

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-31>

УДК 004

ТАБОР Денис

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0009-0002-6813-2125>

## ПОРІВНЯННЯ РЕЖИМІВ ДОСТУПУ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ В МЕРЕЖІ IEEE 802.11BE

У статті продемонстровано технічні можливості нового стандарту Wi-Fi 7 (802.11be), зокрема впровадження багатоканальної технології MLO для підвищення пропускної здатності та зниження затримок. Розглянуто режими роботи багатоканальних пристроїв такі як MLRSR та MLMR та їхні покращені версії EMLSR, EMLMR та особливості передачі даних. Досліджено ефективність роботи мереж у сценаріях із різними конфігураціями, що включають використання багатоканальної передачі пристроїв що конкурують за ресурси. Результати моделювання демонструють переваги багатоканального доступу для мереж із високими вимогами до продуктивності та мінімальних затримок.

Ключові слова: мережі Wi-Fi, стандарт IEEE 802.11be, технологія MLO, пристрій MLD, багатоканальна передача.

TABOR Denis

State University of Information and Communication Technology

## COMPARISON OF MULTI-CHANNEL ACCESS MODES IN THE IEEE 802.11BE NETWORK

The article showcases the technical capabilities of the new Wi-Fi 7 standard (802.11be), particularly focusing on the implementation of multi-link operation (MLO) technology to enhance bandwidth, reduce latency, and improve overall network efficiency. The study delves into the fundamental principles of MLO and its role in optimizing wireless communication by enabling devices to simultaneously utilize multiple frequency bands for data transmission.

A detailed examination of the operational modes of multi-link devices is provided, including the Multi-Link Single Radio (MLSR) and Multi-Link Multi-Radio (MLMR) architectures. Furthermore, the paper introduces and analyzes the enhanced versions of these architectures, namely Enhanced Multi-Link Single Radio (EMLSR) and Enhanced Multi-Link Multi-Radio (EMLMR), highlighting their improvements in network stability, interference mitigation, and throughput efficiency. The study also discusses specific data transmission features that make Wi-Fi 7 a significant advancement over its predecessors.

To assess the real-world performance of Wi-Fi 7 networks, the research incorporates simulation-based evaluations of network performance under various configurations involving multi-link transmission and competing devices. These simulations investigate key performance metrics, such as throughput, latency, and packet delivery efficiency, under different levels of network congestion and interference.

Results from these simulations underscore the benefits of multi-channel access in scenarios requiring high performance and minimal latency, such as gaming, video streaming, and enterprise-level networking. The study concludes that the adoption of Wi-Fi 7 and MLO technology has the potential to significantly enhance wireless networking capabilities, paving the way for a more robust and responsive internet experience in high-demand environments.

Keywords: Wi-Fi networks, IEEE 802.11be, Multi-Link Operation, Multi-Link Device, multi-link Tx/Rx.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У зв'язку з постійно зростаючими потребами до якості і продуктивності безпроводних мереж розроблено і сертифіковано новий стандарт 802.11be що відкрив нове покоління Wi-Fi 7. Даний стандарт має забезпечити максимальну пропускну спроможність до 46 Гбіт/с що дало йому назву надзвичайно високої пропускної здатності ETH (Extremely High Throughput). Для цього впроваджено декілька нових технологій і покращень. На фізичному рівні було розширено ширину каналу з 160 МГц у Wi-Fi 6 до 320 МГц, додана квадратурна амплітудна модуляція 4096 QAM, покращено технології OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) та MU-MIMO (Multi-User, Multiple-Input, Multiple-Output) до розмірності 16x16. Впроваджено використання каналу 6 ГГц. На каналному рівні використано новий формат ресурсної одиниці MRU (Multi-Resource Units), що дозволить ефективніше використовувати канал для великої кількості пристроїв. Ключовою особливістю є впровадження багатоканальної технології агрегації каналів MLO (Multi-Link Operation) з використанням різних частот, а саме 2.4, 5 та 6 ГГц.

