

**Кременецька Я. А., Дудка О. Б., Морозова С. В., Корсун В. І.**

*...Державний університет телекомунікацій, Київ*

### **МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД В СТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ**

*Розглянуті питання математичного моделювання мобільних систем зв'язку в міліметровому діапазоні на основі аналізу інтерференційних шумів, з урахуванням високої спрямованості передавальної антени, молекулярного поглинання, блокування високочастотного випромінювання. Запропоновані моделі та результати розрахунків зможуть бути реалізовані для підвищення ефективності використання міліметрового діапазону, а також для вибору оптимальних методів мультиплексування, модуляції радіосигналів, розрахунку енергетичного покриття стільникових мереж 5G.*

**Ключові слова:** міліметровий діапазон, стільникові системи зв'язку, відношення сигнал/інтерференційний шум, блокування, системи 5G

**Kremenetska Ya. A., Dudka O. B., Morozova S. V., Korsun V. I.**

*State University of Telecommunications, Kyiv*

### **INTERFERENCE MODELING OF MILLIMETER-WAVE CELLULAR COMMUNICATIONS SYSTEMS**

*To implement the bandwidth requirements for mobile communication systems of the fifth generation, it is assumed to use the millimeter wavelength range. However, the use of this range is significantly different from the lower-frequency radio resources, which are used in modern communication systems, for example, from the decimeter range. The unique properties of the millimeter wave propagation can fundamentally change approaches to network planning, calculating interference noise, coverage size, evaluating communication quality, required signal power and other parameters that affect network performance. This paper presents mathematical models of interference noise, taking into account the high directivity of the transmitting antenna, molecular absorption, blocking high-frequency radiation based on stochastic geometry. Mathematical modeling of mobile communication systems in the millimeter range is an ongoing research process. The creation of accurate models of such systems is important for the further development of the mobile industry and other telecommunication technologies in the millimeter and terahertz ranges. In the work, the ratios for the signal/interference  $i$  are calculated depending on different antenna aperture angles and different distances between the control receiver-transmitter pair for the two-dimensional model. And also the signal/noise molecular absorption, which, as suggested by modern studies, must be taken into account in the analysis of interference. The approaches to radio channel modeling presented in this article can be implemented to increase the efficiency of using the millimeter-wave energy and frequency resources, as well as to select the best methods of multiplexing, modulating radio signals, and calculating the energy coverage of fifth-generation cellular networks.*

**Key words:** millimeter wave band, cellular systems, signal to interference ratio, blocking, 5G systems

**Кременецкая Я. А., Дудка А. Б., Морозова С. В., Корсун В. И.**

*Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОМЕХ В МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Рассмотрены подходы к математическому моделированию мобильных систем связи в миллиметровом диапазоне интерференционных шумов, учитывающие высокую направленность передающей антенны, молекулярное поглощение, блокировку высокочастотного излучения.*

© Кременецька Я. А., Дудка О. Б., Морозова С. В., Корсун В. І. 2018

*Модели и результаты расчетов могут быть реализованы для повышения эффективности применения энергетического и частотного ресурсов миллиметрового диапазона, а также для выбора оптимальных методов мультиплексирования, модуляции радиосигналов, расчета энергетического покрытия сотовых сетей 5G.*

**Ключевые слова:** миллиметровый диапазон, сотовые системы связи, отношение сигнал/интерференционный шум, блокировка, системы 5G

