

**Ілларіонов Максим Юрійович**

аспірант

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ORCID ID 0009-0007-2352-050X

[maksym.illarionov@nure.ua](mailto:maksym.illarionov@nure.ua)**Білодід Володимир Григорович**

науковий співробітник

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна ORCID ID 0009-0002-8976-2310

[vibos111@gmail.com](mailto:vibos111@gmail.com)

### СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМИ У ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ 6G З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ РАДІОКАНАЛУ

**Анотація.** Предметом дослідження є процес управління навантаженням у гетерогенних бездротових мережах шостого покоління з урахуванням впливу якості радіоканалу на характеристики обслуговування трафіку. Метою є розроблення стохастичної моделі управління навантаженням у 6G-мережах, яка встановлює взаємозв'язок між фізичними параметрами радіоканалу, зокрема відстанню між передавачем і приймачем та відношенням сигнал/інтерференція+шум, і показниками якості обслуговування. Завдання: сформулювати модель радіоканалу на основі узагальненої моделі затухання сигналу зі степеневим законом і молекулярним поглинанням; визначити залежність відношення сигнал/інтерференція+шум від відстані; встановити зв'язок між цим відношенням і пропускну здатністю каналу; побудувати стохастичну модель системи масового обслуговування зі змінною інтенсивністю обслуговування; дослідити вплив параметрів радіоканалу на показники якості обслуговування. Методи дослідження включають теорію бездротових каналів зв'язку, теорію інформації, теорію масового обслуговування та чисельне моделювання. Використано узагальнену модель затухання сигналу, формулу Шеннона та аналітичні вирази для систем масового обслуговування. Чисельне моделювання виконано за сценаріями різних умов поширення радіохвиль. Отримані результати показують аналітичні залежності між відстанню, якістю радіоканалу та показниками обслуговування. Встановлено, що зі збільшенням відстані нелінійно знижується відношення сигнал/інтерференція+шум, що призводить до зменшення пропускну здатності та інтенсивності обслуговування. Це спричиняє зростання завантаження системи, середнього часу затримки та довжини черги. Результати підтверджують залежність якості обслуговування від умов поширення сигналу та різницю між сценаріями прямої видимості й граничними умовами роботи мережі. Висновки: запропонована модель дозволяє комплексно оцінювати вплив фізичних характеристик радіоканалу на показники якості обслуговування. Показано, що поєднання фізичного рівня та теорії масового обслуговування забезпечує більш реалістичний опис функціонування 6G-мереж. Результати можуть бути використані для аналізу, прогнозування й оптимізації навантаження та розробки алгоритмів керування ресурсами у бездротових системах нового покоління.

**Ключові слова:** гетерогенні мережі шостого покоління, управління навантаженням, якість радіоканалу, сигнал-шум, пропускну здатність каналу, теорія масового обслуговування

**Maksym Illarionov**

Postgraduate

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0007-2352-050X

[maksym.illarionov@nure.ua](mailto:maksym.illarionov@nure.ua)**Volodymyr Bilodid**

Researcher

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0002-8976-2310

[vibos111@gmail.com](mailto:vibos111@gmail.com)

### STOCHASTIC MODEL OF LOAD MANAGEMENT IN HETEROGENEOUS 6G NETWORKS WITH RADIO CHANNEL QUALITY CONSIDERATION

**Abstract.** The study examines the load management process in heterogeneous sixth-generation (6G) wireless networks, accounting for the impact of radio channel quality on traffic service characteristics. The aim is to develop a stochastic load management model for 6G networks that establishes the relationship between physical radio channel parameters, particularly transmitter – receiver distance and signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), and quality of service (QoS) indicators. Objectives: to develop a radio channel model based on a generalized signal attenuation model with a power-law path loss and molecular absorption; to determine the dependence of SINR on distance; to establish the relationship between SINR and channel capacity; to build a stochastic queueing model with variable service rate; and to study the influence of radio channel parameters on QoS metrics. Methods include wireless communication theory, information theory, queueing theory, and numerical simulation. A generalized signal attenuation model, the

© 2026 Ілларіонов М.Ю., Білодід В.Г. Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

*Shannon capacity formula, and analytical queueing expressions are applied. Numerical simulations are performed using scenario-based modelling under different propagation conditions. Results show analytical dependencies between distance, radio channel quality, and traffic service performance. It is demonstrated that increasing distance leads to a nonlinear decrease in SINR, resulting in reduced channel capacity and service rate. Consequently, system utilization, average delay, and queue length increase. The results confirm a strong dependence of QoS on propagation conditions and highlight differences between line-of-sight and boundary operating scenarios. Conclusions indicate that the proposed model provides a comprehensive assessment of how physical radio channel characteristics affect network QoS. The integration of physical-layer modelling with queueing theory enables a more realistic representation of 6G heterogeneous networks. The results can be used for load analysis, prediction, optimization, and the design of resource management algorithms for next-generation wireless systems.*

**Keywords:** heterogeneous 6g networks, load management, radio channel quality, signal-noise, channel capacity, queueing theory.

## 1. Вступ

Інтенсивний розвиток бездротових технологій та зростання вимог до телекомунікаційних систем зумовлюють перехід до мереж шостого покоління (6G), які мають забезпечити принципово новий рівень продуктивності, надійності, адаптивності та безпеки. На відміну від попередніх поколінь, мережі 6G характеризуються високою динамічністю середовища, що пов'язано з використанням гетерогенних радіотехнологій, надширокого частотного спектра, включно з терагерцовим діапазоном, та складною просторово-часовою структурою трафіку [1, 2].

У таких умовах процеси надходження та обслуговування трафіку мають виражений стохастичний характер, що потребує застосування ймовірнісних підходів та моделей теорії масового обслуговування [3]. Водночас ключовим чинником, який визначає ефективність обслуговування, є якість радіоканалу, що описується відношенням сигнал/інтерференція+шум (SINR). Саме SINR визначає швидкість передачі даних, інтенсивність обслуговування та загальні показники якості сервісу. Його зниження призводить до зменшення пропускної здатності каналу, збільшення затримок та втрат пакетів [4].

Сучасні дослідження показують, що рівень прийнятого сигналу суттєво залежить від відстані між передавачем і приймачем, параметрів антен, частоти сигналу та умов поширення. У мережах 6G, особливо в терагерцовому діапазоні, додаткового впливу набувають інтерференція та молекулярне поглинання, що спричиняють суттєве нелінійне згасання сигналу. Для опису таких процесів застосовуються узагальнені моделі поширення радіохвиль, які розширюють класичні підходи, зокрема рівняння Фріса [5].

Наукова проблема полягає у недостатній точності існуючих моделей управління навантаженням, які, як правило, не враховують взаємозв'язок між фізичними характеристиками радіоканалу та параметрами системи масового обслуговування. Це призводить до спрощеного опису мережевих процесів і не дозволяє адекватно оцінювати якість обслуговування в умовах гетерогенних 6G-мереж.