Технологія MLO дозволяє станціям STA (скор. Station) та точкам доступу AP (Access Point) використовувати кілька каналів в різних діапазонах частот для одночасної передачі і прийому даних. MLO, представляє собою одночасне використання декількох каналів, які працюють на різних діапазонах. Основні аспекти роботи технології MLO: одночасне використання різних каналів, розподіл навантаження при роботі в декількох каналах та адаптивне використання частот що дозволяє переключатись між каналами за необхідності. Це дозволяє зменшити затримки та підвищити надійність зв'язку [1].

Проте використання технології MLO може мати суттєвий недолік через використання спільних чи розташованих близько антен через те що сигнал з однієї антени може вливати на іншу. Це може призвести

до конфліктів при використанні одного і того ж діапазону, незважаючи на використання різних каналів. Ці завади погіршуються через більшу потужність сигналу передачі порівняно з прийнятим сигналом. Зменшення відстані між антенами в пристроях MLO призводить до збільшення наведеного сигналу між ними, що ускладнює передачу і прийом сигналу. Для вирішення цих проблем розроблено рішення, а саме асинхронна багатоканальна передача та синхронна передача. Синхронна передача зменшує завади, але за рахунок зниження пропускної здатності, через зменшення кількості доступу до каналу. Інше рішення передбачає уникнення передачі даних, поки необхідний передавач передає, що зменшує інтерференцію. Наприклад, під час передачі по одному каналу сусідні канали залишаються вільними, щоб забезпечити правильний прийом кадрів. Для вирішення даних проблем використовуються різні режими роботи MLO [2].

Виконуючи аналіз існуючих наукових робіт в яких досліджується механізм MLO та проводиться аналіз різних сценаріїв використання, можна відмітити, що за останній час дана тема набуває все більшого поширення. Можна виділити наступні роботи. В роботі [3], [4] розглянуто різні політики розподілу трафіку в рамках багатоканальної роботи та показано що використання політик з урахуванням стану мережі дають кращі результати ані ж статичні, і краща продуктивність досягається коли новий потік трафіку направлено в менш завантажений інтерфейс. В роботі [5], [6] проведено аналіз з використанням MLO в умовах щільних мереж з пристроями різних версій стандарту 802.11 і показано що ефективність роботи такої мережі залежить від правильного вибору політики розподілу частот. В роботі [7] запропоновано механізм покращення справедливості розподілу пристроїв NSTR-MLD з співіснуючими SLD.

В даній роботі проводиться аналіз і порівняння особливостей різних типів багатоканальних пристроїв, а саме: MLSR, NSTR-MLMR, STR-MLMR, EMLSR, EMLMR, та дослідження використання багатоканальних пристроїв спільно з одноканальними пристроями попередніх поколінь Wi-Fi, а саме SLD, EMLSR, STR-MLMR .

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Технологія MLO може бути застосована на пристроях з одним радіоінтерфейсом MLSR (Multi-Link Single-Radio) та декількома MLMR (Multi-Link Multi-Radio).

Багатоканальні пристрої (MLD) класифікуються наступним чином:

- Багатоканальний пристрій з одним радіоінтерфейсом MLSR
  - Пристрої покращеного радіозв'язку EMLSR
- Багатоканальний пристрій з декількома радіоінтерфейсами MLMR
  - Пристрій одночасної багатоканальної передачі багатоканального радіозв'язку NSTR-MLMR
  - Пристрої одночасної багатоканальної передачі багатоканального радіозв'язку STR-MLMR
  - Пристрої покращеного радіозв'язку EMLMR

Розглянемо схеми роботи даних режимів

**STR-MLMR** (Simultaneous Transmit and Receive Operation) – пристрій має 2 і більше радіомодулів і може проводити одночасний прийом і передачу. Даний режим відноситься до асинхронного, тобто два або більше каналів отримують чи передають незалежно один від одного. Для пакету який необхідно передати пристрій оцінює навантаження і стан каналу і може обирати канал який забезпечить найменшу затримку. Такий пристрій може використовувати декілька каналів для передачі, об'єднуючи полосу пропускання і збільшуючи швидкість зв'язку та передавати і приймати одночасно. За необхідності пристрій може повторити передачу пакету у всіх діапазонах, а станція відкине повторні пакети і обере один. Схема роботи пристрою представлена на рис. 1 [8].

