

Сергиенко Михаил Владимирович

аспирант, ассистент кафедры практической и прикладной информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва. SPIN-код: 6664-9116, AuthorID: 1230038.

Электронный адрес: Sergienko.m@inbox.ru

Mikhail V. Sergienko

Postgraduate, Assistant at the Department of practical and applied informatics, MIREA – Russian Technological University, Moscow. SPIN-code: 6664-9116, AuthorID: 1230038.

E-mail address: Sergienko.m@inbox.ru

Алпатов Алексей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва. SPIN-код: 9012-0246, AuthorID: 1064377.

Электронный адрес: aleksej01-91@mail.ru

Aleksey N. Alpatov

Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of instrumental and applied software, MIREA – Russian Technological University, Moscow. SPIN-code: 9012-0246, AuthorID: 1064377.

E-mail address: aleksej01-91@mail.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11ax В СЦЕНАРИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И УМНЫХ СКЛАДОВ

Аннотация. Индустрия 4.0 стремится к полной цифровизации производственных процессов, и беспроводные технологии играют в этом важную роль. Однако для различных областей применения, таких, например, как умные склады, где роботы контролируют и выполняют все задачи, современные стандарты и запатентованные решения должны соответствовать строгим отраслевым требованиям. Одной из ключевых задач исследований в этой области является разработка беспроводных систем, которые могут передавать короткие пакеты данных в многопользовательских средах. Однако существующие предложения и модели промышленных каналов не всегда могут удовлетворить эти требования. В качестве возможного решения авторы предлагают оптимизировать стандарт IEEE 802.11ax. Благодаря использованию OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) эта оптимизация может создать высокопроизводительную систему для умных складов. В данной статье представлена беспроводная система для интеллектуальных складов, разработанная на основе стандарта IEEE 802.11ax. Система включает в себя оптимизацию на двух уровнях: MAC и PHY.

Ключевые слова: интернет вещей, промышленность, умный склад, связь, беспроводные технологии, IEEE 802.11ax.

Для цитирования: Сергиенко М.В., Алпатов А.Н. Анализ применимости беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax в сценариях промышленного интернета вещей и умных складов // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 1. С. 127 – 140. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.01.P.127

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF IEEE 802.11AX WIRELESS NETWORKS IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS AND SMART WAREHOUSES SCENARIOS

Abstract. Industry 4.0 aims to fully digitalize production processes, and wireless technology plays a significant role in this process. Specifically, for applications such as smart warehouses where robots perform tasks and monitor their progress, modern standards and proprietary solutions must meet stringent industry requirements. One of the primary research goals in this area is to develop wireless systems that can efficiently transmit short data packets in multi-user settings. However, existing proposals and industrial channel models may not always satisfy these demands. To address this issue, the authors suggest optimizing the IEEE 802.11ax standard by utilizing OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). This optimization can create a highly efficient system for smart warehouses. This article presents a wireless solution for intelligent warehouses based on the IEEE 802.11ax standard, which has the potential to meet the requirements of Industry 4.0. The system includes optimization at two levels: the MAC (Medium Access Control) and PHY (Physical Layer).

Keywords: internet of things, industry, smart warehouse, communication, wireless technologies, IEEE 802.11ax.

For citation: Sergienko M.V., Alpatov A.N. (2025) Analysis of the applicability of IEEE 802.11ac wireless networks in industrial internet of things and smart warehouses scenarios. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 1. Pp. 127 – 140. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.01.P.127 (In Russian).

Введение

Одной из ключевых задач Индустрии 4.0 является полная автоматизация производственных процессов. Это означает, что на заводах проводная связь будет заменена беспроводными технологиями. Такой переход сулит множество преимуществ, включая снижение затрат, повышение производительности и улучшение безопасности для операторов. Прямое участие человека в производственных процессах фактически будет сведено к минимуму. Напротив, основные задачи работников будущих заводов будут связаны с удаленными операциями. Дистанционное управление позволяет руководителям контролировать несколько сетей одновременно для различных производственных процессов, что существенно снижает риск для оператора. Эти преимущества особенно заметны в обрабатывающей промышленности в процессе создания или производства товаров с использованием оборудования, рабочей силы, механизмов, инструментов, а также химических или биологических процессов. Для выполнения этих операций обычно требуется несколько типов помещений: механические мастерские, производственные цеха и склады. Каждое из этих пространств обладает своими уникальными особенностями, которые зависят от используемых строительных материалов, установленного оборудования, плотности его размещения и размеров зданий. В соответствии с требованиями Индустрии 4.0 для каждой из этих сред должны быть разработаны индивидуальные беспроводные системы, отвечающие ее специфическим требованиям.

