

ОСОБЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТОВ WIA И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Писецкий Ю.В

Вотинов К.А

Йулдошев Ж.Ф

*Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада
Ал-Хоразмий, Ташкент*

yuriy.pisetskiy@mail.ru ; votinovkirill@gmail.com ; jalol2122@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются особенности семейства стандартов беспроводных промышленных сетей управления WIA, включающего WIA-PA, WIA-FA и WIA-NR. Проведён анализ системных архитектур, стеков протоколов и ключевых технических решений каждого стандарта. Представлены сравнительные показатели производительности и области практического применения. Обсуждается концепция гетерогенной иерархической архитектуры будущих промышленных беспроводных сетей, а также пять ключевых технических вызовов, требующих решения в эпоху 6G: гетерогенная интерконнекция, гармоничное сосуществование в спектре, энергоэффективность, абсолютная временная синхронизация и многоприоритетное планирование.

Ключевые слова: промышленные беспроводные сети управления, WIA, URLLC, 5G, 6G, промышленная автоматизация, беспроводное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленная автоматизация формирует устойчивый запрос на беспроводные решения, отвечающие жёстким требованиям по надёжности, временной детерминированности, малой задержке и информационной безопасности [1, 2]. Промышленные беспроводные сети управления (ПБСУ) позволяют повысить производительность, сократить эксплуатационные расходы и обеспечить переход к интеллектуальному производству. В ответ на эти запросы Международной электротехнической комиссией (МЭК) разработаны и стандартизированы четыре международных протокола: WirelessHART, ISA100.11a, WIA-PA для автоматизации технологических процессов и WIA-FA для заводской автоматизации [7].

Параллельно 3GPP в рамках концепции 5G определил сценарий сверхнадёжной связи с малой задержкой (URLLC) как ключевой инструмент для промышленного управления [1]. Тем не менее практическое внедрение 5G URLLC в промышленности сопряжено с рядом ограничений: большинство

предприятий не располагает лицензиями на спектр, а реализация URLLC в нелицензируемом диапазоне по-прежнему остаётся одной из наиболее актуальных технических задач [3]. Для решения данной проблемы был разработан стандарт WIA-NR, основанный на воздушном интерфейсе 5G и обеспечивающий URLLC в нелицензируемом спектре [3]. Совместно WIA-PA, WIA-FA и WIA-NR образуют полное семейство стандартов WIA, охватывающее весь спектр требований промышленной автоматизации и продолжающее развиваться в направлении 6G.

АРХИТЕКТУРА И СТЕК ПРОТОКОЛОВ СЕМЕЙСТВА WIA

Семейство WIA объединяет несколько классов физических устройств: хост-компьютер, шлюзовое и полевое устройство, портативный терминал, а также маршрутизирующие устройства, устройства доступа и базовые станции [1]. На основе данных компонентов каждый из стандартов формирует собственную топологию сети. WIA-PA использует звездообразную или иерархическую звездно-ячеистую топологию. WIA-FA применяет резервированную звездообразную топологию, обеспечивающую высокую отказоустойчивость. WIA-NR определяет иерархическую звездообразную топологию с поддержкой связи устройство-устройство (D2D) и координированной многоточечной передачи данных (CoMP) [1].

Управление сетью реализуется через централизованную либо гибридную (централизованную и распределённую) архитектуру. WIA-PA поддерживает обе модели, WIA-FA ориентирована на централизованное управление, тогда как WIA-NR использует гибридную модель [1]. Стеки протоколов всех трёх стандартов построены на основе модели OSI. Принципиальным отличием является выбор физического уровня: WIA-PA и WIA-FA работают в диапазоне 2,4 ГГц на основе IEEE 802.15.4 и IEEE 802.11 соответственно, тогда как WIA-NR задействует диапазон 5 ГГц и использует PHY, MAC и уровень управления радиолинком стандарта 5G. Во всех стандартах применяется механизм прослушивания перед передачей (LBT) для соответствия правилам нелицензируемого спектра [1, 3]. Основные параметры физического уровня представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные параметры физического уровня (PHY) семейства WIA [1, 3, 4]

Параметр	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Спектр	2,4 ГГц	2,4 ГГц	5 ГГц
Полоса (МГц)	5	20, 40	20, 40, 80, 100, 120, 140, 160
Режим передачи	DSSS	DSSS, FHSS, OFDM, CCK, PBCC	OFDM

Параметр	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Модуляция	O-QPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Макс. скорость	250 кбит/с	54 Мбит/с	100 Мбит/с
Антенны	Одиночная	Одиночная	Антенные решётки MIMO

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Временной слот служит базовой единицей обмена пакетами во всех стандартах WIA: его длина конфигурируется, а слоты циклически объединяются в суперкадры или кадры [1]. В WIA-PA суперкадр строится на основе маяка (beacon) IEEE 802.15.4 и включает активный период с зонами конкурентного и бесконкурентного доступа, а также неактивный период для внутри- и межкластерного обмена. WIA-FA формирует суперкадр из маячных, восходящих разделяемых и нисходящих тайм-слотов. WIA-NR задействует гибкую нумерологию 5G: при межнесущем интервале $2\mu \times 15$ кГц длина кадра фиксируется на уровне 10 мс и может включать нисходящие, восходящие, самодостаточные и гибкие слоты с длительностью вплоть до 0,0625 мс [1].