Робота в даному режимі підвищує ефективність використання доступного спектру що збільшує пропускну здатність та зменшує затримку. Даний режим підходить для мереж з високими вимогами до пропускної здатності і мінімальних затримках, наприклад при використанні у відео конференціях, потоковій передачі з високою роздільною здатністю, інтенсивним трафіком.

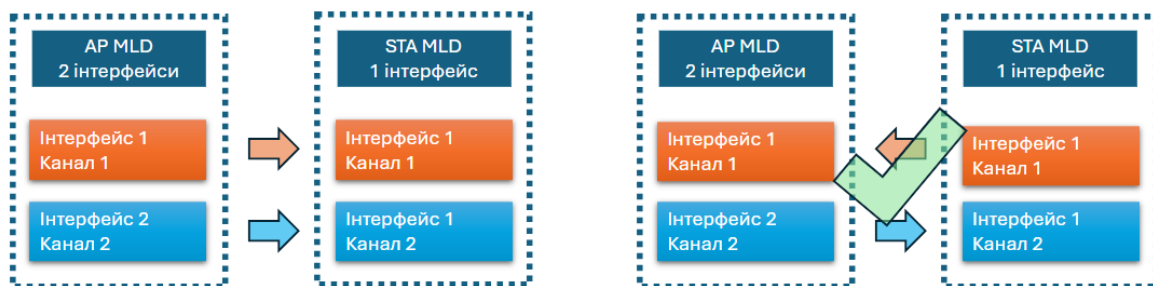


Рис. 1 Схема роботи одночасної передачі та прийому пристрою MLMR

**NSTR-MLMR** (Nonsimultaneous Transmit and Receive Operation) – неодночасний прийом чи передача, тобто в даному режимі одночасний прийом і передача на різних каналах не допускаються. В один момент часу усі канали можуть лише отримувати чи відправляти дані. Використовується у випадку коли одночасна передача або прийом сигналу може викликати міжканальну інтерференцію яка впливає на сигнали між собою, що робить неможливим використання режиму STR. Схема роботи пристрою представлена на рис. 2.



Рис. 2 Схема роботи неодночасної передачі та прийому пристрою MLMR

**EMLMR** (Enhanced Multi-link Multi-Radio) – в даному режимі пристрій може динамічно розподіляти канали між окремими діапазонами або об'єднувати їх в одному діапазоні. Та в залежності від умов мережі розподіляти ресурси для кращої продуктивності. Схема роботи представлена на рис. 3 та 4.

Даний режим підтримує EHT, що включає підтримку високошвидкісної передачі даних з використанням декількох просторових потоків (Tx/Rx Nss - Number of Spatial Streams), широкої полоси пропускання (BW - Bandwidth), можливості високої модуляції і кодування (MCS - Modulation and Coding Scheme). Дані можливості можуть змінюватись окремо для кожного каналу. При цьому конфігурація кожного окремого каналу може динамічно змінюватись в залежності від умов середовища передачі, а також може змінюватись режим роботи пристрою.

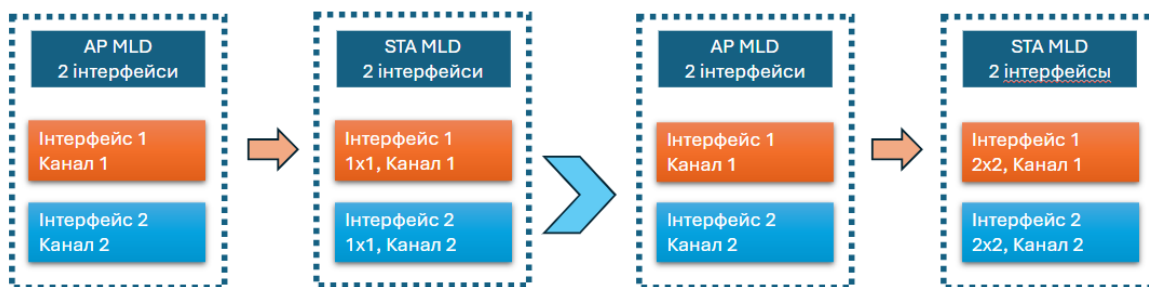


Рис. 3 Схема прийому покращеного багатоканального пристрою з декількома інтерфейсами EMLMR

