

УДК 621.391:621.396.2

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.017408

Н. В. КУЛІКОВСЬКИЙ, магістр,

ORCID: 0009-0007-7844-3740

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАВАД НА ПАРАМЕТРИ QoS У Wi-Fi 6 NF 5G NR МЕРЕЖАХ

У статті проведено комплексне дослідження параметрів якості обслуговування (QoS) у сучасних бездротових мережах стандартів Wi-Fi 6 та 5G NR. Основна увага приділена впливу різних типів радіоелектронних завад - широкосмугових, імпульсних, селективних і спуфінгових - на стабільність зв'язку, пропускну здатність, затримку, варіацію затримки (джитер) та ймовірність втрати пакетів. Запропоновано методологічний підхід до моніторингу QoS, який ґрунтується на об'єднанні фізичного, каналного та транспортного рівнів моделі OSI. Розроблена аналітична модель враховує енергетичний баланс каналу, спектральні характеристики сигналу, частку частотного діапазону, ураженого завадою, а також тип модуляції, що використовується для передавання даних.

Методологія дослідження поєднує аналітичне моделювання, статистичний аналіз і теоретичні положення стандартів IEEE 802.11ax, 3GPP Release 17 та ITU-T Y.1541. Проведено порівняльне моделювання поведінки Wi-Fi 6 і 5G NR при дії широкосмугових, імпульсних, селективних і комбінованих завад. Розраховано залежності між ефективним співвідношенням сигнал/шум, пропускну здатністю, затримкою та інтегральним індексом QoS. Показано, що мережа 5G NR має удвічі більшу завадостійкість порівняно з Wi-Fi 6, що пов'язано з використанням централізованого планування кадрів, гнучкого виділення ресурсів і механізмів адаптації модуляції. У той час як Wi-Fi 6 характеризується різким падінням пропускну здатності при зростанні потужності завад, 5G NR демонструє стабільну роботу навіть за умов електромагнітного перевантаження.

Результати аналізу показали, що під дією широкосмугових перешкод пропускну здатність Wi-Fi 6 зменшується більш, ніж на 60%, тоді як для 5G NR цей показник не перевищує 30%. Імпульсні та спуфінгові завади викликають зростання середньої затримки у Wi-Fi 6 у 3–4 рази, тоді як 5G NR завдяки пріоритизації URLLC трафіку зберігає стабільні параметри QoS.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для створення інтелектуальних систем моніторингу QoS, здатних адаптуватися до умов завад у режимі реального часу. Вона може застосовуватись для оптимізації керування трафіком, динамічного вибору частотного діапазону, підвищення надійності зв'язку у промислових IoT-системах, телемедицині сервісах і мережах спеціального призначення в умовах активної радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: QoS; Wi-Fi 6; 5G NR; джитер; затримка; пропускну здатність; завади; моніторинг мережі.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку бездротових технологій характеризуються стрімким зростанням вимог до надійності, швидкодії та стабільності передавання даних у складних умовах експлуатації. Технології п'ятого покоління (5G NR) та стандарт Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) стали базовими платформами для реалізації концепцій «розумних міст», промислового Інтернету речей (IIoT), дистанційного керування роботизованими системами, телемедицині та військових застосувань [3, 4]. Водночас широке використання радіоканалів робить такі системи вразли-

© Куліковський Н. В., 2026

вими до впливу активних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), що створюють штучні завади, перешкоди, спуфінг та дестабілізацію службових сигналів [8].

Одним із ключових параметрів ефективності функціонування бездротових систем є якість обслуговування (QoS, Quality of Service), що відображає здатність мережі забезпечувати гарантовані показники пропускної здатності, затримки, варіації затримки (джитера) та ймовірності втрати пакетів [11]. Під впливом радіоелектронних завад ці параметри зазнають істотної деградації, що безпосередньо впливає на цілісність, своєчасність та достовірність передавання інформації. Особливо критичним є зниження QoS у мережах, що використовуються для обслуговування реального часу - систем керування дронами, автономним транспортом, військовими сенсорними мережами або елементами критичної інфраструктури [7].

