

АРХИТЕКТУРА АДАПТИВНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ И УСТРОЙСТВАМИ

ARCHITECTURE OF ADAPTIVE WIRELESS LOCAL NETWORK FOR CONTROLLING OBJECTS AND DEVICES

**M. Khoroshko
I. Skorikov**

Summary. The use of high-speed multi-hop wireless networks is becoming increasingly relevant as a new wave of different wireless devices are being researched and developed. This is particularly relevant for public safety, surveillance and monitoring applications where streaming multimedia data is constantly being generated and must be made available to users in real time. High-bandwidth communication techniques, such as IEEE 802.11s-based wireless mesh networks, can provide low-cost and easy-to-deploy solutions that are scalable and suitable for these services. However, there is a parallel issue of adapting wireless networks to inconsistent environmental conditions as well as to changing user requirements. Equally important is the challenge of minimizing power consumption while meeting quality constraints during wireless network operation. Particular emphasis must be placed on the fact that these adaptations must be performed at runtime in order for the network to operate efficiently in an ever-changing environment. In view of the noted, the paper deals with the issues related to the study of the peculiarities of designing the architecture of an adaptive wireless local area network for controlling objects and devices. As an object of research the task of controlling technological equipment, objects and devices within the framework of IoT technology realization was considered. Special attention in the article is paid to the equipment of base stations, which are divided into two types, depending on computing capabilities. It also describes the peculiarities of modem design, taking into account the channel for which it will be used. As a result, the architecture of adaptive wireless local area network is presented. Its distinguishing feature is the presence of a new wireless switch that allows reconfiguration of network topologies and frequency ranges, adapting to the changing requirements of indoor traffic. The new architecture requires less infrastructure, reduces power consumption, and reduces network deployment and maintenance costs.

Keywords: wireless network, adaptation, switch, range, Internet of Things, base station, reconfiguration.

Хорошко Максим Болеславович

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск
clevermaks@yandex.ru

Скориков Иван Олегович

Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск
i-skorikov@internet.ru

Аннотация. Использование высокоскоростных многоходовых беспроводных сетей становится все более актуальным по мере того, как исследуется и разрабатывается новая волна различных беспроводных устройств. Это особенно актуально для приложений общественной безопасности, промышленности, наблюдения и мониторинга, где постоянно генерируются потоковые мультимедийные данные, которые должны предоставляться пользователям в режиме реального времени. Методы связи с высокой пропускной способностью, такие как беспроводные ячеистые сети на базе стандарта IEEE 802.11s, могут обеспечить недорогие и простые в развертывании решения, масштабируемые и подходящие для этих услуг. Однако, параллельно возникает вопрос адаптации беспроводных сетей к непостоянным условиям окружающей среды, а также к изменяющимся требованиям пользователей. Не менее важной является задача минимизации энергопотребления при одновременном соблюдении ограничений качества во время работы беспроводной сети. Особый акцент необходимо сделать на том, что эти адаптации должны выполняться во время работы, чтобы сеть могла эффективно функционировать в условиях постоянно меняющейся внешней среды. С учетом отмеченного, в статье рассматриваются вопросы, связанные с изучением особенностей проектирования архитектуры адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами. В качестве объекта исследования рассматривалась задача управления технологическим оборудованием в рамках реализации технологии IoT. Отдельное внимание в статье уделено оборудованию базовых станций, которые разделяются на два типа, в зависимости от вычислительных возможностей. Также описаны особенности проектирования модема с учетом канала для которого он будет использоваться. В итоге представлена архитектура адаптивной беспроводной локальной сети. Ее отличительной особенностью является наличие нового беспроводного коммутатора, который позволяет реконфигурировать топологии и частотные диапазоны сети, адаптируясь к изменяющимся требованиям трафика внутри помещений. Новая архитектура требует меньше инфраструктуры, позволяет снизить энергопотребление и сократить расходы на развертывание и обслуживание сети.

Ключевые слова: беспроводная сеть, адаптация, коммутатор, диапазон, Интернет вещей, базовая станция, реконфигурация.