Многоканальный доступ с адаптивным скачкообразным изменением частоты применяется во всех трёх стандартах для повышения пропускной способности и помехоустойчивости. WIA-PA сочетает МДЧР с МДВР и поддерживает три схемы перестройки частоты: адаптивное переключение, адаптивное скачкообразное изменение и тайм-слотное скачкообразное изменение частоты [1]. WIA-FA организует параллельный доступ через несколько устройств по разным каналам (МДЧР). WIA-NR оснащает базовые станции антенными решётками MIMO, применяет CoMP и реализует трёхуровневое адаптивное скачкообразное изменение частоты на уровнях слота, подкадра и кадра. Для снижения трафика и повышения энергоэффективности в стеках протоколов реализована агрегация данных: двухуровневая в WIA-PA (сетевой уровень и уровень приложений), агрегация кадров в WIA-FA и двухуровневая агрегация для восходящей и нисходящей передачи в WIA-NR [1].

Планирование передачи данных в семействе WIA учитывает их приоритеты, определяемые требованиями конкретных промышленных приложений. WIA-PA определяет три режима коммуникации: клиент/сервер (C/S) для динамических аperiodических данных без жёстких требований к реальному времени, издатель/подписчик (P/S) для периодических данных реального времени с

поддержкой многоадресной рассылки и источник/приёмник отчётов (R/S) для аperiodических данных, включая аварийные сигналы и события [1].

ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ К 6G

За годы стандартизации и апробации семейство WIA продемонстрировало последовательное повышение ключевых показателей производительности [1, 3, 4]. WIA-PA как наиболее зрелый стандарт обеспечивает надёжность свыше 99,3% при задержке менее 100 мс и поддерживает сети до 1000 узлов; применяя многоисточниковую синхронизацию высокой точности, время доступа удаётся сократить с 1 с до 10 мс для замкнутых систем управления [1]. WIA-FA достигает надёжности свыше 99,99% при задержке менее 10 мс и скорости 54 Мбит/с, что удовлетворяет требованиям управления в дискретном производстве, включая мониторинг роботов и управление автоматизированными транспортными средствами (AGV) [4]. WIA-NR по результатам системных симуляций и стендовых испытаний подтверждает надёжность свыше 99,999% при задержке менее 1 мс, что соответствует базовым целевым показателям 5G и достаточно для поддержки управления движением [3]. Хронология эволюции семейства WIA отражена на рисунке 1, а сравнительные показатели систематизированы в таблице 2.

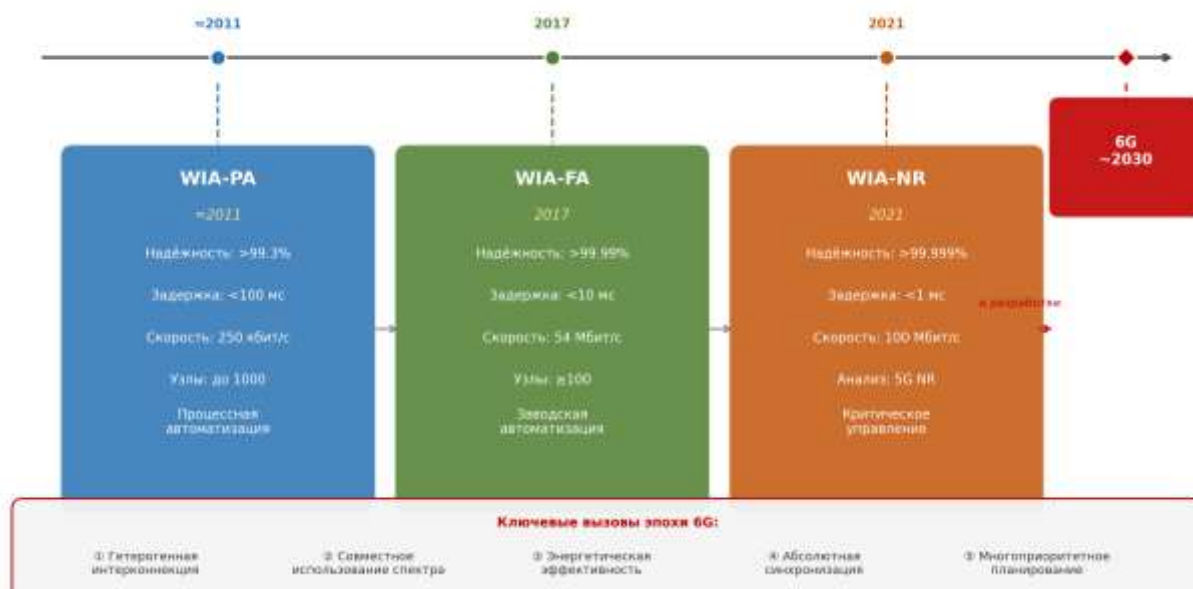


Рис. 1. Эволюция семейства стандартов WIA и ключевые вызовы эпохи 6G.

