

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ 5G

Коляденко Ю.Ю., Чурсанов М.О., Водолажченко О.В.

Кафедра «Інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського»,
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

E-mail: yuliia.koliadenko@nure.ua,
mykyta.chursanov@nure.ua,
oleksandr.vodolazhchenko@nure.ua

Abstract

The analysis of attenuation of the millimeter-wave signal in free space from the intensity of precipitation is carried out at various values of optical visibility. The analysis of the attenuation of the millimeter-wave signal from the distance when the signal propagates through obstacles in the form of walls at various values of the wall thickness is carried out. The analysis of the attenuation of the millimeter-wave signal from the depth of the leaf layer is carried out; it covers the signal propagation at different values of the carrier frequency. The analysis of the value of the power of the millimeter-wave signal at the input of the receiver on the intensity of precipitation is carried out at various values of optical visibility. The analysis of the value of the power of the millimeter-wave signal at the input of the receiver versus the distance when the signal propagates through obstacles in the form of walls at various values of the wall thickness is carried out. The analysis of the power value of the millimeter-wave signal at the receiver input from the depth of the leaf layer is carried out, overlaps the signal propagation at various values of the carrier frequency.

Технологія нового покоління 5G / IMT-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її застосування [1-10]. Одним з таких особливо важливих аспектів є електромагнітна сумісність (ЕМС). На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, названої NewRadio, необхідно завчасно подбати про вжиття заходів щодо ефективної оцінки умов ЕМС для цих мереж на основі ретельного аналізу особливостей технології 5G, а правильно і точно оцінивши ці умови - успішно забезпечити ЕМС радіозасобів нових мереж.

МСЕ з 1995 року став міжнародним координатором робіт з електровзв'язку, спрямованих на створення глобального інформаційного суспільства. Створивши Регламент радіозв'язку і розділивши поверхню Землі на три регіони, МСЕ організував певний порядок в частотному користуванні. Однак, виключно активно використовуються частотні діапазони нижче 5 ГГц. Присвоєння радіочастот і радіочастотних каналів для радіоелектронних засобів в цих діапазонах здійснюється за технологіями частотно-територіального планування з обов'язковим розрахунком ЕМС радіозасобів. Тому одне з основних напрямків по створенню нового покоління мобільного зв'язку 5G це освоєння частотних діапазонів вище 5 ГГц, які поки ще недостатньо використовуються.

Аналіз головних особливостей радіоінтерфейсу 5G дозволяє вказати на очікувані особливості процедур оцінки умов ЕМС для цих мереж. Головними недоліками сигналів міліметрового діапазону (ММД) є:

- 1) сильне загасання міліметрових хвиль при поширенні;
- 2) рівень сигналу істотно залежить від впливу гідрометеорів (краплі дощу, сніг, град, туман) і від присутності в атмосфері твердих неоднорідностей (листя дерев, зграї птахів, пилю);
- 3) високий ступінь впливу на рівень сигналу перешкод, які закривають трасу.

Як і у всіх лініях зв'язку і радіоелектронних системах, в лініях зв'язку ММД радіохвилі, які поширюються мають складну, випадково-детерміновану структуру і підкоряються законам електроди-

наміки, а параметри радіохвиль описуються рівняннями Максвелла. Однак, таке представлення є досить складним, що може привести до ускладнення моделі, а, отже, до труднощів роботи з нею, до збільшення похибок розрахунків. Тому в якості моделі поширення сигналів в радіолініях скористаємося відомою моделлю, яка заснована на рівнянні передачі [11,12]:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} - \eta_{nep} - \eta_{np} - W, \quad (1)$$

де P_{np} - потужність сигналу, що приймається (дБ); P_{nep} - потужність передавача; G_{nep}, G_{np} - відповідно: коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен; η_{np}, η_{nep} - коефіцієнти корисної дії приймального і передавального фідерів; W - втрати (ослаблення) електромагнітного поля (дБ).

У загальному вигляді ослаблення сигналу (завади) W визначаються виразом:

$$W = W_{PE3} + W_{cp}, \quad (2)$$

де W_{PE3} - ослаблення завади, яке визначається характеристиками радіоелектронного засобу (РЕЗ). При розрахунку ослаблення корисного сигналу можна вважати $W_{PE3} = 0$; W_{cp} - ослаблення сигналу (завади), яке визначається умовами середовища поширення радіохвиль.

W_{cp} , яке визначається умовами середовища поширення, розраховується відповідно до виразу, дБ:

$$W_{cp} = W_{en} + W_{\text{dod}}^{(1)} + W_{\text{dod}}^{(2)} + W_{\text{dod}}^{(3)} + W_{\text{dod}}^{(4)} + W_{\text{dod}}^{(5)} + W_{\text{dod}}^{(6)}, \quad (3)$$

де W_{en} - ослаблення у вільному просторі (дБ)

$$W_{en} = 92,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d) \quad , \text{ [дБ]} \quad (4)$$

де d - відстань між передавачем і приймачем, f - частота.

$W_{\text{dod}}^{(1)}$ - додаткове ослаблення, викликане впливом стін і перекриттів поверхів:

$$W_{\text{dod}}^{(1)} = W_{0c} \cdot N_{cm} \left(\frac{N_{cm} + 2}{N_{cm} + 1} - c \right) + W_{0n} \cdot N_n \left(\frac{N_n + 2}{N_n + 1} - c \right), \quad (5)$$

де W_{0c} - ослаблення за рахунок впливу стіни або міжповерхового перекриття. Зазвичай [11,12] для стіни $W_{0c} = 8,38$ дБ і $c = 0,51$, міжповерхового перекриття $W_{0n} = 18,3$ дБ і $c = 0,46$, N_{cm} - кількість стін; N_n - кількість міжповерхових перекриттів.

$W_{\text{dod}}^{(2)}$ - додаткові втрати енергії сигналу при заповненні простору різними предметами, дБ [11,12]:

$$W_{\text{dod}}^{(2)} = \delta \cdot d, \quad (6)$$

де δ - коефіцієнт погонного ослаблення, що враховує заповнення простору предметами. Для майже порожнього простору $\delta = 0,2$ дБ / м, для переповненого простору $\delta = 0,6$ дБ / м.

$W_{\text{dod}}^{(3)}$ - додаткове ослаблення, викликане втратою енергії радіохвиль при поширенні через дощі;

$$W_{\text{dod}}^{(3)} = kdK_d Y^a \quad (7)$$

де k - коефіцієнт, який визначає наявність або відсутність опадів, Y - інтенсивність опадів, мм/год, K_d - параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації дБ год/мм, a - безрозмірний параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації.

$W_{\text{dod}}^{(4)}$ - додаткове ослаблення, викликане втратою енергії радіохвиль через туман:

$$W_{\text{доо}}^{(4)} = kdl_T V_T,$$

l_T - питомий погонний коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в тумані, V_T - коефіцієнт вмісту води в атмосфері, який визначається по оптичній видимості.

$W_{\text{доо}}^{(5)}$ - додаткове ослаблення сигналу при поширенні крізь листя дерев:

$$W_{\text{доо}}^{(5)} = 0,2 f^{0,3} r^{0,6},$$

де r - глибина шару листя, що перекриває, м,

Випадкова компонента додаткового ослаблення:

$$W_{\text{доо}}^{(6)} = W_{\text{е}}^{(n)} + W_{\text{е}}^{(u)}, \quad (8)$$

де $W_{\text{е}}^{(n)}$, $W_{\text{е}}^{(u)}$ - відображають відповідно: повільні і швидкі випадкові завмирання.

У розрахункових задачах з енергетики радіоліній малих відстаней швидкими завмираннями зазвичай нехтують, бо вони характерні для досить протяжних, ($d > 30 \dots 50$ км), переважно закритих, або напівзакритих радіотрас. Для офісних радіоліній або радіоліній в межах мікрорайону прийнято вважати $W_{\text{е}}^{(u)}(t) \rightarrow 0$. Повільні завмирання $W_{\text{е}}^{(n)}$ складають 10 ... 16 дБ. Повільні завмирання підкоряються випадковому логарифмічно-нормальному закону, тоді:

$$W_{\text{е}}^{(n)}\{u(t)\} = \rho W_{\text{е}}^{(n)}\{u(t - \Delta t)\} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot N(0, \sigma), \quad [\text{дБ}], \quad (9)$$

де ρ - коефіцієнт кореляції між двома перетинами випадкового процесу зміни $W_{\text{е}}^{(n)}\{u(t)\}$, рознесених на інтервал Δt .