В настоящее время беспроводные сети распространяются повсеместно, и с каждым днем их становится все больше. Прогнозируемый рост Интернета вещей (IoT) позволяет реализовать целый ряд приложений и сценариев, таких как интеллектуальные сети, мониторинг окружающей среды, «умный» транспорт, всепроникающее здравоохранение и сельскохозяйственный мониторинг. Особую значимость беспроводные сети приобрели с развитием автономных транспортных средств и промышленных роботов, поскольку важность принятия надежных решений в реальном времени постоянно растет [3].

Однако, существующие реализации архитектур и технических решений локальных беспроводных сетей не всегда оптимальны как с точки зрения используемых протоколов, так и с точки зрения экономической эффективности конкретной технологии. Например, для систем «умный дом», промышленного Интернета вещей существует большое количество вариантов реализаций, которые в определенных условиях перестают выполнять свои функции. Одной из причин является изменение топологии сети, в результате чего отдельные объекты сети перестают быть доступными для сервера и других объектов [1].

В свете вышеизложенного, очевидным является тот факт, что ключевая проблема систем беспроводной связи заключается в их адаптивности. Эти системы должны быть гибкими и приспосабливаться к переменным условиям окружающей среды (например, изменяющееся количество пользователей в соте или колеблющиеся параметры канала из-за отражений или перемещений), а также к динамичным требованиям абонентов (пусковая способность, характер трафика и QoS) [10]. Если система может адаптироваться во время выполнения к условиям окружающей среды, можно добиться значительной экономии вычислительных затрат. Кроме того, от аппаратных архитектур ожидается, что они будут чрезвычайно эффективными и экономичными, поскольку используются в потребительских терминалах, работающих от батарей [1].

Таким образом, сеть должна быть адаптированной к изменению своей топологии, быть способной к восстановлению утраченных связей между объектами сети и к установлению новых связей и маршрутов обмена данными. Важнейшим фактором, определяющим «живучесть» сети, является ее архитектура. Например, сеть с архитектурой «Клиент-Сервер» при отказе сервера перестает существовать [4]. Поэтому для обеспечения работоспособности сети необходимо распределить функции управления сетью между несколькими или всеми объектами сети.

Приведенные факты и высокая научно-практическая значимость рассматриваемой тематики предопределили выбор темы данной статьи.

Различные исследователи работают над решением проблем обеспечения адаптивности в беспроводных сетях, из их числа можно выделить Муравьева К.А., Жалникова В.П., Спиричева И.И., Метёлкина А.В., Ерёмин М.Ю., Pu Song, Shangkun Xiong, Sen Xu, Jianquan Li.

Над разработкой архитектуры ячеистой сети с несколькими переходами и адаптивным управлением для систем широкополосного фиксированного беспроводного доступа трудятся Вишневецкий В.М., Семёнова О.В., Буй З.Т., Лихтциндер Б.Я., Бакай Ю.О., Овасапян Т.Д., Anelia Mitseva, Efthimia Aivaloglou, Maria Marchitti, Neeli Rashmi Prasad.

Методики адаптивного управления беспроводной сетью с многоагентным обучением с подкреплением разрабатывают Беридзе Д.Л., Джорбенадзе М.Б., Квириквелия Ш.В., Борзов Д.Б., Чернышев А.А., Lawal Bello, Panos Bakalis, Predrag Rapajic, Kwashie A. Anang.

Высоко оценивая работы современных авторов и имеющиеся на сегодняшний день наработки, следует отметить некоторые вопросы, которые требуют особого внимания и более глубокого изучения. Так, существующие методы управления сетями, особенно в контексте LoRaWAN, подчеркивают оптимизацию одной метрики, обычно это коэффициент доставки пакетов или коэффициент ошибок пакетов. Однако для реальных приложений часто требуется баланс нескольких конфликтующих метрик производительности. Кроме того, нерешенной остается проблема нестабильности сети и разделения ресурсов распределенного консенсуса в беспроводных сетях [6].

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей проектирования архитектуры адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами. В качестве объекта исследования будет рассматриваться задача управления технологическим оборудованием, в рамках реализации технологии IoT.

Итак, в локальных беспроводных сетях широко используется технология Wi-Fi, которая позволяет достаточно простыми средствами создать архитектуру «Клиент-Сервер». Функции Клиента выполняют узлы Wi-Fi сети с конфигурацией Station (рис. 1, а), а функции сервера — узел с конфигурацией Access Point (точка доступа). Обмен информацией между узлами сети осуществляется поверх Wi-Fi протоколов с помощью протоколов MQTT через MQTT сервер (рис. 1, б).