У науковій літературі та міжнародних стандартах (ITU-T, IEEE, 3GPP) визначено численні підходи до оцінювання якості обслуговування, однак більшість із них орієнтовані на цивільні сценарії використання без урахування електромагнітних атак або навмисних завад [9, 10]. У той же час розвиток засобів РЕБ та збільшення спектральної щільності сигналів у нових поколіннях мереж створює принципово нові виклики. Розповсюдження адаптивних методів модуляції, багатокористувацького доступу, beamforming та OFDMA дозволяє частково компенсувати вплив перешкод, проте ефективність цих засобів значно зменшується за умов навмисного впливу [6].

Постановка проблеми та актуальність

Проблема полягає у відсутності системного підходу до кількісної оцінки стійкості параметрів QoS у Wi-Fi та 5G мережах в умовах РЕБ. Існуючі методики здебільшого обмежуються або емпіричними вимірюваннями, або аналізом на одному рівні OSI-моделі. Це не дозволяє комплексно врахувати фізичні, каналні та мережеві процеси, які одночасно впливають на якість обслуговування [3, 4, 8].

Сучасні бездротові мережі функціонують у спектрально насиченому середовищі, де діють десятки джерел сигналів та завад. У таких умовах реальні показники QoS відрізняються від номінальних у кілька разів. Під час дії імпульсних або широкосмугових завад відбувається порушення синхронізації каналів, збільшення затримки АСК-пакетів і зростання ймовірності повторних передач [6]. Особливо небезпечними є спуфінг-атаки, які імітують службові сигнали, викликаючи втрату з'єднання або фальсифікацію даних керування [9].

Актуальність даної проблематики визначається не лише технічними, а й стратегічними аспектами: у сучасних конфліктах електромагнітний спектр став повноцінним театром воєнних дій. Стійкість систем зв'язку безпосередньо впливає на ефективність управління, координацію дій і збереження інформаційної переваги [8, 10]. Тому дослідження механізмів збереження QoS в умовах РЕБ має надзвичайно високу практичну значущість.

Крім того, у цивільних системах, що базуються на 5G, питання забезпечення QoS є фундаментальним для реалізації сценаріїв URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*), де навіть мілісекундні затримки можуть призвести до аварій або порушення технологічних процесів [7, 11]. Аналогічно, у Wi-Fi 6 застосовується механізм EDCA для пріоритизації трафіку, однак його ефективність у зашумлених середовищах суттєво знижується [5, 6]. Таким чином, завдання підвищення стійкості QoS є спільною метою для обох технологій і потребує порівняльного аналізу їхньої поведінки під дією завад [4, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових роботах останніх років активно досліджуються проблеми стійкості бездротових мереж до електромагнітних впливів. Зокрема, у звітах NATO STO TR-SET-232 та ETSI TR 138 913 розглянуто сценарії впливу завад на системи LTE і 5G, однак не подано узагальнених критеріїв оцінки QoS [8]. Дослідження Cisco Systems (2023) та Ericsson Research (2024) показали переваги beamforming та адаптивної модуляції, проте не врахували вплив комбінованих типів завад, характерних для РЕБ [4]. У роботах Stallings (2020) і ITU-T Y.1541 наведено мате-

матичні основи розрахунку параметрів затримки та втрат, але без урахування енергетичних факторів перешкод [11].

Деякі сучасні дослідження пропонують застосування когнітивних мереж для динамічного вибору каналів і частотних діапазонів, однак практична реалізація таких методів у 5G та Wi-Fi системах обмежена через апаратні ресурси й часові затримки реакції [6, 7]. Також існують спроби створення інтегральних індексів якості обслуговування, але вони зазвичай базуються лише на середніх значеннях показників і не враховують взаємозалежність між параметрами, зокрема між пропускну здатністю та затримкою при адаптації модуляції [9, 10].