Например, сценарии использования на этапе производства, безусловно, отличаются от тех, что применяются на этапе хранения. В связи с этим возникают различные задачи для

Анализ применимости беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax
в сценариях промышленного интернета вещей и умных складов

промышленных коммуникаций [1–5], где, как правило, требуется высокая надежность и низкая задержка для обмена данными между различными узлами. Традиционно средства связи, применяемые на производстве, можно разделить на три категории: 1) средства обеспечения безопасности, 2) каналы управления с разомкнутым контуром и 3) средства связи с замкнутым контуром [6]. Однако новые технологические тенденции открывают новые горизонты, а новые сценарии использования расширяют возможности беспроводного подключения к различным аспектам производственной деятельности.

Одной из таких тенденций является *автоматизация складских процессов*, известная как *умные склады*. В этих системах несколько роботов работают автономно, выполняя логистические задачи. Такие роботы обычно делятся на две категории: автономные управляемые транспортные средства (AGV) и автономные мобильные роботы (AMR). Одни из них представляют собой портативных роботов, которые следуют заданному маршруту, в то время как другие предназначены для перемещения материалов. Автономные мобильные роботы (AMR) обычно включают роботизированные манипуляторы, краны или приводы. Для обеспечения безопасного и эффективного взаимодействия между многочисленными роботами в режиме реального времени требуется специальная система управления роботами (URLLC), позволяющая избежать столкновений, предотвратить повреждение продуктов или оборудования и защитить людей [2].

Обычная беспроводная связь не подходит для этой задачи, так как коммерческие приложения не требуют такой высокой производительности, как в случаях автоматизации производства. За последнее десятилетие были разработаны оптимизированные версии стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 и 5G NR, которые позволяют использовать их для новых приложений. Эти оптимизации включают изменения на уровнях MAC и PHY. Однако в настоящее время эти решения лишь частично соответствуют требованиям автоматизации производства. Помимо технологических ограничений широко распространенных стандартов беспроводной связи существует еще одна проблема, связанная с особенностями промышленной среды: между точкой доступа и узлами существует множество препятствий, что затрудняет передачу сигнала. Избирательное затухание частоты и медленные изменения во времени в канале, характерные для этих моделей, делают детерминированную связь, основанную на разнесении во временной области, неэффективной [7]. Это особенно актуально, когда требуется несколько подключений между устройствами, как в случае с интеллектуальными складами.

Одним из решений для этого сценария может стать стандарт IEEE 802.11ax. Его преимущества заключаются в следующем:

- 1) в данном стандарте вводится использование технологии OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access);
- 2) по сравнению с предыдущими стандартами IEEE 802.11ax использует больше частотных поднесущих на канал.

Эти изменения направлены на поддержку многопользовательской связи в стандарте IEEE 802, позволяя подключать нескольких пользователей к одной передаче [8].

Также в работе [5] утверждается, что OFDMA обеспечивает низкую задержку при высокой плотности взаимосвязанных узлов в критических ситуациях. Кроме того, эта технология демонстрирует устойчивость к частотно-избирательным замираниям [9], что характерно для промышленных сред. OFDMA действительно способна работать с разне-

сением частот, что значительно повышает надежность в условиях, когда требуется высокая производительность.

В последние годы было предложено множество способов оптимизации OFDMA для стандартов IEEE 802.11. Например, для банков и иных организаций финансового сектора был разработан подход, известный как ах-SRPT, который основывается на планировщике 4G LTE. Этот метод разделяет узлы на подгруппы в зависимости от объема данных, которые каждый из них должен передать, и позволяет использовать сети более чем с 60 узлами. Однако в критических ситуациях данный метод демонстрирует более высокую задержку и не предлагает механизмов повторной передачи. Д. Лопес-Перес с соавторами [8] сравнили характеристики OFDMA в стандартах IEEE 802.11ax и IEEE 802.11be, моделируя промышленный сценарий. Хотя основное внимание в исследовании уделяется устаревшему стандарту IEEE 802.11ax, его сложность не позволяет напрямую применять его в критических ситуациях. Стандартный триггерный фрейм, используемый для планирования нисходящей и восходящей линии связи, увеличивает задержку.

Д.Г. Филозо с соавторами [9] предложили альтернативный подход, основанный на управлении мощностью и задержками. Они разработали алгоритм, который оптимизирует OFDMA, позволяя сети эффективно использовать ресурсы и обеспечивая меньшую задержку, представили планировщик восходящей линии связи для стандарта IEEE 802.11ax, который призван повысить эффективность распределения подканалов. Этот планировщик, основанный на контроллере с обратной связью, осуществляет назначения, учитывая объем данных и требования к качеству обслуживания каждого узла в восходящей линии связи. Однако задержка, необходимая для периода восходящей линии связи с участием 25 узлов, превышает 1 мс.

О. Сейджо и соавторы [5] предлагают W-SHARP для стандарта IEEE 802.11g/n в приложении автоматизации производства (FA), представляя детерминированное решение MAC-уровня OFDMA. Результаты показывают более низкие задержки по сравнению с суперкадром на основе стандарта IEEE 802.11ax. Однако в их работе не анализировались преимущества повторных передач частоты.

