы достигается её совместимость с различным оборудованием, обеспечиваются разные возможности предобработки. Так, на данный момент, подсистема сбора данных реализована в двух вариантах: приём пакетов по локальной сети и сбор данных через USB-порт.

Подсистема предобработки позволяет закладывать различные варианты: от передачи не обработанных данных, до применения различных фильтров, позволяющих реализовать потоковую обработку данных (например, фильтр Калмана).

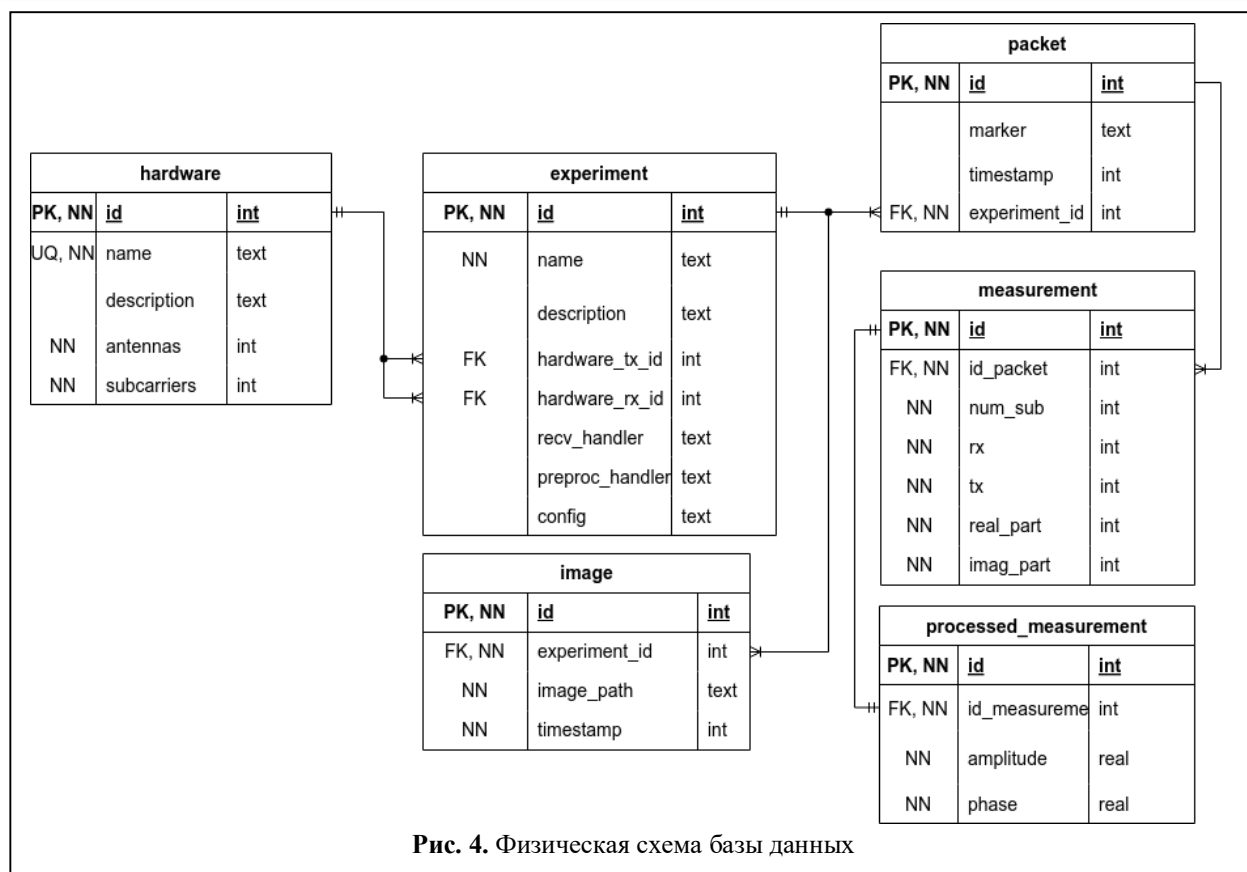


Рис. 4. Физическая схема базы данных

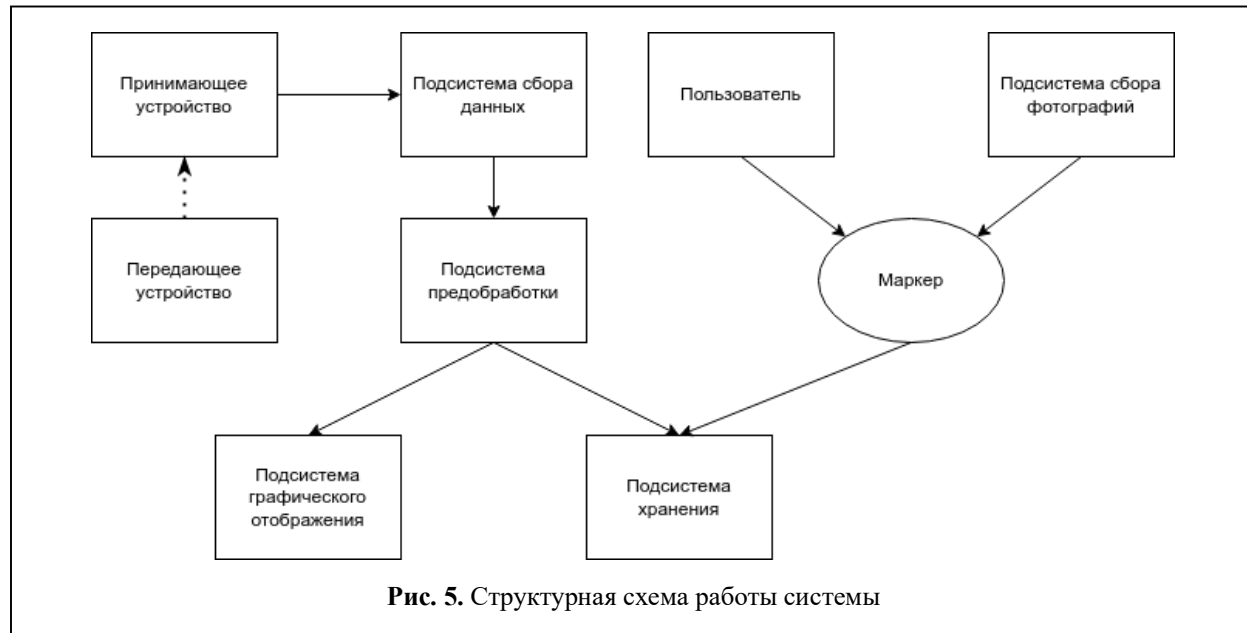


Рис. 5. Структурная схема работы системы

Подсистема графического отображения является частью графического пользовательского интерфейса, построенного на основе библиотеки Gtkmm 4. Сама подсистема основана на графической библиотеке OpenGL, благодаря чему обеспечивается высокая производитель-

ность даже для больших объёмов пополняющихся данных.

Параллельно с системой сбора данных работает система сбора фотографий. Она осуществляет сбор фотографий, а также отвечает за возможности их анализа для последующего

изменения маркировки наравне с пользователем.

Подсистема хранения отвечает за буферизацию, загрузку данных в БД и из выгрузку в формате JSON для последующего анализа.

Экспериментальные исследования

Система применялась в двух аналогичных исследованиях, направленных на анализ канальных матриц с целью определения наличия или отсутствия человека между устройствами. Схема лаборатории, в которой проводились исследования, представлена на рис. 6. Лабораторный стенд отличается только применяемым оборудованием (2 Wi-Fi роутера по 3 антенны на каждом в одном исследовании и 2 микропроцессора ESP32 во втором исследовании).

