

Кременецька Я.А., Мельник Ю.В., Марков С.Ю. *Державний університет телекомунікацій, Київ*

## МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПРОВОДОВОГО РАДІОКАНАЛУ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТІВ ВІДБИТТЯ ТА РОЗСІЮВАННЯ

Прогнозування траєкторних і енергетичних характеристик каналів прямої видимості так і у відсутності прямої видимості необхідно для реалізації телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль. Для прогнозування були проаналізовані методи, засновані на особливостях поширення міліметрових хвиль в навколишньому середовищі. Розроблено метод на основі квазі-оптичної моделі поширення з урахуванням ефектів множинного відбиття і багатопроменевого поширення сигналу. Так як за рахунок малої довжини хвилі міліметрового діапазону можлива реалізація вузько спрямованого випромінювання, то можливо забезпечення одночасного формування зображень, зв'язку та позиціонування. Розглянуто можливість посилення радіоканалу в міліметровому діапазоні за допомогою штучних відбивачів для формування одного вузького променя, який багато разів відбивається, а також багатопроменеве поширення сигналу для одного відображення. Наведені результати розрахунків показують, що моделювання, а також реалізація, радіоканалів з використанням штучних відбивачів може привести до підсилення сигналу в каналі, збільшення доступності, дальності зв'язку. На основі врахування точної геометрії забудови або зовнішнього середовища всередині приміщень можна знайти енерго і спектрально ефективні рішення, що особливо важливо при проектуванні телекомунікаційних мереж в міліметровому діапазоні, а в майбутньому терагерцовому діапазоні, і особливо при застосуванні технології МІМО. Вивчення фундаментальних ефектів відображення, розсіювання, дифракції для міліметрових хвиль може привести до розробки більш точних моделей енергетичного покриття, розрахунків затримки сигналу, когерентності, поляризації, шуму і т.д. Такі підходи необхідні для розвитку майбутніх надшвидкісних мобільних телекомунікаційних систем з різними додатками та послугами.

**Ключові слова:** телекомунікаційні системи, міліметрові хвилі, 5G, моделювання каналу, поширення сигналу, пряма видимість, відбиття, розсіювання, штучні відбивачі, посилення каналу, прогнозування каналу.

Кременецкая Я.А., Мельник Ю.В., Марков С.Е. *Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОГО РАДИОКАНАЛА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ОТРАЖЕНИЙ И РАССЕИВАНИЯ

Прогнозирование траекторных и энергетических характеристик каналов прямой видимости так и в отсутствие прямой видимости необходимо для реализации телекоммуникационных систем в миллиметровом диапазоне волн. Для прогнозирования были проанализированы методы, основанные на особенностях распространения миллиметровых волн в окружающей среде. Разработан метод на основе квазиоптической модели распространения с учетом эффектов множественных отражений и многолучевого распространения сигнала. Так как за счет малой длины волны миллиметрового диапазона возможна реализация узко направленного излучения, то возможно обеспечение одновременного формирования изображений, связи и позиционирования. Рассмотрена возможность усиления радиоканала в миллиметровом диапазоне с помощью искусственных отражателей для формирования одного узкого луча, который многократно отражается от нескольких отражателей, а также многолучевое распространение сигнала для одного отражения. Приведенные результаты расчетов показывают, что моделирование (а также реализация) радиоканалов с использованием искусственных отражателей может привести к усилению сигнала в канале, увеличению доступности, дальности связи. На основе учета точной геометрии застройки или внешней среды внутри помещений можно найти энерго и спектрально эффективные решения, что особенно важно при проектировании

© Кременецька Я.А., Мельник Ю.В., Марков С.Ю. 2020

телекоммуникационных сетей в миллиметровом диапазоне, а в будущем терагерцовом диапазоне, и особенно при применении технологии ММО. Изучение фундаментальных эффектов отражения, рассеяния, дифракции для миллиметровых волн может привести к разработке более точных моделей энергетического покрытия, расчетов задержки сигнала, когерентности, поляризации, шума и т.д. Такие подходы необходимы для развития будущих сверхскоростных мобильных телекоммуникационных систем с различными приложениями и услугами.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, миллиметровые волны, 5G, моделирование канала, распространение сигнала, прямая видимость, отражение, рассеяние, искусственные отражатели, усиление канала, прогнозирование канала