А. Айджаз [10] описывает виртуальный TDMA, обеспечивающий детерминированную связь по стандарту IEEE 802.11ax OFDMA. В их предложении предусмотрена дополнительная точка доступа (AP) для повышения эффективности в промышленных сценариях. Однако достигнутая задержка превышает 5 мс.

Предлагаемые варианты оптимизации OFDMA предлагают различные подходы к повышению производительности в соответствии со стандартами IEEE 802.11. Однако для решения сложных задач, возникающих в критических промышленных условиях, таких как сокращение задержек и повышение надежности, необходимы дальнейшие исследования.

Обзор беспроводных систем для сценариев умных складов

Промышленные коммуникации в производственной сфере традиционно делятся на три основные категории: системы безопасности, каналы управления с разомкнутым контуром и коммуникации с замкнутым контуром.

Каналы управления с разомкнутым контуром и коммуникации с замкнутым контуром из-за своей управляющей природы в настоящее время рассматриваются как критически важные. Эти две группы коммуникаций имеют схожие области применения, поскольку обе предназначены для управления устройствами и механизмами, участвующими в про-

Анализ применимости беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax
в сценариях промышленного интернета вещей и умных складов

изводственных процессах. Они считаются критически важными, так как должны предотвращать повреждение оборудования, прерывание производственных процессов и обеспечивать безопасность операторов.

Первая группа коммуникаций направлена на минимизацию любых рисков повреждения оборудования или прерывания производственного процесса, а также на обеспечение безопасности персонала. В этих случаях варианты использования требуют высокой производительности с точки зрения задержки, надежности и количества подключенных устройств. Вторая группа включает в себя операции мониторинга, которые по своей природе не связаны с рисками, описанными ранее. Таким образом, критически важные коммуникации охватывают множество сценариев использования, которые еще предстоит реализовать в будущих предложениях по беспроводным системам. Одним из таких примеров являются умные склады – привлекательная область для критически важных коммуникаций, где требуется высоконадежная связь между многочисленными устройствами, учитывая задержки в мс.

В научной литературе можно найти информацию о том, что современные предложения в области критически важных коммуникаций в основном базируются на широко известных стандартах IEEE 802.11 и 802.15.4, а также на стандарте 3GPP 5G NR.

5G NR – это стандарт сети радиодоступа (RAN) для мобильных сетей 5G, который был представлен в версии Rel-15 в 2017 году. 3GPP стремится расширить спектр сценариев, реализуемых в этих сетях, включая сверхнадежную связь с низкой задержкой (URLLC), что особенно актуально для промышленных сред. Однако в настоящее время суперкадровая структура 5G NR приводит к задержкам более мс, что может ограничивать ее применение для критически важных процессов, таких как обеспечение безопасности связи.

Семейства стандартов IEEE являются наиболее распространенными для промышленных беспроводных сетей (IWN). Среди них стоит выделить стандарт IEEE 802.15.4, который представляет собой набор стандартов, ориентированных на беспроводные персональные сети (WPAN). Эти стандарты предназначены для использования в условиях, когда требуется низкая скорость передачи данных, небольшая дальность действия и низкое энергопотребление. Стандарт 802.15.4 базируется на решениях Zig Bee, Wireless HART, ISA100.11a и WIA-FA. Эти решения обычно применяются в менее требовательных промышленных сценариях, таких как автоматизация процессов (PA) или мониторинг производственных процессов. Однако более высокие задержки и минимальный цикл передачи данных (около 10 мс) затрудняют адаптацию этих стандартов для критически важных коммуникаций на заводах. Новейшие системы на основе стандарта IEEE 802.11 обеспечивают приемлемую производительность с точки зрения задержки и надежности. Традиционно эти стандарты используют OFDM на физическом уровне (PHY) и не предназначены для передачи коротких пакетов. Тем не менее внедрение OFDMA в стандарт IEEE 802.11ax открыло двери для новых сфер применения, где требуется передача коротких пакетов. Благодаря OFDMA IEEE 802.11ax превосходит предыдущие версии IEEE 802.11 по задержке и количеству подключенных пользователей. Дальнейшие улучшения ожидаются с выходом нового стандарта IEEE 802.11be, который обеспечит расширенную полосу пропускания и многоканальную связь, что будет особенно полезно в перспективных промышленных сценариях [8]. В [9; 12] предлагаются решения с низкой задержкой, основанные на многоканальных операциях. Однако IEEE 802.11 имеет ограничения, когда речь заходит о детерминированной задержке.

Во-первых, он опирается на CSMA/CA – механизм доступа к среде, который не гарантирует детерминированности и затрудняет достижение сверхнизких задержек.

Во-вторых, на уровне РНУ присутствует большое количество преамбул, включая свойства, которые не относятся к теме, такие как ретросовместимость. В научной литературе можно найти множество рекомендаций по созданию оптимизированных версий протоколов на физическом (РНУ) и MAC (Media Access Control) уровне, которые соответствуют требованиям конкретных сценариев использования. Например, RT-WiFi [13], IsoMAC [14] и Priority MAC [15] применяют стандартизированный физический уровень IEEE 802.11 РНУ в сочетании с MAC-уровнем множественного доступа с разделением по времени (TDMA), что обеспечивает детерминизм. В отличие от них w-SHARP [5; 16] предлагает оптимизацию на обоих уровнях и демонстрирует многообещающую производительность с точки зрения надежности, задержки и синхронизации.

