

Сайко В.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТРИВИМІРНІ БАГАТОШАРОВІ МЕРЕЖІ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Дана стаття є продовженням циклу статей [1-3], присвячених розробці модельно-методичного апарату реалізації нової інноваційної послуги мереж п'ятого та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону з інтегрованими інтелектуальними поверхнями (РПП) для забезпечення надійності зв'язку. Завдання в такій постановці актуальне і потрібне для надцільних безпроводових мереж міліметрового та терагерцового діапазонів нового покоління.

Для рішення такої задачі перспективною тенденцією є перехід до тривимірного простору для дослідження у галузі таких мереж зв'язку нового покоління. При цьому у розробці науково обґрунтованих методик планування мереж важливо мати розуміння їх архітектури та функціонування у тривимірному просторі. Оскільки мережі, що використовують терагерцовий діапазон хвиль, є гетерогенними, цікаво дослідити спільне використання мереж мобільного зв'язку та мереж РПП у тривимірному просторі, що є темою даної статті.

У статті введено поняття тривимірних багатошарових гетерогенних мереж при використанні терагерцового діапазону частот, запропоновано архітектурні рішення для таких мереж, а також досліджено ймовірність успішного радіоприймання на прикладі багатошарової гетерогенної мережі. Отримана модель дозволяє оцінити якість каналу зв'язку шляхом оцінки відношення сигнал завада та відношення сигнал шум для вузлів мережі. Використання моделі дозволяє стверджувати, що в сучасному багатоповерховому будинку, при розміщенні вузлів у кожному приміщенні, може бути побудована мережа бездротового зв'язку при використанні терагерцового діапазону хвиль, причому якість радіоканалу дозволяє використовувати максимально досяжні для сучасних стандартів швидкості передачі даних.

Ключові слова: мобільний зв'язок, терагерцовий діапазон, блокування передачі, тривимірні багатошарові мережі.

Постановка проблеми. У реальних умовах мобільним системам 5G NR у терагерцовому діапазоні хвиль у більшості випадків досить складно працювати через рухомі перешкоди, такі як люди та транспортні засоби, які можуть блокувати радіосигнал. Якщо мобільний пристрій потрапляє в зону блокування радіосигналу, то залежно від середовища та відстані до базової станції NR BS, пристрій може втратити покриття BS або знизити якість сигналу, щоб запобігти помилкам передачі [4, 5]. Є рішення для підключення користувачів до кількох базових станцій (БС) одночасно, що дозволяє уникнути блокування сигналу, але його технічна реалізація на існуючій мобільній інфраструктурі 5G може привести до додаткових затримок та зниження ефективності системи [6].

Нові технічні рішення з інтегрованими інтелектуальними поверхнями, що реконфігуруються (РПП),

представляють інтерес з точки зору швидкого формування променя та подолання ефектів блокування в системах міліметрових та терагерцових діапазонів хвиль. Інтелектуальні поверхні РПП є багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж та можуть створювати інтелектуальне радіосередовище [7]. РПП-мережа може створювати великомасштабні інтелектуальні радіоканали для обслуговування кількох користувачів, оптимізуючи режим передачі та параметри РПП. Використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку та продуктивність системи, але оцінка каналу на РПП може бути складним завданням через велику кількість елементів, що відбивають промені. Потенціал РПП для локалізації отримав обмежене висвітлення в літературі, включаючи попередні дослідження, в яких RIS працює в режимі прийому як лінза або в режимі відображення.

Але при цьому також необхідно відмітити, що останні кілька десятиліть бездротові мережі переважно будувалися зі статичних наземних точок доступу. Тому, враховуючи поширеність РІП і бажання інтегрувати РІП в стільникові мережі, можна обґрунтовано припустити, що перспективи мобільних систем нового покоління більше не будуть горизонтальними і двовимірними. Тривимірні перспективні вертикальні мережі, що виникають, складаються з безлічі рухомих і висотних точок доступу. Прикладами є автомобільні мережі VANET і цільові мережі, що літають, FANET [8,9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [10] з врахуванням особливостей функціонування безпроводової сенсорної мережі у тривимірному просторі був розроблений новий алгоритм вибіру головного вузла кластера.