**Kremenetskaya Y.A., Melnik Yu.V., Markov S.E.** State University of Telecommunications, Kiev

## MODELING OF MILLIMETER-WAVE WIRELESS RADIOCHANNEL TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECTS OF REFLECTION AND SCATTERING

*Prediction of the trajectory and energy characteristics of the channels of direct visibility and in the absence of direct visibility is necessary for the implementation of telecommunication systems in the millimeter wavelength range. For forecasting, methods based on the propagation of millimeter waves in the environment were analyzed. A method is developed based on a quasi-optical propagation model taking into account the effects of multiple reflections and multipath signal propagation. Since due to the short wavelength of the MMD, narrowly directed radiation can be realized, it is possible to provide simultaneous image formation, communication, and positioning. The possibility of amplifying the radio channel in the millimeter range using artificial reflectors for the formation of a single narrow beam, which is repeatedly reflected from several reflectors, as well as multipath signal propagation for one reflection, is considered. The above calculation results show that the modeling (as well as the implementation) of radio channels using artificial reflectors can lead to signal amplification in the channel, increase accessibility, and communication range. Based on the exact geometry of the building or the external environment inside the premises, energy and spectrally effective solutions can be found, which is especially important when designing telecommunication networks in the millimeter range, and in the future terahertz range, and especially when applying MIMO technology. Studying the fundamental effects of reflection, scattering, and diffraction for millimeter waves can lead to the development of more accurate models of energy coverage, calculations of signal delay, coherence, polarization, noise, etc. Such approaches are necessary for the development of future ultra-fast mobile telecommunication systems with various applications and services.*

**Keywords:** telecommunication systems, millimeter waves, 5G, channel modeling, signal propagation, direct visibility, reflection, scattering, artificial reflectors, channel amplification, channel prediction

**1. Вступ.** Застосування частотного ресурсу міліметрового діапазону (ММД) хвиль в смузі 24-100 ГГц при розгортанні мереж 5G розглядається як рішення для підвищення швидкості передачі інформації в телекомунікаційних системах за рахунок розширення смуги пропускання. Майбутні безпроводні телекомунікаційні системи продовжать розвиватися з підвищенням несучої частоти наближаючись до терагерцового діапазону. Частоти вище 100 ГГц розглядаються як перспективний ресурс для наступного покоління бездротових мереж 6G [1].

За рахунок малої довжини хвилі ММД можлива реалізація вузькоспрямованого випромінювання, а також забезпечення одночасного формування зображень, зв'язку та позиціонування. У терагерцовому діапазоні позиціонування буде забезпечувати точність на рівні сантиметрів, а також підтримувати формування зображень навіть в умовах відсутності прямої видимості (англ. non-line of sight, NLOS). Для майбутніх бездротових систем зв'язку в ММД вирішуються такі проблеми, як моделювання просторового тривимірного (3D) каналу, енергоефективні та економічно ефективні рішення для систем обробки інформації, в тому числі, для систем формування променів в фазованих антенних решітках (ФАР) з величезною кількістю випромінюючих елементів. Для технології ФАР мають бути використані нові підходи і архітектури формування діаграми спрямованості, в яких враховуються шумові обмеження (в тому

числі для просторового формування шуму), конструктивні обмеження та гібридне формування діаграми спрямованості.

