

APPROACHES TO MODELING THE CHANNEL OF MILLIMETER RANGE FOR MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

The paper discusses the main approaches to modeling radio channels in the millimeter range. The bandwidth in the millimeter wavelength range is a significant part of the unused frequency spectrum from 30 to 300 GHz, which is an important resource for future wireless communication systems. The development of technology in the millimeter wavelength range is an important link in the development of 5G (and next generations), in mobile cellular communications, in the «Internet of things» and other technologies. The development of mathematical models of radio systems in the millimeter wavelength range is an ongoing process and is based on patterns that are distinguishable from modeling approaches in other wavelength ranges. It is shown that to improve the models for the long-term development of future wireless systems in the millimeter-wave range, especially for the mobile industry, new concepts of model development based on fundamental physical approaches are needed. The analysis of the components of the energy budget of the radio link in the millimeter range. For systems in the millimeter-wave range, characteristic effects of scattering, reflections, blocking probability is high (low diffraction), media absorption, dependence of absorption on weather conditions and carrier frequency in the millimeter range (presence of transparency windows and absorption peaks), molecular noise absorption. A multi-beam model of a radio channel in the millimeter range is proposed, which takes into account the effects of molecular absorption (re-radiation) in the atmosphere and the effects of signal reflection in urban areas. It is shown that solutions based on amplification due to diffraction and reflections can be used in designing millimeter-range mobile systems for the urban scenario, which will significantly improve energy efficiency.

Keywords: millimeter-wave range; mobile communication; channel loss; radio channel model.

Introduction

To solve the problems of increasing throughput, research is being conducted in fig. 1.

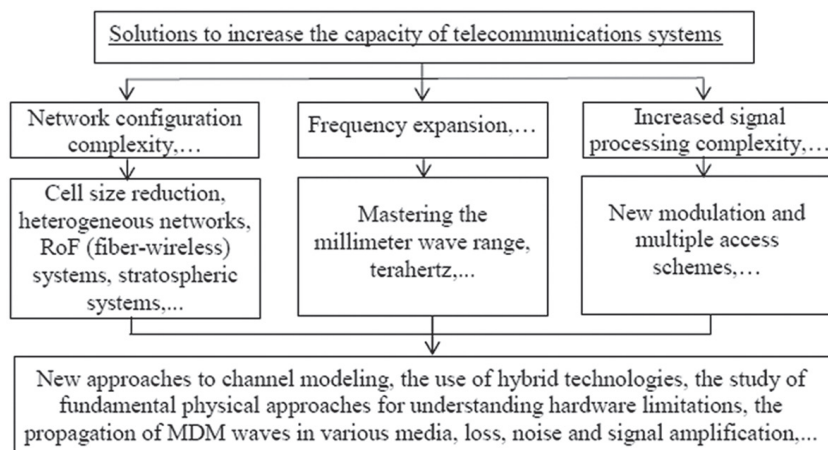


Fig. 1. The main methods of increasing the capacity of telecommunication systems

In addition, the combination of these areas may further increase the capacity of telecommunications. However, for the practical implementation of high bandwidth there are difficulties. For example, the available bandwidth is determined not only by the available spectrum, but also by the capacity of the equipment.

The bandwidth in the millimeter wavelength range (MMR) is a significant part of the unused frequency spectrum from 30 to 300 GHz, which is an important resource for future wireless communication systems. The frequency resource of MMR provides the use of a modulation bandwidth of several GHz, which is a solution to increasing the data transfer rate in wireless communication systems. For example, when using a bandwidth of more than 60 GHz, almost 100 Gbit/s has been achieved [1].

Phase distortions, non-linearity of the characteristics of a transceiver can, for example, limit the practical use of spectral-effective modulations on MMR carriers. Also, the propagation characteristics of MMR waves differ from lower frequency bands. For systems in MMR, characteristic effects of scattering, reflection, blocking probability is high (low diffraction manifestation), absorption in media, dependence of

absorption on weather conditions and on carrier frequency of MMR (presence of transparency windows and absorption peaks), presence of molecular noise absorption, etc. However, modern directions for modeling systems in MMR often do not take into account such physical features of the propagation and generation of MMR signals.