Еще одна интересная система – WirelessHP [4] – представляет собой автономную систему, основанную на стандарте IEEE 802.11 РНУ. Она использует оптимизированную преамбулу и методы кодирования каналов для обеспечения задержек менее 0,5 мс, однако по-прежнему существует необходимость решения чрезвычайно сложных задач, таких как создание интеллектуального склада. Это связано с тем, что такие задачи требуют одновременного обеспечения чрезвычайно высокой надежности и минимальных задержек, а также использования множества взаимосвязанных узлов с интервалом менее мс. В таких случаях необходимы новые исследования и технические решения.

Особенности сценариев умных складов с точки зрения систем передачи данных

Индустрия 4.0, активно развивающаяся в последние годы, требует автоматизации производственных процессов. Одним из направлений этой автоматизации является замена человеческих задач автоматизированными роботами. Примером такого подхода может служить внедрение автоматизированных грузовых транспортных средств (AGVs) и автоматизированных складских роботов (AMRs) для управления и мониторинга складских процессов. Эти роботы должны обмениваться информацией в режиме реального времени, чтобы обеспечить непрерывность и безопасность процессов. С одной стороны, AGVs и AMRs управляют всем логистическим процессом, помогая при необходимости перемещать оборудование со склада в производственные цеха. С другой стороны, безопасность играет важную роль во многих из этих сценариев.

Схема расположения складов состоит из двух различных зон: распределительной и складской. Распределительная зона предназначена для перемещения продукции из цехов в складскую зону. Для решения этой задачи необходимы различные инструменты: краны, автономные транспортные средства, устройства для очистки, сборочные линии и конвейерные ленты. Они будут использоваться для упаковки и транспортировки продуктов или материалов.

Складская зона – это место, где хранятся продукты. Она характеризуется высокой плотностью стеллажей и повышенной проходимостью. В этом пространстве для транспортировки и хранения используются AGV или AGV с AMR (автономные мобильные роботы). С учетом свойств среды полевых испытаний, описанных в [7], и информации из [3; 7], можно представить потенциальную складскую среду для данного варианта использования следующим образом. Здание имеет размеры 70 × 70 × 20 м, а в его стенах и потолках преобладают металлические конструкции. На глубине 5 м под полом также находятся ме-

Анализ применимости беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax
в сценариях промышленного интернета вещей и умных складов

таллические объекты, такие как трубопроводы, системы видеонаблюдения и освещения. Можно предположить, что предложенный сценарий будет использоваться для хранения металлических изделий, предназначенных для автомобильной промышленности. В зоне распределения не наблюдается высокой плотности металлических материалов, в отличие от условий хранения. Что касается конфигурации сети, то каждый робот оснащен необходимым оборудованием для сетевых коммуникаций. Кроме того, точки доступа расположены на определенной высоте, чтобы упростить видимость во время общения.

Для описания различий в характеристиках распространения сигнала в этой сети требуются различные модели каналов. Плотность металлических материалов может подтвердить эту гипотезу. С одной стороны, в зоне распространения не наблюдается высокой плотности металлических объектов, и она рассматривается как сценарий прямой видимости (LOS). С другой стороны, высокая плотность стеллажей, высота которых составляет около 10 м, нарушает прямую видимость между подключёнными узлами. В результате этот сценарий относится к сценарию отсутствия прямой видимости (NLOS).

Для выполнения складских задач необходимо взаимодействие роботов. Важно также учитывать риск нарушения производственного процесса или угрозы безопасности людей. В связи с этим сеть должна обеспечивать высокоточную связь. Для этой цели автономные транспортные средства и манипуляторы оснащены различными датчиками, которые собирают информацию о местоположении, наличии препятствий и людей, а также о состоянии запасов. Эти датчики могут получать данные с помощью камер или лазеров. Для предлагаемого приложения рекомендуется второй вариант.

Наконец, эти требования можно представить в виде ключевых показателей эффективности. Во-первых, для данного совместного сценария требуются сети с задержками не более 1 мс, как определено в [3]. Руководство ETSI [2] помогает определить плотность роботов, которая должна составлять 0,1 робота на квадратный метр. Таким образом, наличие 32 устройств среди AGV и AMR на складе является разумным в этом предложении. И, наконец, сеть должна быть способна управлять этими роботами и осуществлять мониторинг. Важным аспектом данного предложения является отсутствие в окружающей среде людей-операторов. В связи с этим частота ошибок менее 10^{-6} считается приемлемой для моделирования. Аналогичный вариант использования для сетей 5G был рассмотрен в [13], где указан диапазон задержек от 1 до 50 мс. Кроме того, в руководстве NIST [2] также рассматривается сопоставимый диапазон показателей задержки и надежности для связи между роботами, что еще раз подтверждает использование предлагаемого варианта.