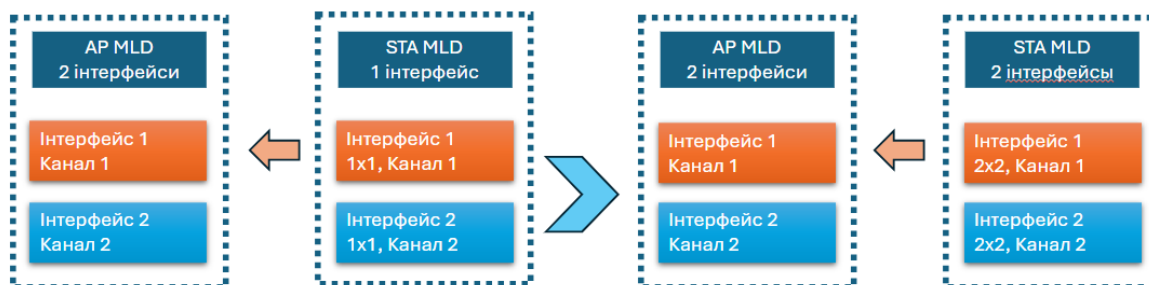


Рис. 4 Схема передачі покращеного багатоканального пристрою з декількома інтерфейсами EMLMR

**MLSR** (Multi-Link Single Radio) – може використовуватись на пристроях які мають один радіомодуль, який прослуховує 2 чи більше каналів одночасно. Тобто в окремий проміжок часу можуть працювати в одному діапазоні і переключатись на інший в залежності від умов. Радіомодуль 2x2 може бути налаштований на 1x1 на кожному діапазоні чи каналі для прослуховування вхідних пакетів на кожному каналі. Передача відбувається по кожному каналу за раз. Схема роботи наведена на рис. 5.

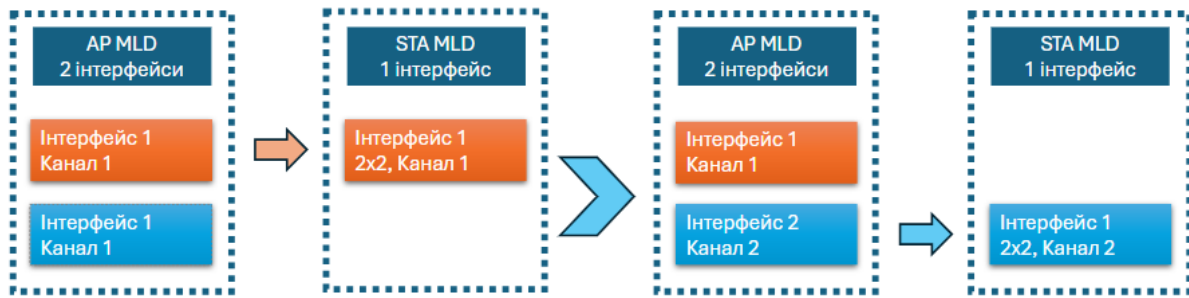


Рис. 5 Схема роботи багатоканального пристрою з одним інтерфейсом MLSR

**EMLSR** (Enhanced Multi-Link Single Radio) – покращена версія MLSR що дозволяє ефективніше переключатись між каналами і зменшити затримку. Пристрій використовує 1 радіоінтерфейс, але віртуально розподіляє потоки на декілька каналів. Схема роботи наведена на рис. 6.

На відміну від MLSR може керувати такими конфігураціями таким параметрів як Nss, MCS, BW окремо для кожного каналу.