Отже, актуальним є розроблення інтегрованих стохастичних моделей, що поєднують фізичний рівень радіоканалу з апаратом теорії масового обслуговування. Це дозволяє підвищити точність оцінювання впливу параметрів середовища на показники якості обслуговування та забезпечити більш ефективне управління навантаженням у перспективних бездротових мережах 6G.

## 2. Постановка проблеми

Наукова проблема полягає у недостатній формалізації взаємозв'язку між фізичними характеристиками радіоканалу та показниками якості обслуговування (QoS) у гетерогенних мережах 6G в умовах стохастичного характеру трафіку та змінної якості радіосередовища. Існуючі підходи до моделювання навантаження не забезпечують одночасного врахування SINR, пропускної здатності каналу та параметрів системи масового обслуговування, що обмежує точність оцінювання мережевої продуктивності.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері бездротових телекомунікаційних мереж, зокрема 6G, формуються навколо кількох ключових наукових напрямів: моделювання радіоканалів, оптимізація мережевих ресурсів та аналіз якості обслуговування (QoS).

У роботі [5] розглядаються фундаментальні аспекти міліметрових і терагерцових каналів, зокрема стохастичні моделі згасання та залежність пропускної здатності від просторових параметрів середовища. Ці дослідження заклали основу для розуміння фізичних обмежень майбутніх 6G-систем.

Робота [6] присвячена дослідженню рефлексивних інтелектуальних поверхонь (RIS), які дозволяють динамічно формувати характеристики радіосередовища шляхом керованого відбиття сигналів. Показано, що інтеграція RIS у бездротові системи може значно підвищувати ефективну пропускну здатність каналів, однак такі моделі здебільшого обмежуються фізичним рівнем і не враховують мережеві аспекти навантаження.

У напрямі мережевої оптимізації значний внесок зроблено авторами роботи [7], які розглядають методи балансування навантаження в гетерогенних мережах із використанням оптимізаційних підходів та теорії ігор. Ці моделі дозволяють ефективно розподіляти користувачів між базовими станціями, однак часто базуються на спрощених припущеннях щодо стабільності каналу.

Окремий клас досліджень представлений у роботі [8], у якій системно розглядається теорія бездротових каналів та встановлюється зв'язок між якістю радіоканалу, пропускною здатністю та затримками. Ці результати широко використовуються при побудові моделей на основі теорії масового обслуговування.

Таким чином, сучасні дослідження можна умовно поділити на три групи:

- 1) фізичне моделювання радіоканалів;
- 2) оптимізація мережевого навантаження;
- 3) теорія черг і QoS-аналіз.

Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість існуючих підходів розглядає фізичний та мережевий рівні ізольовано. Зокрема, моделі радіоканалу описують процеси поширення сигналу (включаючи затухання, інтерференцію та шум), тоді як моделі управління навантаженням оперують спрощеними або усередненими характеристиками каналу. Це не дозволяє повною мірою врахувати вплив змін якості радіоканалу, що характеризується відношенням сигнал/інтерференція+шум (SINR), на показники затримок, довжини черг та рівень завантаження системи.

Таким чином, відкритою залишається задача розроблення інтегрованої стохастичної моделі, яка одночасно:

- враховує фізичні властивості радіоканалу (затухання, інтерференція, шум);
- описує стохастичний характер трафіку;
- встановлює аналітичний зв'язок між SINR, пропускну здатністю та QoS-показниками;
- забезпечує можливість аналізу навантаження в гетерогенних мережах 6G.

#### 4. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є побудова аналітичної стохастичної моделі управління навантаженням у гетерогенних мережах 6G, яка враховує вплив якості радіоканалу на основі узагальненої моделі поширення сигналу та дозволяє встановити кількісні залежності між SINR, пропускну здатністю каналу, показниками QoS та рівнем мережевого навантаження.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються такі завдання:

- 1) сформулювати математичну модель радіоканалу з урахуванням втрат поширення, інтерференції та молекулярного поглинання;
- 2) отримати аналітичний вираз для SINR як функції відстані та параметрів радіоканалу;
- 3) встановити зв'язок між SINR та пропускну здатністю каналу;
- 4) побудувати стохастичну модель масового обслуговування зі змінною інтенсивністю обслуговування, що залежить від пропускну здатності каналу;
- 5) встановити залежність між якістю сигналу, показниками QoS та рівнем навантаження мережі;
- 6) провести чисельне моделювання для верифікації аналітичних залежностей та аналізу впливу параметрів радіоканалу на QoS-показники.

#### 5. Моделі та методи

##### 5.1 Математична модель радіоканалу

Для опису процесу передачі сигналу в гетерогенних мережах 6G використовується модель радіоканалу, яка базується на узагальненій моделі поширення сигналу, що розширює рівняння Фріса [5, 9]. Дане рівняння дозволяє встановити залежність між потужністю прийнятого сигналу та параметрами системи передачі.

$$P_r(d, f) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 e^{-k(f)d}, \quad (1)$$

де  $P_t$  – потужність переданого сигналу;  $G_t, G_r$  – коефіцієнти підсилення антен;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $d$  – відстань між передавачем і приймачем;  $k(f)$  – коефіцієнт поглинання (залежить від частоти, кисню, водяної пари).

SINR зменшується зі збільшенням відстані внаслідок степеневого затухання сигналу, експоненційного ослаблення (молекулярне поглинання) та впливу інтерференції. З урахуванням співвідношення між довжиною хвилі та частотою сигналу

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

де  $c$  – швидкість світла;  $f$  – частота сигналу, можна зробити висновок, що при переході до високочастотних діапазонів, характерних для мереж 6G, значення  $\lambda$  зменшується, що призводить до додаткового зниження рівня прийнятого сигналу.

Таким чином, використання міліметрових і терагерцових частот підсилює вплив відстані на якість радіоканалу.

Для практичних розрахунків зручно використовувати логарифмічну форму узагальненої моделі поширення сигналу, що розширює рівняння Фріса:

$$P_r(dB) = P_t(dB) + G_t(dB) + G_r(dB) - 20\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - 4.343 k(f) d, \quad (3)$$

де  $4.343 = \frac{10}{\ln 10}$ .

Дана форма дозволяє перейти від мультиплікативних залежностей до адитивних та спрощує аналіз втрат сигналу в децибелах.

Розглянута модель є спрощеним представленням процесу поширення радіосигналу і базується на припущенні вільного простору без урахування багатопроменевого розповсюдження, ефектів затінення та інтерференції. Попри це, вона дозволяє отримати аналітичні вирази, необхідні для подальшого дослідження впливу якості радіоканалу на параметри якості обслуговування трафіку [10].

Таким чином, узагальнена модель поширення сигналу, що розширює рівняння Фріса формує базу залежності для визначення потужності сигналу, що надалі використовується для оцінки відношення сигнал/інтерференція+шум як ключового показника якості радіоканалу.