Нещодавні дослідження показали багатообіцяючі результати у використанні методів машинного навчання для безпосереднього прогнозування оптимальних фазових зрушень РІП і вектора формування променя в БС або повністю минаючи проміжний етап оцінки каналу, або з обмеженим знанням інформації про канал.

У [11] автори запропонували заснований на глибинному навчанні (Deep Learning, DL) підхід для проведення порівняння між вимірюваною інформацією про координати в місцезнаходження користувача і конфігурацією кожного елемента РІП, яка максимізує рівень прийнятого користувачем сигналу в автономному режимі з використанням попередньо створеної бази даних відбитків пальців під час навчання рекурентної нейронної мережі (current neural network, DNN). На онлайн-фазі в навчену модель DNN передавалися виміряні координати цільового місця розташування, щоб вивести оптимальну фазову конфігурацію з акцентом на передбачуване місцезнаходження.

У [12] автори використовували метод DL «актор-критик» для вивчення спільної конструкції матриці формування променя передачі в БС і конфігурації фазового зсуву РІП для системи MISO. Сумарна ставка використовувалася як миттєва винагорода для навчання алгоритму на основі DL. Матриця формування променя передачі та фазові зрушення були отримані спільно шляхом поступового максимізації сумарної швидкості шляхом спостереження винагороди та ітеративного налаштування параметрів.

Цілком природно, що, незважаючи на перспективи і безліч потенційних переваг, підхід машинного навчання до розробки рішень РІП стикається з багатьма проблемами. Ці проблеми також є можливостями майбутніх напрямів досліджень.

І одна із них, це змусити новий підхід, заснований на штучному інтелекті, працювати в реальних експериментах. Майже у всіх роботах, які ми розглянули, дослідження та експериментальні результати ґрунтуються на чисельному моделюванні, яке є податливим першим кроком. Однак загальноновизнано, що дані моделювання є точними, а поведінка, що моделюється, більш детермінованим. У реальному середовищі ці переваги були б недоступними. Надзвичайно важливо вийти за рамки експериментів, заснованих на моделюванні, для вивчення практичної здійсненності та ефективності рішень РІП на основі машинного навчання.

Постановка завдання. Перехід до безпроводових мереж терагерцового діапазону передбачає ще більше збільшення щільності мережі у порівнянні з сучасними мережами. При розробці науково-обґрунтованих методик планування таких мереж важливим є розуміння їх архітектури та функціонування у тривимірному просторі. Оскільки мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль є гетерогенними, що більш цікаво – це спільне застосування мереж мобільного зв'язку та мереж РІП у тривимірному просторі, яке є предметом досліджень даної статті. Тому одним із перспективних напрямів у вирішенні даної проблеми авторами пропонується робоча гіпотеза проведення досліджень щодо інтеграції мереж технологій мобільного зв'язку та мереж реконфігурованих інтелектуальних поверхонь у тривимірному просторі для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Архітектура тривимірної багатошарової мережі терагерцового діапазону

Для забезпечення подолання ефектів блокування передачі з підтримкою інтелектуальної поверхні, що реконфігуруються, в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль пропонується наступна архітектура тривимірної багатошарової мережі (рис. 1).

Загалом, число шарів тривимірної багатошарової надщільної мережі терагерцового діапазону може мати значення від 1 до n . Навіть якщо мережа має лише один шар, її все одно можна віднести до багатошарових надщільних мереж, оскільки її планування вимагає використання методів планування надщільних мереж. Кожен з шарів мережі може бути реалізований за допомогою однієї з технологій телекомунікацій, наприклад, інтелектуальної поверхні, що реконфігурується. На рис. 1

наведено приклад тривимірної багат шарової гетерогенної надщільної мережі, яку можна розглядати як комбінацію дво- та тривимірних шарів.

