

УДК 621.39

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.035862

О. О. ОРЯБІНСЬКА, викладач, ORCID: 0009-0005-8156-0177,

І. В. ТАРАСЕНКО, викладач, ORCID: 0009-0009-5736-5979,

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КАНАЛУ СИСТЕМ 5G ТА 6G УСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕННЯ

Для з'єднань точка-точка в системах 5G вже стандартизували E-діапазон від 60 до 90 ГГц [1], а це означає що і наступне покоління 6G його буде використовувати. Використання даного діапазону дозволить радіосистемам наблизити швидкість передавання даних до швидкостей досяжних у волоконно-оптичних лініях [1]. Підвищення частоти робочого діапазону автоматично призводить до зменшення зони покриття від одного передавача. Розмір стільників у системах 5G та 6G вже мікро-стільники та піко-стільники, що інколи забезпечує покриття лише у певній будівлі. Моделі поширення радіохвиль усередині приміщень, що частіше всього використовуються, засновані на описі поширення радіохвиль у вільному просторі. Але слід враховувати, що наявність відбиваючих поверхонь у вигляді стін, підлоги, меблів, людей та інших об'єктів суттєво впливає на характер поширення радіохвиль. Різні типи приміщень створюють різноманітні характеристики поширення, які прийнято описувати емпіричними моделями, що базуються на усередненні безлічі експериментальних даних. У даній роботі пропонується взяти за основу емпіричну модель радіоканалу [3] та аналітичну модель радіоканалу з урахуванням ревербераційного поля, створеного відбиваючими поверхнями [2]. Об'єднання цих моделей дозволяє: оцінити канал за наявності прямої видимості і канал за відсутності прямої видимості; врахувати індивідуальні особливості приміщень, що дозволить суттєво зменшити похибку, характерну для емпіричних моделей; за рахунок використання показника ступеня втрат на трасі з емпіричної моделі можна точніше врахувати характер приміщення. Такий підхід дозволяє поєднати переваги та зменшити недоліки двох методів моделювання.

**Ключові слова:** E-діапазон; поширення радіохвиль; ревербераційне поле; модель каналу в середині приміщення; втрати на трасі.

### Вступ

Математичне моделювання каналів зв'язку завжди мало суто науковий інтерес і дозволяло перевірити нові методи передавання аналітично ще на етапі розробки. Також моделювання радіоканалу фіксовані точка-точка дозволяло оптимально обрати обладнання радіолінії. З поширенням систем мобільного зв'язку та доступу виникла потреба у складних динамічних моделях каналів, що можуть врахувати зміни, які виникають повсякчас, навіть за відсутності руху передавача відносно приймача. Потреба в таких моделях перш за все була у науковців, що розробляли нові методи передавання. Але і оператори зв'язку теж потребували ефективних моделей, які б дозволили проводити якісно частотно-територіальне планування. В результаті виникло декілька підходів до математичного моделювання радіоканалів. Аналітичні моделі, що імітували вплив спотворень на сигнали дозволяли добре оцінити ефективність нових методів передавання, але не дозволяли прорахувати зону покриття у стільнику і визначити зони радіотіні [2]. Для вирішення цієї проблеми почали використовувати імітаційні моделі, в яких за допомогою точних цифрових карт місцевості програмним методом розраховується інтенсивність сигналу в кожній точці простору. Дана методика вимагає, по-перше, створення точних цифрових карт, що враховують не тільки периметр, а й висотність будівель. Також, слід враховувати матеріали, з яких вони побудовані. Така кропітка робота пов'язана з суттєвими витратами. З широким поширенням систем з піко-стільниковою структурою мережі, де передбачене улаштування точок доступу всередині приміщень, частотно-територіальне планування ускладнилося. Для оптимального вибору розташування точки доступу виникла потреба в простих у використанні моделях каналу всередині приміщення. Для вирішення цієї задачі почали використовувати емпіричні моделі, які отримували шляхом вимірювань у різних приміщеннях певного типу [3]. Дані моделі досить прості, але враховують особливості приміщень, виконаних з використанням певних будівельних матеріалів, характерних для кліматичних умов і традицій США [3]. Тобто отримані моделі не є універсальними.

### Основна частина

Технології 5G та 6G дозволять забезпечити найвищі швидкості передачі даних, доступні сьогодні. Нещодавно для з'єднань точка-точка був стандартизований E-діапазон. E-діапазон це спектр електромагнітного випромінювання, що лежить у частотному діапазоні від 60 до 90 ГГц. Оптоволоконний зв'язок

© О. О. Орябінська, І. В. Тарасенко, 2024

забезпечує швидкість передачі даних до 10 Гбіт/сек, а перевагою бездротових мереж Е-діапазону є те, що за швидкістю з'єднання вони наближаються до швидкості передачі даних по волокну. Над розвитком бездротових мереж 5G у цьому напрямі вже працюють такі великі телекомунікаційні компанії, як Ericsson, Huawei, NEC і Nokia [1].