Таблица 2

Показатели производительности и области применения семейства WIA [1, 3, 4]

Параметр	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Надёжность	>99,3%	>99,99%	>99,999%
Задержка (мс)	<100	<10	<1
Макс. скорость	250 кбит/с	54 Мбит/с	100 Мбит/с
Масштаб (узлы)	до 1000	≥100	в разработке
Статус	Коммерческое внедрение	Тестирование и расширение	Разработка и испытания
Области применения	Нефтяная, нефтехимическая, металлургия, энергетика	Роботизированные мастерские, логистические сортировочные системы	Критическое управление движением, микронанопозиционирование

Ни один из существующих стандартов промышленной беспроводной связи не охватывает в полной мере весь спектр требований промышленной автоматизации [1, 7]. В долгосрочной перспективе предлагается гетерогенная иерархическая архитектура будущих ПБСУ: WIA-NR обеспечивает крупногранированное покрытие завода и канал связи с системами планирования ресурсов предприятия (ERP) через магистральную сеть, тогда как WIA-PA и промышленный Ethernet сохраняют роль мелкозернистого покрытия на уровне производственной площадки [1]. WIA-NR берёт на себя функцию критического промышленного управления, а энергоэффективный WIA-PA продолжает обеспечивать крупномасштабный мониторинг и измерения.

Реализация данной архитектуры в эпоху 6G сопряжена с пятью ключевыми вызовами [1, 5, 6]. Гетерогенная интерконнекция требует разработки механизмов адаптации сотен существующих промышленных протоколов с временными гарантиями при шлюзовом преобразовании. Гармоничное сосуществование в нелицензируемом спектре предполагает применение технологий интеллектуального радио с когнитивными возможностями для надёжной совместной работы с WiFi и другими системами. Повышение энергоэффективности предусматривает интеграцию сбора энергии из окружающей среды и симбиотического радио как ключевых технологий 6G [5]. Абсолютная временная синхронизация с минимальным джиттером критически важна для изохронной кооперации промышленных роботов. Наконец,

многоприоритетное совместное планирование для гетерогенных сетей потребует разработки алгоритмов планирования смешанной критичности (mixed-criticality scheduling) и унификации схем приоритетов [1, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Семейство стандартов WIA представляет собой завершённую технологическую платформу для ПБСУ, охватывающую задачи от крупномасштабного мониторинга технологических процессов (WIA-PA) до детерминированного управления в реальном времени (WIA-FA) и сверхнадёжной связи с малой задержкой (WIA-NR). Последовательная эволюция стандартов отражает нарастание требований промышленной автоматизации: от надёжности 99,3% и задержки 100 мс у WIA-PA до надёжности 99,999% и задержки менее 1 мс у WIA-NR [1, 3, 4].

Переход к 6G открывает перспективы дальнейшего повышения производительности ПБСУ: задержка воздушного интерфейса должна составить менее 0,1 мс при надёжности не ниже 99,9999999% [5, 6]. Достижение этих целей потребует решения пяти технических задач, рассмотренных в настоящей работе. Приоритетным направлением остаётся разработка гетерогенной иерархической архитектуры, в которой WIA-NR обеспечит критическое управление, а WIA-PA сохранит роль энергоэффективной сети мониторинга [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Yu, H.; Zeng, P.; Xu, C. Industrial Wireless Control Networks: From WIA to the Future. *Engineering* 2022, 8, 18–24. DOI: 10.1016/j.eng.2021.06.024.

[2] Wollschlaeger, M.; Sauter, T.; Jasperneite, J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 2017, 11(1), 17–27. DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104.

[3] Xu, C.; Zeng, P.; Yu, H.; Jin, X.; Xia, C. WIA-NR: Ultra-Reliable Low-Latency Communication for Industrial Wireless Control Networks over Unlicensed Bands. *IEEE Network* 2021, 35(1), 258–265. DOI: 10.1109/MNET.011.2000286.

[4] Liang, W.; Zheng, M.; Zhang, J.; Shi, H.; Yu, H.; Yang, Y. et al. WIA-FA and its applications to digital factory: a wireless network solution for factory automation. *Proceedings of the IEEE* 2019, 107(6), 1053–1073. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2905620.

[5] Saad, W.; Bennis, M.; Chen, M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network* 2020, 34(3), 134–142. DOI: 10.1109/MNET.001.1900287.

[6] Dang, S.; Amin, O.; Shihada, B.; Alouini, M.S. What should 6G be? *Nature Electronics* 2020, 3(1), 20–29. DOI: 10.1038/s41928-019-0355-6.



[7] Huang, V.K.L.; Pang, Z.; Chen, C.J.A.; Tsang, K.F. New trends in the practical deployment of industrial wireless: from noncritical to critical use cases. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 2018, 12(2), 50–58. DOI: 10.1109/MIE.2018.2825480.