**2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** В мобільних системах, які працюють в діапазонах нижче 6 ГГц, при поширенні радіохвиль переважають механізми дифракції та дзеркального відбиття. У ММД системи зв'язку в основному проєктуються на дистанціях прямої видимості, так як в меншій мірі при поширенні сигналів ММД проявляються ефекти відбиття і дифракції. Однак встановлено, що для успішного прийому хвиль ММД потрібно мати достатньо точний опис навколишнього середовища, наприклад, характер розташування меблів та іншого обладнання в середині приміщень [1-3]. Було встановлено, що для хвиль ММД фізично малі об'єкти призводять до розсіювання, яке становитиме 10% [2] від загальної потужності для прямої видимості (англ. line-of-sight, LOS), і може бути навіть більш значимим для NLOS [2]. На рис. 1 показана виміряна і розрахована потужність отриманого сигналу для 60 ГГц усередині приміщення, кількість виявлених піків і динамічний діапазон між найсильнішим шляхом і рівнем шуму.

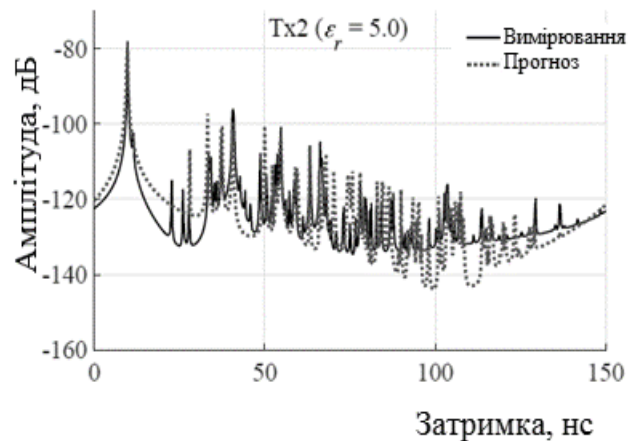


Рис.1. Виміряні і прогнозовані (розрахункові) затримки сигналу на частоті 60 ГГц для зони прямої видимості LOS всередині приміщення [2]

Показано, що прямий шлях є дуже домінуючим в каналах LOS, а також енергетичні вклади для NLOS сильно залежать від дзеркального відбиття сигналу. Також було визнано корисним для отримання докладної інформації про навколишнє середовище лазерне сканування [11]. Прогнозування каналу в ММД за даними лазерного сканування з урахуванням усіх відповідних механізмів поширення, включаючи дзеркальні відбиття, розсіювання і затінення, а також дифракцію, є актуальним напрямком досліджень. Довжина хвилі ММД стає порівнянна і менше, ніж типова шорсткість поверхні будівельних об'єктів, і таким чином виявляються ефекти дзеркального і дифузного розсіювання. Тому розсіювання на частотах ММД стає важливим механізмом поширення, яке необхідно вивчати і враховувати при моделюванні радіоканалів в ММД для міського сценарію. Найбільш використовувані теорії засновані на моделі спрямованого розсіювання (англ. Directive scattering, DS) і моделі радіолокаційного перетину розсіювання (англ. Radar Cross Section, RCS) [4].

В роботі [5] надані результати вимірювання відбиття/розсіювання сигналу на частоті 140 ГГц, які підтвердили правильність теорії спрямованого розсіювання (DS). Багата кількість експериментальних досліджень характеристик каналів в ММД приведена в [2] де показано, що в міських умовах найбільш підходять статистичні та детерміновані моделі.

Тому аналіз ефектів відбиття, розсіювання сигналів для ММД може привести до розробки більш точних моделей енергетичного покриття, розрахунків затримки сигналу, когерентності, поляризації, шуму і т.д. Такі моделі необхідні для розвитку майбутніх надшвидкісних мобільних телекомунікаційних систем з різними додатками та послугами.

**3. Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення і розробка моделей каналів з урахуванням ефектів розсіювання та відбиття та квазіоптичної характеру поширення сигналів в ММД. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізовані моделі розсіювання, які розглядаються для моделювання каналів в ММД мобільних систем зв'язку;
- запропонований підхід моделювання радіоканалів в ММД за допомогою квазіоптичної моделі, в якій використовується значення спрямованості випромінювання і площі приймальної антени;
- розроблені моделі підсилення радіоканалів в ММД із застосування штучних відбивачів.