### 5.2 Оцінка якості радіоканалу

На основі отриманого виразу для потужності прийнятого сигналу якість радіоканалу може бути кількісно охарактеризована через відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR), яке є ключовим параметром для оцінки ефективності бездротової передачі даних.

З урахуванням молекулярного поглинання та інтерференції якість радіоканалу доцільно характеризувати через відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR), яке визначається як:

$$\gamma(d_f) = \frac{P_r(d_f)}{I(d) + N_0 B}, \quad (4)$$

де  $P_r(d_f)$  – визначається узагальненим рівнянням втрат сигналу з урахуванням експоненційного затухання;  $N_0 B$  – потужність шуму в смузі  $B$ ;  $I(d)$  – інтерференція.

У подальшому інтерференційна складова  $I(d)$  розглядається як узагальнена ефективна характеристика гетерогенної мережі, що в першому наближенні може бути апроксимована сталою середньою величиною.

З отриманого співвідношення випливає, що відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR) зменшується зі збільшенням відстані між передавачем і приймачем внаслідок комплексного впливу кількох факторів. Зокрема, спостерігається степеневе затухання сигналу, обумовлене геометричним розходженням хвилі, а також експоненційне ослаблення, спричинене молекулярним поглинанням у середовищі поширення. Додатково на зниження SINR впливає інтерференція від інших передавачів, що є характерним для гетерогенних мереж. У сукупності це призводить до суттєвого погіршення якості радіоканалу навіть при помірному збільшенні відстані, що є критичним для високочастотних систем 6G.

Беручи до уваги залежність (2), зростання робочої частоти супроводжується зменшенням довжини хвилі, що обумовлює додаткове зниження відношення сигнал/інтерференція+шум та посилення впливу відстані на якість радіоканалу.

Отримана залежність створює основу для подальшої оцінки пропускної здатності каналу, оскільки саме значення SINR визначає граничні можливості передачі інформації.

Однак у реальних бездротових середовищах умови поширення сигналу є нестабільними, що обумовлює необхідність врахування випадкових ефектів затухання.

Для врахування реальних умов поширення радіосигналу, які включають затінення, багатопроменевість та випадкові флуктуації потужності сигналу, детермінована модель втрат узагальнюється шляхом введення стохастичної складової. У такому випадку відношення сигнал/шум моделюється як добуток детермінованої компоненти, що описує середнє затухання сигналу, та випадкової величини, яка відображає статистичні ефекти середовища поширення:

$$\gamma(d_f, X) = \frac{K \cdot \frac{1}{d^\alpha} e^{-k(d) d} \cdot X}{I(d) + N_0 B}, \quad (5)$$

де  $X$  – випадкова величина, що має логнормальний розподіл із параметрами  $\mu_s$  та  $\sigma_s^2$ , що дозволяє врахувати стохастичний характер радіоканалу в гетерогенних мережах;  $K$  – детермінована константа, що визначає середній рівень затухання сигналу та залежить від параметрів системи передачі.

У подальшому аналізі інтерференційна складова  $I(d)$  розглядається як усереднена просторова характеристика гетерогенної мережі.

### 5.3 Пропускна здатність каналу

Пропускна здатність каналу є ключовим параметром, що визначає граничну швидкість передавання інформації в бездротових системах. Для її оцінки використовується теорема Шеннона [11], яка встановлює граничну залежність між пропускною здатністю каналу, шириною смуги пропускання та відношенням сигнал/шум:

$$C = B(I + \gamma), \quad (6)$$

де  $C$  – пропускна здатність каналу;  $B$  – ширина смуги пропускання.

Пропускна здатність розглядається як стохастична величина, обумовлена стохастичністю SINR.

Підставляючи отриманий раніше вираз для SINR, маємо залежність пропускної здатності від відстані між передавачем і приймачем:

$$C(df) = B \left( 1 + \frac{P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 e^{-k(f)d}}{I(d) + N_0 B} \right). \quad (7)$$

Отриманий вираз показує, що пропускна здатність каналу є нелінійною функцією відстані. Зі збільшенням відстані відбувається зменшення відношення сигнал/шум, що призводить до зниження максимальної швидкості передавання даних.

У спрощеному вигляді залежність можна подати як:

$$C(df, X) = B \left( 1 + \frac{K}{d^n} e^{-k(f)d} \cdot \frac{X}{I(d) + N_0 B} \right), \quad (8)$$

де  $K$  – узагальнений коефіцієнт, що включає параметри системи передачі та шуму.

Таким чином, пропускна здатність каналу  $C(d, X)$  визначається якістю радіоканалу та має стохастичний характер. В аналітичних виразах використовується математичне сподівання SINR, тоді як чисельне моделювання враховує реалізації випадкової величини  $X$ .

Оскільки саме пропускна здатність визначає інтенсивність обслуговування заявок у системі, це створює прямий зв'язок між фізичними характеристиками радіоканалу та навантаженням у мережі масового обслуговування. Отже, керування навантаженням у гетерогенній 6G-мережі може бути здійснене через параметри радіоканалу [12].

У цьому випадку пропускна здатність каналу може розглядатися як випадкова функція відстані, а випадкова складова  $X$  зумовлює флуктуації пропускної здатності навіть за фіксованих геометричних параметрів мережі.

Отже, інтенсивність обслуговування заявок у системі масового обслуговування також набуває стохастичного характеру, оскільки визначається через пропускну здатність каналу.

#### 5.4 Стохастична модель управління навантаженням у гетерогенній 6G-мережі з урахуванням пріоритетного трафіку

У даній роботі навантаження мережі розглядається як стохастичний процес, що формується сумарним впливом фізичних характеристик радіоканалу та гетерогенності трафіку. На відміну від класичної моделі M/M/1, у сучасних мережах 6G трафік має багатокласову структуру та включає сервіси з різними вимогами до затримки та надійності, зокрема URLLC, eMBB та mMTC [13].

У зв'язку з цим модель масового обслуговування розширюється до M/M/1/K системи з пріоритетним обслуговуванням, де інтенсивність надходження заявок розподіляється за класами,  $K$  – максимальна місткість буфера системи.

$$\lambda = \lambda_U + \lambda_E + \lambda_M, \quad (9)$$

де  $\lambda_U$  – інтенсивність URLLC-трафіку (високий пріоритет);  $\lambda_E$  – інтенсивність eMBB-трафіку (середній пріоритет);  $\lambda_M$  – інтенсивність mMTC-трафіку (низький пріоритет).

Інтенсивність обслуговування визначається пропускну здатністю радіоканалу, яка залежить від відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR):

$$\mu(d, X) = \frac{C(d, X)}{L}, \quad (10)$$

де  $L$  – середній розмір пакета;  $C(d, X)$  – визначається через модель Шеннона з урахуванням SINR та стохастичної природи радіоканалу.