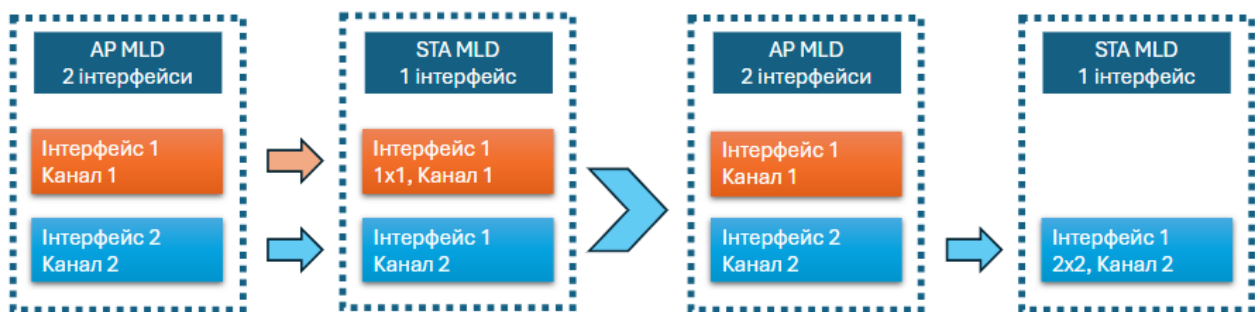


Рис. 6 Схема роботи покращеного багатоканального пристрою з одним інтерфейсом EMLSR

Для порівняння режимів багатоканального доступу проведено моделювання роботи мережі Wi-Fi за декількома сценаріями. Сценарії моделювання включають роботу пристроїв в таких режимах: SL (Single link), EMLSR, STR-MLMR. Проведено моделювання за такими сценаріями:

- 1) Пристрої SLD + MLD використовують окремі канали без конкуренції;
- 2) Пристрої MLD використовують всі доступні канали конкуруючи між собою;
- 3) Пристрої SLD + MLD використовують всі доступні канали конкуруючи між собою.

Моделювання проводиться за таких умов: усі пристрої знаходяться в спільній зоні покриття, без прихованих і засвічених станцій; черга передачі на кожному пристрої постійно заповнена; розмір кожного пакету передачі – 1500 байт; схема модуляції 256-QAM, ширина каналу 80 МГц, з використанням RTS/CTS, тривалість передачі 100 с. Процес моделювання проводиться в симуляторі мережі NS3.

Сценарій 1: в даному сценарії порівнюється продуктивність роботи мережі в умовах ізоляції каналів, тобто без конкуренції пристроїв за ресурс. В даному випадку порівнюємо продуктивність режимів роботи пристроїв які використовують один інтерфейс з пристроями які використовують 2 або 3 інтерфейси. За результатами моделювання робота багатоканальних пристроїв значно краще за продуктивністю, збільшуючи пропускну здатність і зменшуючи затримку зі збільшення кількості інтерфейсів. Пристрої SL показує меншу ефективність роботи, так як використовує 1 канал. Результати моделювання даного сценарію наведені на рис. 7, 8.

Сценарій 2: проводиться порівняння багатоканальних режимів коли пристрої конкурують за доступ до каналу. Даний сценарій показує як конкуренція за канал впливає на продуктивність мережі та порівнює продуктивність окремих режимів роботи. За результатами в режимі STR-MLMR продуктивність виявляється значно більшою оскільки пристрій дозволяє одночасну роботу на декількох каналах. Проте в деяких випадках, коли декілька пристроїв намагаються отримати доступ до каналу, може призвести до збільшення затримок. Використання додаткового інтерфейсу допомагає зменшити затримки, так як вірогідність конкуренції між пристроями більша. Результати моделювання даного сценарію наведені на рис. 7, 8.

Сценарій 3: в даному сценарії розглядається продуктивність роботи багатоканальних режимів при взаємодії з одноканальними, в умовах конкуренції за канал. В даному сценарії багатоканальні пристрої використовують два інтерфейси і відповідно одноканальний пристрій може працювати на одному каналі конкуруючи з ними. Даний сценарій показує як SL пристрій впливає на затримку і продуктивність багатоканального пристрою. За результатами можна зробити висновок що багатоканальні пристрої в даному

режимі працюють ефективніше, на відміну від одноканальних для яких виникає конкуренція в каналі. Результати моделювання даного сценарію наведені на рис. 7, 8. Результати порівняння характеристик даних режимів наведено у табл. 1.