Маркировка данных производилась пользователем, задающим маркер в соответствии с тем, присутствует человек в исследуемой области, входит в неё, выходит или в ней отсутствует. Несмотря на возможные неточности при маркировке, связанные с невозможностью идеально точного определения пользователем момента, соответствующего переходу между состояниями, такая методика показала достаточно эффективную, поскольку обученные на этих данных модели нейронных сетей показали высокую точность.

Отсутствие необходимости прерывания считывания данных для определения нового результирующего класса позволило сократить время на сбор данных 35,71%. Время, необхо-

димое для сбора информации о состоянии канала связи, для эксперимента позиционирования человека без использования нательных датчиков в неавтоматизированном режиме составило 1287 секунд. Использование системы сбора и автоматизированной маркировки сократило время сбора до 827 секунд.

Другой возможной проблемой может являться сложность сопоставления собранных фотографий и пакетов. Однако, при достаточной частоте съёмки (что задаётся пользователем) это не является проблемой, поскольку анализируемые характеристики среды не могут изменяться с высокой скоростью (так, при съёмке 1 фотографии в секунду, достигается достаточно подробная фотофиксация, и, как следствие — актуальность маркировки данных).

Заключение

В данной статье была представлена разработка системы сбора, хранения и управления канальными матрицами для построения алгоритмов позиционирования и локализации внутри помещений. Анализ и использование канальных матриц позволяют значительно улучшить точность и надёжность позиционирования в сложных условиях среды распространения сигнала, где присутствуют множественные отражения, интерференция и динамические изменения.

Предложенная система включает в себя модули сбора данных, хранения и управления канальными матрицами, что обеспечивает комплексный подход к решению задач позиционирования.