Мотивация для строгих показателей эффективности заключается в уникальных характеристиках среды, которые охватывают две различные категории процессов: одна связана с автономными гусеничными транспортными средствами (AGVs), другая – с автоматизированными мобильными роботами (AMRs). В первом случае, хотя высокие требования к производительности могут быть не так важны, способность AMR справляться с тяжелыми задачами оправдывает установление жестких значений ключевых показателей эффективности, включая задержку, как подчеркивается в [2]. Одним из примеров сценария, где необходимость в высокой производительности становится очевидной, является дистанционное управление порталными системами, которые традиционно используются для транспортировки тяжелых грузов.

Производственные и складские площадки традиционно отличаются большим количеством неподвижных металлических деталей, а также наличием как неподвижных, так и движущихся механизмов. Эти элементы оказывают существенное влияние на распространение радиочастотного сигнала. Во-первых, время когерентности в таких условиях становится особенно длительным по сравнению со временем передачи символов в большинстве беспроводных устройств физического уровня (PHY). Во-вторых, возникают частотно-селективные замирания. Эти эффекты могут привести к медленному изменению времени работы промышленных каналов, что делает повторные передачи во временной области неэффективными [7; 12; 14].

В настоящее время количество моделей использования частотных каналов для промышленной сферы сокращается. Они считаются слишком обобщенными или устаревшими, поскольку были разработаны в 2000-х годах [12; 16]. Две наиболее часто используемые модели использования частотных каналов в промышленности, описанные в литературе, были разработаны в 2004 году в рамках исследований IEEE 802.15.4a. Модель SM7 описывает сценарии промышленных потерь, а модель SM8 учитывает взаимосвязь промышленных потерь с отсутствием прямой видимости (NLOS). Обе модели основаны на модели Салеха – Валенсуэлы. Основной проблемой этих моделей является их применимость к конкретным сценариям анализа. Их достоверность подтверждается только на расстоянии до 8 м. Но поскольку альтернативных вариантов нет, эти модели использования частотных каналов задействованы для анализа, представленного в данной статье.

Возникающая необходимость передачи различных типов информации является одним из движущих факторов развития IEEE 802.11ax. Этот стандарт направлен на устранение помех между устройствами, защиту от частотно-селективных замираний и обеспечение гетерогенных соединений с качественным обслуживанием. Среди важных нововведений можно выделить более высокие скорости передачи данных на поднесущую для каждого символа OFDM и OFDMA в целях многопользовательской связи. Первая особенность достигается за счет уменьшения расстояния между поднесущими. В предыдущих версиях стандарта IEEE 802.11 этот параметр был в четыре раза больше, чем в 802.11ax, что, в свою очередь, привело к увеличению длины символа OFDM в четыре раза.

Кроме того, OFDMA, как и иные стандарты 3GPP, обеспечивает реализацию многопользовательской связи. В стандарте IEEE 802.11ax OFDMA применяется для передачи коротких данных. Этот метод заключается в объединении соседних поднесущих, которые составляют канал, в ресурсные единицы (RUs), также известные как подканалы. В зависимости от требований сети группировка может быть неоднородной или однородной.

Благодаря высокой пропускной способности 160 МГц OFDMA позволяет отправлять короткие данные множеству пользователей без снижения скорости передачи [8; 17]. Чтобы решить проблемы синхронизации для восходящей линии связи, IEEE 802.11ax вводит триггерный кадр. Точка доступа отправляет это управляющее сообщение для координации связи по восходящей линии. Эти изменения увеличивают пропускную способность стандарта IEEE 802.11ax, позволяя подключать до 74 пользователей к каналу 160 МГц [16].

Предложения по использованию IEEE 802.11ax в сценариях умных складов

В данном разделе обсуждаются методы оптимизации, которые могут быть использованы в стандарте IEEE 802.11ax для достижения ключевых показателей эффективности,

Анализ применимости беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11ax
в сценариях промышленного интернета вещей и умных складов

определенных в предложенном сценарии умного склада. Все эти рекомендации основаны на глубоком анализе, который был проведен выше. Сначала необходимо кратко описать топологию сети, а затем подробно описать предложения, касающиеся физического и MAC-уровня.

В описанном сценарии сеть IEEE 802.11ax предназначена для отслеживания и управления множеством роботов, задействованных в складских процессах. Из-за строгих требований к задержке сеть была смоделирована в виде звездообразной топологии. Подобная инсталляция включает в себя несколько ключевых элементов. Для управления сетью используется пульт дистанционного управления. Он отвечает за настройку, мониторинг и контроль всей сети, а также отправляет информацию в точки доступа по протоколу Ethernet в режиме реального времени.

Точки беспроводного доступа координируют обмен данными между пультом дистанционного управления и остальными узлами (или STA), упорядочивая различные периоды, возникшие в суперкадре. Их основными функциями являются:

- запуск процесса передачи;
- передача данных пульту дистанционного управления;
- завершение процедуры передачи;
- оповещение о любом критическом событии пульту дистанционного управления.

