



КОМПЛЕКС СРЕДСТВ НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

А. В. Марочкина, А. И. Парамонов*

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: alex-in-spb@yandex.ru

Аннотация—В статье предлагаются результаты анализа задач моделирования сети Интернета вещей, выбора структуры и состава комплекса средств для натурного и комбинированного моделирования. **Предмет исследования.** Задачи моделирования сети Интернета вещей высокой плотности. **Метод.** Системный анализ и статистический анализ. **Основные результаты.** Сформулированы основные задачи моделирования сети Интернета вещей высокой плотности, предложена трехуровневая структура модели, выполнен анализ доступных технических средств и предложен состав технических средств на каждом из уровней. **Практическая значимость.** Полученные результаты анализа использования технических средств при решении различных задач моделирования, предложенный комплекс моделирования сети Интернета вещей могут быть использованы при решении научно-исследовательских задач, а также в учебном процессе университета.

Ключевые слова—натурное моделирование, сеть Интернета вещей, сеть доступа, узел связи, рабочая станция, сервер.

Информация о статье

УДК 654.739

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 22.04.2021, принята к печати 28.07.2021.

Ссылка для цитирования: Марочкина А. В., Парамонов А. И. Комплекс средств натурного моделирования сети Интернета Вещей высокой плотности // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 2. С. 40–54. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-40-54.



COMPLEX OF EQUIPMENT FOR HIGH DENSITY IoT FULL-SCALE MODELING

A. Marochkina, A. Paramonov*

¹The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: alex-in-spb@yandex.ru

Abstract—The article proposes the results of the analysis of the problems of modeling the Internet of Things network, the choice of the structure and composition of the complex of tools for full-scale and combined modeling. **Subject of research.** Problems of modeling a network of the Internet of things of high density. **Method.** System analysis and statistical analysis. **Main results.** The main tasks of modeling the network of the Internet of Things of high density are formulated, a three-level structure of the model is proposed, the analysis of available technical means is carried out and the composition of technical means at each of the levels is proposed. **Practical significance.** The obtained results of the analysis of the use of technical means in solving various modeling problems, the proposed platform for modeling the Internet of Things network can be used in solving research problems, as well as in the educational process of the university.

Keywords—access network, Internet of things, connectivity, percolation theory, lattice structure.

Article info

Article in Russian.

Received 22.04.2021, accepted 28.07.2021.

For citation: Marochkina A., Paramonov A.: Complex of equipment for high density IoT full-scale modeling // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 2. pp. 40–54 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-2-40-54.



Введение

Рост количества устройств Интернета вещей (ИВ) приводит к неуклонному повышению плотности сети, т. е. количества устройств на единицу площади. В перспективных сетях ИВ плотность узлов может достигать значений 1 устройство/ m^2 и выше. Такая высокая плотность узлов неизбежно приводит к изменению свойств сети. Во-первых, это влечет за собой рост взаимных влияний узлов сети, внутриканальных помех. Помехи создаются соседними узлами при передаче данных, это ограничивает пропускную способность сети. Во-вторых, структура сети зависит от окружения, повторяя в некотором образе его свойства [1, 2].

Однако, высокая плотность узлов имеет и положительные стороны, а именно, избыточность ресурсов, благодаря которой возможно реализовать эффективное управления структурой сети. Большое количество узлов расширяет возможность выбора различных структур, привязанных не к отдельным узлам, а к заданным (целевым) точкам пространства. Для таких манипуляций структурой требуется разработка соответствующих методов и алгоритмов. В общем, сеть ИВ в таком случае можно рассматривать как множество узлов (ресурс) который может быть сконфигурирован различным образом, в зависимости от целевого назначения (назначений) сети.

При этом появляется потребность в методах описания и формирования сетей с заданными свойствами. В частности, необходимо иметь возможность связать параметры окружения, сети и трафика с показателями качества функционирования.

Разработка таких методов сопряжена с необходимостью проверки создаваемых моделей и методов. Для этой цели традиционно применяются методы численного (имитационного) моделирования. Однако, при моделировании сетей высокой плотности появляются сложности, связанные с необходимостью моделирования тысяч и более узлов, а также реалистичного моделирования распространения сигналов и окружения. Распространенные системы имитационного моделирования, как правило, оперируют на порядок меньшими количествами сетевых элементов, а моделирование распространения ограничиваются некоторым набором стандартных моделей.