### **Постановка задачі моделювання радіоканалів та систем 5G**

Для реалізації всього потенціалу 5G, різних нових додатків, таких як: штучний інтелект, 3D відео, Internet of Everything (Інтернет-всього), технологій обробки даних (Big Data), безпілотні автомобілі (self-driving car), технологія занурення людини в штучний світ (VR/AR), необхідне збільшення обсягу трафіку даних. Наприклад, нестиснена передача відео UHD і 3D TV UHD потребує відповідно 24 Гбіт/с та 100 Гбіт/с. Ключовою вимогою до майбутніх мобільних мереж п'ятого покоління 5G (і наступних поколінь) є здатність обробляти величезну кількість даних і, крім того, мати дуже високу пропускну здатність на кожен пристрій (від декількох Гбіт/с до Тбіт/с) з щільністю потоку даних до 10 біт/с/км<sup>2</sup>). Такі межі передбачаються світовим щомісячним трафіком для смартфонів в 2021 році: до 50 петабайт в секунду [1]. Для досягнення таких швидкостей необхідна дуже широка смуга частот, яка може бути знайдена і реалізована в діапазоні міліметрових і терагерцових хвиль (30-450 ГГц), оскільки швидкість передачі даних перетворюється в попит на доступну смугу пропускання.

Більшість досліджень безпроводових систем в міліметровому діапазоні (ММД) зосереджені на діапазонах 28, 38, 60 ГГц і Е-діапазоні (71-76 ГГц і 81-86 ГГц) [2]. Існує кілька стандартів, визначених для внутрішніх бездротових персональних мереж (WPAN) або безпроводових локальних мереж (WLAN), наприклад ECMA-387, IEEE 802.15.3c і IEEE 802.11ad [2, 3], що стимулює зростаючі інтереси використання ММД в зовнішніх стільникових системах [4]. Для мобільних мереж особливий інтерес представляють частоти 28, 38, 71-76, 81-86 ГГц для організації малих стільників (до 150-200 м) [2].

Безпроводові системи в 60-ГГц діапазоні працюють на відносно малих дистанціях при прямої видимості завдяки сильному ослабленню сигналу в атмосферному кисню. Але через ослаблення сигналу усувається проблема інтерференції між різними джерелами сигналу, що належать різним мережам. Це дозволяє автоматично вирішити проблему повторного використання частот – зникає завдання частотного розподілу. Саме тому діапазон 60 ГГц в багатьох провідних країнах світу визнаний безліцензійним.

Міліметровий Е-діапазон – 71-76,81-86 і 92-95 ГГц. На відміну від 60-ГГц діапазону, знаходиться у "вікні прозорості", що робить його прийнятним для високошвидкісної передачі даних на відстані до декілька кілометрів. Оскільки габарити антенних систем в цьому діапазоні можуть бути істотно знижені, досягається висока спрямованість передачі. Історія масового освоєння Е-діапазону почалася в 2003-2005 роках, коли Федеральна комісія зв'язку США визначила правила використання цих діапазонів для високошвидкісної фіксованої передачі даних. Samsung вперше домігся передачі даних 1 Гбіт/с на частоті 28 ГГц у травні 2013 года [4]. Ericsson тестували на частоті 15 ГГц і досягли швидкості до 4,5 Гбіт/с в зовнішніх мережах, і на 70 ГГц для досягнення швидкості 2 Гбіт/с в приміщеннях [5]. Huawei і China mobile на Світовому конгресі мобільних технологій (англ. – Mobile World Congress) в 2017 році продемонстрували в діапазоні 26,5-40 ГГц пропускну здатність користувачів більш ніж на 22 Гбіт/с [6].

Моделі для розрахунку втрат сигналу, співвідношення сигнал/шум необхідні для точного проектування, порівняння радіоінтерфейсів та розгортання безпроводових систем. Так як

вибір типу модуляції і ущільнення пов'язаний з необхідними критеріями спектральної і енергетичної ефективностей у відповідності з необхідною пропускну здатністю мережі. У мобільних системах оптимальний вибір методу модуляції сигналів суттєво залежить від обмежень на розміри стільників і щільності абонентів в них, потужності передавача, а також повинен враховувати технології формування і випромінювання сигналів, особливості поширення, інтерференційний шум, ймовірність блокування,

Загальні параметри моделі радіоканалу включають несівну частоту, пропускну здатність, двовимірну або тривимірну відстань між передавачем (TX) і приймачем (RX), вимоги до обладнання та систем, стандартів, обмежень на щільність потоку потужності.

Моделювання каналів та систем для 5G є продовжувальним процесом, і при цьому необхідні нові концепції розробки моделей радіовипромінювання в ММД, заснованих на фундаментальних фізичних підходах [2]. Розробка правильних моделей поширення радіоканалів ММД життєво важлива для довгострокового розвитку майбутніх безпроводових систем ММД, особливо для мобільної індустрії ММД, яка тільки зараз розробляється, і для можливості подальшого розширення радіодіапазонів, збільшення пропускну здатності, енергоефективності.

### Моделювання інтерференційних завад в стільникових мережах ММД на основі стохастичної геометрії

Потужність інтерференційних завад від інших каналів зв'язку в будь-якому розташованому опорному приймачі найбільш часто виражають як [7]:

$$N_K = \sum_{i=1}^K g_i h_i G(\theta_i, \psi_i) l_i^{-a}, \quad (1)$$

де  $g_i$  – потужність  $i$ -го передавача;

$h_i$  – коефіцієнт загасання в каналі (для моделювання дрібномасштабними завмирання використовують змінну Nakagami);

$G(\theta_i, \psi_i)$  – коефіцієнт підсилення антени в залежності від кута місця  $\theta_i$  і кута азимута  $\psi_i$  тривимірної діаграми спрямованості антени;

$l_i$  – відстань між передавачем і приймачем в  $i$ -му інтерферируючий каналі відповідно;

$K$  – кількість активних джерел завад.

Для міліметрового діапазону в основному аналіз поводитьсь в круговому секторі, втрати каналу враховуються за законом  $l(r) = r^{-a}$  для LOS (пряма видимість) систем значення для коефіцієнта вибирається  $a = 2$ , зазвичай для NLOS (поза прямої видимості),  $a = 3, 3.5, \dots, 5$ .

Тоді згідно (1) відношення сигнал/шум + інтерференційний шум:

$$SINR = \frac{g_0 G_0 l_0^{-a}}{\sum_{i=1}^K g_i h_i G(\theta_i, \psi_i) l_i^{-a} + \sigma^2},$$

де індекс 0 відповідає опорному приймача і передавача, значення  $\sigma$  зазвичай відповідає тепловому шуму, присутньому в смузі каналу.

Значення сигнал інтерференційний шум відповідно:

$$SIR = \frac{G_0 l_0^{-a}}{\sum_{i=1}^K h_i G(\theta_i, \psi_i) l_i^{-a}} \quad (2)$$

Втрати в радіоканалі ММД враховуються СІ моделлю:

$$L^{CI}(f_c, d_{3D})[\text{dB}] = \text{FSPL}(f_c, 1 \text{ м}) + 10n \log_{10}(d_{3D}) + \chi_{\sigma}^{CI},$$

де  $\chi_{\sigma}^{CI}$  – представляє собою втрати через затінення, які моделюється як нульова середня гаусівська випадкова величина зі стандартним відхиленням в дБ;

$n$  – показник втрати шляху, знайдений шляхом зведення до мінімуму помилки вимірювань

даних;

$$d_{3D} > 1 \text{ м};$$

$\text{FSPL}(f_c, 1 \text{ м})$  – втрати у вільному просторі на відстані в 1 м.

Для вивчення інтерференційних завад часто використовують стохастичну геометрію. Зокрема, модель просторового точкового процес Пуассона. Імовірність знаходження інтерферуючих вузлів всередині області  $A$  виражається як [8]:

$$P\{N \in R\} = \frac{(\lambda A)^N}{N!} e^{-\lambda A}, \quad N \geq 0,$$

$\lambda$  – щільність (інтенсивність) інтерферуючих вузлів  $N$ .

Для розрахунків для систем ALOHA або TDMA (способи доступу, пропонувані для мобільних систем в ММД) також вводяться параметри спектральної ефективності, щільності можливих джерел електромагнітних полів на одиницю площі, передавачів (ланок) на одиницю площі, щільність перешкод на одиницю площі і т.д. [9].

Розглянемо контрольну пару передавач-приймач в присутності  $N$  джерел інтерференційних завад в круговій області  $A$  з радіусом  $R$  (Рис. 1).

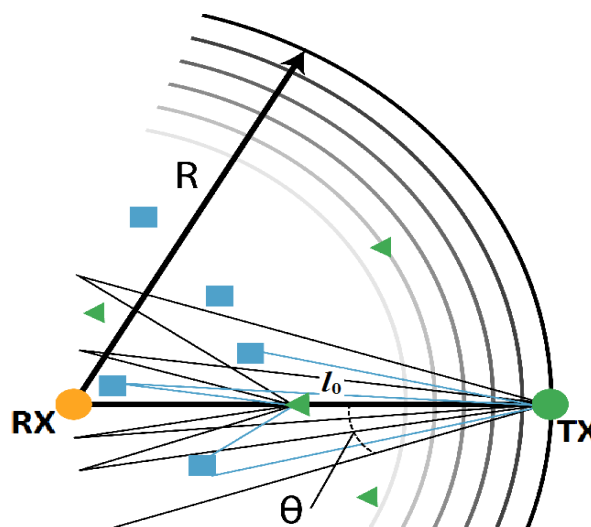


Рис. 1. Приклад точкового розподілу Пуассона: кола – досліджувана пара приймач-передавач; квадрати – блокування; трикутники – вузли, що заважають (вносять інтерференційний шум)

Інтерферуючі вузли розподіляються на основі просторового точкового процесу Пуассона. Загальний прийнятий сигнал завад в певній точці мережі являє собою суму прийнятого сигналу від кожного вузла. Припустимо, що інтерферуючі джерела знаходяться на відстані LOS і мають постійну однакову потужність передачі. А також, що еталонна пара передавач-приймач, відстань між якими  $l_0$ , не є частиною точкового процесу Пуассона і не заблокована. Ефекти, пов'язані з NLOS, наприклад, пов'язані з ефектами відображень (в меншій мірі дифракції) вимагають окремого вивчення [10, 11]. Будемо вважати, що ймовірність блокування для інтерферуючих вузлів не залежить від кута розкриття антени, а тільки від відстані та лінійного розміру блокування.

Сумарне значення шумових завад між інших каналів зв'язку в приймачі можна виразити як [12]

$$N_{\text{int}} = P_{\text{TX}} \frac{D_{\text{TX}} A_{\text{RX}}}{4\pi} \sum_{i=1}^N l_i^{-2} e^{-\gamma(f)l_i} = P_{\text{TX}} \frac{2/(1 - \cos(\theta/2)) A_{\text{RX}}}{4\pi} \sum_{i=1}^N l_i^{-2} e^{-\gamma(f)l_i}, \quad (3)$$

де  $N$  – число інтерферуючих вузлів, що впливають на приймач;

$l_i$  – відстань від інтерферуючого вузла до приймача;

$\gamma(f)$  – коефіцієнт поглинання (абсорбції) (absorption coefficient), (залежить від частоти несучої);

$\theta$  – кут розкриття антени (beamwidth).

Для двомірної моделі ймовірність блокування сигналу від інтерферуючих вузлів кругової форми радіусу  $r_b$  можна розглянути як функцію від віддалення від даного вузла в такий спосіб [13]:

$$p_b = \exp(-\lambda_b(l - r_b)), \quad (4)$$

де  $\lambda_b$  – щільність розміщення блокувань.

Ймовірність, що приймач знаходиться всередині основного пелюстки  $\theta$  активного передавача:

$$p_l = 1 - \exp(-l^2 \text{tg}(\theta/2)). \quad (5)$$

Середнє значення інтерференції в приймачі  $E[N_{\text{int}}]$  може бути обчислено у відповідність з (3)-(5) наступним чином:

$$\begin{aligned} E[N_{\text{int}}] &= P_{\text{TX}} \frac{A_{\text{RX}}}{2\pi(1 - \cos(\theta/2))} \int_0^R l^{-2} \exp(-\gamma l) p_l (1 - p_b) 2\lambda \pi l dl \\ &= P_{\text{TX}} \frac{A_{\text{RX}}}{2\pi(1 - \cos(\theta/2))} \int_0^R l^{-2} \exp(-\gamma l) [1 - \exp(-l^2 \text{tg}(\theta/2))] [1 - \exp(-\lambda_b(l - r_b)r_b)] 2\lambda \pi l dl \\ &= |\theta \leq 10^\circ| = P_{\text{TX}} \frac{4A_{\text{RX}}}{\pi\theta^2} [E_i(r_b, \gamma, \lambda, \lambda_b, \theta) - E_i(R, \gamma, \lambda, \lambda_b, \theta)], \end{aligned} \quad (6)$$

$E_i(x)$  – інтегральна показникова функція.

Відношення сигнал/інтерференційні завади згідно (2), (6):

$$SIR = \frac{P_{\text{RX}}}{E[N_{\text{int}}]} = \frac{l_0^{-2} e^{l_0 \gamma(f)}}{[E_i(r_b, \gamma, \lambda, \lambda_b, \theta) - E_i(R, \gamma, \lambda, \lambda_b, \theta)]}. \quad (7)$$

Для  $\gamma=0.1$ ,  $\lambda=0.01$ ,  $\lambda_b=0.01$ ,  $r_b=0.3$  м на рис. 2 представлені розрахункові значення SIR для різних значень  $\theta$  и  $l_0$ .

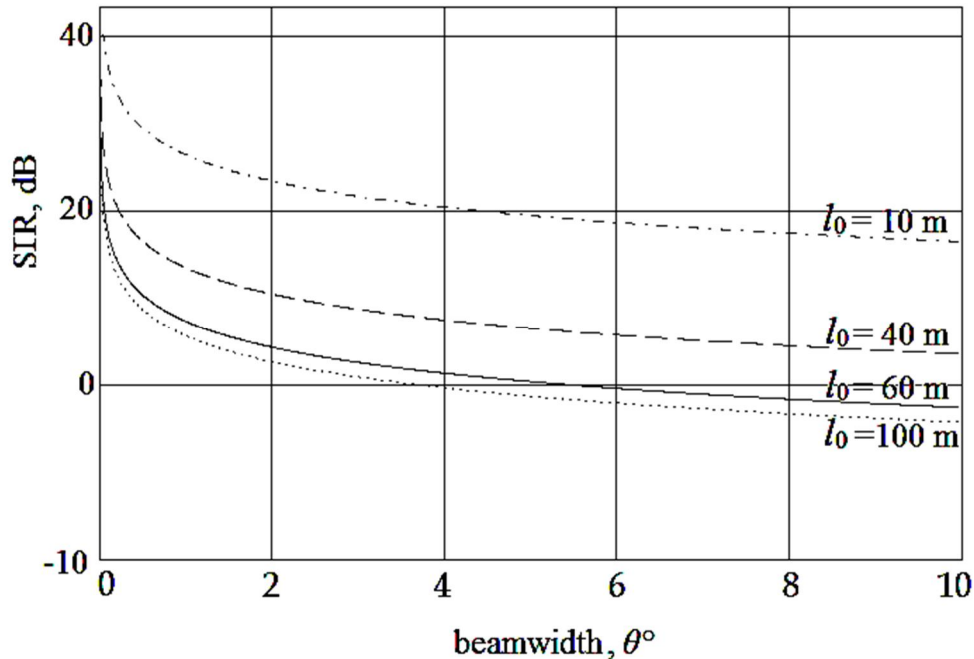


Рис. 2. Результати обчислення значення SIR за формулою (7) для різних  $\theta^\circ$  кутів розкриття антени та різних відстаней  $l_0$ ,  $R = 100$  м

### Інтерференційний шум молекулярного поглинання

Випромінювальна здатність середовища, в якому розповсюджуються радіохвилі ММД і терагерцового діапазону (0,1-1 ТГц) розглядається як джерело шуму [13, 14]. Відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера потужність шуму молекулярного поглинання можна записати наступним чином:

$$N_M(f_c, d) = P_{TX} \frac{D_{TX} A_{RX}}{4\pi d^2} (1 - e^{-\gamma(f)d}), \quad (8)$$

де  $\gamma(f)$  – узагальнений коефіцієнт поглинання середовища, значення якого можна знайти, наприклад, з бази даних HITRAN [15].

Електромагнітне випромінювання, що поглинається молекулами в середовищі, як показано в роботах [14], повторно випромінюється не в фазі приблизно на тих же частотах випромінювання, яке було поглинуто. Однак, в роботі [14] показано, що поглинання молекулами водяної пари терагерцового випромінювання вводить кольоровий шум. На даний момент природа шуму поглинання молекул ще вивчається.

Можливо, в основі поглинання/випромінювання лежать комбінація різних фізичних явищ, наприклад, вимушеного, спонтанного, повторного випромінювань. Автори статей [13,14] припускають, що молекулярний шум поглинання є основним чинником, що визначає співвідношення SIR для вікон прозорості терагерцового діапазону.

Часові характеристики (властивості) поглинання/випромінювання в кінцевому рахунку визначають кількість енергії, отриманої приймачем. Тому для терагерцового діапазону пропонуються імпульсні методи модуляції і кодування інформації [14].

На рис. 3. представлені результати математичного моделювання молекулярного шуму поглинання (8) для різних відстаней  $l_0$ .

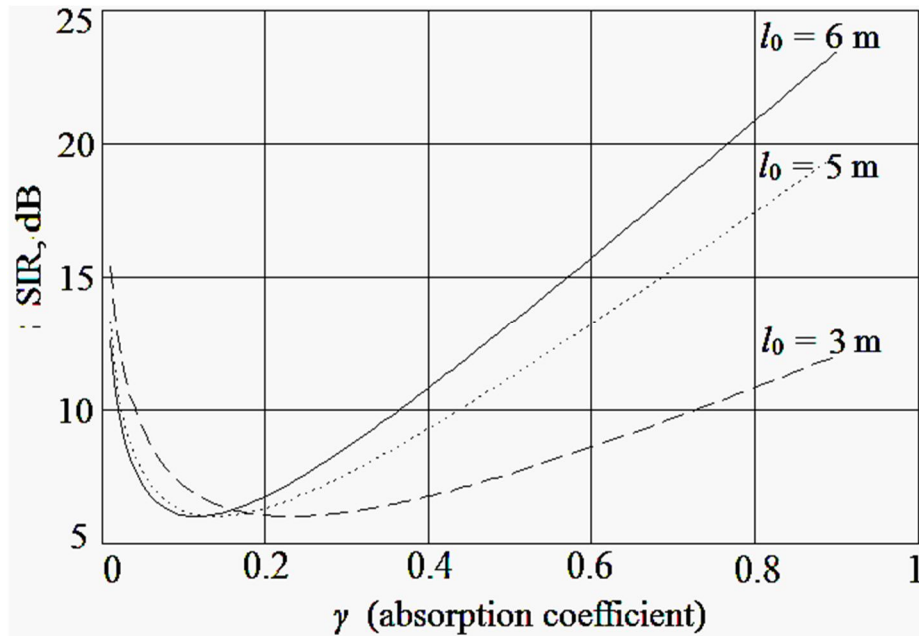


Рис. 3. Розрахункові значення співвідношення сигнал/шум молекулярного поглинання залежно від коефіцієнта поглинання(абсорбції)  $\gamma$  для різних відстаней  $l_0$  від передавача до приймача (згідно (8)).

### Висновки та обговорення результатів

Підходи до моделювання втрат і шумів в радіоканалах ММД, особливо для стільникових систем в міській забудові, суттєво відрізняються від більш низькочастотних діапазонів 2, 4 та 5 ГГц, які використовуються, наприклад, в технології LTE. Це пояснюється тим, що для хвиль ММД істотніше проявляються ефекти блокувань, поглинання сигналу. Показано, що вузькоспрямоване випромінювання в ММД для радіоканалу може бути використано для збільшення співвідношення SIR (рис. 2).

Як видно з рис.3 в моделях розрахунку стільникових систем в ММД також необхідно враховувати шум молекулярного поглинання. Результати розрахунків і підходи до моделювання радіоканалів, представлені в даній статті, зможуть бути застосовані для підвищення ефективності використання енергетичного і частотного ресурсів міліметрового діапазону, а також для вибору оптимальних методів мультиплексування, модуляції радіосигналів, розрахунку енергетичного покриття стільникових мереж наступних поколінь.

### Список використаної літератури

1. Ericsson Traffic Exploration Tool / Ericsson. – 2016.  
– <http://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBasicEditor.ericsson>.
2. Rappaport T. S. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, Jr. Molisch, E. Mellios, J. Zhang. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – Dec. 2017. – Vol. 65. – P. 6213-6230.



3. Niu Y. Survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: Opportunities and challenges / Y Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, A. Vasilakos // *Wireless Networks*. – Apr. 2015. – P. 1-20.
4. Xiao M. Millimeter wave communications for future mobile networks / M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, L. Dai, Y. Li, M. Matthaiou, G.K. Karagiannidis // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2017. – Vol. 35. – №9. – P. 1909-1935.
5. DOCOMO's 5G Outdoor Trial Achieves 4.5Gbps Ultra-high-speed Transmission. – Aiming at 5G launch by Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games. – [https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media\\_center/pr/2015/0302\\_03.html](https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2015/0302_03.html).
- 6 Huawei 5G trials: Focus on MIMO, mm wave and network slicing. – <https://www.rcrwireless.com/20170421/fundamentals/huawei-5g-trials-tag17-tag99>.
7. Haenggi M. Interference in Large Wireless Networks / M. Haenggi, Ganti R. // *Foundations and Trends® in Networking*. – 2009. – Vol.3. – №2. – P. 127-248.
- 8 Pinto P. Communication in a Poisson field of interfererspart I: interference distribution and error probability / P. Pinto, M. Win // *IEEE Trans. Wireless Commun.* – 2010. – Vol. 9. – №7. – P. 2176-2186..
9. Shokri-Ghadikolaei H. Millimeter wave cellular networks: A MAC layer perspective / H. Shokri-Ghadikolaei, C. Fischione., G. Fodor, P. Popovski, M. Zorzi // *IEEE Trans. Commun.* – 2015. – Vol.63. – №10. – P. 3437-3458.
10. Zhao H. GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city / H. Zhao et al. // *IEEE International Conference on Communications*. – Budapest. – 9-13 June 2013. – P. 5163-5167.
11. Narayanan A. Coverage Analysis in Millimeter Wave Cellular Networks with Reflections / A. Narayanan, T. V. Sreejith, R. K. Ganti // *IEEE Global Communications Conference*. – 2017. – P. 1-6.
12. Kremenetskaya Y. A. Quasi-optical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics / Y. A. Kremenetskaya, I. O. Liskovskiy, E. R. Zhukova // *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*. – Kyiv. – 24-27 May 2017. – P. 395-398.
13. Petrov V. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, Y. Koucheryavy // *IEEE Trans. Wireless Commun.* – 2017. – Vol. 16, – №3. – P. 1791-1808.
14. Jornet J. M. Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band // J. M. Jornet, I. F. Akyildiz // *IEEE International Conference on Communications*. – 2011. – P. 1-6.
15. Rothman L. S. Hitran: High-resolution transmission molecular absorption database / L. S. Rothman et al. // *Harvard-Smithson Center for Astrophysics*. – 2014. – <https://www.cfa.harvard.edu>.