#### 4. Моделі каналів в ММД з урахуванням ефектів розсіювання та відбиття.

**4.1. Моделі розсіювання.** Передбачається, що при поширенні хвиль міліметрового і субміліметрового діапазонів відбуваються процеси як дзеркального, так і дифузного розсіювання на більшості поверхонь будівель. У моделях передбачається, що дзеркальний компонент зберігає просторову когерентність (вузькі промені) та високу просторову роздільну здатність [1,2,4]. Для шорстких поверхонь на додаток до первинного відбитого компоненту при дзеркальному відбитті додається розсіяне випромінювання, яке розкидано по багатьох інших напрямках. Загальна потужність розсіяних некогерентних променів  $P_{scat}$  додається до потужності когерентних променів  $P_{coher}$ , таким чином, в підсумку потужність на вході приймача можна виразити співвідношенням:  $P_{RX} = P_{coher} + P_{scat}$ .

Якщо вважати розподіл нерівностей на поверхні гауссовим, тоді коефіцієнт шорсткості Релея, як показано в [1], має вигляд:

$$K_{Rayl} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( 4\pi\delta \cos \theta_i / \lambda \right)^2 \right], \quad (1)$$

де  $\theta_i$  – кут падіння і відбивання;

$\delta$  – стандартне відхилення, що характеризує шорстку поверхню;

$\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі.

Тоді для гауссового розподілу нерівностей на поверхні коефіцієнт відбиття набуває вигляду:

$$\Gamma_{rough} = \Gamma K_{Rayl} \quad (2)$$

Однак, вираз (2) оснований на припущенні малого кута падіння і не дає можливості розрахувати потужність розсіювання в певному напрямку. Для вивчення характеру розсіювання в певному напрямку в залежності від характеристик нерівностей стін запропоновані різні моделі. В основному аналізуються дві популярні моделі розсіювання, які розглядаються для моделювання каналів в ММД мобільних систем зв'язку. Це модель спрямованого розсіювання (англ. Directive scattering, DS) і модель радіолокаційного перетину розсіювання (англ. Radar Cross Section, RCS). Експериментальні дані показують, що розсіювання може стати помітним механізмом поширення радіохвиль ММД. Моделювання енергетичного покриття з урахуванням ефектів розсіювання не тільки наближає модель до реального каналу, але й сприяє розробці майбутніх технологій МІМО та створенню зображень і точному позиціонуванню в майбутніх бездротових системах 5G і 6G.

Модель DS з однією пелюсткою, яка розсіюється та спрямована в напрямку дзеркального відбиття, є найкращою для цегляних стін. Це показано в експериментальних дослідженнях (коефіцієнта розсіювання становлять 0,05, 0,2 і 0,4) [2]. Для більш складної забудови (кам'яна кладка, колони, поглиблення, щільна міське середовище і т.д.) необхідні подальші дослідження, так як імовірно, може бути створений істотний ефект зворотного розсіювання далеко від дзеркального напрямку.

У моделі з однією пелюсткою, що розсіюється, у відповідності до рис.2 електромагнітна хвиля падає на поверхню під кутом падіння  $\theta_i \in [0^\circ, 90^\circ]$ , електричне поле розсіюється в моделі DS в будь-якому довільному напрямку в усій площині падіння, включаючи зворотне розсіювання,  $\theta_s \in [-90^\circ, 90^\circ]$ :

$$|\bar{E}_s|^2 = \left( \frac{KS}{\tau_i \tau_s} \right)^2 \frac{dS \cos \theta_i \left( \frac{1 + \cos \psi}{2} \right)^{\alpha_R}}{F_{\alpha_R}}, \quad (3)$$

$E_s$  - розсіяне електричне поле під кутом розсіювання;  $K$  – деяка стала, що залежить від амплітуди падаючої хвилі;  $\tau_i$  і  $\tau_s$  - відстані між розсіювачем і передавачем, і приймачем відповідно;  $dS$  - площа об'єкту, якій розсіює;  $\psi$  - кут між відбитою і розсіяною хвилями, як показано на рис. 2;  $F_{\alpha_R}$  - коефіцієнт масштабування для нормалізації до загальної розсіяної потужності, який задається наступним виразом [4]:

$$F_{\alpha_R} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \frac{1 + \cos \psi}{2} \right)^{\alpha_R} \sin \theta_s d\theta_s. \quad (4)$$