В таких условиях возникает потребность создания универсального средства натурного или гибридного моделирования, обеспечивающего решение широкого круга задач в области сети Интернета вещей высокой плотности. В качестве такого средства предлагается комплекс устройств и программ, обеспечивающий конфигурирование натурной или гибридной модели для решения конкретной задачи. Далее будем называть этот комплекс КМСИВ. Целью данной работы является разработка структуры и состава КМСИВ высокой плотности.



Постановка задачи

КМСИВ высокой плотности должна позволять реализовывать и исследовать основные особенности таких сетей, исследование которых традиционными средствами осложняется их-за потребности задействования чрезмерно больших объемов оборудования или необходимости решения задач высокой вычислительной сложности. Сформулируем основные задачи комплекса технических и программных средств, который представляет собой данная платформа.

1. Моделирование взаимодействия узлов беспроводной сети доступа Интернета вещей с учетом взаимных влияний (внутриканальных помех). Эта модель должна учитывать и позволять исследовать влияние на сеть специфики окружения, свойств трафика и внутрисетевых помех. Желательно также, чтобы модель позволяла проводить указанные исследования для нескольких протоколов организации беспроводного канала.

2. Моделирование сетевой структуры достаточно большого размера, т. е. моделирование фрагмента сети Интернета вещей с достаточно большим количеством узлов, для которого могут быть применены методы и подходы управления сетевой структурой Интернета вещей. Количество узлов такой сети должно позволять производить выбор структуры сети как с учетом взаимных влияний узлов, так и с учетом влияния окружения сети, т. е. с одной стороны оно должно быть достаточно большим. С другой стороны, это количество не должно быть слишком большим, что неизбежно отразится на сложности развертывания, перестройки и работы с моделью.

3. Платформа моделирования должна обеспечивать возможность анализа функционирования сети при предоставлении услуг. Она должна быть достаточно гибкой, как в части аппаратного, так и программного обеспечения. Оборудование, используемое для моделирования узлов сети должно обеспечивать возможность изменения их функциональности путем замены программного обеспечения. Платформа должна содержать, как программное, так и аппаратное обеспечение для анализа взаимодействия узлов сети как на уровне радиоканала, так и на уровне кабельных сетевых интерфейсов.

Таким образом, структура платформы моделирования будет определяться набором аппаратных и программных средств. Выбор тех и других средств должен опираться на необходимость решения определенных выше задач.

Выбор структуры и аппаратных средств

Предлагаемая структура платформы моделирования сети высокой плотности приведена на рис. 1.

Состав платформы можно условно разделить на три уровня: уровень сети доступа, транспортный уровень и уровень услуг.