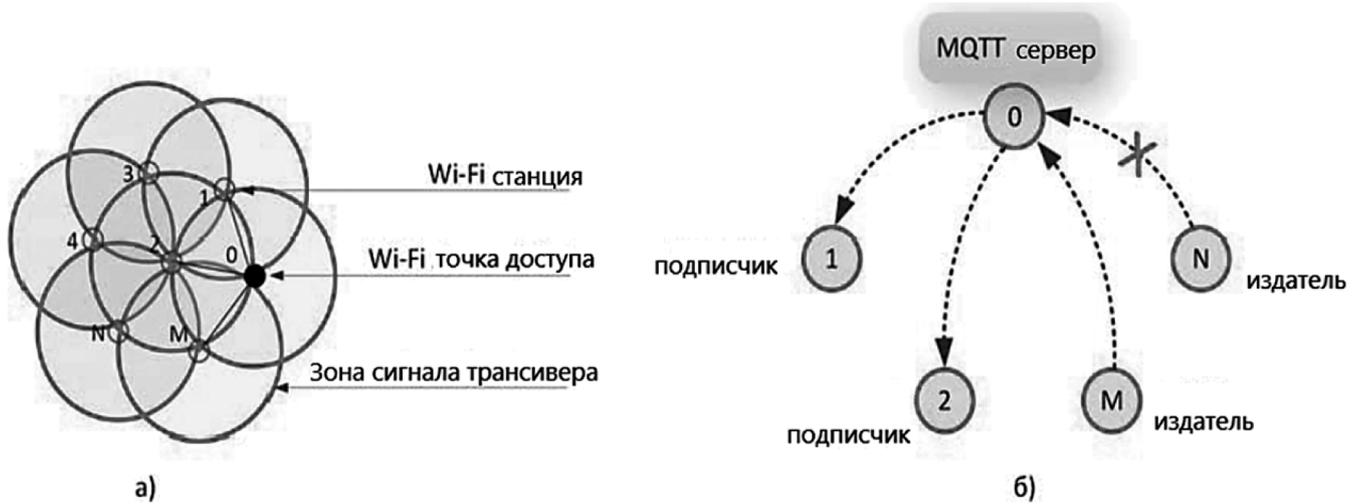


Рис. 1. Архитектура «Клиент-Сервер» с использованием MQTT сервера

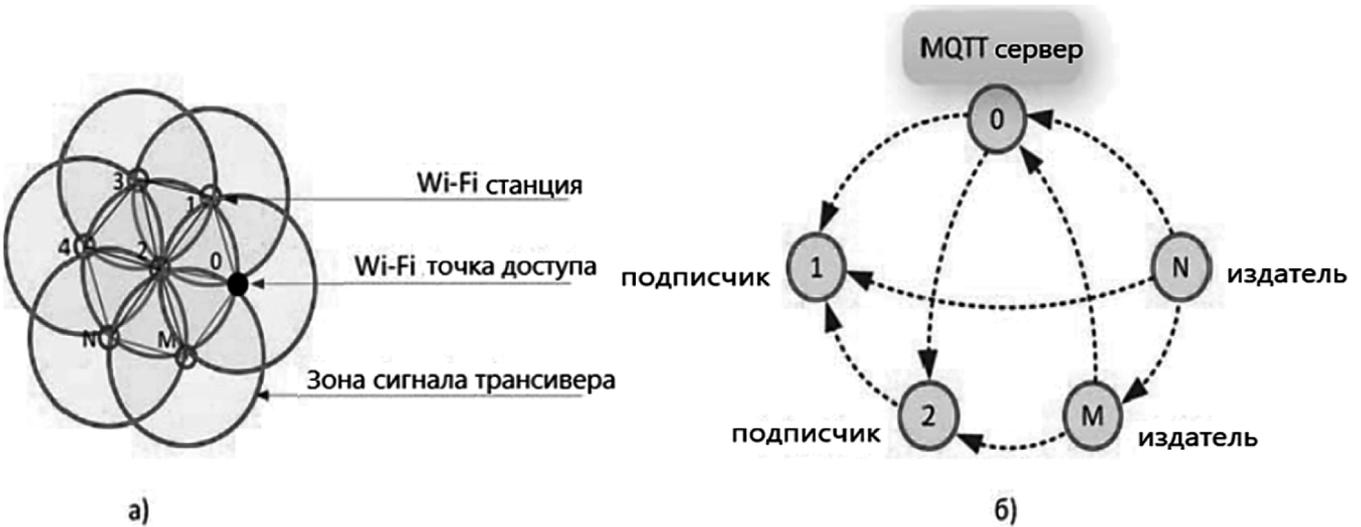


Рис. 2. Mesh-Network с использованием MQTT сервера

Такая архитектура сети имеет два недостатка. Один заключается в том, что при отказе или недоступности MQTT сервера вся сеть становится неработоспособной, а объекты сети — неуправляемыми. Второй недостаток заключается в том, что при изменении положения объекта сети в пространстве, он может потерять связь с точкой доступа и также стать неуправляемым [5].

Указанные недостатки устраняются путем объединения узлов сети в ячеистую сеть (Mesh network) (рис. 2, а)). В этом случае обмен информацией осуществляется не только через MQTT сервер, но и через прямые связи между узлами сети (рис. 2, б)), которые выполняют функции ретрансляторов. При такой организации сети MQTT сервер становится необязательным атрибутом в локальной сетевой системе управления объектами.

В реальных условиях топология сети может включать в себя множество узлов-ретрансляторов и быть неоптимальной с точки зрения управляемости. Динамическое

разбиение сети на кластеры способствует повышению уровня управляемости сети и ее администрирования [2].

Несомненно, при проектировании архитектуры адаптивной беспроводной локальной сети особое значение имеет оборудование базовых станций (BSE). Существует два типа оборудования базовых станций по вычислительным возможностям:

- оборудование базовых станций типа I, которое способно обрабатывать только часть доступной полосы частот, например одну или несколько несущих. В качестве примера можно привести блок обработки множественного доступа с частотным разделением (FDMA);
- оборудование базовой станции типа II, которое способно обрабатывать всю полосу частот и отбрасывает нерелевантные поддиапазоны только после обработки всей полосы (например, блок обработки ортогонального FDMA [OFDMA]) [8].

Таким образом, беспроводные сети в помещениях относятся либо к типу I, либо к типу II в лицензируемой полосе частот, поскольку смешение этих двух типов систем не поддерживается из-за текущей политики лицензирования спектра.