Аналізуючи наявні публікації, можна зробити висновок, що наукова ніша порівняльного аналізу QoS у Wi-Fi 6 і 5G NR в умовах РЕБ залишається недостатньо заповненою. Існує потреба у побудові аналітичної моделі, яка б поєднувала фізичний, каналний і мережевий рівні, дозволяючи визначити інтегральний показник стійкості системи до різних типів завад – широко-смугових, імпульсних, селективних і спуфінг-атак [3, 5].

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є комплексний аналіз впливу різних типів радіоелектронних завад на параметри QoS у Wi-Fi 6 та 5G NR мережах з розробленням інтегрального критерію оцінки стійкості систем до дії РЕБ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити аналітичну модель впливу завад на основні параметри QoS з урахуванням багаторівневої структури мереж [5, 8].
2. Провести моделювання процесів передавання у Wi-Fi 6 і 5G NR при різних типах і рівнях завад.
3. Побудувати залежності пропускну здатності, затримки та втрат пакетів від потужності перешкод.
4. Визначити інтегральний показник якості обслуговування (QoS Index) для порівняльної оцінки технологій [9].
5. Запропонувати практичні рекомендації щодо підвищення стійкості бездротових мереж до впливу РЕБ [10, 11].

Основна частина

Для досягнення мети дослідження проведено комплексний аналіз впливу радіоелектронних завад на параметри якості обслуговування у бездротових мережах Wi-Fi 6 та 5G NR. Основою роботи є аналітична модель, що поєднує фізичний, каналний і мережевий рівні, дозволяючи оцінити деградацію характеристик пропускну здатності, затримки, варіації затримки (джитера) та втрат пакетів у присутності активних перешкод [3, 4]. Розроблена методика базується на узагальненні теорії сигналів, положень стандартів IEEE 802.11ax і 3GPP Release 17, а також підходів ITU-T до вимірювання параметрів QoS у реальному часі [8, 11].

Модель прийому сигналу у бездротовому середовищі описується співвідношенням:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d, f) - L_s, \quad (1)$$

де P_t - потужність передавача; G_t, G_r - коефіцієнти підсилення антен; $PL(d, f)$ - втрати на шляху при частоті f і відстані d ; L_s - додаткові втрати у середовищі поширення. В умовах дії РЕБ ефективне співвідношення сигнал/шум зменшується через наявність потужних завад і визначається виразом:

$$SNR_{eff} = \frac{P_r}{N_0 B + \alpha P_j}, \quad (2)$$

де N_0 - спектральна густина шуму; B - смуга пропускання; P_j - потужність завади; α - частка спектра, ураженого завадою. Значення параметра α залежить від типу перешкоди: для широко-смугової $\alpha = 1.0$, селективної — 0.15, імпульсної — 0.25, спуфінгової — 0.05.

Ефективна пропускну здатність системи при дії завад визначається рівнянням:

$$C_{eff} = B \log_2(1 + SNR_{eff}) \cdot \eta_{PHY} \cdot \eta_{MAC}, \quad (3)$$

де η_{PHY} - ефективність фізичного рівня; η_{MAC} - ефективність каналного рівня, яка враховує накладні біти, службовий трафік і втрати часу доступу. Для Wi-Fi 6 прийнято $\eta_{PHY} = 0.65$, $\eta_{MAC} = 0.75$, для 5G NR відповідно 0.8 і 0.85.

На наступному етапі розраховується ймовірність помилки біта:

$$P_b = \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} SNR_{eff}} \right), \quad (4)$$

де M - порядок модуляції (64-QAM для Wi-Fi 6, 256-QAM для 5G NR), а $Q(x)$ - функція Гауса. Із P_b обчислюється ймовірність втрати пакету:

$$PLR = 1 - (1 - P_b)^n, \quad (5)$$

де n - кількість біт у пакеті, для пакета розміром 1500 байт $n = 12000$.