**Аналітична модель на основі поширення у вільному просторі.** Більшість моделей, які використовуються для розрахунків втрат на радіотрасі усередині приміщень, засновані на формулі розрахунку втрат при поширенні радіохвиль у вільному просторі [3].

$$L(d) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} \text{ дБ.} \quad (1)$$

**Емпірична модель.** Наявність радіонепрозорих поглинаючих і відбиваючих поверхонь у вигляді стін, підлоги, меблів, людей та інших об'єктів істотно впливає на характер поширення радіохвиль. Різноманітність типів приміщень зі схожими типами відбиваючих та поглинаючих поверхонь призводить до необхідності використовувати деякі емпіричні моделі, які ґрунтуються на даних численних вимірювань. У роботі [3] розроблені декілька моделей, де втрати на трасі поширення радіохвиль в певних типах приміщень визначаються співвідношенням

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\Omega}, \quad (2)$$

де  $L(d)$  — втрати на трасі поширення радіохвиль в децибелах;  $d$  — відстань рознесення передавача та приймача;  $L(d_0)$  — еталонні втрати на трасі на деякій еталонній відстані  $d_0$ ;  $n$  — показник ступеня втрат на трасі та  $X_{\Omega}$  — компонент затінення, який є випадковою величиною з гаусовим розподілом, нульовим середнім і стандартним відхиленням  $\Omega$  [3]. Запропонована модель дозволяє оцінювати ослаблення в каналі з прямою видимістю. Але характер поширення радіохвиль всередині приміщення з безліччю відбиваючих поверхонь частіше всього не передбачає прямої видимості. Отримані експериментально  $L(d_0)$  мають великий розкид значень для одного й того ж типу приміщень. Це можна пояснити різними розмірами і матеріалами відбиваючих поверхонь. Значення ж  $n$  та  $\Omega$  мають невеликий розкид навколо середнього для одного типу приміщення.

**Аналітична модель на основі ефекту реверберації.** Якщо передавальна антена розташована всередині приміщення, то незалежно від її положення багаторазове відбиття радіохвиль від стін, підлоги, стелі, меблів та інших об'єктів призводить до збільшення потужності сигналу, на виході приймальної антени. Збільшення спостерігаємо порівняно з передаванням у вільному просторі. Даний ефект нагадує явище реверберації, добре вивчене в акустиці. Розглянемо малий майданчик  $\Delta s$ , довільно розташований всередині кімнати. Робимо припущення, що радіохвилі поширюються рівномірно і вєспрямовано. Тоді біжуча зліва направо хвиля переносить половину від потужності, що переноситься через цей майданчик при нормальному падінні. Якщо кут падіння хвилі на виділений, майданчик  $\Delta s$  довільний, то потужність, що переноситься, в середньому в два рази менша, ніж при нормальному падінні. Таким чином, чверть повного потоку енергії переноситься крізь довільний малий виділений майданчик. Враховуючи, що щільність потоку енергії  $W$  на відстані  $d$  від джерела з потужністю  $P_{\text{пр}}$  у вільному просторі визначається формулою

$$W = \frac{P_{\text{пр}}}{4\pi d^2}, \quad (3)$$

введемо середній коефіцієнт поглинання поверхні  $\bar{\alpha}$  та підсумуємо по всій поверхні. В результаті отримаємо співвідношення

$$\frac{W}{4} \sum s\bar{\alpha} = P_{\text{пр}} (1 - \bar{\alpha}). \quad (4)$$

Тоді з (4) шляхом нескладних перетворень отримуємо

$$W = \frac{4P_{\text{пр}}}{R}, \quad R = \frac{\sum s\bar{\alpha}}{(1 - \bar{\alpha})} \quad (5)$$

Комбінуючи потужність прямого сигналу та ревербераційного поля, а також враховуючи ефективну площу приймальної антени, отримуємо

$$P_{\Sigma} = P_{\text{пр}} \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right). \quad (6)$$

З (6) отримуємо вираз для втрат

$$L(d) = 10 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \right]. \quad (7)$$

У цій роботі пропонується взяти за основу дві моделі – експериментальну (2) та аналітичну з урахуванням ревербераційного поля (7). При цьому в експериментальній моделі (2) значення  $L(d_0)$  замінити розрахованим  $L(d)$  за формулою (7) для каналу з прямою видимістю, а для каналу без прямої видимості враховувати у формулі (7) лише ревербераційну складову (8)

$$L(d) = 10 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{4}{R} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \right] \quad (8)$$

**Запропонована експериментально-аналітична модель.** Таким чином, отримуємо комбіновану експериментально-аналітичну модель [4]:

для каналу з прямою видимістю (9)

$$L(d) = 10 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{1}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \right] + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \pm \Omega, \quad (9)$$

для каналу без прямої видимості (10)

$$L(d) = 10 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{4}{R} \right) \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \right] + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \pm \Omega. \quad (10)$$

Як приклад, наведемо розраховані за формулами (9) і (10) залежності втрат від відстані для офісного та житлового будинків за умов наявності прямої видимості LOS (рис. 1) та відсутності прямої видимості NLOS (рис. 2). Будівля розмірами 70×50×10 м, значення коефіцієнта поглинання враховані для відбиваючих матеріалів гіпсова панель і бетонна плита.