У системі реалізується пріоритетний механізм обслуговування, характерний для мереж 6G, де URLLC має найвищий пріоритет та може витіснити пакети нижчих класів.

Для аналітичного опису середнього часу перебування заявок використовується апроксимація для системи з пріоритетами:

- 1) URLLC (високий пріоритет)

$$W_U \approx \frac{1}{\mu(d, X) - \lambda_U}; \quad (11)$$

- 2) eMBB (середній пріоритет)

$$W_E \approx \frac{1}{\mu(d, X) - (\lambda_U + \lambda_E)}; \quad (12)$$

- 3) mMTC (низький пріоритет)

$$W_M \approx \frac{1}{\mu(d, X) - (\lambda_U + \lambda_E + \lambda_M)}. \quad (13)$$

Оскільки трафік класу URLLC має найвищий пріоритет і може витіснити пакети eMBB та mMTC, ймовірність його втрати є мінімальною. Для нижчих класів трафіку ймовірність втрати (PLR) складається з двох компонентів: блокування через переповнення буфера та скидання через прихід пакетів з вищим пріоритетом.

Згідно з теорією систем M/M/1/K, стаціонарна ймовірність того, що в системі знаходиться n пакетів, визначається як:

$$P_n = p(d)^n \frac{1-p(d)}{1-p(d)^{K+1}}, \quad (14)$$

де  $p(d)$  – загальний коефіцієнт завантаження системи від усіх класів трафіку.

Будь-який пакет класу  $i \in \{E, M\}$  буде заблокований, якщо на момент його надходження буфер повністю заповнений ( $n = K$ ):

$$P_{block} = P_K = \frac{p(d)^K(1-p(d))}{1-p(d)^{K+1}}. \quad (15)$$

З урахуванням багатокласового трафіку коефіцієнт завантаження визначається як:

$$\rho(d) = \frac{\lambda_U + \lambda_E + \lambda_M}{E[\mu(d, X)]}. \quad (16)$$

Клас mMTC є найбільш чутливим до деградації радіоканалу та навантаження. Ймовірність втрати пакета mMTC ( $PLR_M$ ) суттєво зростає при збільшенні інтенсивності URLLC ( $\lambda_U$ ) та eMBB ( $\lambda_E$ ), оскільки вони мають право на першочергове обслуговування та витіснення.

Для спрощеної оцінки в умовах високого навантаження, сумарна ймовірність втрати для mMTC-трафіку може бути апроксимована як:

$$PLR_M P_{block} + P_{displ}, \quad (17)$$

де  $P_{displ}$  – ймовірність того, що пакет буде витіснений з буфера пакетом URLLC, який надійшов пізніше.

При наближенні  $\rho(d) \rightarrow 1$  ймовірність втрат  $P_K$  зростає нелінійно, що в сценарії Cell-edge ( $n=4$ ) призводить до миттєвої деградації mMTC-сервісів.

У міському середовищі (Urban,  $n=3$ ) навіть при стабільній затримці URLLC, ймовірність втрат для mMTC може перевищити допустимі межі ( $> 10^{-2}$ ), що робить мережу непридатною для масового інтернету речей.

Умова стабільності системи виконується при:  $\rho(d) < 1$ .

Запропонована модель дозволяє описати ключові особливості гетерогенних мереж 6G:

- URLLC-трафік обслуговується з мінімальною затримкою та практично не накопичується в черзі;
- eMBB-трафік формує середнє навантаження системи;
- mMTC-трафік є найбільш чутливим до деградації SINR і призводить до формування черг при погіршенні умов радіоканалу.

Таким чином, якість радіоканалу безпосередньо впливає на диференційовані показники QoS для різних класів трафіку через зміну інтенсивності обслуговування  $\mu(d, X)$ .

Узагальнюючи результати, отримуємо розширений причинно-наслідковий стохастичний ланцюг взаємозв'язків:

$$d \rightarrow \gamma(d, f, X) \rightarrow \mu(d, X) \rightarrow \{QoS, PLR\}, \quad (18)$$

і дозволяє описати поведінку гетерогенних 6G-мереж у вигляді багатокласової стохастичної системи масового обслуговування з пріоритетами та прогнозувати повну відмову в обслуговуванні для низькопріоритетних пристроїв при погіршенні умов радіоканалу.

Таким чином, якість радіоканалу безпосередньо визначає ефективність обслуговування трафіку, впливаючи на показники QoS і рівень навантаження мережі.

## 6. Результати дослідження

Для перевірки аналітичної моделі та оцінки її адекватності проведено чисельне моделювання впливу параметрів радіоканалу на характеристики якості обслуговування трафіку в гетерогенній мережі 6G. Основною метою експерименту є підтвердження встановлених у роботі залежностей між відстанню, відношенням сигнал/інтерференція+шум (SINR), пропускну здатністю каналу та показниками QoS.

Для чисельної реалізації повної моделі SINR, що включає молекулярне поглинання та інтерференцію, використано еквівалентну апроксимацію у вигляді ефективного показника затухання.

Такий підхід дозволяє врахувати сумарний вплив степеневого затухання, молекулярного поглинання та інтерференції без зміни структури аналітичних залежностей.

### 6.1 Вихідні параметри чисельного експерименту

Моделювання виконується у середовищі Python [14] із використанням аналітичних виразів, описаних вище. Для відображення різних умов функціонування бездротової системи застосовано сценарний підхід. Такий підхід відповідає сучасним практикам моделювання гетерогенних мереж 6G, у яких умови поширення сигналу можуть істотно відрізнитися залежно від середовища та щільності розгортання базових станцій. Розглянуто три характерні сценарії функціонування бездротової системи:

– оптимальний сценарій, що відповідає умовам прямої видимості (LoS) та мінімальними втратами сигналу;

– типовий сценарій, характерний для міських гетерогенних мереж із помірним затуханням ;

– граничний сценарій, який моделює роботу системи на межі зони покриття (cell-edge conditions).

Для всіх сценаріїв прийнято фіксовані параметри радіосистеми, що відповідають типовим характеристикам мереж 6G:

–  $P_t = 1 \text{ Вт}$  – потужність переданого сигналу;

–  $G_t = G_r = 25 \text{ dBi}$  – коефіцієнти підсилення антен;

–  $N_0 = 10^{-21} \text{ Вт/Гц}$  – спектральна щільність шуму;

–  $B = 10 - 20 \text{ ГГц}$  – ширина смуги пропускання каналу;

–  $f = 140 \text{ ГГц}$  – несуча частота;

– молекулярне поглинання враховано через коефіцієнт  $\kappa(f)$  відповідно до моделі ITU-R P.676 з урахуванням відносної вологості.

Такі значення частоти та ширини смуги відображають очікувані характеристики терагерцового діапазону мереж 6G [15].