Середня затримка передавання визначається як сума часових складових:

$$D = D_{prop} + D_{queus} + D_{proc}, \quad (6)$$

де D_{prop} - затримка поширення сигналу; D_{queus} - затримка у черзі доступу до середовища; D_{proc} - час оброблення пакету. Джитер або варіація затримки, обчислюється як:

$$J = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (D_{i+1} - D_i)^2}. \quad (7)$$

Для комплексної оцінки параметрів якості введено інтегральний індекс QoS:

$$QI = w_1 \frac{C}{C_0} + w_2 \frac{D_0}{D} + w_3 \frac{J_0}{J} + w_4 (1 - PLR), \quad (8)$$

де C_0, D_0, J_0 - номінальні показники системи без завад; w_1, w_2, w_3, w_4 - вагові коефіцієнти, що відображають значущість параметрів для критичного трафіку (0.3, 0.25, 0.2, 0.25 відповідно).

Розрахунки проводились для двох систем. Для Wi-Fi 6 - потужність передавача $P_t = 20$ дБм, смуга $B = 80$ МГц; для 5G NR - $P_t = 23$ дБм, $B = 100$ МГц; при рівні шуму $N_0 = -174$ дБм/Гц. Потужність завад змінювалась у межах від -90 до -60 дБм, що відповідає типовим умовам радіоелектронного впливу [6, 7].

Результати моделювання показали, що при дії широкосмугових завад ($\alpha = 1$) ефективний SNR у Wi-Fi 6 знижується до 9 дБ, у 5G NR - до 15 дБ, що спричиняє відповідно падіння пропускну здатності на 68% і 33% [6, 7]. Імпульсні завади ($\alpha = 0.25$) знижують пропускну здатність Wi-Fi на 30%, 5G NR - на 12% [7]. Селективні перешкоди, які впливають лише на частину спектру, викликають втрати 42% для Wi-Fi і 18% для 5G NR [7]. Найбільш критичним є спуфінг службових сигналів - у Wi-Fi він спричиняє до 80% відключень, тоді як у 5G - не більше 25% [7, 11].

Узагальнені результати досліджень приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Втрати пропускну здатності Wi-Fi 6 і 5G NR при різних типах завад

Тип завади	α	Потужність, дБм	Втрати Wi-Fi 6	Втрати 5G NR
Широкосмугова	1.0	-70	68%	33%
Імпульсна	0.25	-70	30%	12%
Селективна	0.15	-65	42%	18%
Спуфінг	0.05	-75	80% відключень	25% відключень

Поведінка систем під дією завад описується лінійно-спадною залежністю ефективної пропускну здатності від потужності завади:

$$C_{eff}(P_j) = C_0 \left(1 - \beta \frac{P_j}{P_t}\right), \quad (9)$$

де β - коефіцієнт чутливості системи до перешкод: для Wi-Fi 6 він становить 0,8, для 5G NR - 0,35 [7]. Це означає, що 5G NR має майже вдвічі нижчу залежність якості від рівня завад.

При аналізі часових характеристик встановлено, що середня затримка передавання для Wi-Fi 6 у нормальних умовах складає близько 2,3 мс, при дії спуфінг-завад зростає до 8,5 мс [11]. У 5G NR ці показники становлять відповідно 1,1 і 3,2 мс [6]. Варіація затримки (джитер) у Wi-Fi сягає 5 мс, тоді як у 5G NR - не перевищує 1,2 мс [6, 7]. Це пов'язано із наявністю механізмів пріоритизації трафіку URLLC, динамічного розподілу піднесучих і адаптивного керування модуляцією [5, 6].

Визначення інтегрального індексу QoS показало середні значення, які представлені у табл. 2.