Якщо розглядати мережу Fog-терміналів, що знаходиться в обмеженому об'ємі, ми можемо забезпечити її зв'язність за допомогою використання транзитного вузла, розміщеного на мережі РІП з іншими кластерами мережі. Коли розмір кластера невеликий, то всі вузли кластера можуть знаходитися у зоні зв'язку один з одним. Однак, завдання полягає у забезпеченні зв'язності мережі як між вузлами одного кластера, так і між вузлами різних кластерів.

При великій кількості вузлів та кількох кластерах, доцільною є ієрархічна структура, яка включає виділення головних вузлів кластера, що виконують роль транзитних вузлів для зв'язку з вузлами іншого рівня. Це дозволяє ефективно використовувати мережеві ресурси шляхом систематизації обміну даними, зменшує ймовірність колізій та забезпечує зв'язність мережі. Головні вузли є шарнірами, як і вузли на мережі РІП, і їх можна визначити, використовуючи відомі методи, наприклад запропонований у [13]. Цей метод полягає в тому, що мережу описують моделлю повнозв'язкового неорієнтованого графа, знаходять всі компоненти графа та використовують алгоритми пошуку мінімального остова графа. При наявності ребер, довжина яких

перевищує радіус зв'язку відповідного вузла кластерів, вони виключаються зі знайденого остова, що дозволяє отримати кілька компонентів графа. Шарнірами графа є вузли, що з'єднані виключеними ребрами, а для забезпечення зв'язності мережі необхідно отримати зв'язок шарнірів із заданою кількістю РІП.

В залежності від розташування шарнірів, зв'язність їх може бути забезпечена за допомогою одного або кількох РІП. Для забезпечення зв'язності, бажано мінімізувати кількість використовуваних РІП. Метою вибору точок розміщення РІП є забезпечення зв'язності шарнірів, і для цього можна використовувати алгоритм кластеризації FOREL [14], який намагається знайти центри можливих груп (кластерів) зі зв'язними шарнірами, які можуть бути забезпечені одним РІП. Якщо з'являються кластери, що містять лише один шарнір, то відстань між цим та іншими шарнірами перевищує радіус зони зв'язку РІП. У такому випадку можна використовувати комбінацію декількох РІП з більшою дальністю зв'язку на наступному рівні мережі РІП.

Оцінка ймовірності успішного радіоприймання

У бездротових системах зв'язку (БСЗ), оцінка ймовірності успішного радіоприймання є важливою для вивчення одночасних передач, невизначеною