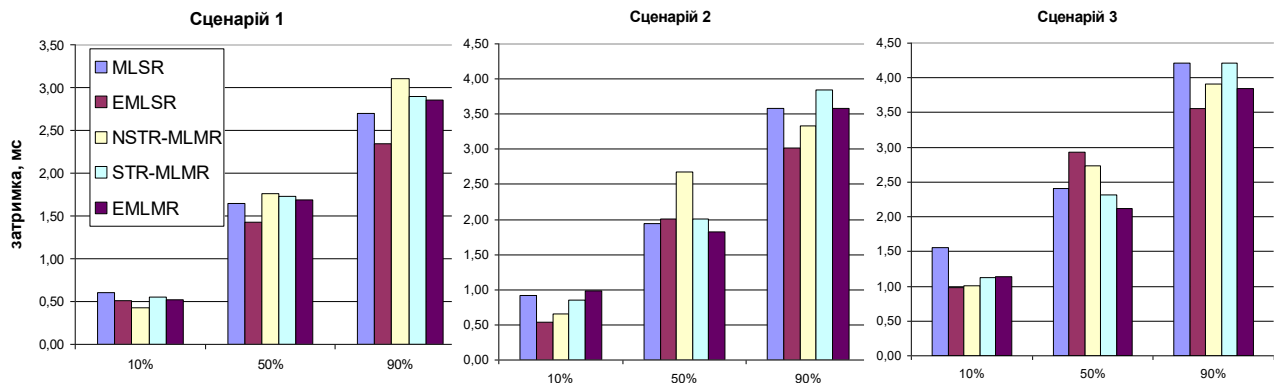


Рис. 7 Затримка при використанні режимів MLSR, NSTR-MLMR, STR-MLMR, EMLSR, EMLMR

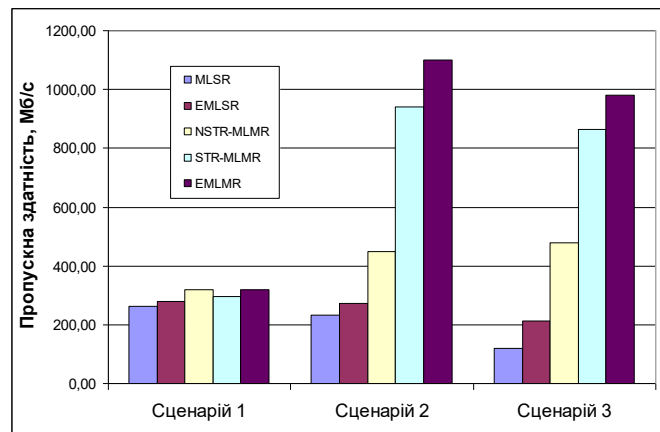


Рис. 8 Пропускна здатність при використанні режимів MLSR, NSTR-MLMR, STR-MLMR, EMLSR, EMLMR

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика режимів багатоканальної передачі**

	MLSR	EMLSR	STR-MLMR	NSTR-MLMR	EMLMR
Кількість антен	1	1	≥ 2	≥ 2	≥ 2
Пропускна здатність	низька	низька	висока	середня	висока
Затримка	висока	низька	середня	висока	середня
Основна характеристика	Передача і прийом на одному каналі в окремий момент часу	MLSR з додатковою можливістю прослуховувати декілька каналів	Одночасний прийом і/чи передача на декількох каналах в окремий момент часу	Одночасний прийом чи передача на декількох каналах в окремий момент часу врівнюванням блоків	STR-MLMR з можливістю динамічної зміни параметрів для окремого каналу

**ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**

**І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

В роботі порівняно використання режимів багатоканальної передачі які можуть бути застосовані у технології Wi-Fi 7. Основні переваги і недоліки даних режимів включають: для режимів MLSR і EMLSR це відносно проста реалізація і низька затримка, проте має низьку пропускну здатність у порівнянні з іншими режимами; режим STR-MLMR підтримує високу пропускну спроможність і середню затримку, проте вимагає відносно складну реалізацію обладнання і вимоги щодо середовища передачі. Робота в режимі NSTR-MLMR підходить для роботи в умовах інтерференції, проте не підтримує високу пропускну здатність у порівнянні з асинхронним режимом. Із даних режимів більшість виробників обирають EMLSR та STR-MLMR. Режими NSTR-MLMR та EMLMR мають значну складність реалізації і тому не прийняті у Wi-Fi 7. Проте можуть використовуватись виробниками.