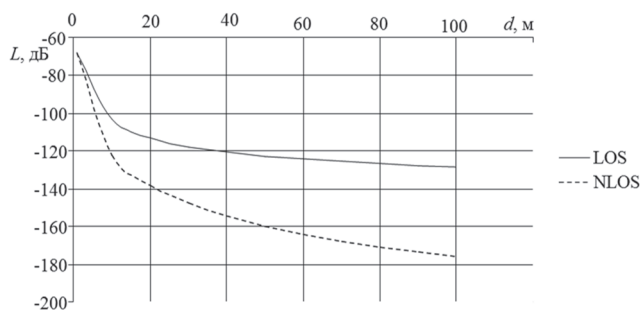


Рис. 1. Графік залежності втрат від відстані для офісного приміщення

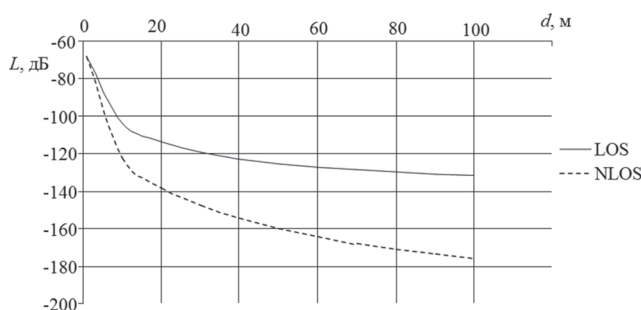


Рис. 2. Графік залежності втрат від відстані для житлового приміщення

### Висновки

Запропонований підхід до моделювання дозволяє:

- ◆ оцінити як канал прямої видимості, так і канал без прямої видимості (чого не дозволяє жодна з моделей окремо);
- ◆ істотно зменшити похибку характерну для експериментальних моделей за рахунок врахування індивідуальних особливостей приміщень (розміри, матеріали відбиваючих поверхонь);
- ◆ за рахунок використання показника ступеня втрат на трасі з експериментальної моделі (має малий розкид в емпіричній моделі) можна точніше врахувати характер приміщення.

Таким чином, вдається поєднати переваги та зменшити недоліки двох підходів до моделювання.

### Список використаної літератури

1. Денисов Д. Тенденции развития 5G сетей. Новые частоты E-диапазона и технология OAM. URL: <https://nag.ru/material/30112>
2. Steinböck G. Modeling of Reverberation Effects for Radio Localization and Communications. 2013. 240 p.
3. Smulders P. F. M. Statistical characterization of 60-GHz indoor radio channels // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009. Vol. 57(10). P. 2820–2829. URL: <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2030524>
4. Орябінська О. О. Модель радіоканалу систем 5G у приміщенні // Міжнар. мультидисципл. наук. конф. на тему: Світ наукових досліджень. Зб. тез доповідей: вип. 10 (м. Тернопіль, 24 червня 2022 р.). Тернопіль. 2022. С. 126–128.

*O. Oriabinska, I. Tarasenko*

### **MATHEMATICAL MODEL CHANNEL IN THE MIDDLE OF THE ROOM SYSTEMS 5G AND 6G**

*For point-to-point connections in 5G systems, the E-band [1] has already been standardized, which means that the next generation of 6G will also use it. The E-band is located in the frequency range from 60 to 90 GHz. The use of the E-band allows radio systems to approach data transmission over optical fiber in terms of connection speed [1]. An increase in the frequency of the operating range automatically leads to a decrease in the coverage area of one transmitter. The size of cells in 5G and 6G systems is already micro-cells and pico-cells, which sometimes provides coverage only in a certain building. Most of the models used to calculate radio routes located inside buildings are based on the formula describing the propagation of radio waves in free space. However, the presence of walls, floors, furniture, people and other objects significantly affects the nature of radio wave propagation. The variety of conditions leads to the necessity of using some empirical models based on numerous experiments to investigate the conditions of radio wave propagation indoors. In this work, it is proposed to take two models as a basis - an experimental one [3] and an analytical one taking into account the reverberation field [2]. The combination of the analytical and experimental model allows you to estimate both the line-of-sight channel and the channel without line-of-sight; take into account the individual features of the premises, significantly reducing the error characteristic of experimental models; Due to the use of the indicator of the degree of losses on the route according to the experimental model, it is possible to more accurately take into account the nature of the premises. Thus, it is possible to combine the advantages and reduce the disadvantages of two modeling approaches.*

**Keywords:** E-band; radio wave propagation; reverberation field; model channel in the middle of the room; path losses.