Под критическими событиями понимаются обстоятельства, которые влияют на состояние процессов или препятствуют их выполнению. Точка доступа подключена к пульту дистанционного управления по проводным технологиям, в то время как связь с узлом осуществляется по беспроводной сети. Наконец, узлы, которые включают в себя датчики и аналогичные или эквивалентные устройства, отправляют диагностические данные и сигналы тревоги для остальной части сети и получают информацию о конфигурации, управлении и командах.

В большинстве стандартов линейки IEEE 802.11 форма сигнала на физическом уровне (PHY) включает в себя несколько типов символов OFDM. Среди них – преамбула, необходимая для обнаружения данных, и сообщения, содержащие саму информацию. Обычно длина преамбулы на физическом уровне составляет небольшую часть от общего времени, необходимого для передачи пакетов. Однако при передаче коротких пакетов ее накладные расходы могут быть значительными. Поэтому ее размер должен быть как можно меньше, чтобы обеспечить минимальные задержки. В стандарте IEEE 802.11ax преамбула состоит из двух частей. Первая часть обеспечивает обратную совместимость с предыдущими стандартами 802.11, структура которых похожа на IEEE 802.11a/g. Вторая часть реализует функциональность стандарта IEEE 802.11ax и может быть декодирована только устройствами стандарта IEEE 802.11ax. Кроме того, при оптимизации этой преамбулы необходимо учитывать относительно медленное изменение времени в промышленных каналах [4; 15]. В таких условиях прямая оценка канала от точки доступа не всегда необходима из-за медленных изменений в канале, поэтому ее можно измерить с помощью станции доступа (STA) в течение периода нисходящей линии связи (DL). Это позволяет сократить структуру преамбулы и, следовательно, уменьшить задержку. Данное предложение соответствует рекомендациям, высказанным в работах [4; 15]. Учитывая их, предлагаем оптимизировать преамбулы AX для более быстрой передачи данных в OFDMA.

В связи с этим рассмотрим различные формы сигналов, которые используются в расширенных преамбулах, необходимых для точки доступа. В частности, будет использоваться устаревшая преамбула, состоящая из L-STF и L-LTF, как это предусмотрено стандартом IEEE 802.11ax. Она служит для того, чтобы предоставить станциям (STA) необходимую информацию для оценки канала. Длительность обеих преамбул составляет 8 мс. Кроме того, для получения более детальной информации о пользователе будут включены два дополнительных символа. Оптимизированный HE-SIGNAL A определяет полосу пропускания и период кадра (для каналов передачи данных в нисходящем или восходящем направлении). В стандартном дизайне для этого требуется только один символ. Оптимизированный со временем HE-SIGNAL предоставляет информацию для декодирования и позволяет определить наличие или отсутствие повторных передач в течение периода кадра, также используя только один символ [14]. Эти оптимизированные версии имеют длительность 4 мс. Из-за того, что канал передачи изменяется медленно, сигнал STA становится короче. Преамбула этого сигнала должна содержать информацию об обнаружении только для точки доступа. Поэтому, учитывая стандарт IEEE 802.11ax, оптимальным решением является преамбула, состоящая исключительно из RL-SIG [6]. Каждому подканалу соответствует свой RL-SIG, что позволяет одновременно передавать данные по восходящей линии связи. Длительность RL-SIG составляет 4 мкс.

Требования к задержке, которые предъявляются к сценариям умных складов, не позволяют использовать традиционный MAC-уровень IEEE 802.11, основанный на CSMA/CA. В связи с этим в следующих предложениях используется концепция детерминированных передач, когда заранее определенный суперкадр включает периоды нисходящей и восходящей линии связи, включая повторные передачи. В описываемых далее методах OFDMA применяется для обеспечения двух схем повторной передачи, основанных на частотной области. Кроме того, чтобы синхронизировать устройства и поддерживать постоянное количество подключенных устройств в сети, узлы, которые не участвуют в активных коммуникациях, должны передавать диагностические данные.

Одним из ключевых преимуществ этого подхода является его способность вносить изменения в подканал точки доступа во время передачи данных. Эта функция значительно повышает надежность и адаптивность сети, позволяя ей соответствовать конкретным требованиям каждого варианта использования склада.

Метод оптимизации MAC-уровня № 1

MAC-уровень сочетает в себе свойства технологии доступа к среде TDMA, гарантируя детерминированную доставку кадров с периодическим перераспределением RU, что позволяет учитывать медленные изменения во времени в промышленных каналах. Каждый раз пульт дистанционного управления изменяет RUs для каждого STA, который предварительно установлен для конфигурации сети. τ определяется на основе свойств модели канала. Точка доступа получает идентификатор требуемых узлов с пульта дистанционного управления, который также определяет длину суперкадра. Связь инициализируется в течение периода ожидания. Здесь AP отправляет сообщения следующих типов: Start или Stop – для запуска и завершения процессов передачи, Alarm – в случае возникновения рисков и Report, получаемые STAs. Они также включают оценку канала. DL начинается с процедуры распределения ресурсов, где каждый узел связан с определенным RU. Каждые $\delta\tau$ происходит повторное присвоение RU. Этот параметр связан с параметрами

канала, такими как время когерентности. В частности, в этой работе модели каналов имеют время когерентности 30 мс, а повторное присвоение производится каждые 10 мс. Период заканчивается, когда от каждого узла будут получены подтверждения. В противном случае точка доступа изменит режим с DL на DL RTx. Остальные узлы, которым не требуется повторная передача, будут отправлять диагностические кадры данных в течение этого периода.