В рамках проводимого исследования в процессе разработки архитектуры адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами будет считаться, что каждый запрос трафика соответствует распределенной антенне. Все запросы трафика совместно определяют его распределение в сети. Будем интерпретировать каждую потребность в трафике как конечное число поднесущих FDMA или ортогонального мультиплексирования с частотным разделением (OFDM) в системах типа I или II. В новой архитектуре дискретное число (под)поднесущих преобразуется в непрерывное требование физической полосы пропускания. После выделения подполоса непрерывной полосы пропускания будет преобразована обратно в дискретное число (под)поднесущих.

Например, если антенне требуется 15 FDMA поднесущих и расстоянием между ними 200 кГц, требуемая полоса пропускания составляет 3 МГц. Если антенне выделена подполоса в 2 МГц, то фактически выделяется 10 несущих. Требования к полосе пропускания могут быть оценены в три этапа.

1. На первом этапе необходимо получить данные о требуемой полосе пропускания для каждого BSE с сервера, называемого центром эксплуатации и технического обслуживания.
2. На втором этапе измеряется доля принимаемой мощности на каждой антенне, подключенной к BSE в беспроводном коммутаторе.
3. На последнем этапе с помощью этой пропорции рассчитывается требуемая полоса пропускания антенны.

Итак, предполагаемая сеть будет состоять из базовых станций, подключенных к высокоскоростной магистрали. Каждая базовая станция служит концентратором для всех коммуникаций с различными терминалами внутри ячейки. Для снижения стоимости установки выгодно, чтобы ячейки были достаточно большими. Этого можно добиться, используя ISM-диапазоны 2,4 ГГц или 5,7 ГГц. Кроме того, такой подход позволяет интегрировать радиочастотный фронт-энд в стандартную CMOS или BiCMOS технологию, в отличие от пико-сотовых сетей, которые исследуются в диапазоне 60 ГГц [9]. Поскольку в сети всего несколько базовых станций, на них можно разместить большое количество вычислительных мощностей, таких как обработка пространства-времени и многопользовательское обнаружение.