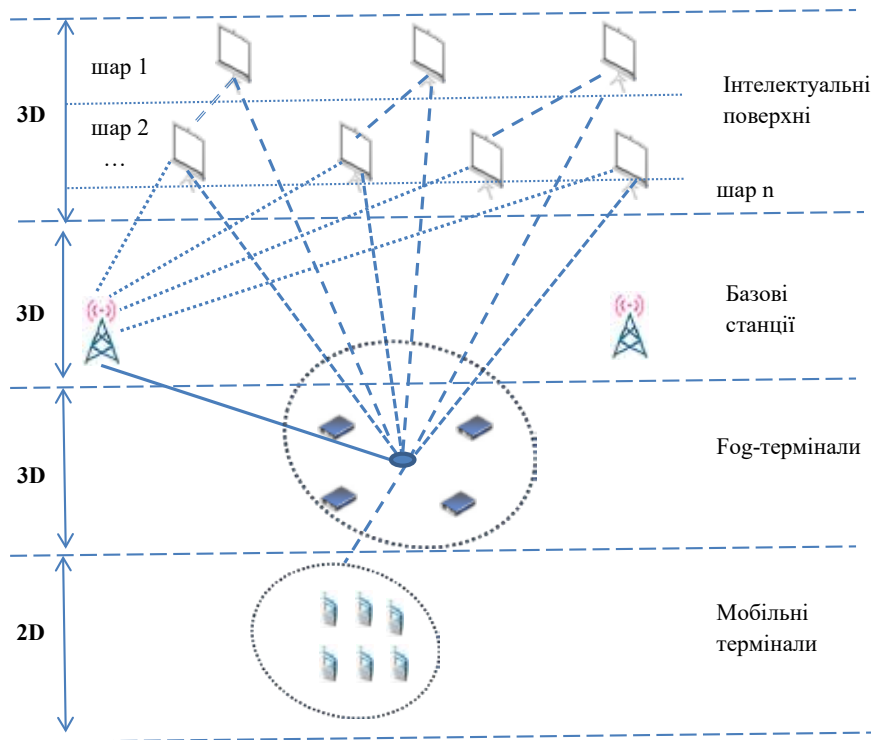


Рис. 1. Модель багат шарової 3D мережі

ності розташування пристроїв та умов поширення радіохвиль. Для цього використовується параметр ймовірності передачі p , але класичний підхід базується на математичній моделі, згідно з якою успішне радіоприймання вважається можливим лише на відстані r_0 , яка не перевищує дальності R . Однак, ця модель не враховує впливу територіального розподілу пристроїв БСЗ та створених ними завад на ймовірність радіоприймання P_{SUC} .

Аналітичну модель формування сигналу завади опишемо виразом для трьох вимірів:

$$P_o = P_p \iiint_w a(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

де P_p – потужність завади, що виробляється в одиниці об'єму,

$a(x, y, z)$ – коефіцієнт, що визначає залежність потужності завади в точці O від координат джерела завади,

w – область, що розглядається.

Залежність $a(x, y, z)$ можна виразити через відстань до джерела завади d і уявити як

$$a(d) = \frac{c}{f^2 d^\alpha L(q)}, \quad (2)$$

де d – відстань від точки спостереження до джерела завади, α – коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу ($\alpha \geq 2$), f – частота сигналу, c – константа (відповідно до задачі $c=10^{2.6}$), $L(q)$ – послаблення сигналу перешкодами, q – кількість перешкод.

З урахуванням дискретної структури модель (1) може бути записана у вигляді суми за трьома вимірами

$$P_o(i, j, h) = p_o \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a(i, j, h), \quad (3)$$

де p_o – потужність передавача вузла мережі.

Якщо розміри елементарної комірки (довжина, ширина і висота) дорівнюють l, v, s відповідно, то відстань d між точкою спостереження та довільним вузлом комірки можна визначити як

$$d(i, j, h) = \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}, \quad (4)$$

Послаблення сигналу перешкодами, згідно з моделлю (1), може бути визначено як

$$L(q) = Bq, \quad (5)$$

де B – коефіцієнт ослаблення сигналу перешкодою.

У моделі, що розглядається, зробимо припущення про поширення сигналу строго по прямій, що з'єднує точку спостереження з вузлом $p_{i,j,h}$, тоді кількість перешкод в даному напрямку буде дорівнює кількості вертикальних і горизонтальних площин, що перетинаються, проведених через центри ребер, що з'єднують вузли комірок, тобто. дорівнюватиме сумі абсолютних значень індексів i, j та h :

$$L(i, j, h) = B(|i| + |j| + |h|), \quad (6)$$

Тоді вираз (2) для коефіцієнта зниження потужності може бути виражений через індекси як

$$a(i, j, h) = \frac{c}{L(i, j, h) f^2 \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}}. \quad (7)$$

Започаткуємо пороговий рівень потужності p_m в точці прийому, при перевищенні якого сигнал не сприймається як завада. Тоді вираз для потужності завади у точці спостереження може бути записано як

$$P_o = 8U \sum_{h=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m J(p_{i,j,h}) p_{i,j,h}, \quad (8)$$

де $p_{i,j,h}$ потужність завади, яка створена вузлом i, j, h у точці спостереження; U – інтенсивність навантаження, m – кількість вузлів мережі;

$$p_{i,j,h} = p_o \frac{c}{B(i+j+h) f^2 \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}}, \quad (9)$$

$J(p_{i,j,h})$ – індикаторна функція, яка забезпечує підсумовування тільки потужностей сигналів, що сприймаються як завада.