Analysis of modern approaches to channel modeling in the millimeter range

There is a large number of research papers on the development of models of MMR channels. To characterize the propagation of MMR signals, parameters such as attenuation, delay spread of signals, shading (blocking) of signals and radiation directivity are used. From the analysis of the models given in [2], they can be divided into the following types: LOS probabilistic models (LOS Probability) and models close to free space loss models — CI model (Close-in Model). Various scenarios are also considered: micro cells and macro cells for urban development, indoor loss models, rural models (RMa).

Probabilistic models are needed to predict the likelihood that a user (UE) is within line-of-sight (LOS) of a base station (BS) or out of line of sight (NLOS) through the available interference (signal blocking objects). In the case of LOS for MMR communications, a more reliable operation of the network is proposed compared to the conditions of NLOS, given the large losses due to diffraction and absorption [2]. The LOS probability is modeled as a function of distance in a two-dimensional 2D space and does not depend on the operating frequency [3]. In [4], the LOS state is determined using a map, with only the position of the transmitting and receiving antennas being considered to determine the path blocking.

Probabilistic models of UMi LOS include open (outdoors) areas with a high density of users, streets and users in the premises. For models based on the Friis formula: the CI model, in which the signal power losses are close to free space losses (English Close-in; CI) [4], the CIF model is close to the free space losses with a frequency-dependent indicator [5] and the loss model Alpha-Beta-Gamma (ABG) [6].

The free-space loss $(4\pi R_c/f_c)^2$ value is used in the Friis equation in dB, free space losses are expressed as

$$PL_{FC} = 92,4 + 20\lg(f_c) + 20\lg(R), \quad (1)$$

where R — is the distance between the receiver RX and the transmitter TX, km; f_c — is the carrier frequency, GHz.

With each doubling of the distance and with each doubling of the frequency, the losses in free space increase by 6 dB.

The model of signal power loss in the CI channel takes into account the frequency dependence based on the Friis formula, as given in [7], dB:

$$PL^{CI}(f_c, d_{3D}) = FSPL(f_c) + 10n\log_{10}(d_{3D}) + \chi_{\sigma}^{CI}, \quad (2)$$

where χ_{σ}^{CI} — is the loss due to shading, which is modeled as a zero average Gaussian random variable with a standard deviation in dB; n — is the path loss indicator, found by minimizing the errors from the measured data to a value of 2; $d_{3D} > 1$; $FSPL(f_c)$ — loss in free space at a distance of 1 m, dB:

$$FSPL(f_c) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f_c \cdot 10^9}{c}\right) = 32,4 + 20\log_{10}(f_c). \quad (3)$$

The CIF model is an extension of the CI model, where the losses are frequency-dependent. The CIF uses two parameters to simulate average loss, dB:

$$PL^{CIF}(f_c, d) = 32,4 + 20\log_{10}(f_c) + 10n\left(1 + b\left(\frac{f_c - f_0}{f_0}\right)\right)\log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{CIF}, \quad (4)$$

where n denotes the loss index; b — is the optimization parameter that describes the linear frequency dependence of the path loss index on the average frequency f_c , GHz, according to the data used to optimize the model [8]. The CIF model returns to the CI model when $b = 0$ for several frequencies or when $f_c = f_0$.

The ABG model uses three parameters for optimization [8], dB:

$$PL^{ABG}(f_c, d) = 10\alpha\log_{10}(d) + \beta + 10\gamma\log_{10}(f_c) + \chi_{\sigma}^{ABG}, \quad (5)$$

where the parameters α , β and γ are determined by finding the best fit value between the model and the measured data, f_c measured in GHz.

Almost all modern approaches are based on the basic basis of channel models that have been developed for low-frequency technologies and the results of calculations show significant differences in these models [2; 8]. As pointed out in [1] Rappoport T., the motivation for modeling channels in MMR often includes ensuring the work of improving the inherited approaches and software at lower frequencies, and therefore new approaches are needed for a fundamental understanding of the propagation of MMR waves in order to develop correct models. Simulation of the channel for 5G+ is an ongoing process, besides other applications are

proposed for 5G+ telecommunications systems and subsequent generations [9] such as sensor networks, security systems, radar, peer-to-peer communications (P2P), machine-to-machine communication (M2M) and other special applications that can be implemented on the basis of the unique properties of MMR waves. Such applications may further complicate the design, calculation and methods for improving the efficiency of telecommunications systems. The development of correct models in MMR is important both for increasing the productivity and efficiency of telecommunication systems, and for mastering higher frequency ranges above 100 GHz to terahertz. Solutions based on physical fundamental approaches to channel modeling in MMR, the use of hybrid technologies can contribute to a more efficient use of the spectral resource and performance of telecommunication systems.

Approaches to channel modeling based on physical aspects

Models for calculating signal loss required for accurate design, comparing radio interfaces and system deployment. Basic approaches to modeling wireless channels based on the physical effects of MMR propagation are shown in fig. 2.

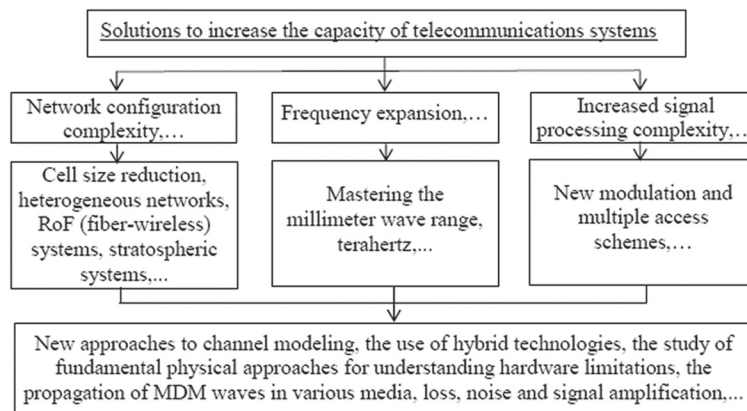


Fig. 2. Physical effects of the propagation of millimeter waves in a radio channel

In the case of directional MMR communication, it is also necessary to take into account for modeling a multipath propagation channel structure, which can be characterized by both LOS components and reflected and diffracted components, which will combine a limited number of multipath components and characteristics of the transmitting and receiving antennas. Such approaches in modeling an MMR channel can potentially reduce interference between multipath components, as well as lead to the capture of a limited number of multipath components.

If there are diffusers, several propagation paths can be observed, which are radiated by the antenna in different directions and enter the receiving antenna from different sides. In this case, calculations will be performed for each individual path, but when calculating the total received power, it is necessary to coherently add fields through separate paths that take into account antenna gains in different directions.

The overall budget of the millimeter-wave channel is formed by the contribution of the rays that enters the receiving antenna. As a result, the signal arriving at the receiving antenna incurs losses due to such factors:

- 1) the divergence of radiation in the atmosphere in the line of sight;
- 2) extinction in the atmosphere for different hydrometeors depending on the wavelength;
- 3) by extinction in the line of sight due to passage through various materials (objects) (shadow factor).

Signal gain due to:

- 1) superposition of fields in the reflection (scattering) of radiation;
- 2) superposition of wave fields due to diffraction on elements of urban development;
- 3) narrowly directed radiation of the transmitting antenna;
- 4) the effective area of the receiving antenna.

For urban development, it is assumed that in MMR the range of the combs will be about 100 m and the area of the user's receiving antenna may not exceed 10 cm², therefore the average gain can be expressed as the sum of four types of beams:

- 1) the rays that make only reflections (four reflections that make a significant contribution to the signal) on the walls of the building;
- 2) rays, diffracts once in the corners of the construction with reflection before or after diffraction;
- 3) rays that diffract twice on building angles, with or without multiple reflections;
- 4) rays that have passed through interference with partial absorption without reflections and diffraction, which introduce a small power contribution to the received signal (defined as the shadow factor).

The overall gain of the channel (in case of neglecting the polarization conversion) is the result of amplification for each beam, depending on the transmission conditions, namely, reflection (the first component of the product), transmission (second component) and diffraction amplification (the third component):

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{D_{TX}(\alpha)A_{RX}}{4\pi r^2} \cdot \sum_j \left(\prod_m p_m(\theta_j) \frac{|\Gamma_m(\theta_{mj})|^2}{\rho_m} \prod_n p_n(\theta_j) |T_n(\theta_{nj})|^2 \prod_l p_l(\theta_j) \frac{|D(\theta_{lj})|}{\rho_l} \right), \quad (6)$$

where $\rho_m, \rho > 1$ — the coefficients that determine the excess path of the rays during reflection and diffraction; $\rho(\theta)$ — the probability of an appropriate process for certain conditions; Γ, T, D — are the reflection, transmission and diffraction coefficients, respectively.

Due to the narrow directivity of the radiation of the MMR antennas and the short transmission distance (for mobile systems), m, n and l must perceive certain values depending on the geometry of the building.

The effect of molecular absorption noise on the power of the radio channel in the millimeter range

The results of studies [10] have confirmed that at small distances (less than 1 km) attenuation in the rain will have a minimal effect on the propagation of MMR waves at frequencies from 28 GHz to 38 GHz, and also that for cell sizes of about 200 m, atmospheric absorption of MMR does not create significant additional losses.

In works [11], the emissivity of the medium in which radio waves of MMR and terahertz (0,1...1 THz) propagate is considered as a source of noise.

In approximation to the Bouguer-Lambert-Beer law, the molecular absorption noise power can be written:

$$N_M(f_c, d) = P_{TX} \frac{D_{TX}A_{RX}}{4\pi d^2} (1 - e^{-\gamma(f)d}), \quad (7)$$

where $\gamma(f)$ — generalized absorption coefficient of the medium, the value of which can be found, for example, from the HITRAN database.

In fig. 3. the results of mathematical modeling of molecular absorption noise are presented (according to formula (7)).

Electromagnetic radiation, which is absorbed by molecules in the medium, as shown in [11], is re-emitted out of phase at approximately the same frequencies of the radiation that was absorbed. However, it was shown in [12] that absorption of terahertz radiation by water vapor molecules introduces color noise. At the moment, the nature of the molecule absorption noise is still under study. It is possible that the basis of absorption/radiation is a combination of various physical phenomena, for example, stimulated, spontaneous, repeated radiation. The authors of the articles [11] suggest that molecular noise absorption is the main factor determining the SIR ratio for terahertz transparency windows. The time characteristics (properties) of absorption/radiation ultimately determine the amount of energy received by the receiver. Therefore, for the terahertz range, pulsed modulation and coding information methods are proposed [12].

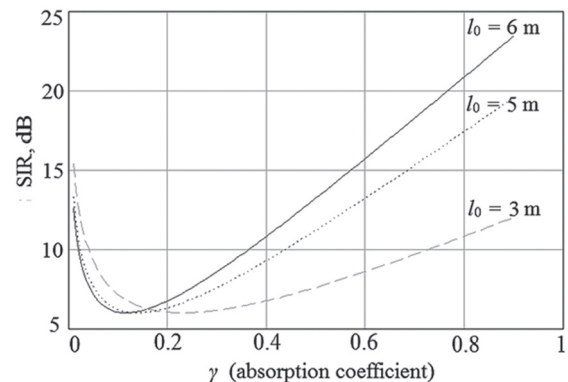


Fig. 3. The calculated values of the signal-to-noise ratio of molecular absorption as a function of the absorption coefficient (absorption) γ for different distances l_0 from the transmitter to the receiver

Conclusion

Channel simulation for 5G is a continuing process, and new concepts for the development of radio wave propagation models in MMR are needed, based on fundamental physical approaches. The development of correct propagation models is vital for the long-term development of future MMR wireless systems, especially for the mobile industry in MMR, which is only now being developed, and for the possibility of further expanding radio bands and increasing bandwidth.

From the analysis of the components of the energy budget of the radio link in the millimeter range, it follows that it is necessary to take into account the effects of molecular absorption (re-radiation) in the atmosphere and the effects of signal reflection in urban areas in models of coverage.

Solutions based on amplification due to diffraction and reflections can be used in the design of mobile millimeter-wave systems for the urban scenario, which will significantly improve energy efficiency.

References

1. Yu J., Li X., Chi N. *Faster than fiber: Over 100-Gb/s signal delivery in fiber wireless integration system* // *Opt. Express*. 2013. №19. P. 22885–22904.
2. *Small-Scale, Local Area, and Transitional Millimeter Wave Propagation for 5G Cellular Communications* / T. S. Rappaport [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. №12 (65). P. 6474–6490.
3. Samimi M. K., Rappaport T. S., MacCartney G. R. *Probabilistic omnidirectional path loss models for millimeter-wave outdoor communications* // *IEEE Wireless Communications Letters*. 2015. №4 (4). P. 357–360.
4. *5GCM Channel Model for bands up to 100 GHz, 5GCM: tech. Rep. Oct.* [Online]. Available: <http://www.5gworkshops.com/5GCM.html>
5. *Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks* / G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, S. Sun, S. Den // *IEEE Access*. 2015. (3). P. 2388–2424.
6. *Millimeter waves channel measurements and path loss models* / S. Piersanti, L. A. Annoni, D. Cassioli Piersanti S. // *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Canada. 2012. P. 4552–4556.
7. *Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks* / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65. P. 6213–6230.
8. *MacCartney G. R., Rappaport T. S. Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications* // *IEEE Journal on Selected I. Toyoda, and K. Takahashi. RF impairment models for 60 GHz-band SYS/PHY simulation: tech. Rep., IEEE 802.15-06-0477-01-003c*. Nov.2006.
9. *What will 5G be?* / J. G. Andrews [et al.] // *IEEE J. Sel. Areas Commun*. 2014. №6 (32). P. 1065–1082.
10. *Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!* / T. S. Rappaport [et al.] // *IEEE Access*. 2013. (1). P. 335–349.
11. *Kokkonen J., Lehtomaki J., Juntti M. A discussion on molecular absorption noise in the terahertz band* // *Juornal of Nano Communication Networks*. 2010. Vol. 8. P. 35–45.
12. *Jornet J. M., Akyildiz I. F. Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band: Proc. IEEE International Conference on Communications*. Kyoto, Japan, 2011. P. 1–6.

Я. А. Кременецька

ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛІВ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДЛЯ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Розглянуто основні підходи до моделювання радіоканалів у міліметровому діапазоні. Ширина смуги в міліметровому діапазоні довжин хвиль становить значну частину невикористаного частотного спектра від 30 до 300 ГГц, який є важливим ресурсом для майбутніх систем безпроводового зв'язку. Розвиток технологій у міліметровому діапазоні довжин хвиль є важливою ланкою впровадження 5G (і наступних поколінь) у мобільний стільниковий зв'язок, в «Інтернет речей» та інші технології. Розробка математичних моделей радіосистем у діапазоні міліметрових хвиль являє собою тривале дослідження і ґрунтується на принципах, що відрізняються від підходів моделювання в інших діапазонах довжин хвиль. Показано, що для вдосконалення моделей у довгостроковому розвитку майбутніх безпроводових систем у міліметровому діапазоні, особливо для мобільної індустрії необхідні нові концепції розробки моделей, засновані на фундаментальних фізичних підходах. Проведено аналіз складових енергетичного бюджету радіолінії в міліметровому діапазоні. Показано, що для систем у діапазоні міліметрових хвиль характерні ефекти розсіювання, відображень, імовірності блокування високі (низька дифракція), поглинання середовища, залежність поглинання від погодних умов і носійної частоти в міліметровому діапазоні (наявність вікон прозорості і піків поглинання), шум молекулярного поглинання. Запропоновано багатоприменеву модель радіоканалу в міліметровому діапазоні, яка враховує вплив молекулярного поглинання (перевипромінювання) в атмосфері та ефекти відображення сигналу в міських умовах. Показано, що вирішення, засновані на підсиленні за рахунок дифракції та відображень, можуть бути використані у процесі розробки мобільних систем міліметрового діапазону для міського сценарію, що значно підвищить енергоефективність.

Ключові слова: міліметровий діапазон; мобільний зв'язок; втрати в каналі; модель радіоканалу.

Я. А. Кременецкая

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КАНАЛОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Рассмотрены основные подходы к моделированию радиоканалов в миллиметровом диапазоне. Ширина полосы в миллиметровом диапазоне длин волн составляет значительную часть неиспользованного частотного спектра от 30 до 300 ГГц, который является важным ресурсом для будущих систем беспроводной связи. Развитие технологий в миллиметровом диапазоне длин волн является важным звеном во внедрении 5G (и последующих поколений) в мобильную сотовую связь, в Интернет вещей и другие

технології. Розробка математических моделей радиосистем в диапазоне миллиметровых волн представляет собой продолжающееся исследование и основана на принципах, которые отличаются от подходов моделирования в других диапазонах длин волн. Показано, что для совершенствования моделей в долгосрочном развитии будущих беспроводных систем в миллиметровом диапазоне, особенно для мобильной индустрии, необходимы новые концепции разработки моделей, основанные на фундаментальных физических подходах. Проведен анализ составляющих энергетического бюджета радиолинии в миллиметровом диапазоне. Показано, что для систем в диапазоне миллиметровых волн характерны эффекты рассеяния, отражений, вероятности блокировки высоки (низкая дифракция), поглощения среды, зависимости поглощения от погодных условий и несущей частоты в миллиметровом диапазоне (наличие окон прозрачности и пиков поглощения), шум молекулярного поглощения. Предложена многолучевая модель радиоканала в миллиметровом диапазоне, которая учитывает влияние молекулярного поглощения (переизлучения) в атмосфере и эффекты отражения сигнала в городских условиях. Показано, что решения, основанные на усилении за счет дифракции и отражений, могут быть использованы при разработке мобильных систем миллиметрового диапазона для городского сценария, что значительно повысит энергоэффективность.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон; мобильная связь; потери в канале; модель радиоканала.

УДК 621.321

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.062933

О. А. ДІБРІВНИЙ, аспірант,
Державний університет телекомунікацій, Київ

СУЧАСНИЙ СТАН МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ В УКРАЇНІ

Розглянуто стан мережі мобільного інтернету в Україні. Основну увагу приділено порівнянню швидкості підімкнення та щільності покриття в Україні зі світовими лідерами та виокремлено основні здобуті результати такого зіставлення. Також наведено порівняння швидкостей мобільного підімкнення для трьох найбільших мобільних операторів України: Київстар, Vodafone та lifecell, як з урахуванням 2G/3G мереж та окремо 4G мережі. Запропоновано статистику використання 4G мережі абонентами даних операторів. Сформульовано основні проблеми становлення 100-відсоткового покриття України мережею 4G.

Ключові слова: 4G; 3G; lifecell; Vodafone; Київстар; SpeedTest by Ookla; мобільний інтернет.

ВСТУП

Постановка проблеми. У сучасному світі мобільний інтернет став важливою частиною життя більшості людей, що зумовлено популяризацією соціальних мереж та масовою гаджетизацією населення. Швидкий і доступний мобільний інтернет став одним із основних пріоритетів розвитку мобільних провайдерів в Україні. Запуск у 2018 році мережі 4G відкрив нові можливості для використання IT-технологій як для пересічних користувачів, так і для малого та середнього бізнесу. Варто зазначити, що головною метою впровадження технології 4G в Україні було не лише отримання нових швидкостей, оскільки 3G покриття вже дозволяло мати швидкість інтернету в межах 20 Мбіт/с, що давало змогу цілком комфортно працювати з будь-якими популярними сервісами — від перегляду онлайн-відео, онлайн-трансляцій до онлайн-ігор і завантаження об'ємного контенту. Метою такого запуску було забезпечення стабільного сервісу і широкого покриття, оскільки частоти 3G інтернету не справлялися з навантаженням абонентів на українському ринку. Зі зростанням кількості використовуваних гаджетів із підтриманням мобільного інтернету перед мобільними операторами України постало питання впровадження нових технологій мобільного інтернету,

а також розширення покриття наявних мереж. Актуальність даної статті — огляд сучасного стану мобільних мереж в Україні та визначення основних проблем щодо впровадження 100-відсоткового покриття території України швидкісним інтернетом.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Проблема впровадження широкого покриття мобільним інтернетом в Україні останніми роками було присвячено багато наукових праць, серед яких, зокрема, можна виокремити роботи таких авторів, як Лазоренко Л. В., Паночішин Ю. М., Ткач А., Олійник В. М., Яценко В. В.

Огляд покриття та швидкості мобільних мереж в Україні

Загальний стан швидкості мобільного інтернету в Україні згідно зі статистикою SpeedTest by Ookla станом на жовтень 2019 року подано на рис. 1.

Для порівняння світовий індекс швидкості інтернету та індекси провідних країн наведено на рис. 2.

Як бачимо, швидкість мобільного інтернету в Україні на 27% нижча за світову і в 4,4 рази менша від швидкості інтернету країни, яка посідає перше місце. Основною причиною такого показника в швидкості інтернету є відносно низький відсоток

© О. А. Дібрівний, 2019