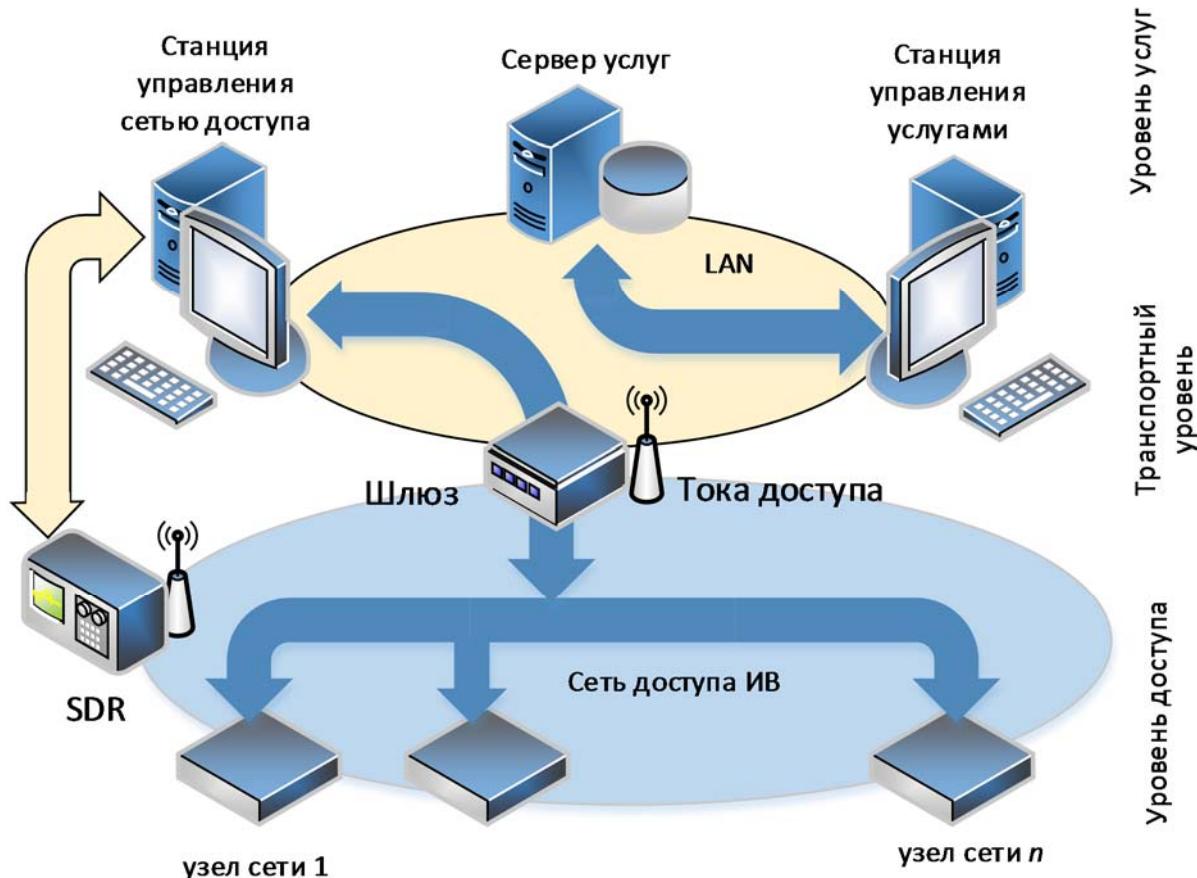


Рис. 1. Структура КМСИВ

Уровень доступа

Стандарты. На уровне сети доступа реализуется модель беспроводной сети, состоящая из n узлов. Возможности этой сети определяются возможностями узлов, их количеством n .

Работа в лицензируемых участках спектра сопряжена с рядом ограничений, сложностью технической реализацией модели с учетом этих ограничений, а также с необходимостью получения разрешительных документов. В рамках данной работы такой подход нецелесообразен. Из наиболее распространенных технологий организации радиоканала в сети ИВ в нелицензируемых участках спектра можно отметить стандарты IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee), LoRa, IEEE 802.11ah. Первые три служат для построения сетей ограниченного радиуса обслуживания (десятки – сотни метров), следующие два для построения сетей среднего радиуса (единицы – десятки километров).

Все эти стандарты могут быть использованы для построения сети доступа ИВ, однако реализация их всех в рамках одной модели значительно ее усложняет, а также усложняет работу с такой моделью, поскольку сочетание стандартов для



сетей малого и среднего масштаба сети (дальности связи) требует изменения геометрических масштабов модели, что вероятно не слишком удобно при использовании модели в исследовательской или учебной лаборатории. Поэтому, целесообразно реализовать модель одного масштаба.

Моделирование окружения. Одной из задач данного уровня также является моделирование фрактальных свойств окружения, в частности согласно работам [1, 2] эти свойства могут быть заданы фрактальными кривыми, например, кривыми Гильберта или ковер Серпинского, рис. 2.