Щільність потоку потужності розсіяної хвилі у відповідності з [5] дорівнює:

$$\rho_d = |\bar{E}_s|^2 / 120\pi. \quad (5)$$

Формування вузького променя і його поширення можна простежити за допомогою квазіоптичної моделі [6], в якій використовується значення спрямованості випромінювання і площі приймальної антени (відбивача), рис.2.

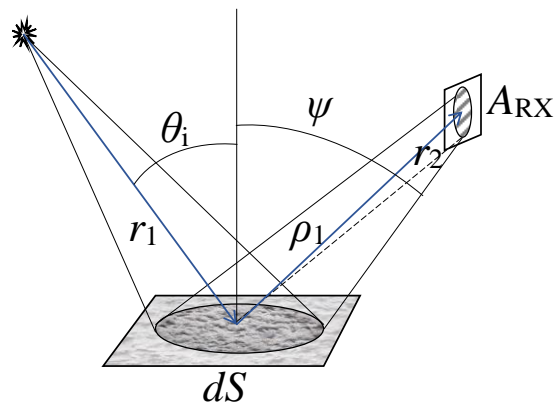


Рис.2. Формування вузького променя та його відбиття на розсіючій поверхні

Таким чином це робиться у відкритих оптичних системах зв'язку, потужність на вході приймача  $P_{RX}$  можна записати:

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{D_{TX}(\alpha) A_{RX}}{4\pi r^2 L_{atm}(f_c, r)} = P_{TX} \frac{A_{RX}}{\Omega r^2 L_{atm}(f_c, r)} \approx P_{TX} \frac{4A_{RX}}{\pi \alpha^2 r^2 L_{atm}(f_c, r)}. \quad (6)$$

$P_{TX}$  - потужність передавача,  $A_{RX}$  - апертура приймальної антени;

$D_{TX}(\alpha) = \frac{4\pi}{\Omega} = 2/(1 - \cos(\frac{\alpha}{2}))$  – коефіцієнт спрямованої дії антени;

$\alpha$  – кут розкриття антени.

Використовуючи квазіоптичну модель [6] для одного відбиття (без урахування поглинання в атмосфері) можна записати вираз для потужності сигналу на вході приймача:

$$P_{RX} = \rho_d A_{RX} = |\bar{E}_s|^2 A_{RX} / 120\pi. \quad (7)$$

Модель радіолокаційного перетину розсіяння RCS зазвичай передбачає, що розсіюючий об'єкт є ідеальним електричним провідником, що може не відповідати дійсності в реальному середовищі. Значення RCS для різних розсіюючих об'єктів зазвичай емпірично виводяться з результатів вимірювання. Кількісна міра потужності, яка перехоплена розсіювачем і перевипромінена зворотно в напрямку RX, визначається ефективною площиною розсіювання (ЕПР) -  $\sigma$ .

Міра кількості падаючої потужності, перехопленої розсіювачем і перевипромінювана в напрямку приймача, позначається як RCS [4]. Щільність потоку потужності, яка розсіяна і випромінюється в напрямку приймача, позначається як

$$\rho_d = \frac{P_{TX}}{4\pi d^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi d^2}. \quad (8)$$

Прийняту потужність для квазіоптичної моделі можна представити у вигляді:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} A_{RX} \sigma}{16\pi^2 d^4}. \quad (9)$$

Розсіювання поверхнею розраховують виходячи з поділу нерівностей на великомасштабні та дрібномасштабні, відповідно  $\sigma_{rough}$  і  $\sigma_{smooth}$ :

$$\sigma = \sigma_{rough} + |\chi_s|^2 \sigma_{smooth}, \quad (10)$$

де  $\chi_s$  - характеристична функція, що залежить від висоти нерівностей шорсткої поверхні.