Для оцінки просторового ущільнення одночасних передач застосовується критерій ймовірності успішного радіоприймання PSUC (SINR) [15]:

$$P_{SUC}(SINR) = P(SINR \geq \gamma), \quad (10)$$

де SINR – відношення сигнал шум плюс завада, γ – граничне значення SINR, яке визначається чутливістю приймального пристрою.

Ймовірність успішного радіоприймання визначається:

$$P_{SUC}[SINR(r_o, \beta_o, \alpha_o, \alpha_i, k_i(p, \mu_s), \gamma)] = P\left(\frac{P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)}{P_{No}} + \sum_{i=1}^{k_i} (p, \mu_s) P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i) \geq \gamma\right), \quad (11)$$

де $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$ – потужність внутрісистемних завад передавального пристрою TX_i на вході приймача RX_o з врахуванням середніх втрат розповсюдження радіохвиль, повільних та швидких завмирань; $k_i(p, \mu_s)$ – число джерел завад; p – ймовірність передачі пристрою μ_s – щільність пристроїв, P_{No} – потужність теплового шуму.

Оцінка ймовірності успішного радіоприймання з діаграмоутворенням із (11) визначається SINR, що залежить від потужності сигналу $P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)$ та потужності внутрісистемних завад $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$. Тому для врахування направленості антени на P_{SUC} потрібно врахувати вплив коефіцієнта підсилення (КП) сигналу і КП внутрішньосистемних завад. Потужність сигналу $P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)$ з урахуванням впливу КП G_o визначається наступним виразом:

$$P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o) = G_o K P_{Tx} r_o^{-\eta} e^{\beta_o} \alpha_o. \quad (12)$$

η – показник середніх втрат розповсюдження.

Потужність сигналу $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$ з урахуванням впливу КП G_i визначається наступним виразом:

$$P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i) = G_i K P_{Tx} r_i^{-\eta} e^{\beta_i} \alpha_i. \quad (13)$$

Підставляючи (12) та (13) в (11), отримуємо вираз P_{SUC} з діаграмоутворенням.

На рис. 2 показана залежність ймовірності успішного радіоприйому з направленими антенами при ймовірності $p=0,5$, SINR $\gamma=10$ dB та параметрах (G_i/G_o) ,

де

DB – діаграмоутворення з попереднім виявленням.

DD – сеанс спрямованої передачі та спрямованого прийому.

DO – сеанс спрямованої передачі та ненаправленого прийому.

RB – випадкове діаграмоутворення.

З аналізу графіків слідує, що ймовірності успішного радіоприйому суттєво підвищується в режимі діаграмоутворення з попереднім виявленням для сеансу направленої передачі і направленого прийому DD.

Висновки.

1. У статті введено поняття тривимірних багатопланових гетерогенних мереж при використанні терагерцового діапазону, запропоновано архітектурні рішення для таких мереж, а також досліджено характеристики зв'язності на прикладі багатопланової гетерогенної мережі.

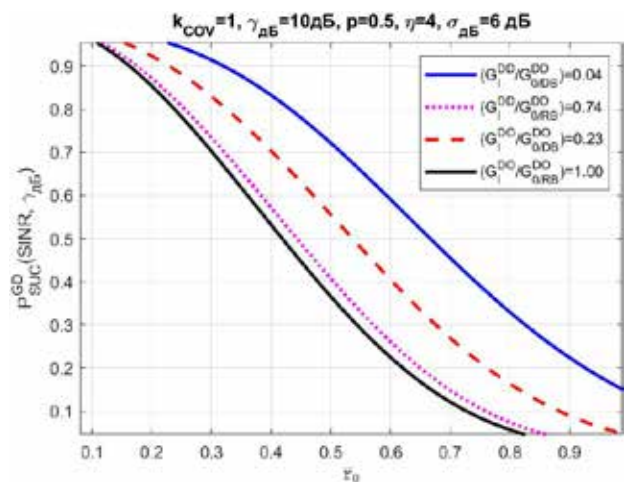


Рис. 2. Ймовірність успішного радіоприйому в режимі діаграмоутворення

2. Отримана модель дозволяє оцінити якість каналу зв'язку шляхом оцінки відношення сигнал шум для вузлів мережі.