### 6.2 Верифікація залежності відношення сигнал/інтерференція+шум від відстані

На першому етапі чисельного дослідження проведено аналіз залежності відношення сигнал/інтерференція+шум від відстані між передавачем і приймачем. Для моделювання використовувалась стохастична модель радіоканалу, розроблена в розділі 4 (вирази (4)-(5)), доповнена врахуванням молекулярного поглинання та інтерференції, що є критичними для мереж 6G у терагерцовому діапазоні [16].

Зокрема, для різних сценаріїв функціонування мережі приймаються такі значення показника затухання:

–  $n = 2$  – для умов прямої видимості (LoS);

–  $n = 3$  – для типових міських умов;

–  $n = 4$  – для граничних умов (cell-edge).

Результати моделювання наведено на рис. 1.

Зі збільшенням показника затухання  $n$  спостерігається більш швидке зниження SINR, що відповідає погіршенню умов поширення сигналу. Найбільш сприятливі умови спостерігаються для сценарію прямої видимості ( $n = 2$ ), тоді як у граничному сценарії ( $n = 4$ ) відбувається найшвидша деградація якості радіоканалу.

Додатково на зниження SINR впливає експоненційний множник  $e^{-\kappa(f)d}$ , що відображає молекулярне поглинання, яке є суттєвим для високочастотних діапазонів 6G. Це призводить до прискореного зменшення рівня сигналу на великих відстанях.

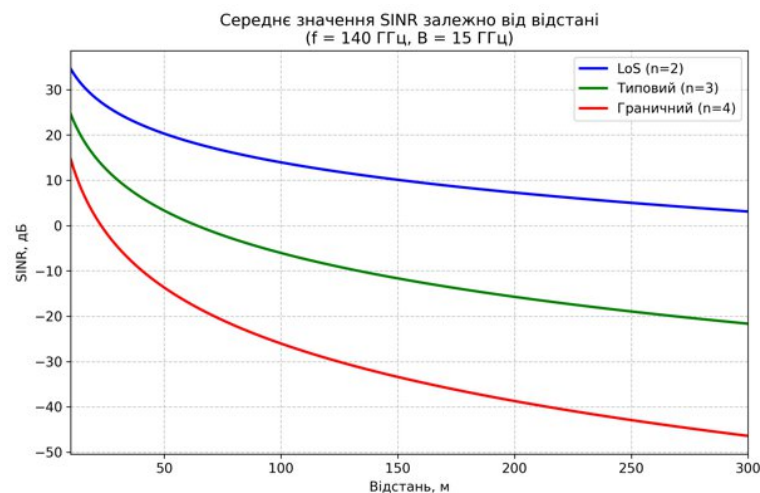


Рис. 1. Середнє значення SINR залежно від відстані для різних сценаріїв поширення сигналу

Отримані результати узгоджуються з аналітичними залежностями, наведеними у розділі 4, та підтверджують адекватність запропонованої стохастичної моделі для опису процесів поширення сигналу в гетерогенних мережах 6G.

### 6.3 Аналіз впливу параметрів радіоканалу на пропускну здатність

Для оцінки впливу якості радіоканалу на пропускну здатність системи проведено чисельне моделювання на основі стохастичної моделі, розробленої в розділі 4. Пропускна здатність каналу розраховувалася за теоремою Шеннона з урахуванням отриманих значень SINR та ширини смуги пропускання, прийнятої у чисельному експерименті.

Оскільки SINR має стохастичний характер, для отримання усереднених характеристик застосовувався метод Монте-Карло. Результати моделювання для трьох сценаріїв поширення сигналу наведено на рис. 2.

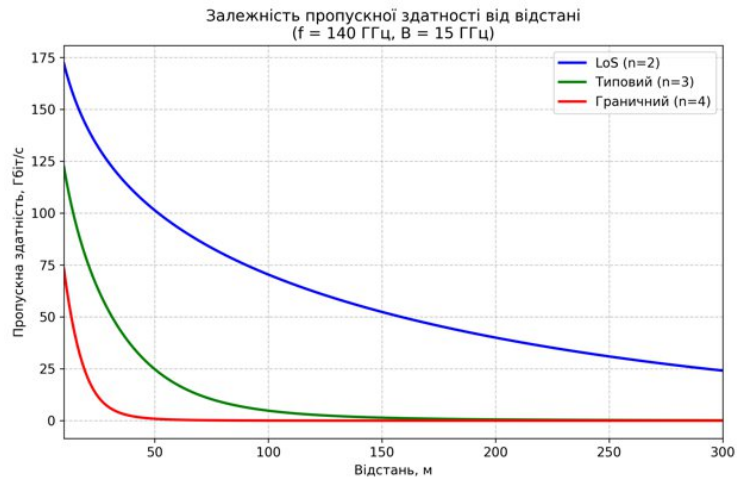


Рис. 2. Залежність середньої пропускну здатності від відстані для різних сценаріїв поширення радіохвиль

Графік демонструє нелінійне зменшення пропускну здатності зі збільшенням відстані в усіх розглянутих сценаріях. Найвищі значення пропускну здатності спостерігаються в умовах прямої видимості (LoS, n=2). У граничному сценарії (n=4) пропускна здатність знижується найбільш інтенсивно через сукупний вплив ступеневого затухання, молекулярного поглинання та інтерференції.

Отримані результати підтверджують, що завдяки великій ширині смуги пропускання в субтерагерцовому діапазоні на відносно невеликих відстанях вдається досягати високої пропускну здатності (десятки Гбіт/с). Водночас якість каналу швидко деградує зі збільшенням відстані, що є характерною особливістю перспективних мереж 6G.

#### 6.4 Аналіз впливу якості радіоканалу на показники QoS у гетерогенній 6G-мережі з пріоритетним трафіком

У даному підрозділі досліджується вплив якості радіоканалу на показники якості обслуговування (QoS) у гетерогенній бездротовій мережі шостого покоління (6G) з пріоритетним трафіком. Аналіз виконується для трьох сценаріїв поширення радіосигналу (LoS, Urban, Cell-edge) та трьох класів сервісів: URLLC, eMBB та mMTC. Основним показником QoS обрано середній час затримки обслуговування заявок [17].

Результати моделювання для сценарію прямої видимості (LoS, n = 2) наведено на рис. 3.

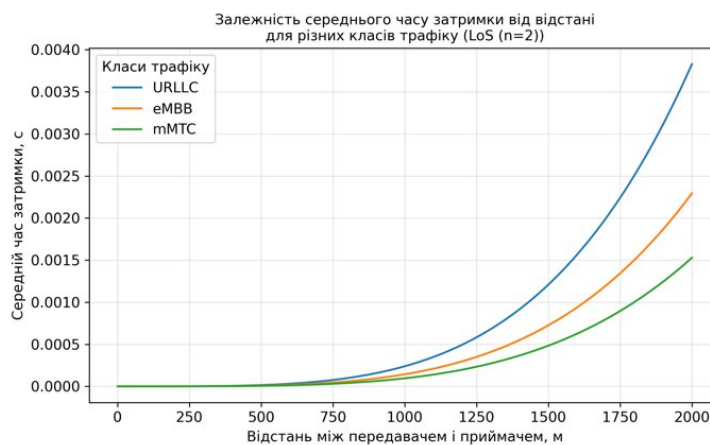


Рис. 3. Залежність середнього часу затримки від відстані для LoS

У даному випадку спостерігаються найкращі умови поширення радіосигналу, що забезпечує високі значення відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR) та, відповідно, більшу пропускну здатність каналу.