Для двомірних моделей [4] розглядається тільки ширина об'єкту, що розсіює, оскільки передбачається, що довжина цього об'єкту має розмір одиницю, тоді для моностатичної моделі одержимо:

$$\sigma_{smooth} = \frac{2\pi\omega^2}{\lambda} \left[ \cos\theta_i \frac{\sin(k_0\omega\cos\theta_i)}{k_0\omega\cos\theta_i} \right]^2, \quad (11)$$

де  $\omega$  - ширина об'єкту, що розсіює;  $k_0$  - хвильове число у вільному просторі.

З цього виразу видно, що ефект згладжування знаходиться в зворотній залежності від довжини падаючої радіохвилі.

Відповідно до [1] можна записати вираз для характеристичної функції:

$$\chi_s = \exp\left[-k_0^2 h_{\text{rms}}^2 \cos^2(\theta_i)\right], \quad (12)$$

де  $h_{\text{rms}}$  позначає середньоквадратичну помилку (висоту дрібномасштабної поверхні).

При зменшенні частоти домінує ефект згладжування. Однак, коли частота досягає терагерцового діапазону, вплив шорсткості  $\chi_s$  на значення розсіювання стає набагато більш значним. Методи знаходження значень  $\sigma_{\text{rough}}$  описані в [4] для випадково орієнтованих невеликих перетинів.

**4.2. Моделі на основі штучного відбиття.** Можливим варіантом забезпечення доступності і дальності зв'язку в ММД, особливо в NLOS, може бути застосування штучних відбивачів.

Для одного відбиття у відповідності з квазіоптичною моделлю (6) можна записати:

$$P_{\text{RX2}} \approx P_{\text{TX}} \frac{4S_{\text{RX1}}}{\pi\alpha^2 r_1^2} \cdot \frac{4A_{\text{RX}}}{\pi\alpha^2 (\rho_1 + \alpha S_{\text{RX1}}/\pi)^2} \approx P_{\text{TX}} \frac{16S_{\text{RX1}}A_{\text{RX}}}{\pi^2\alpha^4 r_1^2 \rho_1^2 L_{\text{atm}}(f_c, r_1, \rho_1)}. \quad (13)$$

Якщо передача радіосигналу відбувається формуванням одного вузького променя, який багаторазово відбивається від  $N$  відбивачів (рис.3а), то, приймаючи що  $P_{\text{RX},i} = kP_{\text{TX},i}$  та  $k$  (коефіцієнт відбиття) однаковий для всіх відбивачів, за аналогією з (13) можна записати для систем NLOS вираз для потужності сигналу на прийомі:

$$P_{\text{RX}} \approx P_{\text{TX}} \left(\frac{4}{\pi\alpha}\right)^{(N+1)} A_{\text{RX}} \prod_{i=1}^N \frac{S_{\text{RX},i} k_i}{r_i^2 \rho_i^2 L_{\text{atm}}(f_c, r_i, \rho_i)}. \quad (14)$$