3. Розроблена модель описує логічну структуру мережі, що організується в тривимірному просторі, для якої можуть бути застосовані методи, що дозволяють оцінити ймовірність стану зв'язності мережі.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Баховський П.Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: серія технічні науки. 2023. Т. 34(73). № 1. С.51-56.
2. Saiko Volodymyr, Narytnyk Teodor. High-reliability 5G / IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Saiko V., Narytnyk T. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. pp. 477-497. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1
URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>
3. Сайко, В., & Наритник, Т. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. 2(2) pp.166 – 181.
4. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толупа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
5. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкопasmового доступу. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2015. – 196 с
6. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 31.07.2019).
7. T.J.Cui. Electromagnetic information computing and intelligent control. In Proc. Huawei Internal Workshop. Huawei, 2020.
8. Беспроводные сенсорные сети. Б.Я. Лихтциндер – М.: Горячая линия Телеком, 2021. 236 с.
9. Гольдштейн Б.С. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2013. 160 с.
10. Абакумов П.А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве. Электросвязь. 2014. № 4.
11. C. Huang, G.C. Alexandropoulos, C. Yuen, M. Debbah Indoor signal focusing with deep learning designed reconfigurable intelligent surfaces. Proc. IEEE Workshop on Sig. Proc. Advances in Wireless Commun. (SPAWC) .2019, pp. 1-5.
12. C. Huang, R. Mo, C. Yuen Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning. IEEE J. Sel. Area. Commun., 2020. 38 (8) . pp. 1839-1850.
13. Нуриллоев И. Н., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети. Электросвязь. 2017. № 7. С. 39–44.

14. Алгоритм Forel. URL: https://studme.org/191776/matematika_himiya_fizik/1343_algoritm_forel (дата звернення 01.04.2023).

15. Фокин Г.А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. том 15. № 5. С. 4-21.

Saiko V.G., Narytnyk T.M. THREE-DIMENSIONAL MULTILAYER NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE

This article is a continuation of the series of articles [1-3] devoted to the development of a model-methodical apparatus for the implementation of a new innovative service for networks of the fifth and subsequent generations – the use of the resource of a local cluster of network infrastructure of the terahertz range with integrated intelligent surfaces (RIS) to ensure the reliability of communication. The task in such a production is relevant and necessary for the ultra-dense wireless networks of the millimeter and terahertz ranges of the new generation.

To solve this problem, a promising trend is the transition to a three-dimensional space for research in the field of such new generation communication networks. At the same time, in the development of scientifically sound methods for planning networks, it is important to have an understanding of their architecture and functioning in three-dimensional space. Since networks using the terahertz wave range are heterogeneous, it is interesting to investigate the joint use of mobile communication networks and RIS networks in three-dimensional space, which is the topic of this article.

The article introduces the concept of three-dimensional multilayer heterogeneous networks using a terahertz frequency range, proposes architectural solutions for such networks, and also studies the probability of successful radio reception using the example of a multilayer heterogeneous network. The obtained model makes it possible to estimate quality of communication channel by estimating ratio of interference signal and ratio of noise signal for network nodes. The use of the model allows us to assert that in a modern multi-storey building, when placing nodes in each room, a wireless communication network can be built using a terahertz wave range, and the quality of the radio channel allows using the maximum data transfer rates achievable for modern standards.

Key words: *mobile communication, terahertz range, transmission blocking, three-dimensional multilayer networks.*