Метод оптимизации MAC-уровня № 2

Данный метод оптимизации MAC-уровня технологии IEEE 802.11ax подразумевает комбинирование методов детерминированной доставки кадров и перераспределения ресурсов в случае ошибочного обнаружения. Частотно-селективное замирание и медленное изменение времени канала позволяют рассматривать OFDMA как объединение нескольких функций. Каналы, изменяющиеся во времени, представляют собой ключевую концепцию, основанную на объединении лучших подканалов во время повторных передач. Устройства доступа к сети (STA) передают оценки канала в точку доступа в виде диагностических сообщений, также известных как отчеты о данных. Эти сообщения затем отправляются на пульт дистанционного управления, который служит базой данных, хранящей оценки канала для каждого STA, идентифицируемого по уникальному идентификатору. Точка доступа использует эту базу данных для переназначения каналов на основе следующего подхода: STA, требующие повторных передач, назначаются к лучшим подканалам, в то время как остальные устройства переназначаются на худшие. Процесс переназначения осуществляется в соответствии с идентификаторами персонала, которые могут быть как возрастающими, так и убывающими.

Схема функционирует следующим образом. Точка доступа получает идентификаторы требуемых узлов от пульта дистанционного управления, который также определяет длину суперкадра. Связь инициализируется в течение периода ожидания. В это время точка доступа отправляет сообщения нескольких типов:

- 1) сообщения Start и Stop отправляются индивидуально на устройства, участвующие в определенных процессах;
- 2) Alarm – сообщения используются для приостановки возможных операций в случае обнаружения устройствами опасного события;
- 3) Request for Data Report (запрос отчета о передаче данных) – результаты измерений, передаваемые для оценки качества канала. Следует отметить, что в каждом STA имеется множество датчиков для мониторинга и управления процессами.

Процесс передачи данных по нисходящей линии (DL) начинается с распределения ресурсов, при котором каждый узел получает свой собственный RU. Для обеспечения синхронности при передаче и повторной передаче данных в систему включается кадр радиомаяка. Если связь прерывается, точка доступа выполняет перераспределение ресурсов в течение периода повторной передачи (RTx). Этот период заканчивается только после получения подтверждения от узла, в противном случае точка доступа меняет режим с DL на DL-RTx. STA, которые не нуждаются в повторной передаче, отправляют кадры диагностических данных в новых RU.

Процесс передачи данных по восходящей линии (UL) иницируется триггерным кадром, который точка доступа отправляет к задействованным узлам. В этой части процесса узлы могут отправлять сообщения трех типов:

- 1) DataReports, содержащие оценку качества канала или результаты измерений;
- 2) сигналы о завершении процесса;
- 3) сообщения Alarm, если автоматизированные системы (AGV) или устройства (ARM) обнаруживают какое-либо опасное событие.

Период UL завершается, когда точка доступа получает данные. Если этого не происходит, точка доступа переходит в режим UL-RTx. В данном режиме узлы, которые не нужны в повторной передаче, отправляют кадры диагностических данных в новых RU.

Заключение

В данной статье предлагается оптимизация стандарта IEEE 802.11ax с учетом его потенциального использования для управления автоматизированными грузовыми автомобилями (AGV) и автоматизированными мобильными роботами (AMR) в процессе хранения на интеллектуальных складах. Связь в условиях, характерных для таких сценариев, должна обеспечивать низкую задержку и высокую надежность. Это необходимо, чтобы избежать прерывания производственного процесса и связанных с этим рисков для безопасности товаров и людей. Возможности OFDMA, представленные в этом стандарте, могут быть полезны для решения задач проектирования беспроводных систем, предназначенных для автоматизации производства. С одной стороны, некоторые варианты использования требуют высокой эффективности, которой сложно достичь с помощью существующих решений; с другой – модели промышленных каналов существенно снижают производительность этих систем. В стандарте IEEE 802.11ax, в отличие от предыдущих версий стандарта, увеличено количество поднесущих. Это позволяет повысить эффективность многопользовательской связи и, возможно, решить проблему частотно-селективно-го замирания, характерного для промышленных каналов.