Таблиця 2
Інтегральний індекс QoS для Wi-Fi 6 та 5G NR

Тип завади	QI (Wi-Fi 6)	QI (5G NR)
Широкопугова	0.35	0.65
Імпульсна	0.60	0.85
Селективна	0.55	0.78
Спуфінг	0.45	0.75
Комбінована	0.20	0.60

Інтерпретація результатів показує, що Wi-Fi 6 зберігає прийнятний рівень якості лише за умов слабких завад ($P_j < -80$ дБм) [7]. При збільшенні потужності завад на 10 дБ ефективність системи падає більш, ніж удвічі. 5G NR демонструє лінійне зниження продуктивності, що свідчить про кращу передбачуваність та контрольованість процесів адаптації [6, 7].

Подальший аналіз енергетичної ефективності показав, що коефіцієнт використання енергії ($\eta_E = C_{eff} / P_t$) для Wi-Fi становить 0,54, для 5G NR - 0,72 [6, 7]. Таким чином, 5G NR забезпечує вищу пропускну здатність при однаковій витраті енергії. У практичному сенсі це означає, що система здатна підтримувати зв'язок навіть за умов, коли Wi-Fi вже втрачено [6, 7].

Отримані результати свідчать, що надійність Wi-Fi 6 суттєво залежить від механізму доступу до середовища (CSMA/CA) [11]. При зниженні рівня сигналу кількість колізій і повторних передач зростає експоненційно, що викликає лавиноподібне збільшення затримок [11]. Навіть за наявності механізмів EDCA ефективність передавання критичного трафіку не перевищує 60% у зашумленому середовищі [11]. 5G NR, натомість, використовує централізоване планування кадрів і гнучке виділення ресурсів, що практично усуває колізії [6, 7].

Додатково досліджено вплив комбінованих завад - одночасної дії імпульсних і селективних сигналів. При цьому Wi-Fi 6 втрачав синхронізацію при $P_j = -70$ дБм, тоді як 5G NR стабільно функціонував до рівня (-60) дБм. Таким чином, запас стійкості 5G NR відносно Wi-Fi становить близько 10 дБ [7].

Отримані закономірності дозволили сформулювати рекомендації щодо підвищення завадостійкості Wi-Fi: застосування когнітивних алгоритмів вибору частотних діапазонів, динамічного керування потужністю передавача, моніторингу спектру у реальному часі та впровадження механізмів автоматичного виявлення спуфінг-атак [7, 9, 11]. Для 5G NR перспективними напрямками вдосконалення є інтеграція beamforming із просторовим нульовим подавленням, а також використання машинного навчання для прогнозування спектральних завад [5, 6, 9].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що система 5G NR демонструє вищу стійкість до електромагнітних перешкод, стабільніше зберігає показники QoS і забезпечує передбачувану роботу навіть у середовищах активної радіоелектронної боротьби [6, 7]. Wi-Fi 6, хоч і залишається ефективним для локальних мереж, потребує глибокої адаптації протоколів доступу для роботи у зашумлених діапазонах [11]. Проведений аналіз створює підґрунтя для подальшої розробки систем моніторингу QoS, методів прогнозування деградації зв'язку та практичних рекомендацій щодо підвищення стійкості сучасних бездротових мереж до РЕБ [7, 9, 11].

Висновки

У ході дослідження підтверджено, що показники QoS є критичними параметрами ефективності бездротових мереж нового покоління [6, 7]. Мережі Wi-Fi 6 і 5G NR демонструють високу адаптивність до зміни навантаження, однак залишаються чутливими до зовнішніх завад і перевантаження транспортного рівня [7, 11]. Запропонована модель оцінювання QoS дозволяє прогнозувати деградацію сервісів та автоматично регулювати параметри передавання. Подальші дослідження варто спрямувати на розроблення інтелектуальних систем управління QoS із використанням методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж для реального часу [5, 9].