### Література

1. Álvaro López-Raventós, Boris Bellalta. Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs / Boris Bellalta. // IEEE Wireless Communications. – 2022. – №29. – С. 94 – 100.
2. Alsadg A. Abdalhafid, Shamala K. Subramaniam, Zuriati A. Zukarnain, Fahrul H. Ayob. Multi-Link Operation in IEEE802.11be Extremely High Throughput: A Survey / Alsadg A. Abdalhafid. // IEEE Access. – 2024. – №12. – С. 46891–46906.
3. Álvaro López-Raventós, Boris Bellalta. IEEE 802.11be Multi-Link Operation: When the Best Could Be to Use Only a Single Interface / Boris Bellalta. // Mediterranean Communication and Computer Networking Conference. – 2021. – №19.
4. Mao Yang, Bo Li, Zhongjiang Yan, Yuan Yan. AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT) / Mao Yang. – 2019.
5. Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios, Fernando José Velez, Jean-Frédéric Wagen. Investigating Inclusiveness and Backward Compatibility of IEEE 802.11be Multi-link Operation / Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios, Fernando José Velez, Jean-Frédéric Wagen. // 2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. – 2023.
6. Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios. Study of Band Allocation Policies in IEEE 802.11be Networks with Devices of Different Capabilities / Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios. // ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications. – 2023.
7. Lam Kwon, Eun-Chan Park. Contention-Less Multi-Link Synchronous Transmission for Throughput Enhancement and Heterogeneous Fairness in Wi-Fi 7 / Lam Kwon. // Sensors. – 2024. – №24 (11).
8. Carlos Cordeiro. Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7, 6 GHz, and Beyond [Електронний ресурс] / Carlos Cordeiro // Intel. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.intel.com/content/dam/www/central-libraries/us/en/documents/2022-06/wi-fi-tutorial-long.pdf>.
9. Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide [Електронний ресурс] / Cisco Meraki. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Wi-Fi\\_7\\_\(802.11be\)\\_Technical\\_Guide](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_(802.11be)_Technical_Guide).

### References

1. Álvaro López-Raventós, Boris Bellalta. Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs / Boris Bellalta. // IEEE Wireless Communications. – 2022. – No. 29. - S. 94 - 100.
2. Alsadg A. Abdalhafid, Shamala K. Subramaniam, Zuriati A. Zukarnain, Fahrul H. Ayob. Multi-Link Operation in IEEE802.11be Extremely High Throughput: A Survey / Alsadg A. Abdalhafid. // IEEE Access. – 2024. – No. 12. - S. 46891–46906.
3. Álvaro López-Raventós, Boris Bellalta. IEEE 802.11be Multi-Link Operation: When the Best Could Be to Use Only a Single Interface / Boris Bellalta. // Mediterranean Communication and Computer Networking Conference. – 2021. – No. 19.
4. Mao Yang, Bo Li, Zhongjiang Yan, Yuan Yan. AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT) / Mao Yang. - 2019.
5. Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios, Fernando José Velez, Jean-Frédéric Wagen. Investigating Inclusiveness and Backward Compatibility of IEEE 802.11be Multi-link Operation / Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios, Fernando José Velez, Jean-Frédéric Wagen. // 2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. - 2023.
6. Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios. Study of Band Allocation Policies in IEEE 802.11be Networks with Devices of Different Capabilities / Daniele Medda, Athanasios Iossifides, Periklis Chatzimisios. // ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications. - 2023.
7. Lam Kwon, Eun-Chan Park. Contention-Less Multi-Link Synchronous Transmission for Throughput Enhancement and Heterogeneous Fairness in Wi-Fi 7 / Lam Kwon. // Sensors. – 2024. – No. 24 (11).
8. Carlos Cordeiro. Wi-Fi Unleashed: Wi-Fi 7.6 GHz, and Beyond [Electronic resource] / Carlos Cordeiro // Intel. – 2022. – Resource access mode: <https://www.intel.com/content/dam/www/central-libraries/us/en/documents/2022-06/wi-fi-tutorial-long.pdf>.
9. Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide [Electronic resource] / Cisco Meraki. – 2024. – Resource access mode: [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Wi-Fi\\_7\\_%28802.11be%29\\_Technical\\_Guide](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide).