

Карнаух Д. М.

Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

Тягунова М. Ю.

Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

Киричек Г. Г.

Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ТА МОЖЛИВОСТІ ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ «ІОТ»

У даній статті досліджується існуюча ситуація з роботою електронних пристроїв в бездротових телекомунікаційних мережах в умовах великої кількості перешкод в щільних міських агломераціях, промислових парках, висвітлення актуальних потреб суспільства в цій сфері, аналізу нових технічних можливостей для розвитку систем, які використовують бездротові пристрої системи «Інтернет речей» (IoT), а також потенціал для розвитку бездротової комунікації у міській та промисловій інфраструктурі. Пошук оптимальних рішень щодо надійного зв'язку між багатьма пристроями, що працюють у середовищі з промисловими завадами має вирішальне значення для безпечного та ефективного регулювання міського трафіку, забезпечення ефективної промислової автоматизації. Впроваджуючи гнучкі інтелектуальні рішення, що використовують бездротові пристрої, міста можуть підвищити безпеку, зменшити дорожні затори та затримки, покращити загальний трафік, зменшити обсяги шкідливих викидів, що призведе до економії коштів, підвищення якості життя жителів сучасних міст. Дослідження базується на детальному аналізі стандарту IEEE 802.11be для визначення ефективності, надійності та продуктивності бездротових телекомунікаційних мереж, що працюють у промислових умовах. Дослідження вивчає такі технології, як багатоканальні операції, множинний доступ з ортогональним частотним поділом, QAM модуляція тощо. У роботі розглянуто можливості підвищення стійкості до перешкод та зменшення впливу завад для бездротових телекомунікаційних мереж під впливом природних і техногенних факторів нестабільності. Показано, що використання можливостей стандарту IEEE 802.11be дозволяє досягти високої пропускну здатності каналів зв'язку з мінімальними мережевими затримками. Пристрої можуть використовувати всі доступні частотні ресурси в діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц, автоматично використовуючи канали без перешкод. Проаналізовано вплив конфігурації режиму роботи мережеских пристроїв стандарту IEEE 802.11be (Multi-Link Operations, Frame aggregation, QAM modulation) на пропуску здатність каналів зв'язку. У дослідженні підкреслюється перспективність використання багатоканальних режимів роботи з кількома частотними діапазонами одночасно. Результати дослідження можна використати для розробки надійних систем із використанням багатьох бездротових пристроїв Інтернету речей у місцях, де може бути високий рівень промислових перешкод за допомогою багатоканальних операцій, збільшення кількості просторових потоків і покращених методів управління якістю обслуговування (QoS) за новим стандартом IEEE 802.11be.

Ключові слова: бездротові мережі, перешкодозахищеність, інтелектуальні системи, трафік, IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, модуляція, багатоканальна робота.

Постановка проблеми. У сучасних містах використовуються складні інфраструктурні рішення, які містять велику кількість електронних пристроїв, датчиків та інших елементів системи «Інтернет речей», об'єднаних в мережу. Наприклад, актуальною є проблема оптимізації міського трафіку [1–2], адаптивного регулювання дорожнього руху на перехрестях з використанням новітніх підходів, пов'язаних із засто-

суванням штучного інтелекту [3]. Вирішення цього питання потребує застосування широкого спектру електронних пристроїв: камер, сенсорів тощо, що збільшує точність оцінки ситуації, забезпечує надійність та сприяє ефективному функціонуванню міських транспортних мереж. Використання дротових з'єднань стає все більш обтяжливим та значно збільшує вартість підтримки системи. Застосування бездротових мереж

передачі даних усуває ці обмеження, але вимагає забезпечення надійності, стійкості до перешкод та високої швидкості передачі даних в умовах великої кількості завад, що властиві промисловим зонам, густонаселеним міським районам та при змінних погодних умовах.

Основними перевагами бездротових телекомунікаційних мереж системи IoT є:

- мобільність пристроїв зв'язку;
- гнучкість архітектури;
- легкість розширення системи;
- зниження витрат на технічне обслуговування системи.

Однак неоднорідність середовища передавання даних спричиняє труднощі в забезпеченні якості зв'язку (високої достовірності передавання інформації), здебільшого через перешкоди в радіоканалі, що знижує безпеку й ефективність функціонування всієї системи. У загальному випадку стійкість до перешкод каналу передачі – це здатність мережі розпізнавати і відновлювати сигнали з певним ступенем надійності в присутності перешкод.

У зв'язку з цим під час проєктування систем бездротового зв'язку актуальним завданням є підвищення завадостійкості та зниження впливу радіоперешкод на якість приймання/передавання в умовах впливу природних і техногенних чинників нестабільності. Наприклад, навіть короточасна втрата чи суттєве спотворення даних у процесах управління складними дорожніми потоками є неприйнятним з погляду виконання вимог стійкості та безпеки системи. А випадання одного або більше пристроїв із системи через ненадійність каналів зв'язку знижує ефективність роботи всієї системи, а у великих масштабах може призвести до перебоїв роботи всього «розумного міста».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення перешкодостійкості радіоканалів зв'язку є актуальною науково-технічною проблемою при побудові цифрових мереж електронного зв'язку. В міських умовах особливо потрібні методи завадостійкої телекомунікації для невеликих відстаней. Ідеальна телекомунікаційна мережа має бути здатна впоратися з будь-якими можливими змінами в розподілі. Телекомунікаційна система повинна ефективно долати короткострокові, довгострокові та високоінтенсивні перешкоди. Не зменшуючи швидкість каналу передачі даних до заданого мінімуму і маючи мінімальні компенсації затримки мережі. Короточасні перешкоди зв'язку перешкоди вже досить давно успішно компенсуються за допомогою спеціальних алгоритмів

кодування (кодування з корекцією помилок), які роблять сигнал менш сприйнятливим до шумів, перешкод і завмирань. Ці методи використовують надлишкове кодування даних для виправлення помилок, спричинених перешкодами, без повторної передачі даних [4–5].

Переваги їх використання:

- зменшується необхідність повторної передачі;
- приймач може виявляти наявність помилок і інформувати передавачу;
- низька вартість: досягається за рахунок програмної реалізації.

У разі ж потужного і тривалого джерела перешкод завадостійке кодування вже не може забезпечити стабільність каналу зв'язку, потрібно додаткове використання інших рішень, наприклад, таких, як:

- режим програмної перебудови робочої частоти у діапазоні виділених частот (Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS));
- збільшення ширини спектру частотного сигналу (Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS));
- використання багатопробного поширення (Multiple Input Multiple Output (MIMO));
- формування діаграми спрямованості (Beamforming) – різновид MIMO: формує діаграму спрямованості багатоеlementної антени MIMO в напрямку до приймача на підставі інформації про стан каналу між передавачем та приймачем. Спрямованість формується таким чином, щоб було мінімальне випромінювання у напрямі зон покриття сусідніх точок доступу, щоб мінімізувати взаємні перешкоди. Система може регулювати діаграму спрямованості антени в режимі реального часу. Покращує рівень та якість сигналу;
- технологія ортогонального частотного мультиплексування (Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)).

При використанні FHSS система працює з перебудовою робочої частоти за певним алгоритмом, відомим приймачем і передавачем. Це зменшує вплив перешкод. Перевага цього методу полягає в тому, що його легко реалізувати, недолік – затримка потоку даних при зміні частоти. У разі сильних широкосмугових і динамічних перешкод виникають труднощі зі швидкістю узгодження частот зв'язку і надійністю потоків даних, що обробляються в режимі реального часу.

Технологія DSSS дозволяє розподіляти сигнал ширшою смугою частот за допомогою спеціальної кодової послідовності.

DSSS краще справляється з вузькосмуговими перешкодами, а FHSS ефективна проти широкосмугових та випадкових перешкод [6].

Технологія MIMO включає в себе системи, які використовують кілька антен як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Це дозволяє передавати різні потоки даних одночасно по декількох каналах і ефективно використовувати багатопроменеве поширення, що підвищує стійкість до перешкод, якість передачі даних, швидкість каналу зв'язку [7–8]. Технологія MIMO використовується у більшості сучасних бездротових систем, таких як Wi-Fi, 4G LTE і 5G, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і стабільність зв'язку, що особливо важливо в умовах щільної міської забудови та обмеженого спектру. Сучасна тенденція – збільшення кількості антен.

Розбиття сигналу на кілька піднесучих (OFDM) зменшує вплив перешкод на кожен піднесучий і підвищує загальну стабільність з'єднання. Ортогональність піднесучих дає змогу уникнути інтерференції (перехресних перешкод) між ними [9]. Системи OFDM можуть використовувати динамічний розподіл потужності між піднесучими, виділяючи більше потужності на піднесучі, найчутливіші до перешкод, і пригнічуючи піднесучі, менш чутливі до перешкод. Це сприяє більш рівномірному розподілу помилок і підвищує загальну ефективність системи [10].

Ці методи можуть використовуватися окремо або в комбінації для підвищення рівня захисту радіосигналів від перешкод.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження можливостей комплексу нових функцій стандарту IEEE 802.11be як простого та ефективного інтегрованого рішення для забезпечення стабільної та надійної роботи електронних пристроїв у бездротових телекомунікаційних мережах за наявності недетермінованих індустриальних радіоперешкод. Для досягнення завадостійкого бездротового зв'язку перспективним є використання інтелектуальних систем, здатних аналізувати інформацію про навколишній радіопростір і якість зв'язку, прогнозувати зміни параметрів каналу зв'язку та динамічно адаптувати параметри до змін середовища поширення радіохвиль, завад і завантаження частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу. Технологія Wi-Fi відіграє важливу роль у бездротовому зв'язку між датчиками та пристроями, наприклад, в «Інтернеті речей» і промисловій автоматизації. Так, реалізація надійних рішень для інтелекту-

ального керування рухом на перехрестях за допомогою нейронних мереж вимагає оброблення в реальному часі відео з камер з високою роздільною здатністю і високою швидкістю передачі даних. Для цього необхідні канали зв'язку з високою пропускнуною спроможністю і низькі затримки під час передачі даних. Відеотрафік є одним з основних компонентів трафіку Wi-Fi, і тенденція до збільшення вимог до пропускнуої здатності буде актуальною ще довгий час [11–12].

Цікавими є рішення, запропоновані новим стандартом IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) для бездротових локальних мереж. Щоб забезпечити підтримку максимальної пропускнуої здатності щонайменше 30 Гбіт/с, у стандарті визначено нові режими керування доступом до середовища (MAC) і фізичного рівня (PHY) [13].

Особливості, які привертають найбільшу увагу у IEEE 802.11be:

- додана смуга частот 6 ГГц, яка менш завантажена, ніж діапазони 2,4 ГГц і 5 ГГц, що знижує рівень перешкод від наявного обладнання та зовнішніх джерел шуму;
- смуга пропускання розширена до 320 МГц;
- модуляція 4096-QAM (в попередньому стандарті 802.11ax використовується 1024-QAM) – дає змогу збільшити швидкість передавання даних на 20 %, але підвищує вимоги до співвідношення сигнал/шум у каналі [11];
- множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) – підвищує ефективність використання частот, дозволяючи декільком клієнтам спільно використовувати ресурси каналу [15];
- система багатопроменевого поширення (MIMO) розширена до 16 потоків, що дозволить ефективніше уникати колізій [12], [16–18];
- підвищення стійкості до помилок і покращення загального відношення сигнал/шум каналу зв'язку завдяки технології гібридного автоматичного запиту (Hybrid automatic repeat request (HARQ)), яка дозволяє об'єднувати пакети даних із кількох спроб передачі, передавач може адаптуватись під якість каналу міняючи модуляцію та керуючи швидкістю передачі даних [12], [14], [16–17];
- за рахунок дводіапазонного дуплексу (FD) забезпечується оптимізація використання частотного спектру, збільшення пропускнуої здатності, зниження затримок та кількості колізій [15];
- багатоканальна робота (Multi-Link Operations (MLO)) – одна з ключових функцій нового стандарту: можливість передавання і при-

ймання одного й того самого потоку даних кількома радіоінтерфейсами, використовуючи всі доступні частотні ресурси в діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц.

У попередніх поколіннях Wi-Fi пристрій міг використовувати кілька радіоканалів одночасно, проте кожний радіоканал працював незалежно. Основна відмінність нового стандарту полягає у об'єднанні частотних діапазонів 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц в єдиний пул з безшовним використанням всього діапазону. Це дає змогу уникнути затримок, спричинених нестабільним з'єднанням і зовнішніми перешкодами [14–17]. У стандарті 802.11be всі з'єднання є багатоканальними з декількома фізичними радіоінтерфейсами, але тільки з однією MAC-адресою. Технологія включає логіку для розподілу даних по окремих радіоканалах у міру необхідності та управління їх потоком на низькому рівні. Низькорівневі операції приховані для високорівневих протоколів, тому не потрібно турбуватися про те, скільки радіоканалів використовується і яким чином. Важливою перевагою багатоканальної роботи порівняно з одноканальними широкосмуговими каналами є можливість передавати дані асинхронно по декількох каналах одночасно. Завдяки можливості асинхронної передачі даних по декількох каналах покращується пропускна здатність. І що дуже важливо – суттєво підвищується завадостійкість зв'язку: у разі необхідності повторної передачі даних внаслідок перешкод – повторна передача пакетів можлива по будь-якому радіоканалу. Перемикання каналів здійснюється динамічно, не розриваючи з'єднання. Також для підвищення ефективності та стабільності потоки

даних і команд управління пристроями можуть бути рознесені різними радіоканалами [12], [14], [17], [19–21]. На рис. 1 показано схему багатоканального підключення.

У роботі [22] було проведено тестування й аналіз ефективності роботи системи в одноканальному та багатоканальних режимах. Конфігурації для тестів наведено на рис. 2, результати тестування – на рис. 3.

Результати тестування показали, що усі багатоканальні конфігурації, які працюють згідно IEEE 802.11be демонструють значно вищі показники, ніж одноканальна конфігурація (Case 1-1). Використання нових доступних ширини каналу 320 МГц і модуляції 4096-QAM дає можливість досягати пропускної здатності 30 Гб/с.

Висновки. Збільшення кількості IoT-пристроїв, попит на додатки з високою пропускною спроможністю, підвищення вимог до надійності бездротового зв'язку та необхідність цифрової трансформації промислової та соціальної інфраструктури є основними факторами зростання ринку обладнання бездротового зв'язку [21]. Відмовостійкість і надійність бездротових мереж може бути якісно підвищена за рахунок використання багатоканального режиму роботи, збільшеної кількості просторових потоків, вдосконалених методів керування якістю обслуговування (QoS) нового стандарту IEEE 802.11be. Очікується суттєве покращення стабільності та надійності каналів зв'язку навіть у густонаселених агломераціях, або за складних атмосферних чи заводських умов. Пристрої Wi-Fi 7 широко використовуватимуться для під'єднання промислових датчиків, контролерів і роботів у рамках концепцій «розумного

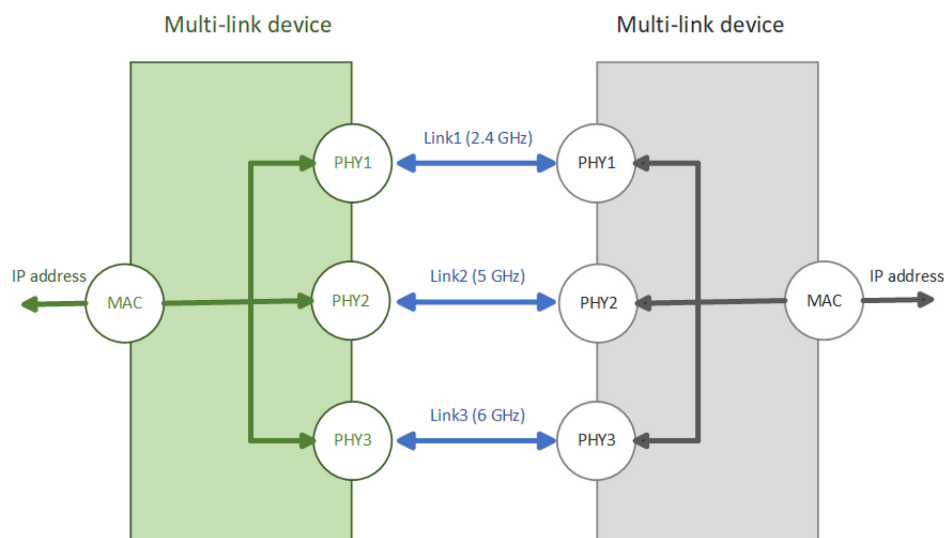


Рис. 1. Багатоканальна взаємодія [21]

Cases	Aggregation	Link	CBW (MHz)	QAM
Case 1-1	1024 ✓	1	320 ✓	4K ✓
Case 1-2	256	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-3	256	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-4	1024 ✓	2 (160 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	160	4K ✓
Case 1-5	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 1-6	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 2-1	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 2-2	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 3	1024 ✓	3 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2 + 160 MHz for link 3) ✓	320 ✓	4K ✓

Рис. 2. Конфігураційні параметри [22]

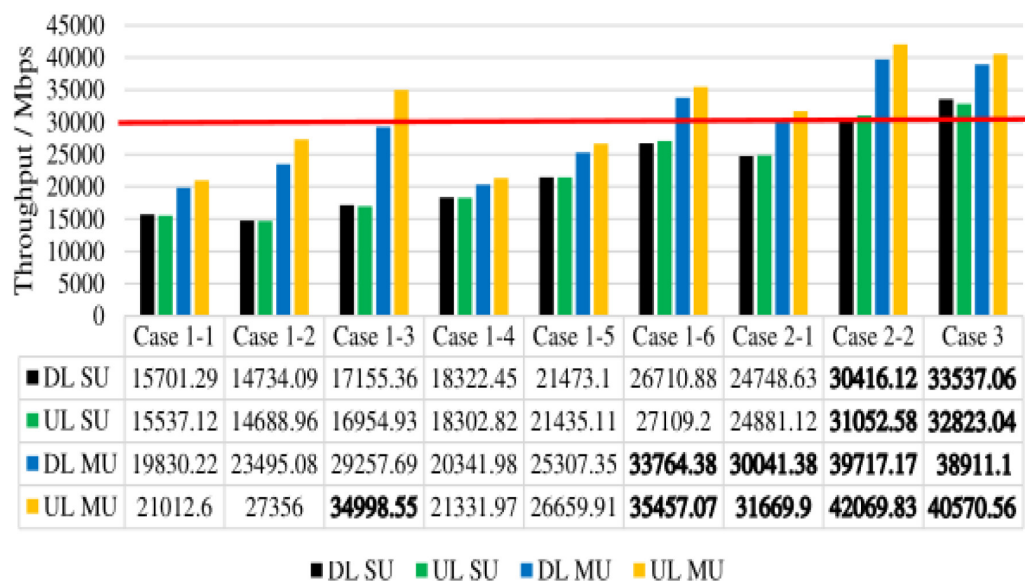


Рис. 3. Пропускна спроможність [22]

міста», охорони здоров'я та Індустрії 4.0. Це сприятиме цифровій трансформації в усіх галузях промисловості.

Однак, незважаючи на оптимістичні перспективи, існують і проблеми, які необхідно буде вирішувати в міру просування нового стандарту:

- вартість: ринок стикається з високими стартовими витратами для WiFi 7, що може вплинути на рівень проникнення;
- технічна сумісність: необхідно враховувати сумісність з наявним обладнанням і мере-

жами, щоб забезпечити плавний перехід для споживачів;

- вдосконалення стандарту: лише практичне масове впровадження пристроїв IEEE 802.11be дозволить виявити недоліки та вузькі місця, які можна буде усунути та оптимізувати у наступних поколіннях стандартів бездротового зв'язку.

Загалом, майбутні пристрої, які підтримують стандарт IEEE 802.11be, перспективне і вони можуть стати одним з основних сегментів ринку бездротових мереж.

Список літератури:

1. Seto K.C., Parnell S., Elmqvist T.A. Global Outlook on Urbanization. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services Challenges and Opportunities* / ed. by T. Elmqvist, M. Fragkias, J. Goodness et al. Dordrecht ; Heidelberg ; New York ; London : Springer, 2013. P. 1–12. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1
2. Li Q., Shangguan W., Cai B., Chai L. Traffic flow guidance and optimization of connected vehicles based on swarm intelligence. *IEEE 2019 Chinese Control Conference (CCC) (July 27–30, 2019)*. 2019. P. 2099–2104. DOI: 10.23919/ChiCC. 2019.8866595