В умовах використання мобільних мереж зв'язку поза будівлею вважають, що основними механізмами поширення радіохвиль є: дифракція, рефракція, поширення у вільному просторі і уздовж земної поверхні. Дані механізми можуть діяти спільно або в різній комбінації, в залежності від фізико-географічних умов. Є ряд рекомендацій ІТУ [11-17], які дозволяють враховувати ті чи інші механізми поширення радіохвиль: розрахунок ослаблення у вільному просторі, поширення радіохвиль з урахуванням дифракції.

У рекомендаціях ІТУ з обліку втрат при поширенні радіохвиль для частот понад 1 ГГц пропонується використовувати напівемпіричну модель, викладену в рекомендації ІТУ-R P.1146 [16]. Ця модель дозволяє розраховувати напруженість поля в точці прийому в діапазоні частот 1..3 ГГц для стаціонарних і мобільних систем зв'язку. Недоліком цієї моделі є те, що вона не дозволяє розраховувати втрати при поширенні радіохвиль, якщо висоти передавальної і приймальної антен вище 30м. У цих випадках рекомендується використовувати модель, викладену в рекомендації ІТУ-R P.452-8 [17-19].

Рівень сигналу на вході приймача в діапазоні 0,03-3 ГГц, особливо в разі використання мобільних абонентських станцій, залежить від багатьох чинників: типу місцевості, висоти будівель і щільності забудови міста, висот приймальних і передавальних антен, наявності рослинності і багатьох інших факторів. Тому при розрахунку отримують медіанне значення напруженості поля в точці прийому з певною ймовірністю. Таким чином, висновок про наявність чи відсутність завади також має імовірнісний характер.

У середовищі Matlab за допомогою математичного моделювання проведено аналіз електромагнітної сумісності мережі 5G. В якості показників ефективності мережі обрано загасання сигналу при поширенні радіохвиль та потужність сигналу на вході приймача. Ці показники значною мірою впливають на критерій ефективності EMC – відношення потужності сигналу до потужності завади та шуму.

Проведено аналіз загасання сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц і на частоті 60 ГГц.

В результаті експерименту отримані залежності загасання сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис.1) і на частоті 60 ГГц (рис.2).

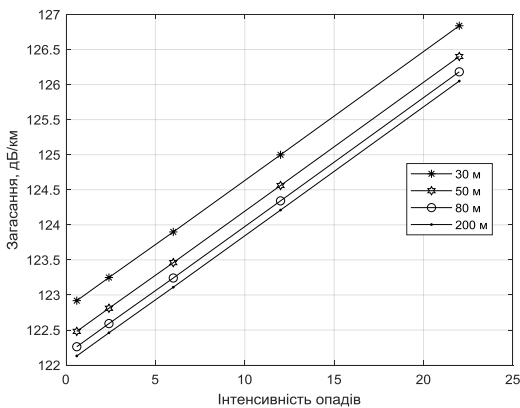


Рис. 1. Залежність загасання сигналу від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості при частоті 30 ГГц

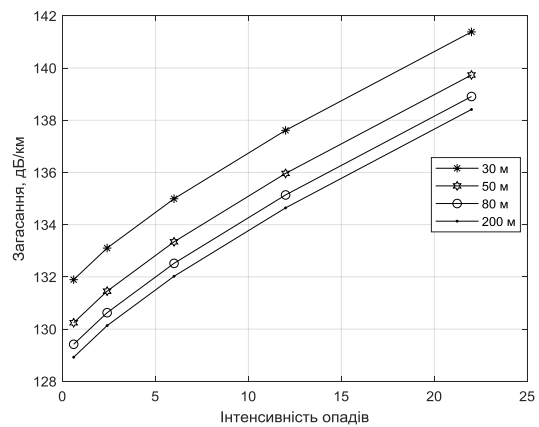


Рис. 2. Залежність загасання сигналу від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості при частоті 60 ГГц

Проведений аналіз залежності загасання сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис.1) і на частоті 60 ГГц (рис.2) показав, що інтенсивність опадів і оптична видимість не суттєво впливає на загасання сигналу, і становить не більше 4 дБ втрат на частоті 30 ГГц і не більше 12 дБ втрат на частоті 60 ГГц.