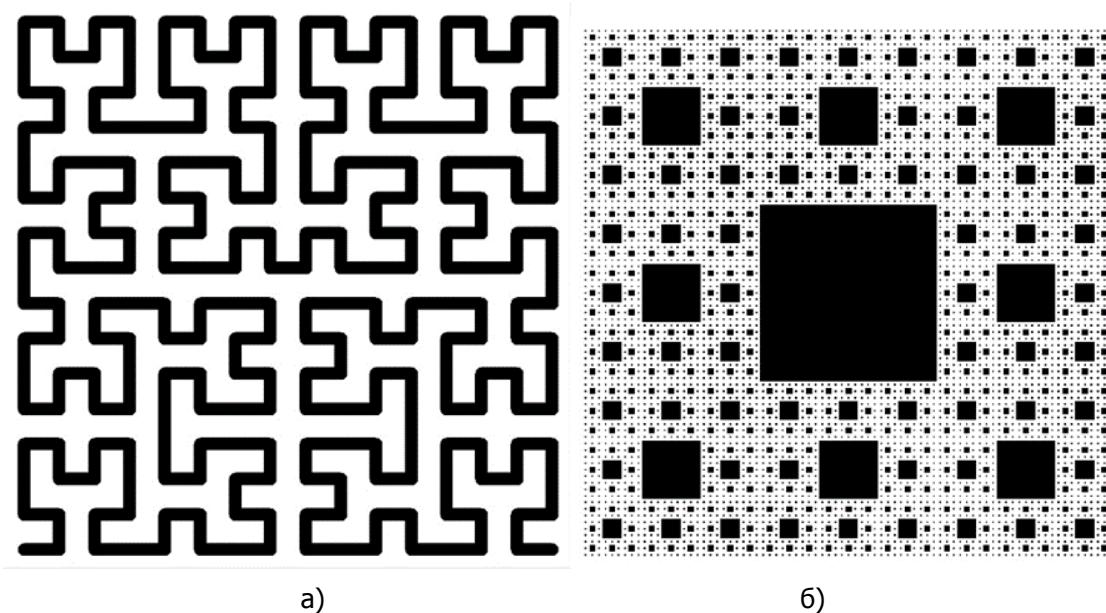


Рис. 2. Примеры моделей окружения:
а – кривая Гильберта, б – ковер Серпинского

При этом линия или ее фрагмент имитирует препятствие распространению радиосигнала (полное или частичное его подавление). В натурной модели реализация такого функционала может быть достигнута несколькими методами:

1. Прямой физический метод. Использование экранирующих перегородок с высокой степенью ослабления сигнала, например, заземленных металлических конструкций в виде решеток (сеток), выбор соответствующих помещений для размещения узлов.

2. Косвенный программный метод. Управление мощностью передатчиков узлов сети таким образом, чтобы ее снижение было эквивалентно ослаблению сигнала.

3. Комбинированный метод. Предполагает использование как физического, так и программного методов, что позволяет с одной стороны снизить требования к физическим конструкциям, а с другой стороны имитировать не только затухание, но и отражения сигналов от поверхностей данных конструкций.



Вероятно, что комбинированный или программный методы является более гибким и целесообразны для использования в задачах моделирования. Для реализации этих методов, необходимо, чтобы узлы сети поддерживали функции программного управления мощностью передаваемых радиосигналов.

Выбор физических средств для построения структуры окружения целесообразно проводить в процессе опытной эксплуатации средств моделирования на основе результатов натурных экспериментов.

Состав технических средств. Полагаем, что на начальном этапе исследований в модели достаточно поддерживать стандарты IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth). Поддержка стандарта IEEE 802.15.4, однако она требует дополнительного оборудования, например Embedded ZigBee Module¹, в то время как стандарты WiFi и Bluetooth могут поддерживаться одним типом оборудования².

Наиболее доступными устройствами, для которых имеется достаточно развитое программное обеспечение являются контроллеры компании Espressif³. Эти устройства поддерживают два стандарта беспроводной связи WiFi и Bluetooth, имеют в своем составе достаточно производительный контроллер, с достаточным объемом оперативной памяти и перепrogramмируемой памяти (флэш-памяти) программ и данных, имеют также проводной USB интерфейс для подключения к другим устройствам и программирования.

Контроллеры также имеют набор выводов общего назначения, которые могут быть использованы различным образом. Функционирование контроллера полностью определяется записанной в него программой, что дает широкие возможности по его применению как для исследовательских задач, так и при использовании контроллера в учебном процессе.

Основные технические характеристики модуля (контроллера) ESP32 приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики контроллера ESP32

	Характеристика	Значение
1	Поддерживаемые спецификации IEEE 802.11	b/g/n 150 Мбит/с
2	Поддерживаемые спецификации IEEE 802.15.1	V4.2 BR/EDR, BLE
3	Интерфейсы	SPI, I ² S, I ² C, UART
4	Процессор	Xtensa®dual-core32-bit LX6
5	ПЗУ	4 Мбайт (флэш)
6	ОЗУ	512 Кбайт

¹ Embedded ZigBee Module. URL: http://en.four-faith.com/f8913-embedded-zigbee-module.html?gclid=EAIAIQobChMIhrehyuar7wIVk7WyCh2vAwQLEAAYASAAEgIWu_D_BwE (13.03.2021).

² Espressif. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (13.03.2021).

³ Там же.