В данной работе предлагается оптимизация для двух уровней: MAC и PHY. На уровне MAC для уменьшения задержек разработаны две детерминированные схемы. Кроме того, чтобы обеспечить надежность, в этом подходе предложены схемы повторной передачи в частотной области, которые демонстрируют улучшенную производительность по сравнению с традиционным методом TDMA в промышленной связи. Первая методология заключается в периодическом перераспределении ресурсов (RU). Второй вариант, в случае возникновения ошибки, предлагает перераспределить RUs для каждого ошибочного пакета с точки зрения канала, что обеспечивает наилучшую надежность. Предложенные оптимизации для стандарта IEEE 802.11ax открывают новые горизонты для промышленных коммуникаций, особенно в контексте URLLC и многопользовательских сценариев, таких как использование на умных складах.

Литература / References

1. Oyekanlu E.A., Smith A.C., Thomas W.P., G Mulroy, Hitesh D., Ramsey M., Kuhn D.J., Mcghinnis J.D., Buonavita S.C., Looper N.A., Ng M., Ng'oma A., Liu W., McBride P.G., Shultz M.G., Cerasi C., Sun D. (2020) A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications. In: *IEEE Access*. Vol. 8. Pp. 202312–202353. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035729>
2. Montgomery K., Candell R., Liu Y., Hany M. (2019) *Wireless User Requirements for the Factory Workcell*. NIST Advanced Manufacturing Series 300-8. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology. 22 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.AMS.300-8>

3. Aijaz A., Sooriyabandara M. (2019) The tactile Internet for industries: A review. In: *Proceedings of the IEEE*. Vol. 107. No. 2. Pp. 414–435. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2018.2878265>
4. Luvisotto M., Pang Z., Dzung D., Zhan M., Jiang X. (2017) Physical layer design of high-performance wireless transmission for critical control applications. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 13. No. 6. Pp. 2844–2854. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2017.2703116>
5. Seijo O., Lopez-Fernandez J.A., Val I. (2021) w-SHARP: Implementation of a high-performance wireless time-sensitive network for low latency and ultra-low cycle time industrial applications. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 17. No. 5. Pp. 3651–3662. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2020.3007323>
6. Fanari L., Iradier E., Bilbao I., Cabrera R., Montalban J., Angueira P., Seijo O., Val I. (2022) A survey on FEC techniques for industrial wireless communications. In: *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. Vol. 3. Pp. 674–699. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/OJIES.2022.3219607>
7. Montalban J., Iradier E., Angueira P., Seijo O., Val I. (2020) NOMA-based 802.11n for industrial automation. In: *IEEE Access*. Vol. 8. Pp. 168546–168557. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023275>
8. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. (2019) IEEE 802.11be extremely high throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax. In: *IEEE Communications Magazine*. Vol. 57. No. 9. Pp. 113–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>
9. Filoso D.G., Kubo R., Hara K., Tamaki S., Minami K., Tsuji K. (2020) Proportional-based resource allocation control with QoS adaptation for IEEE 802.11ax. In: *ICC 2020 – 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, June 07–11, 2020 ICC. Pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149111>
10. Aijaz A. (2020) High-performance industrial wireless: Achieving reliable and deterministic connectivity over IEEE 802.11 WLANs. In: *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. Vol. 1. Pp. 28–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/OJIES.2020.2983259>
11. Perez-Ramirez J., Seijo O., Val I. (2022) Time-critical IoT applications enabled by Wi-Fi 6 and beyond. In: *IEEE Internet of Things Magazine*. Vol. 5. No. 3. Pp. 44–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IOTM.001.2200083>
12. Sachs J., Wikstrom G., Dudda T., Baldemair R., Kittichokechai K. (2018) 5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication. In: *IEEE Network*. Vol. 32. No. 2. Pp. 24–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2018.1700232>
13. Carrascosa M., Geraci G., Knightly E., Bellalta B. (2022) An experimental study of latency for IEEE 802.11be multi-link operation. In: *ICC 2022 – IEEE International Conference on Communications*. Pp. 2507–2512, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838765>
14. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., Long Y., Guo Y. (2020) IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 22. No. 4. Pp. 2136–2166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2020.3012715>
15. Lacalle G., Val I., Seijo O., Mendicute M., Cavalcanti D., Perez-Ramirez J. (2021) Analysis of latency and reliability improvement with multi-link operation over 802.11. In: *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Palma de Mallorca, Spain, July 21–23, 2021. Pp. 1–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/INDIN45523.2021.9557495>
16. Wheeler A. (2007) Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee. In: *IEEE Communications Magazine*. Vol. 45. No. 4. Pp. 70–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2007.343615>

Вестник Российского нового университета

Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление», выпуск 1 за 2025 год

17. Iradier E., Fanari L., Bilbao I., Montalban J., Angueira P., Seijo O., Val I. (2021) Analysis of NOMA-based retransmission schemes for factory automation applications. In: *IEEE Access*. Vol. 9. Pp. 29541–29554. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059069>

Поступила в редакцию: 29.01.2025

Received: 29.01.2025

Поступила после рецензирования: 18.02.2025

Revised: 18.02.2025

Принята к публикации: 04.03.2025

Accepted: 04.03.2025