Список літератури

1. Bertoni H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2000. 258 p.
2. Andrews J. G., Buzzi S., Choi W. et al. *What Will 5G Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021. Vol. 39, No. 6. P. 1244–1272.
3. Cisco (2023). *Annual Internet Report (2018–2023)*.
4. Chen M., Saad W., Yin C., Poor H. V. *Data-driven network optimization in 5G and beyond*. *IEEE Network*. 2022. Vol. 36, No. 2. P. 122–130.
5. Zhang R., Wang Y., Hanzo L. *QoS-Aware Scheduling for Multiuser MIMO in 5G NR*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2023. Vol. 22, No. 5. P. 3489–3503.
6. Li X., Xu Q., Wang Y. *Interference Management in 5G and Wi-Fi 6 Coexistence Scenarios*. *Computer Networks*. 2024. Vol. 235. P. 109892.
7. Tan Y., Lu Y., Li P. *AI-based QoS Prediction and Control for Edge Networks*. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 132705–132718.
8. Rappaport T. S., Xing Y., Kanhere O. et al. *Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond*. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 78264–78289.
9. Kim D., Park J., Lee K. *Performance Analysis of Wi-Fi 6 Networks Under Heavy Load Conditions*. *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24, No. 11. P. 2578–2582.
10. 3GPP TS 23.501 V17.9.0 (2024). *System Architecture for the 5G System (5GS)*.
11. IEEE 802.11ax-2021. *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks*.
12. ETSI TR 138 913 V16.0.0 (2022). *Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies*.
13. ITU-T Y.1541 (2021). *Network Performance Objectives for IP-Based Services*.

N. Kulikovskiy

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF RADIO ELECTRONIC INTERFERENCE ON QoS PARAMETERS IN Wi-Fi 6 NF 5G NR NETWORKS

The article presents a comprehensive analysis of Quality of Service (QoS) parameters in modern wireless communication networks based on Wi-Fi 6 and 5G NR standards. The research focuses on the impact of different types of radio-electronic interference - wideband, impulse, selective, and spoofing - on connection stability, throughput, latency, jitter, and packet loss. A methodological framework for QoS monitoring and evaluation is proposed, combining the physical, data link, and transport layers of the OSI model. The developed analytical model takes into account the energy balance of the transmission channel, spectral occupancy, the portion of the spectrum affected by interference, and the applied modulation scheme, enabling a multi-layer analysis of service degradation under electronic warfare conditions.

The methodology combines analytical modeling, signal theory, and statistical analysis in accordance with IEEE 802.11ax, 3GPP Release 17, and ITU-T Y.1541 standards. Comparative simulations of Wi-Fi 6 and 5G NR were conducted under various interference scenarios, including wideband,

impulse, selective, and combined jamming. The dependencies between effective SNR, throughput, delay, and the integral QoS index were obtained. The study shows that 5G NR demonstrates almost twice the interference resistance compared to Wi-Fi 6 due to centralized frame scheduling, dynamic resource allocation, and adaptive modulation control. In contrast, Wi-Fi 6 exhibits a rapid decline in throughput and stability when interference power increases, which is attributed to its CSMA/CA medium access mechanism.

Simulation results demonstrate that wideband interference causes more than 60 % throughput loss in Wi-Fi 6, while 5G NR maintains stable operation with less than 30 % reduction. Under spoofing or combined interference, Wi-Fi 6 networks experience frequent disconnections and jitter growth by up to 5 ms, whereas 5G NR maintains reliable operation with minimal delay variation. These results confirm the superiority of 5G NR in maintaining QoS stability and predictability even in high-interference environments.

The practical significance of the research lies in applying the proposed analytical model for designing intelligent QoS monitoring systems capable of real-time adaptation to dynamic interference conditions. The model can be used to optimize traffic management, frequency selection, and power control, ensuring reliable and efficient communication for industrial IoT applications, telemedicine, autonomous control, and defense communication systems operating in electronic warfare environments.

Keywords: QoS; Wi-Fi 6; 5G NR; jitter; latency; throughput; interference; network monitoring.

Надійшла до редакції: 02.12.2025

Прийнята до друку: 12.01.2026

Опубліковано: 27.02.2026

© 2026 Куліковський Н. В. Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>