	Характеристика	Значение
7	Напряжение питания	3,3 В
8	Ток потребления (в зависимости от режима)	250 мА/ 20 мА / 10 мкА

Рассматриваемое устройство позволяет динамически регулировать мощность передатчика, что дает возможность имитировать различные условия и расстояния между узлами.

Работа с устройством заключается в разработке прикладных программ для проведения определенных исследований, программирования устройств и проведения натурного эксперимента.

Количество устройств. Для проведения натурных экспериментов количество узлов сети должно быть достаточно большим, но с точки зрения развертывания модели в лаборатории, а также управления этими узлами (настройки и программирования) их количество не должно повышать трудоемкость работы с моделью.

Оценим минимальное количество узлов, исходя из достижения доверительной точности статистического эксперимента. Например, при измерении уровня мощности сигнала от n устройств в точке O , получено n значений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ тогда полуширина доверительного интервала для среднего будет определяться как [3]

$$\Delta = t_{a,n} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение,

n – количество измеренных величин,

$t_{a,n}$ – коэффициент Стьюдента [3].

Относительная ошибка может быть представлена как

$$\delta(n) = \frac{\Delta}{\tilde{x}} 100\% = \frac{t_{a,n} \sigma}{\tilde{x} \sqrt{n}} 100\% = t_{a,n} C \frac{1}{\sqrt{n}} 100\%, \quad (2)$$

где C – коэффициент вариации.

На рис. 3 приведены зависимости относительной ошибки от количества узлов сети для различных значений коэффициентов вариации.

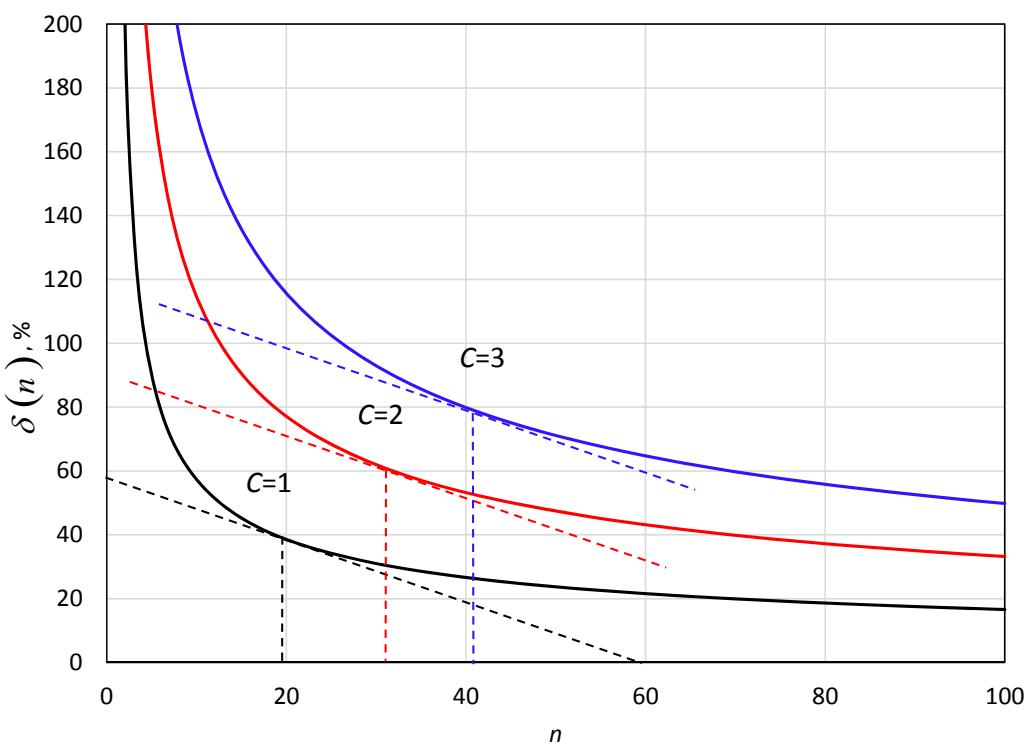


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки от количества узлов сети

Как видно из приведенных графиков, ошибка снижается с ростом n и тем выше, чем выше коэффициент вариации. Следует отметить, что скорость снижения ошибки обратно пропорциональна квадратному корню из числа узлов и скорость ее уменьшения заметно снижается после некоторой величины. Выберем в качестве такой величины точку, в которой производная функции равна единице

$$\frac{d\delta(n)}{dn} = 1, \quad C = 1, \quad t_{a,n} \approx 1,72, \quad n \approx 19,48. \quad (3)$$

Для коэффициента вариации $C = 1$, количество узлов $n = 20$. При больших значениях коэффициента вариации, это количество будет несколько большим (при $C = 2$ и $C = 3$ $n \approx 31$ и $n \approx 41$, соответственно). Однако, значения коэффициента вариации не превышающее единицу или близкое к ней характерно для многих случайных процессов в данной прикладной области. Поэтому на данном этапе целесообразно выбрать количество узлов сети доступное равное 20.

Использование контроллеров ESP32 позволяет обеспечить достаточную гибкость оборудования за счет возможности реализации различного функционала, а также за счет возможности использования различных стандартов организации радиоканала.



Нижняя граница, в части гибкости данного решения определяется, тем, что программирование ESP32 осуществляется на уровне *SDK⁴* (*Software Development Kit*), т. е. предлагаемого разработчиком данного устройства набора инструкций (библиотек). Например, это не дает возможности изменения низкого уровня протоколов взаимодействия между устройствами или реализации каких-либо нестандартных функций взаимодействия с радиоканалом.

Указанный недостаток гибкости, в рассматриваемой структуре, компенсируется использованием *SDR* (*Software Defined Radio*). Требования к *SDR* определяются узлами сети, использованными на уровне модели сети доступа. Частотный диапазон определяется частотным диапазоном стандартов WiFi и Bluetooth с учетом диапазонов 2,4 ГГц, поддерживаемых модулями ESP32. Полоса пропускания должна обеспечивать работу с устройствами WiFi и Bluetooth. Наибольшая ширина полосы канала в диапазоне 2,4 ГГц составляет 40 МГц.

В настоящее время различные производители выпускают более 100 различных готовых решений – одноплатных устройств или наборов для изучения, которые имеют существенно различные параметры и широкий диапазон цен⁵. Анализ основных типов этих устройств показал, что в наибольшей степени задачам моделирования данной платформы удовлетворяет *SDR* типа USRP B200, который представляет собой программируемый трансивер, который позволяет реализовать прием и передачу радиосигналов в диапазоне частот от 70 МГц до 6 ГГц с полосой до 56 МГц.

SDR в данной структуре используется как универсальное средство мониторинга среды распространения и имитации передачи радиосигналов.

В таблице 2 приведены основные характеристики *SDR* USRP B200⁶.

Таблица 2.
Основные характеристики USRP B200

	Характеристика	Значение
1	Диапазон частот	70 МГц – 6 ГГц
2	Полоса частот	до 56 МГц
3	Разрядность АЦП	12 Бит
4	Выходная мощность передатчика	≥ 10 дБм
5	Внешний интерфейс	USB 3.0
6	Потребляемая мощность	≤ 5 Вт
7	Выходная мощность передатчика	≥ 10 дБм

⁴ Espressif SDKs & Demos. URL: https://www.espressif.com/en/products/_soc/_esp32/resources (13.03.2021).

⁵ List of software-defined radios. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/_List_of_software-defined_radios#cite_note-crosscountrywireless2-24 (13.03.2021).

⁶ Ettus Research USRP B200. URL: <https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/> (13.03.2021).



Наиболее дешевой и доступной альтернативой данному типу SDR может быть HackRF One, который отличается от USRP D200 меньшей полосой пропускания (20 МГц), меньшей разрядностью АЦП (8 бит) и примерно вдвое меньшей стоимостью. Несмотря на то, что его полоса пропускания вдвое меньше возможной в стандарте WiFi диапазона 2,4 ГГц, это устройство также позволяет решить большинство задач моделирования.

Транспортный уровень

Транспортный уровень обеспечивает взаимодействие уровня доступа, севера услуг и рабочих станций. Основой данного уровня является сеть передачи данных, в рамках платформы моделирования – это локальная вычислительная сеть (ЛВС). Стык уровня доступа с ЛВС обеспечивается с помощью точки доступа. В данной конфигурации требования к точке доступа состоят в поддержке стандартов радиоканала, используемых в сети доступа. С учетом выбранного типа узлов ESP32 – это WiFi (IEEE 802.11b/g/n 2,4 ГГц) и Bluetooth (IEEE 802.15.1 4.2) устройство должно обеспечивать функции маршрутизатора и стыка Ethernet с ЛВС.

Для этих целей могут быть использованы два варианта:

- первый, использование персонального компьютера (ноутбука), оснащенного соответствующими интерфейсами. Интерфейсы WiFi и Bluetooth могут быть как встроенными, например, в составе ноутбука, так и внешними, подключаемыми к персональному компьютеру;

- второй, использование одноплатного компьютера, например, данным требованиям удовлетворяет Rasberry Pi 4⁷, в состав которого входит WiFi и Bluetooth адAPTERы.

Эти варианты, близки по функциональным возможностям и выбор конкретного из них может быть произведен на этапе построения платформы моделирования, исходя из текущих потребностей.

В качестве ЛВС используется имеющаяся локальная вычислительная сеть организации. При ее недоступности достаточно введения одного сетевого устройства (маршрутизатора), который обеспечит взаимодействие всех необходимых элементов данного уровня и стык с внешней сетью.

Уровень услуг

На данном уровне размещаются серверы и рабочие станции. Сервер в данной платформе моделирования служит для отработки сценариев предоставления различных услуг. Сервер через транспортный уровень и уровень доступа взаимодействует с узлами сети, а также с рабочими станциями, имитирующими действия по управлению услугой и/или действия клиента.

⁷ Raspberry Pi 4. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/> (13.03.2021).



Требования к оборудованию, применяемом на данном уровне основаны на требованиях со стороны применяемого программного обеспечения и особенностей моделируемой услуги.

Ввиду того, что платформа моделирования служит лишь для отработки различных решений по организации сети и услуг, и не предполагает использования больших объемов данных (баз данных клиентов и услуг), которые требуется обрабатывать в заданное время, то целесообразно исходить из требований к современному персональному компьютеру, применяемому в задачах программирования.

Требования к рабочим станциям, практически, такие же как приведенные выше. Рабочая станция используется для моделирования клиентов услуг, а также для работы с элементами платформы моделирования: с узлами сети, точкой доступа, сетевыми устройствами, а также для разработки компиляции программ.

Ориентировочная конфигурация компьютера для сервера услуг и рабочих станций приведена в таблице 3.

Таблица 3.

Ориентировочные характеристики компьютера

N	Характеристика	Значение
1	Процессор	AMD Ryzen 7 3700X
2	ОЗУ	16 Гбайт
3	Твердотельный накопитель (SSD)	512 Гбайт
4	Накопитель на жестком диске (HDD)	2 Тбайт
5	Видеокарта	nVidia GeForce GT 1030

Программные средства

К программным средствам следует отнести: операционные системы вычислительных средств, средства разработки программного обеспечения, программные средства мониторинга трафика, средства статистического анализа. Состав основных программных средств приведен в таблице 4.

Таблица 4.

Состав программных средств

N	Назначение ПО	Наименование
1	ОС сервера	Linux (Ubuntu)
2	ОС рабочих станций	Linux (Ubuntu)/Windows
3	ОС шлюза (точки доступа)	Linux
4	Программирование узлы сети (ESP32)	ESP-IDF, Arduino IDE
5	Программы обработки	C++, Python



N	Назначение ПО	Наименование
6	Программы мониторинга	Wireshark, CommView
7	SDR	GNU Radio

Общий состав технических средств платформы моделирования сети высокой плотности приведен в таблице 5.

Таблица 5.

Состав технических средств

N	Характеристика	Тип	Количество
1	Узлы сети доступа	ESP32	20
2	Точка доступа (шлюз)	Rasbery* ¹ Pi 4	1
3	SDR	USR P B200* ²	1
4	Сервер	ПК* ³	1
5	Рабочая станция	ПК* ⁴	2* ⁵

*Позиции зависят от решаемой задачи:

1 – Как было отмечено выше, альтернативным вариантом может быть ПК, оборудованный соответствующим интерфейсным оборудованием.

2 – Возможен альтернативный вариант, в зависимости от решаемых задач.

3 – Необходимость сервера, определяется решаемой задачей моделирования.

4 – В зависимости от решаемых задач, может использоваться одна рабочая станция.

5 – Обе рабочие станции могут быть совмещены в рамках одного устройства.