Для проектирования модема очень важно знать канал, для которого он будет использоваться. Поэтому

канал внутри помещения был смоделирован с помощью метода трассировки лучей [7]. Поскольку предполагаемое применение — это WLAN, структурированная как сеть со звездообразной конфигурацией, состоящая из относительно больших ячеек, в качестве геометрического входа для алгоритма трассировки лучей был взят типичный коридор в офисной среде. На рис. 3 показан географический результат работы реализованного алгоритма, отображающий различные распространяющиеся лучи с учетом многолучевых составляющих до определенного порога потерь мощности (который для рассматриваемого примера составил 30 дБ). Базовая станция расположена в центре коридора, а мобильный терминал — в одной из офисных комнат. Стены показаны сплошными линиями, а все пунктирные линии представляют собой пути распространения.

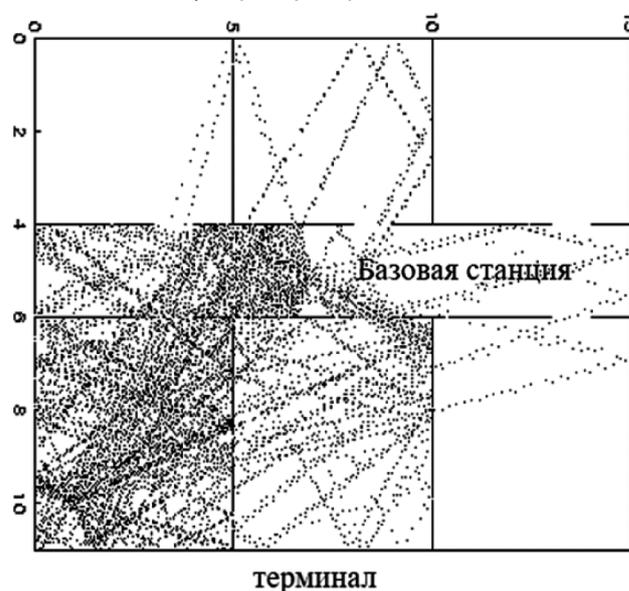


Рис. 3. Типичный результат трассировки лучей

Из приведенной выше картины видно, что в помещении происходит множество отражений, и, следовательно, в приемник поступает большое количество многолучевых компонентов.

На рис. 4 изображена архитектура предлагаемой адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами.

В соответствии с представленной на рис. 3 архитектурой, уровень распределения обеспечивает связь с сетевыми службами, глобальной сетью и Интернетом. Сетевые службы могут включать и не ограничиваться службами приложений глобальной сети (WAAS) и контроллерами WLAN. В зависимости от размера локальной сети эти службы, а также соединение с глобальной сетью и Интернетом могут располагаться на коммутаторе уровня распределения, который также агрегирует соединения уровня доступа локальной сети. Такую схему можно