Использование предложенной системы при проведении экспериментов позволило снизить время на сбор исходных значений и формирование наборов данных более чем на 35%. Разработанная система сбора, хранения и управления канальными матрицами открывает новые перспективы

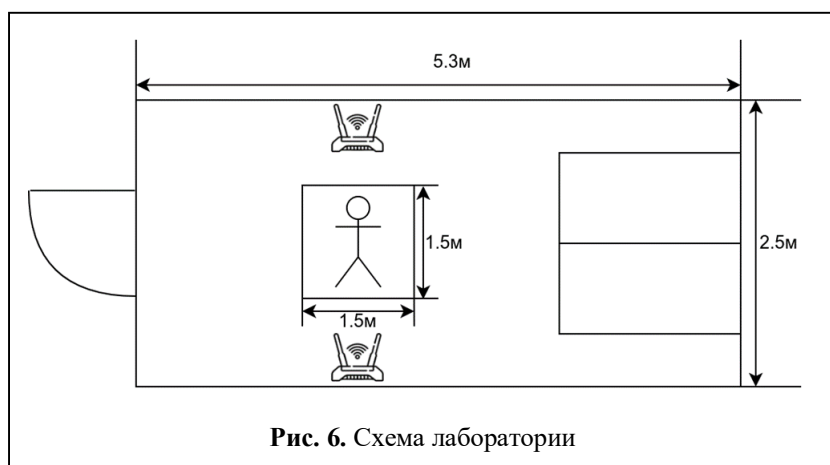


Рис. 6. Схема лаборатории

для создания высокоточных и надёжных алгоритмов позиционирования и локализации внутри помещений. Эти достижения могут найти широкое применение в различных областях, таких как робототехника, умные дома, медицина и безопасность. Будущие исследования могут быть направлены на дальнейшее улучшение алгоритмов, интеграцию новых технологий и расширение области применения системы.

Работа выполнена при поддержке гранта
РНФ № 24-21-00360.

Литература

1. Kunhoth J., Karkar A., Al-Maadeed S. et al. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey // Hum. Cent. Comput. Inf. Sci. 2020. Vol. 10. Pp. 18.
2. Li B., Muñoz J.P., Rong X., Chen Q., Xiao J., Tian Y., Arditi A., Yousuf M. Vision-based mobile indoor assistive navigation aid for blind people // IEEE Trans. Mob. Comput. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 702–714.
3. Tian Y., Yang X., Yi C., Arditi A. Toward a computer vision-based wayfinding aid for blind persons to access unfamiliar indoor environments // Mach. Vis. Appl. 2013. Vol. 24. No. 3. Pp. 521–535.
4. Bai J., Liu D., Su G., Fu Z. A cloud and vision-based navigation system used for blind people // Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies (AIAC'17). ACM, New York, NY, USA, 2017. DOI: 10.1145/3080845.3080867
5. Pearson J., Robinson S., Jones M. Bookmark: appropriating existing infrastructure to facilitate scalable indoor navigation // Int. J. Hum. Comput. Stud. 2017. Vol. 103. Pp. 22–34.
6. Tyukin A., Priorov A., Lebedev I. Research and development of an indoor navigation system based on the digital processing of video images // Pattern Recogn. Image Anal. 2016. Vol. 26. No. 1. Pp. 221–230.
7. Guo Y., Wang W., Chen X. FreeNavi: Landmark-based mapless indoor navigation based on wifi fingerprints // 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2017. Pp. 1–5.
8. Chen X., Kong J., Guo Y., Chen X. An empirical study of indoor localization algorithms with densely deployed aps // 2014 IEEE Global Communications Conference. 2014. Pp. 517–522.
9. Jang J.-W., Hong S.-N. Indoor localization with wifi fingerprinting using convolutional neural network // 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2018. Pp. 753–758.
10. Li Y., Zhuang Y., Lan H., Zhou Q., Niu X., El-Sheimy N. A hybrid wifi/magnetic matching/pdr approach for indoor navigation with smartphone sensors // IEEE Commun. Lett. 2016. Vol. 20. No. 1. Pp. 169–172.
11. Ren H., Kazanzides P. Investigation of attitude tracking using an integrated inertial and magnetic navigation system for hand-held surgical instruments // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2012. Vol. 17. No. 2. Pp. 210–217.
12. Huang C., Liao Z., Zhao L. Synergism of INS and PDR in self-contained pedestrian tracking with a miniature sensor module // IEEE Sens. J. 2010. Vol. 10. No. 8. Pp. 1349–1359.
13. Yang Y., Fathy A.E. Development and implementation of a real-time see-through-wall radar system based on FPGA // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47. No. 5. Pp. 1270–1280.
14. Ouyang G., Abed-Meraim K. A Survey of Magnetic-Field-Based Indoor Localization // Electronics. 2022. Vol. 11. Pp. 864.