Как видно из таблицы 5 состав аппаратных средств может быть в существенной степени различным, в зависимости от решаемой задачи. Например, в задачах исследования взаимных влияний узлов сети доступа, а также влияний структуры окружения на свойства сети доступа первостепенную роль играют узлы сети доступа, средства их программирования, средства мониторинга и анализа. В задачах анализа трафика услуги наряду с оборудованием сети доступа требуется использование оборудования транспортного уровня и уровня услуг.

В таблице 6 приведены условные показатели использования оборудования в различных задачах, полученные как экспертные оценки.

Как видно из приведенной таблицы, в предполагаемых задачах исследований в наибольшей степени используется оборудование сети доступа (узлы сети) и рабочая станция. Шлюз и SDR применяется в половине задач. В наименьшей степени используется оборудование сервера.



Таблица 6.

Использование оборудования в различных задачах

N	Задача	Использование				
		ESP32	SDR	Шлюз	Р. станция	Сервер
1	Анализ взаимных влияний узлов сети доступа	+	+	-	+	-
2	Анализ влияния окружения на сеть доступа	+	+	-	+	-
3	Разработка протоколов маршрутизации	+	+	-	+	-
4	Разработка протоколов управления сетью	+	+	+	+	-
5	Анализ и разработка услуг	+	-	+	+	+
6	Разработка и анализ методов управления услугами	+	-	+	+	+
Среднее использование %		100	67	50	100	33

Выводы

1. Задачами платформы моделирования сети высокой плотности являются задачи исследования и анализа функционирования беспроводной сети Интернета вещей высокой плотности, а именно: взаимодействия узлов беспроводной сети доступа между собой, влияния окружения на свойства сети, процессов предоставления услуг.

2. Комплекс моделирования сети высокой плотности должна включать в себя оборудование и программное обеспечение на трех условных уровнях: уровне доступа, транспортом уровне и уровне услуг.

3. Выбор оборудования и программного обеспечения для КМСИВ основан на принципах целеполагания, совместимости и минимальной достаточности.

4. Анализ задач, решаемых КМСИВ показал, что наибольшее значение и использование имеют средства уровня сети доступа и рабочие станции, используемые для разработки программного обеспечения, натурного моделирования сети доступа и анализа результатов.

5. Предложенная структура КМСИВ, состав технических и программных средств позволяют получить достаточно гибкий комплекс для натурного или гибридного моделирования сетей Интернета вещей, включая и сети ИВ высокой плотности и фрактальные свойства окружения.

6. Предложенная КМСИВ может быть использована для решения научно-исследовательских задач, разработки протоколов и услуг, а также в учебном процессе при изучении сетей Интернета вещей.

Исследование выполнено в рамках выполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2021 год.



Литература

1. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучеряый А. Е. Свойства самоподобия сетевой структуры и ее моделирование для сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 8. С. 18–24. doi: 10.34832/ELSV.2020.9.8.003.
2. Paramonov A.; Muthanna A.; Aboulola O. I.; Elgendi I. A.; Alharbey R.; Tonkikh E.; Koucheryavy E. Beyond 5G Network Architecture Study: Fractal Properties of Access Network // MDPI Appl. Sci. 2020, 10, 7191. doi: 10.3390/app10207191.
3. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи: пер. с англ. М.: Наука, 1973. 899 с.

References

1. Tonkikh EU. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Network structure self-similarity properties and ITS modeling for Internet of Things high-density network // Electrosvyaz. 2020. No. 8. pp. 18–24. doi: 10.34832/ELSV.2020.9.8.003 (in Russian).
2. Paramonov A.; Muthanna A.; Aboulola O. I.; Elgendi I. A.; Alharbey R.; Tonkikh E.; Koucheryavy E. Beyond 5G Network Architecture Study: Fractal Properties of Access Network // MDPI Appl. Sci. 2020, 10, 7191. doi: 10.3390/app10207191.
3. Kendall Maurice G. and Stuart Alan The advanced theory of statistics. M.: Nauka, 1973. 899 s. (in Russian).

Марочкина Анастасия Вячеславовна
аспирантка Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, anastasiy1996@mail.ru

Marochkina Anastasia V.
Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
anastasiy1996@mail.ru

Парамонов Александр Иванович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, alex-in-spb@yandex.ru

Paramonov Alexander I.
Doctor of engineering sciences, docent, professor at the
department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State
University of Telecommunications,
alex-in-spb@yandex.ru