Для всіх класів трафіку характерні найнижчі значення затримки. Зокрема, URLLC-сервіси демонструють практично сталий рівень затримки навіть при збільшенні відстані, що пояснюється їх низькими вимогами до

ресурсів та пріоритетним механізмом обслуговування. eMBB-трафік характеризується помірним зростанням затримки, тоді як mMTC-сервіси демонструють вищу чутливість до збільшення відстані через велику кількість одночасних пристроїв [18].

Результати для міського середовища (Urban,  $n = 3$ ) наведено на рис. 4.

У даному сценарії спостерігається зростання втрат сигналу через багатопроменеве поширення та часткове затінення, що призводить до зниження SINR та пропускної здатності каналу.

У порівнянні зі сценарієм LoS, усі класи трафіку демонструють вищі значення затримки. Найбільш помітне зростання спостерігається для mMTC-сервісів, які є найбільш чутливими до деградації каналу. eMBB демонструє середній рівень погіршення QoS, тоді як URLLC залишається відносно стабільним завдяки пріоритетному обслуговуванню.

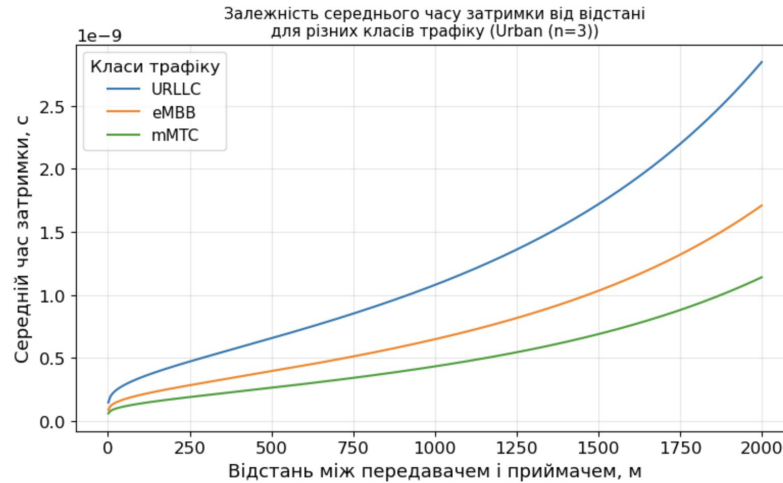


Рис. 4. Залежність середнього часу затримки від відстані для Urban

Результати для граничного сценарію (Cell-edge,  $n = 4$ ) наведено на рис. 5.

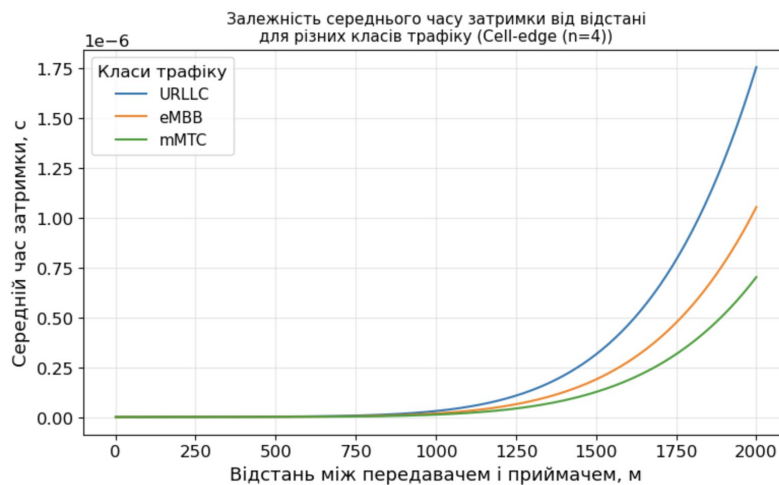


Рис. 5. Залежність середнього часу затримки від відстані для Cell-edge

У даному випадку спостерігається найбільш інтенсивна деградація радіоканалу, що зумовлена значним згасанням сигналу на великих відстанях та зниженням SINR.

Усі класи трафіку демонструють різке зростання затримки при збільшенні відстані. Найбільш критичні значення спостерігаються для mMTC-сервісів, які швидко переходять у стан перевантаження системи. eMBB також зазнає суттєвого погіршення QoS, тоді як URLLC залишається найбільш стійким, хоча також демонструє зростання затримок у граничній зоні покриття [19].

Порівняльний аналіз трьох сценаріїв показує, що якість радіоканалу є визначальним фактором, який впливає на показники QoS у гетерогенних 6G-мережах. Спостерігається чітка залежність:

збільшення відстані  $\rightarrow$  зниження SINR  $\rightarrow$  зменшення пропускної здатності  $\rightarrow$  зростання затримки

Водночас введення пріоритетного механізму обслуговування забезпечує диференціацію класів трафіку за рівнем QoS. Найбільш стійким до деградації каналу є URLLC-трафік, тоді як mMTC є найбільш чутливим і формує основне навантаження в умовах погіршення радіосередовища.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування фізичних характеристик радіоканалу при моделюванні та управлінні навантаженням у гетерогенних мережах 6G.

#### 6.5 Порівняння з існуючими моделями

Для перевірки адекватності та практичної цінності розробленої стохастичної моделі проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими підходами у сфері моделювання мереж 6G.

Зокрема, залежності середнього затухання сигналу та SINR порівнювалися з рекомендаціями 3GPP TR 38.901 (та його розширеннями для частот вище 100 ГГц) та моделями, описаними в роботах [5] та ITU-R P.676. Виявлено якісну та кількісну узгодженість запропонованої моделі зі стандартними path loss моделями для умов LoS та Non-LoS у субтерагерцовому діапазоні. Водночас розроблена модель додатково враховує молекулярне поглинання як функцію частоти, що є особливо важливим для терагерцового діапазону і часто недостатньо детально представлено у загальних 3GPP-моделях [20].

На відміну від стандартних моделей 3GPP, запропонований підхід дозволяє безпосередньо простежити вплив SINR на характеристики черг, що зазвичай не представлено в явному аналітичному вигляді.

У частині оцінки пропускної здатності та QoS-показників запропонований підхід відрізняється від традиційних системних симуляторів (наприклад, ns-3 з модулями 5G/6G або MATLAB 5G Toolbox) тим, що забезпечує аналітичну інтеграцію фізичного рівня (SINR з молекулярним поглинанням) та рівня масового обслуговування з урахуванням стохастичного характеру каналу. Більшість існуючих симуляторів вимагає значних обчислювальних ресурсів і часто використовує усереднені значення параметрів каналу, тоді як запропонована модель дозволяє отримувати аналітичні та чисельні залежності з меншими витратами.