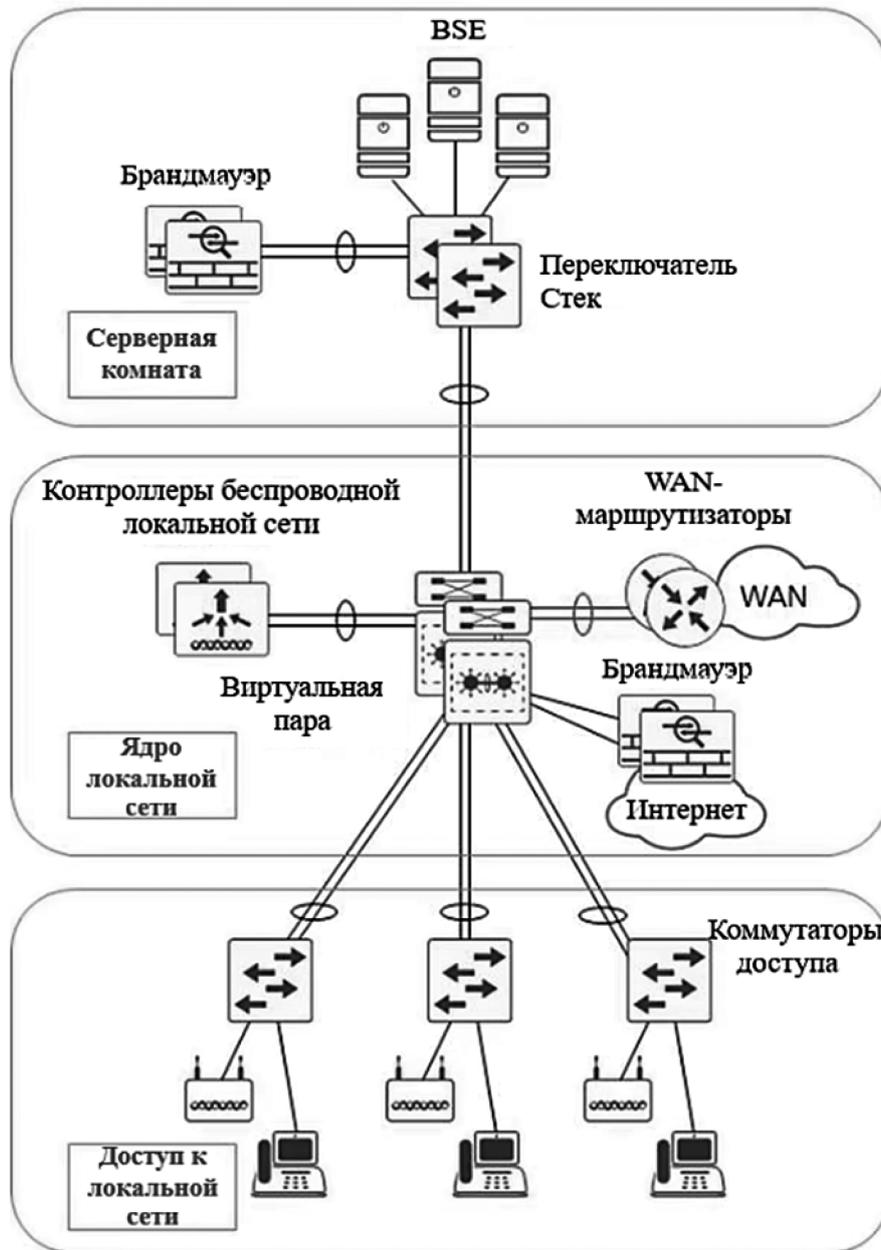


Рис. 4. Архитектура адаптивной беспроводной локальной сети

назвать схемой свернутого ядра, поскольку распределе­ние служит уровнем агрегации для всех устройств.

Особенностью предложенной архитектуры являет­ся то, что в беспроводной коммутатор, а именно в про­цессор алгоритмов, встроен алгоритм коммутации, как показано на рис. 5. Этот алгоритм призван адаптивно определять топологию сети, распределять частоты и устранять помехи.

Рассмотрим, как предложенная архитектура и бес­проводной коммутатор работают на практике.

На рис. 6 показан пример трехэтажной беспровод­ной сети в помещении, где для управления объектами

развернуты шесть антенн и три BSE. Доступная полоса пропускания составляет шесть несущих FDMA, и каждый BSE может обрабатывать четыре несущие.

В левой части рисунка расположена традиционная локальная беспроводная сеть, а в правой реконфигура­ция соединений между BSEs и антеннами в ответ на пе­ремещение пользователей, где реконфигурация про­изошла в беспроводном коммутаторе, что подчеркивает предложенную адаптивную архитектуру. Рассмотрим эту реконфигурацию более подробно.

В сценарий, который продемонстрирован на рис. 5, распределение трафика меняется с равномерного на не-

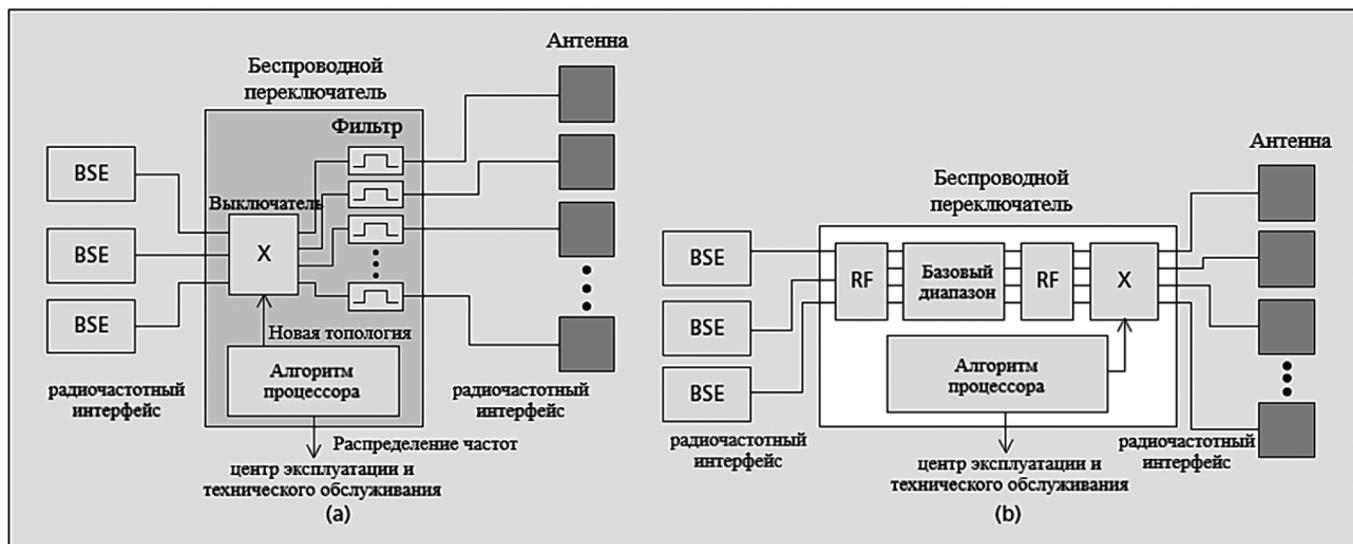


Рис. 5. Предлагаемые структуры нового беспроводного коммутатора:
а) для систем типа I; б) для систем типа II

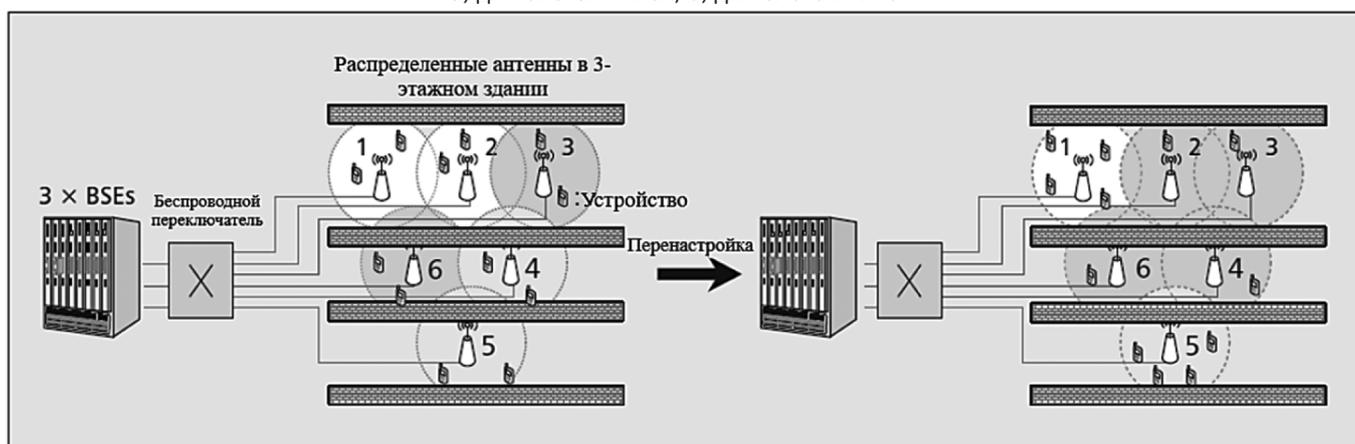


Рис. 6. Архитектура беспроводной локальной сети

сбалансированное. Новые требования к полосе пропускания — четыре несущие для каждой из антенн 1 и 5 и по одной несущей для каждой из антенн 2, 3, 4 и 6. Чтобы удовлетворить новые требования к полосе пропускания, сеть реконфигурируется, используя предложенную адаптивную архитектуру и беспроводной коммутатор. Реконфигурация выполняется в два этапа в процессоре алгоритмов переключателя стека.