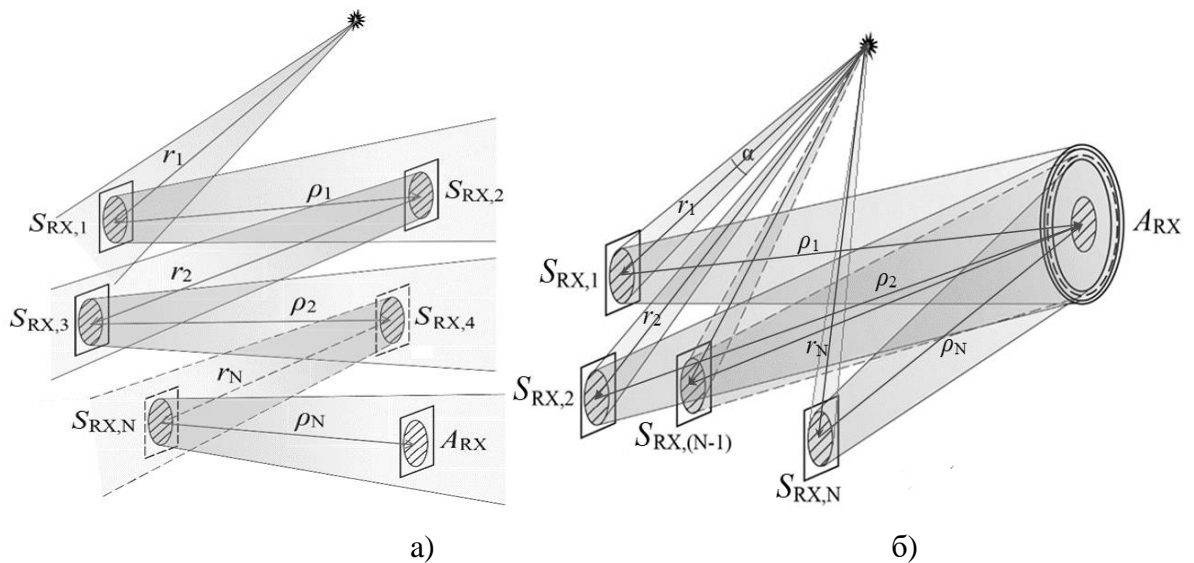


Рис.3. Підсилення радіоканалу ММД за допомогою штучних підсилювачі:  
 а) формування одного вузького променя, який багаторазово відбивається від  $N$  відбивачів;  
 б) багатопроменеве поширення сигналу для одного відбиття

На рис. 4 представлені результати розрахунку залежності (14) динамічного діапазону радіоканалу від кута розкриття антени для різних коефіцієнтів відбиття. У розрахунках взяті наступні значення величин:  $k=0.8$ ,  $r_1 = r_2 = \dots r_i = 5$  м,  $A_{RX} = S_{RX,1} = S_{RX,2} = \dots S_{RX,N} = 10^{-2}$  м.

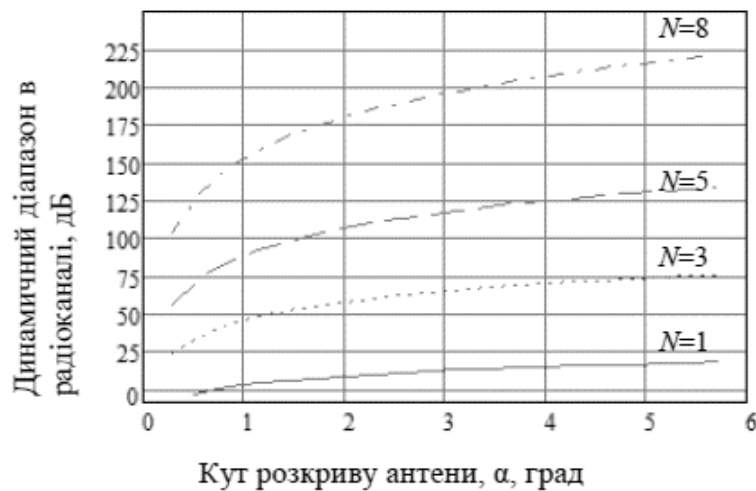


Рис.4 Залежність динамічного діапазону радіоканалу в ММД від кута розкриття антени для різних значень коефіцієнту відбиття

У разі багатопробеневого поширення сигналу (рис.3) за аналогією можна записати для одного відбиття і N променів для систем NLOS

$$P_{RX} \approx P_{TX} \left( \frac{4}{\pi \alpha^2} \right)^2 k A_{RX} \sum_{i=1}^N \frac{S_{RX,i}}{r_i^2 L_{atm}(f_c, r_i) \rho_i L_{atm}(f_c, \rho_i)} \quad (15)$$

На рис.5 представлені результати обчислення по виразу (15) залежність значення підсилення в радіоканалі для багатопробеневого поширення сигналу від кута розкриття антени для одного відбиття.