Порівняння показало, що в умовах прямої видимості ( $n = 2$ ) результати добре співпадають з відомими моделями. У граничних умовах ( $n = 4$ ) розроблена модель демонструє більш песимістичні (реалістичні) значення затримки та завантаження системи завдяки явному врахуванню молекулярного поглинання та інтерференції, які в деяких спрощених моделях недооцінюються.

Таким чином, запропонована стохастична модель доповнює існуючі підходи, поєднуючи точність фізичного моделювання з ефективністю теорії масового обслуговування, і може бути використана як доповнення до детальних системних симуляцій.

#### 6.6. Обговорення результатів

Отримані результати чисельного моделювання підтверджують адекватність запропонованої стохастичної моделі та її здатність коректно відображати взаємозв'язок між параметрами радіоканалу та показниками якості обслуговування в гетерогенній мережі 6G.

Встановлено, що визначальним фактором поведінки системи є якість радіоканалу, яка характеризується відношенням сигнал/інтерференція+шум (SINR). Зміна відстані між передавачем і приймачем призводить до каскадного ефекту: зниження SINR спричиняє зменшення пропускної здатності каналу, що, у свою чергу, зменшує інтенсивність обслуговування заявок і призводить до погіршення показників якості обслуговування.

Аналіз роботи системи для різних значень показника затухання  $n$  показує суттєву залежність її характеристик від умов поширення радіосигналу. За умов прямої видимості ( $n = 2$ ) спостерігається високий рівень SINR, що забезпечує значну пропуску здатність каналу та стабільну роботу системи з низьким рівнем навантаження.

У типових міських умовах ( $n = 3$ ) відбувається помірне зниження SINR через вплив багатопроменевого поширення та часткового затінення. Це призводить до зменшення пропускної здатності, однак система зберігає стабільний режим функціонування з прийнятними показниками якості обслуговування.

У граничних умовах покриття ( $n = 4$ ) спостерігається суттєва деградація радіоканалу. Зниження SINR через сукупний вплив ступеневого затухання, молекулярного поглинання та інтерференції призводить до різкого зменшення пропускної здатності каналу та інтенсивності обслуговування. Це викликає істотне погіршення показників якості обслуговування та наближення системи до режиму насичення.

Отримані результати також демонструють нелінійний характер залежності між відстанню та характеристиками QoS. Навіть незначне збільшення відстані в умовах високочастотного діапазону може призводити до суттєвого погіршення якості обслуговування, що є характерною особливістю мереж 6G.

Особливістю запропонованого підходу є інтеграція фізичної моделі радіоканалу з моделлю теорії масового обслуговування. Це дозволяє враховувати вплив змін SINR безпосередньо на інтенсивність обслуговування, забезпечуючи більш реалістичний опис поведінки системи порівняно з класичними моделями, у яких пропускна здатність часто вважається сталою.

Порівняння з відомими підходами (3GPP TR 38.901, ITU-R P.676 та класичними моделями поширення радіохвиль) показує якісну узгодженість результатів у сприятливих умовах поширення сигналу. Водночас у граничних умовах запропонована модель відображає більш реалістичну деградацію характеристик системи завдяки явному врахуванню високочастотних ефектів, зокрема молекулярного поглинання.

Узагальнено, результати дослідження підтверджують, що запропонована стохастична модель дозволяє послідовно описувати весь ланцюг впливів у гетерогенній мережі 6G: від фізичних параметрів радіоканалу до показників якості обслуговування. Це забезпечує її придатність для аналізу, прогнозування та оптимізації роботи перспективних бездротових систем.

### 7. Висновки та перспективи подальших досліджень

У роботі розроблено стохастичну модель управління навантаженням у гетерогенних мережах 6G, яка враховує вплив якості радіоканалу на характеристики обслуговування трафіку. Запропонований підхід базується на залежності параметрів мережі від відношення сигнал/інтерференція+шум (SINR), що дозволяє адекватно описувати поведінку бездротової системи в умовах високочастотного терагерцового діапазону.

У межах дослідження отримано аналітичні та чисельні залежності між відстанню, якістю радіоканалу та основними показниками QoS, зокрема коефіцієнтом завантаження системи та середньою затримкою. Показано, що зниження SINR унаслідок степеневого згасання сигналу, інтерференції та молекулярного поглинання спричиняє каскадне погіршення характеристик мережі: зменшення пропускної здатності → зниження інтенсивності обслуговування → зростання затримок.

Результати чисельного моделювання для різних сценаріїв поширення сигналу ( $n = 2, 3, 4$ ) підтвердили наявність суттєво різних режимів функціонування системи. У режимі прямої видимості ( $n = 2$ ) мережа характеризується значним запасом пропускної здатності та стабільною роботою. У типовому міському середовищі ( $n = 3$ ) спостерігається помірне погіршення QoS-показників при збереженні працездатності системи. У граничному сценарії ( $n = 4$ ) виявлено швидкий перехід до режиму насичення, що супроводжується різким зростанням затримок навіть при незначному збільшенні відстані.

Порівняння з існуючими моделями та стандартами (3GPP, ITU-R) показало узгодженість результатів у сприятливих умовах поширення сигналу, тоді як у складних сценаріях запропонована модель демонструє більш реалістичну поведінку системи завдяки явному врахуванню фізичних ефектів терагерцового діапазону.

Таким чином, розроблена стохастична модель має як теоретичне, так і прикладне значення та може бути використана для аналізу, прогнозування й оптимізації роботи гетерогенних мереж 6G, зокрема при розробці алгоритмів адаптивного управління радіоресурсами, балансування навантаження та проектування мережевої архітектури майбутніх бездротових систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням запропонованої моделі шляхом урахування мобільності користувачів, динамічної зміни топології мережі, впливу багатопробеневого поширення сигналу та адаптивного керування потужністю передавання. Окремий інтерес становить дослідження застосування методів машинного навчання для прогнозування перевантажень, автоматичного перерозподілу трафіку та підвищення ефективності управління ресурсами в мережах нового покоління.

**Внесок авторів** Максим Ілларіонов – концептуалізація дослідження; розробка методології; побудова аналітичної стохастичної моделі управління навантаженням у гетерогенних мережах 6G; формування теоретичних положень роботи, проведення чисельного моделювання; збір та обробка результатів експерименту; візуалізація та інтерпретація отриманих даних; Володимир Білодід – програмна реалізація моделі; підготовка матеріалів для аналізу результатів.

#### **Декларація про штучний інтелект**

Під час підготовки рукопису автори застосовували інструменти штучного інтелекту тільки для допоміжної перевірки правопису й граматики тексту. Зокрема використано мовні інструменти Grammarly й мовну модель OpenAI для технічної перевірки окремих фрагментів тексту.