Поступила 29 ноября 2024 г.

English

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR COLLECTING, STORING, AND MANAGING CHANNEL ARRAYS FOR BUILDING POSITIONING AND LOCALIZATION ALGORITHMS INSIDE THE PREMISES

Alexandr Vladimirovich Astafiev — PhD in Engineering, Associate Professor of Department of Physics and Applied Mathematics, Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

E-mail: Alexandr.Astafiev@mail.ru

Arkady Lvovich Zhiznyakov — Grand Dr. in Engineering, Professor, the Head of Department of Software Engineering, Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

E-mail: lvovich1975@mail.ru

Dmitrij Alekseevich Ezhkov — Student, Department of Physics and Applied Mathematics, Murom Institute (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”.

E-mail: ejkov.dmitrij@yandex.ru

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23.

Abstract: The article discusses the development of a system for collecting, storing, and managing channel arrays for building indoor positioning and localization algorithms. Navigation within spaces is a difficult task due to a variety of factors such as multipath propagation, interference, and dynamic environment. To improve the accuracy and reliability of positioning, it is proposed to use channel matrices that contain information about the status of the communication channel. The article describes the architecture of the system, which includes modules for data collection, storage and management of channel arrays. Various technologies such as Wi-Fi, Bluetooth, and UWB are being considered and integrated to obtain accurate channel status data. The paper proposes a database structure that makes it possible to organize the collection, storage and processing of channel arrays, regardless of the type of equipment used and its quantity. Data labeling is also supported for marking up data as part of experiments. In conclusion, the projects in which the proposed system was used are considered. The conclusion highlights the prospects for further development of the system and its potential applications in various fields such as robotics, smart homes, medicine, and security.

Keywords: information about the status of the communication channel, Wi-Fi, channel arrays, indoor positioning and localization.

The reported study was funded by Russian Science Foundation, Project No. 24-21-00360

References

1. *Kunhoth J., Karkar A., Al-Maadeed S. et al.* Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 2020. Vol. 10. Pp. 18.
2. *Li B., Muñoz J.P., Rong X., Chen Q., Xiao J., Tian Y., Arditi A., Yousuf M.* Vision-based mobile indoor assistive navigation aid for blind people. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 702–714.
3. *Tian Y., Yang X., Yi C., Arditi A.* Toward a computer vision-based wayfinding aid for blind persons to access unfamiliar indoor environments. *Mach. Vis. Appl.* 2013. Vol. 24. No. 3. Pp. 521–535.
4. *Bai J., Liu D., Su G., Fu Z.* A cloud and vision-based navigation system used for blind people. *Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies (IAICT'17)*. ACM, New York, NY, USA, 2017. DOI: 10.1145/3080845.3080867
5. *Pearson J., Robinson S., Jones M.* Bookmark: appropriating existing infrastructure to facilitate scalable indoor navigation. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 2017. Vol. 103. Pp. 22–34.
6. *Tyukin A., Priorov A., Lebedev I.* Research and development of an indoor navigation system based on the digital processing of video images. *Pattern Recogn. Image Anal.* 2016. Vol. 26. No. 1. Pp. 221–230.
7. *Guo Y., Wang W., Chen X.* FreeNavi: Landmark-based mapless indoor navigation based on WiFi fingerprints. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2017. Pp. 1–5.
8. *Chen X., Kong J., Guo Y., Chen X.* An empirical study of indoor localization algorithms with densely deployed aps. *2014 IEEE Global Communications Conference*. 2014. Pp. 517–522.
9. *Jang J.-W., Hong S.-N.* Indoor localization with wifi fingerprinting using convolutional neural network. *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, 2018. Pp. 753–758.
10. *Li Y., Zhuang Y., Lan H., Zhou Q., Niu X., El-Sheimy N.* A hybrid wifi/magnetic matching/pdr approach for indoor navigation with smartphone sensors. *IEEE Commun. Lett.* 2016. Vol. 20. No. 1. Pp. 169–172.
11. *Ren H., Kazanzides P.* Investigation of attitude tracking using an integrated inertial and magnetic navigation system for hand-held surgical instruments. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2012. Vol. 17. No. 2. Pp. 210–217.
12. *Huang C., Liao Z., Zhao L.* Synergism of INS and PDR in self-contained pedestrian tracking with a miniature sensor module. *IEEE Sens. J.* 2010. Vol. 10. No. 8. Pp. 1349–1359.
13. *Yang Y., Fathy A.E.* Development and implementation of a real-time see-through-wall radar system based on FPGA. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2009. Vol. 47. No. 5. Pp. 1270–1280.
14. *Ouyang G., Abed-Meraim K.* A Survey of Magnetic-Field-Based Indoor Localization. *Electronics*. 2022. Vol. 11. Pp. 864.