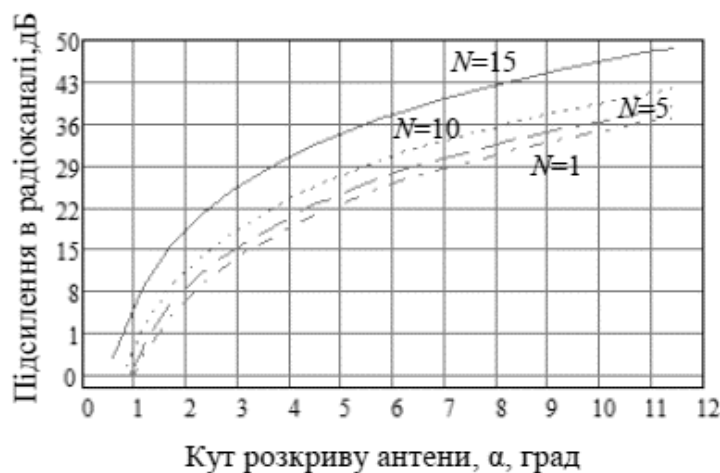


Рис. 5. Залежність підсилення в радіоканалі для багатопробеневого поширення сигналу від кута розкриття антени для одного відбиття



### 5. Обговорення результатів проведеного дослідження.

З наведених результатів розрахунків можна зробити висновок, що моделювання (а також реалізація) радіоканалів в МДД з урахуванням (або створенням) штучних відбивачів може привести до підсилення сигналу в каналі, збільшення доступності (дальності) зв'язку. На основі врахування точної геометрії забудови, вивчення фундаментальних фізичних підходів проектування мереж в ММД можна знайти енерго та спектрально ефективні рішення, що особливо важливо при застосуванні технології МІМО.

**6. Висновки.** Для прогнозування були проаналізовані методи, засновані на особливостях поширення міліметрових хвиль в навколишньому середовищі. Розроблено метод на основі квазіоптичної моделі поширення з урахуванням ефектів множинного відбиття і багатопроменевого поширення сигналу. Розглянуто можливість посилення радіоканалу в міліметровому діапазоні за допомогою штучних відбивачів для формування одного вузького променя, який багато разів відбивається, а також багатопроменевого поширення сигналу для одного відображення. Наведені результати розрахунків показують, що моделювання, а також реалізація, радіоканалів з використанням штучних відбивачів може привести до підсилення сигналу в каналі. Наприклад для 10 відбивачів для куту розкриття антени 5 градусів підсилення може досягти 25 дБ. Тому можна зробити висновок, що врахування точної геометрії забудови, застосування в штучних відбивачів, прогнозування на основі ефектів відбивання та розсіювання сигналу, можна знайти енергоефективні рішення, що особливо важливо при проектуванні телекомунікаційних мереж в міліметровому діапазоні, а в майбутньому терагерцовому діапазоні, і особливо при застосуванні технології МІМО. Такі підходи необхідні для розвитку майбутніх надшвидкісних мобільних телекомунікаційних систем з різними додатками та послугами.

### References

1. Ju S., Shah S., Javed M., J. Li, G. Palteru, Robin J., Xing Y., Kanhere O. and Rappaport T. S. (2019) Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications. *IEEE International Communications Conference (ICC)*, Shanghai, May 2019 P. 1-7.
2. Xiao M. et al. (2017) Millimeter wave communications for future mobile networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Sep 2017.vol. 35, no. 9. P. 1909-1935.
3. Järveläinen J., Haneda K. and Karttunen A. Indoor propagation channel simulations at 60 GHz using point cloud data. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 10, Oct 2016. P. 4457–4467.
4. Balanis C. (2012) *Advanced Eng. Electromagnetics*, 2nd ed. Wiley. 1040 p.
5. Rappaport T. S. (2002) *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 707 p.
6. Kremenetskaya Y. A., Liskovskiy I. O., Zhukova E. R. (2017) Quasioptical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics. *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Ukraine, Kyiv. P. 395-398.