3. Тягунова М.Ю., Карнаух Д.М. Доцільність розробки інтелектуальних систем регулювання руху на перехрестях. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2024. № 1(38). С. 71–76. URL: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2024-1-38-71-76>
4. Faure E. V. FACTORIAL CODING WITH ERROR CORRECTION. *NU “Zaporizhzhia Polytechnic” the scientific journal “Radio Electronics, Computer Science, Control”*. 2017. № 3(42). P. 130–138. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-15>
5. Wang C., Sklar D., Johnson D. Forward Error-Correction Coding. *The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology*. 2002. № 4. URL: <https://web.archive.org/web/20120314085127/http://www.aero.org/publications/crosslink/winter2002/04.html>
6. Spasojevic Z., Burns J. Performance comparison of frequency flopping and direct sequence spread spectrum systems in the 2.4 GHz range. *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (September 18–21, 2000)*. 2000. Vol. 1. P. 426–430. DOI: 10.1109/PIMRC.2000.881461
7. Hampton J.R. Introduction to MIMO communications. New York : Cambridge University Press, 2014. 300 p.
8. Zhang S., Zhang R. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol. 38, № 8. P. 1823–1838.
9. Behrouz F-B., Hussein M. OFDM Inspired Waveforms for 5G. ECE Department, University of Utah and Idaho National Laboratory, 2016. 32 p. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1357211>
10. Bansal G., Hossain M.J., Bhargava V.K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems with statistical interference constraint. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10, № 9. P. 2786–2791. DOI: 10.1109/TWC.2011.072011.100397
11. Garcia-Rodriguez A., López-Pérez D., Galati-Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back. *IEEE Communications Magazine*. 2021. Vol. 59, № 4. P. 102–108.
12. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., Long Y., Guo Y. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, № 4. P. 2136–2166.
13. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57, № 9. P. 113–119. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900338
14. Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I. F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 88664–88688. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9090146>
15. Avdotin E., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Resource allocation strategies for real-time applications in Wi-Fi 7. *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) (May 26–29, 2020)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234994
16. Chauhan S., Sharma A., Pandey S., Rao K. N., Kumar P. IEEE 802.11be: A review on Wi-Fi 7 use cases. *9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends Future Directions) (September 03–04, 2021)*. 2021. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596344
17. Jeknic A., Kocan E. Development Steps that Brought to Wi-Fi 7. *ETF Journal of Electrical Engineering*. 2023. Vol. 29, № 1. P. 65–79. DOI: <https://doi.org/10.59497/jee.v29i1.266>
18. Adame T., Carrascosa-Zamacois M., Bellalta B. Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7. *Sensors*. 2021. № 21(15). 20 p. URL: <https://doi.org/10.3390/s21154954>
19. Chen C., Chen X., Das D., Akhmetov D., Cordeiro C. Overview and Performance Evaluation of Wi-Fi 7. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2022. Vol. 6, № 2. P. 12–18. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100082
20. López-Raventós Á., Bellalta B. Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2022. Vol. 29, № 4, P. 94–100. DOI: 10.1109/MWC.006.2100404
21. Карнаух Д.М., Тягунова М.Ю. Підвищення ефективності радіоканалів зв'язку при побудові цифрових мереж систем «інтернету речей». *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (10–12 грудня 2024 р., м.Запоріжжя)*. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 500 с. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. ISBN 978-617-529-487-1. С. 29–33
22. Liu X., Dong Y., Li Y., Lin Y., Yang X., Gan M. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation. *arXiv (September 27)*. 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.15951>

Karnaukh D. M., Tiahunova M. Yu., Kyrychek H. H. METHODS AND CAPABILITIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA NETWORKS FOR IOT SYSTEMS

This article examines the current situation with the operation of electronic devices wireless telecommunication networks in conditions of a large number of obstacles in dense urban agglomerations, industrial parks, highlighting the current needs of society in this area, analyzing new technical capabilities for the development

of intelligent systems that use wireless devices of the Internet of Things (IoT) system, as well as the potential for the development of wireless communication in urban and industrial infrastructure. Finding optimal solution solutions for reliable communication between many devices that works in the conditions of significant industrial radio interference is crucial for the safe and effective regulation of urban traffic of cars and pedestrians, ensuring effective industrial automation.

The study is based on a detailed analysis of the IEEE 802.11be standard to determine the efficiency, reliability and performance of wireless telecommunications networks operating in industrial conditions. The study explores technologies such as Multi-Link Operations, OFDMA, QAM modulation, etc.

The paper considers the possibilities of increasing the resistance to interference and reducing the impact of radio interference for wireless telecommunication networks under the influence of natural and man-made factors of instability. It is shown that the use of the capabilities of the IEEE 802.11be standard allows achieving high bandwidth of communication channels with minimal network delays. Devices can use all available frequency resources in the 2.4 GHz, 5 GHz and 6 GHz bands, automatically using channels without interference.

The influence of the configuration of the operating mode of network devices of IEEE 802.11be standard (Multi-Link Operations, Frame aggregation, QAM modulation) on the bandwidth of communication channels is shown. The study emphasizes the prospects of using multi-link operating modes when working with several frequency ranges simultaneously.

The results provide actionable recommendations for improving the reliability, performance, and noise immunity of wireless telecommunication networks in locations where high levels of industrial interference may be present. The research can be used to design adaptive systems using many wireless IoT devices.

The fault tolerance and reliability of wireless networks can be qualitatively improved by using multi-link operations, an increased number of spatial streams, and improved quality of service (QoS) management methods of the new IEEE 802.11be standard. A significant improvement in the stability and reliability of communication channels is expected even in densely populated agglomerations, or under difficult atmospheric or interference conditions.

Key words: *wireless networks, IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, IoT, noise immunity, throughput, multi-link operation.*