#### References (MLA)

1. Ericsson Traffic Exploration Tool: Ericsson, (2016). <http://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBas icEditor.ericsson>. Web.
2. Rappaport T. S., Xing Y. MacCartney G. R., Molisch Jr., Mellios E., and Zhang J. "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65(12) (2017): 6213-6230. Print
3. Niu Y., Li Y., Jin D., Su L., Vasilakos A. "Survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: Opportunities and challenges." *Wireless Networks* (2015): 1-20. Print



4. Xiao M., Mumtaz S., Huang Y., Dai L., Li Y., Matthaiou M., Karagiannidis G.K. "Millimeter wave communications for future mobile networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35(9) (2017): 1909-1935. Print
5. DOCOMO's 5G Outdoor Trial Achieves 4.5Gbps Ultra-high-speed Transmission. *Aiming at 5G launch by Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games*. [https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media\\_center/pr/2015/0302\\_03.html](https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2015/0302_03.html). Web.
7. Haenggi M., and Ganti R. K. "Interference in Large Wireless Networks." *Foundations and Trends® in Networking* 3(2) (2009): 127-248. Print.
8. Pinto P., and Win M. "Communication in a Poisson field of Interfererspart I: Interference Distribution and Error Probability." *IEEE Trans. Wireless Commun.* 9(7) (2010): 2176–2186. Print.
9. Shokri-Ghadikolaei H., Fischione C., Fodor G., Popovski P., Zorzi M. "Millimeter wave cellular networks: A MAC layer perspective." *IEEE Trans. Commun.* 63(10) (2015): 3437-3458. Print.
10. Zhao H. et al. "28 GHz Millimeter Wave Cellular Communication Measurements for Reflection and Penetration Loss in And Around Buildings in New York City." *IEEE International Conference on Communications* (2013): 5163-5167. Print.
11. Narayanan A., Sreejith T. V., and Ganti R. K. "Coverage Analysis in Millimeter Wave Cellular Networks with Reflections." *IEEE Global Communications Conference* (2017): 1-6. Print.
12. Kremenetska Y. A., Gradoboyeva N. V., and Morozova S. V. "Increase in Energy Efficiency of Millimetres Systems by the Method of Channel Gain Due to Diffraction and Reflection." *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohiyi* 3(56) 2017: 21-25. Print.
13. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J. M., and Koucheryavy Y. "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas." *IEEE Trans. Wireless Commun.* 16(3) (2017): 1791-1808. Print.
14. Jornet J. M., and Akyildiz I. F. "Low-Weight Channel Coding for Interference Mitigation in Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band." *IEEE Int. Conf. Commun.* (2011): 1-6. Print.
15. Rothman L. S. et al. *Hitran: High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database*. Harvard-Smithson Center for Astrophysics, 2014. <https://www.cfa.harvard.edu>. Web. 11 Sep. 2017.

**Автору статті (Authors of the article)**

**Кременецька Яна Адольфівна** – к.т.н., доцент кафедри телекомунікаційних технологій (Kremenetska Yana Adolfovna – PhD in Ttechnics, Associate Professor of Department of Telecommunication Technologies. Phone: +380 67 302 2242. E-mail: ya.cremen@ukr.net.

**Дудка Олександр Борисович** – магістрант (Dudka Oleksandr Borysovych – Master Studies of the Department of Telecommunication Technologies. Phone: +380 66 032 4779. E-mail: sashadudka20@gmail.com.

**Морозова Світлана Володимирівна** – старший викладач кафедри фізики (Morozova Svitlana Volodymyrivna – Senior Lecturer of Physics Department. Phone: +380 65 387 9025. E-mail: svmorozova@ukr.net.

**Корсун Володимир Іванович** – аспірант Державного університету телекомунікацій (Korsun Volodymyr Ivanovych – Post Graduate Student of State University of Telecommunications.