Інструменти штучного інтелекту не застосовувалися для наукового аналізу, оброблення експериментальних показників, побудови математичних моделей або формування результатів дослідження.

Усі наукові положення, методи, результати експериментів і висновки сформульовано самостійно. Автори перевірили коректність тексту після застосування інструментів штучного інтелекту й несуть повну відповідальність за зміст статті. Використання інструментів штучного інтелекту не вплинуло на результати дослідження та його висновки.

#### **Конфлікт інтересів**

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті.

#### **Список використаної літератури**

- 1.Liu, F., Cui, Y., Masouros, C., Xu, J., Han, T. X., Eldar, Y. C., & Buzzi, S. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2022. Vol. 40(6). P.1728-1767. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632>
- 2.Radivilova, T., Kirichenko, L., Lemeshko, O., Ageyev, D., Mulesa, O., & Ilkov, A. Analysis of anomaly detection and identification methods in 5G traffic. In 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2021. P.1108-1113. <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660920>

3. Dang, S., Amin, O., Shihada, B., & Alouini, M. S. What should 6G be? *Nature Electronics*. 2020. Vol.3. P.20-29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
4. Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34(3). P.134-142. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
5. Rappaport, T. S., Xing, Y., Kanhere, O., Ju, S., Madhow, U., & Trichopoulos, G. C. . Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P.78729-78757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>
6. Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol.38(11). P.2450-2473. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007211>
7. Zhang, Y., Gui, G., Gacanin, H., & Adachi, F. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol.23(2). P.845-873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3059896>
8. Goldsmith, A. *Wireless communications*. Cambridge University Press. 2005. P.436. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>
9. Warnick, K. F., Broyde, F., Jelinek, L., Capek, M., & Clavelier, E. Generalized Friis transmission formula using active antenna available power. *arXiv preprint arXiv:2401.13775*. 2024. 13775. <https://arxiv.org/abs/2401.13775>
10. Yang, P., Di Renzo, M., Xiao, Y., Li, S., & Hanzo, L. Design guidelines for spatial modulation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol.17(1). P. 6-26. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2327066>
11. Wang, C. X., Yang, Y., Huang, J., & Gao, X. Electromagnetic information theory: Fundamentals and applications for 6G wireless communication systems. *IEEE Wireless Communications*. 2024. P.1-8. <https://doi.org/10.1109/MWC.013.2300399>
12. Björnson, E., & Sanguinetti, L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol.19(1). P.77-90. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2941478>
13. Alamri, A., Alotaibi, Y., Alzahrani, A., & Alharbi, S. Performance evaluation of M/M/1 queueing models in cloud computing environments. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024. Vol.85. P.841-848. <https://doi.org/10.54097/1xcw8y74>
14. Virtanen, P., et al. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*. 2020. Vol.17. P.261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
15. Akhtar, M. W., Hassan, S. A., Ghaffar, R., et al. The shift to 6G communications: Vision and requirements. *Human-Centric Computing and Information Sciences*. 2020. Vol.10. P.53. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00258-2>
16. Akdeniz, M. R., et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol.32(6). P.1164-1179. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328154>
17. Proakis, J. G., & Salehi, M. *Digital communications*. (5th ed.). McGraw-Hill. 2008. P.1150.
18. Strinati, E. C., Barbarossa, S., Gonzalez-Jimenez, J. L., Ktenas, D., Cassiau, N., Maret, L., & Dehos, C. 6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2019. Vol.14(3). P.42-50. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921161>
19. Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Communications Magazine*. 2020. Vol.58(3). P.55-61. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
20. Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., & Han, C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical Communication*. 2014. Vol.12. P.16-32. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>

## References

21. Liu, F., Cui, Y., Masouros, C., Xu, J., Han, T. X., Eldar, Y. C., & Buzzi, S. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2022. Vol. 40(6). P.1728-1767. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632>
22. Radivilova, T., Kirichenko, L., Lemeshko, O., Ageyev, D., Mulesa, O., & Ilkov, A. Analysis of anomaly detection and identification methods in 5G traffic. In *2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. P.1108-1113. <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660920>
23. Dang, S., Amin, O., Shihada, B., & Alouini, M. S. What should 6G be? *Nature Electronics*. 2020. Vol.3. P.20-29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
24. Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34(3). P.134-142. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
25. Rappaport, T. S., Xing, Y., Kanhere, O., Ju, S., Madhow, U., & Trichopoulos, G. C. . Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P.78729-78757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>

26. Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol.38(11). P.2450-2473. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007211>
27. Zhang, Y., Gui, G., Gacanin, H., & Adachi, F. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol.23(2). P.845-873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3059896>
28. Goldsmith, A. *Wireless communications*. Cambridge University Press. 2005. P.436. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>
29. Warnick, K. F., Broyde, F., Jelinek, L., Capek, M., & Clavelier, E. Generalized Friis transmission formula using active antenna available power. *arXiv preprint arXiv:2401.13775*. 2024. 13775. <https://arxiv.org/abs/2401.13775>
30. Yang, P., Di Renzo, M., Xiao, Y., Li, S., & Hanzo, L. Design guidelines for spatial modulation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol.17(1). P. 6-26. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2327066>
31. Wang, C. X., Yang, Y., Huang, J., & Gao, X. Electromagnetic information theory: Fundamentals and applications for 6G wireless communication systems. *IEEE Wireless Communications*. 2024. P.1-8. <https://doi.org/10.1109/MWC.013.2300399>
32. Björnson, E., & Sanguinetti, L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol.19(1). P.77-90. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2941478>
33. Alamri, A., Alotaibi, Y., Alzahrani, A., & Alharbi, S. Performance evaluation of M/M/1 queueing models in cloud computing environments. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024. Vol.85. P.841-848. <https://doi.org/10.54097/1xcw8y74>
34. Virtanen, P., et al. *SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python*. *Nature Methods*. 2020. Vol.17. P.261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
35. Akhtar, M. W., Hassan, S. A., Ghaffar, R., et al. The shift to 6G communications: Vision and requirements. *Human-Centric Computing and Information Sciences*. 2020. Vol.10. P.53. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00258-2>
36. Akdeniz, M. R., et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol.32(6). P.1164-1179. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328154>
37. Proakis, J. G., & Salehi, M. *Digital communications*. (5th ed.). McGraw-Hill. 2008. P.1150.
38. Strinati, E. C., Barbarossa, S., Gonzalez-Jimenez, J. L., Ktenas, D., Cassiau, N., Maret, L., & Dehos, C. 6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2019. Vol.14(3). P.42-50. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921161>
39. Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Communications Magazine*. 2020. Vol.58(3). P.55-61. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
40. Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., & Han, C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical Communication*. 2014. Vol.12. P.16-32. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>

**Надійшла до редакції: 02.04.26**

**Прийнята до друку: 12.06.26**

**Опубліковано: 30.06.26**