На первом этапе распределяется спектр, адаптируясь к требованиям трафика. Поскольку не смежным антеннам разрешено использовать одни и те же несущие, имеем граф совместимости (CG) антенн. В графе две вершины, соединенные ребром, обозначают две антенны, которые могут использовать одни и те же несущие, поскольку имеют непересекающиеся зоны покрытия. Далее определяется наибольшее количество взаимно связанных вершин. Эти вершины представляют собой наибольшее количество антенн, которым разрешено использовать одни и те же несущие. В результате несущие используются наиболее эффективно.

На втором этапе обновляется топология сети, переставляя соединения между BSE и антеннами. Несколько антенн могут подключаться к одному BSE, если им выделены разные несущие.

Подводя итоги, отметим, что адаптивные беспроводные сети могут изменять свою топологию и поддерживать сбор и доставку информации для достижения целей высокого уровня, которые охватывают интересы пользователей. В статье предложена новая архитектура адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами. Ее преимущество заключается в том, что для удовлетворения потребностей внутреннего пространства в трафике требуется гораздо меньше BSE по сравнению с существующим уровнем техники. Кроме того, она позволяет снизить энергопотребление за счет уменьшения количества BSE и упрощает модернизацию сетей, делая это, по сути, в режиме реального времени. Еще одно преимущество архитектуры — устойчивость. Это связано с тем, что при выходе из строя од-

ного BSE остальные адаптивно подключают антенну(ы) этого BSE и продолжают предоставлять услуги. В то время как, в существующих сетях при выходе из строя одно-

го BSE происходит полная потеря услуг на территории, покрываемой антенной (антеннами) этого BSE.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаринов С.Л., Болдышев А.В., Заливин А.Н. Алгоритм адаптивного планирования работы узлов беспроводной сенсорной сети // Информационные системы и технологии. 2023. № 2 (136). С. 75–81.
2. Беридзе Д.Л., Джорбенадзе М.Б., Квириквелия Ш.В. Гибридный адаптивный алгоритм для снижения задержек в беспроводной сети // Научные горизонты. 2019. № 5-2 (21). С. 67–76.
3. Васенин Р.С. Эволюция протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях // Научный аспект. 2024. Т. 27. № 3. С. 3410–3414.
4. Иванов В.Г., Прядкин А.М., Скуридин А.Е., Лукьянчик В.Н. Повышение эффективности функционирования сетей беспроводного широкополосного доступа за счёт внедрения адаптивных систем и оценки каналов связи // Стратегическая стабильность. 2024. № 1 (106). С. 60–62.
5. Савенко К.В. Адаптивная модуляция в беспроводных сетях // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2018. № 1-2. С. 298–301.
6. Hajjabadi M. Transient analysis of multitask learning over adaptive networks with wireless links // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2023. Volume 38, Issue 1. P. 145–154.
7. Khoshnevisan L., Liu X. Adaptive fractional order predictive sliding mode control for congestion control of wireless access networks // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2022. Volume 32, Issue 13. P. 120–124.
8. Taha M., Ali A. Smart algorithm in wireless networks for video streaming based on adaptive quantization // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2023. Volume 35, Issue 9. P. 87–95.
9. Shiny G. S., Ram R. S. Energy efficient data dissemination in wireless sensor network enabled IoT using domain-adaptive message passing graph neural network // International Journal of Communication Systems. 2024. № 56. P. 19–23.
10. Sakthivel S. Design of efficient location-based multipath self-adaptive balancer router using particle swarm optimization in wireless sensor network // International Journal of Communication Systems. 2022. Volume 35, Issue 4. P. 34–39.

© Хорошко Максим Болеславович (clevermaks@yandex.ru); Скорииков Иван Олегович (i-skorikov@internet.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»