Проведено аналіз загасання сигналу при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. В якості матеріалу стіни було використано цеглу. При цьому, стіна в 10 см відповідає випадку міжкімнатних перегородок, а стіна в 38 см відповідає випадку несучої стіни. Отримано залежності загасання сигналу від відстані поширення сигналу при різних значеннях товщини стіни (рис.3). Проведений аналіз залежності загасання сигналу від відстані поширення сигналу при різних значеннях товщини стіни показав, що загасання сигналу суттєво залежить від товщини стіни.

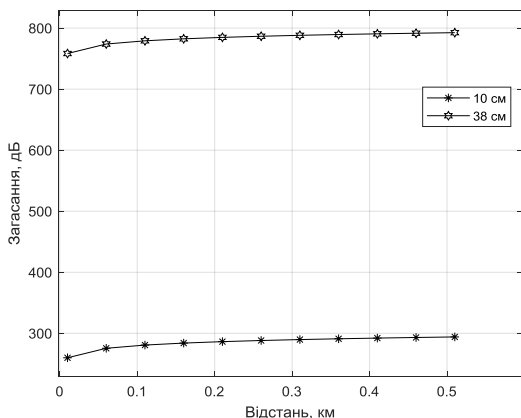


Рис.3. Залежність загасання сигналу від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц

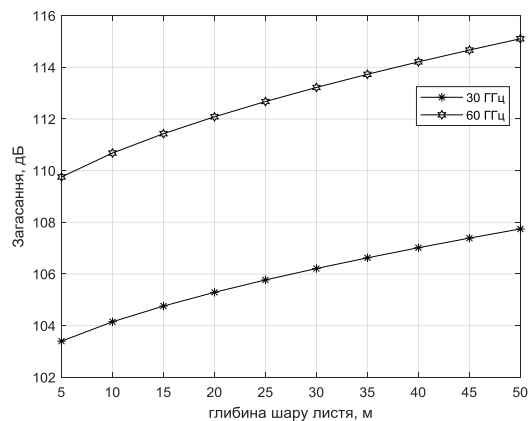


Рис. 4. Залежності загасання сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної

Проведено аналіз загасання сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Отримано залежності загасання сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис.4). При цьому відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя. Проведений

аналіз залежності загасання сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис.4) показав, що насадження не дуже впливають на поширення радіохвиль. Так на кожні 5 метрів приходить загасання сигналу не більше 1 дБ.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц і на частоті 60 ГГц. Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис.5) і на частоті 60 ГГц (рис.6). Відстань від передавача до приймача складала 500 м.

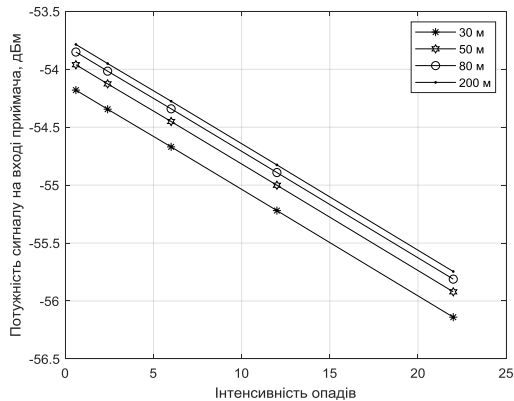


Рис. 5. Залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц

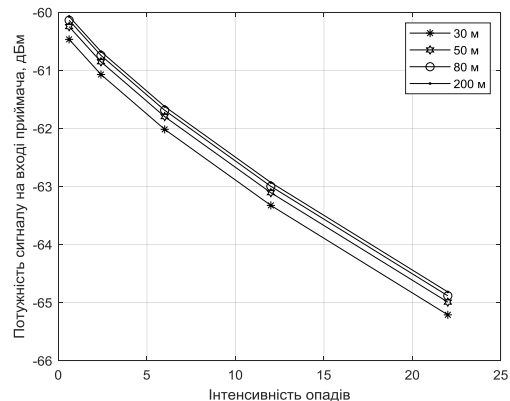


Рис. 6. Залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 60 ГГц

Проведений аналіз залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис.5) і на частоті 60 ГГц (рис.6) показав, що потужність сигналу на вході приймача зменшується при збільшенні інтенсивності опадів, зменшується при зменшенні оптичної видимості, а також зменшується при збільшенні частоти випромінювання. Але треба зазначити, що потужності сигналу на вході приймача лежить в допустимих межах і не виходять за межі чутливості приймача.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц.

Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц (рис.7). Судячи з проведеного аналізу залежності потужності сигналу на вході приймача від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц (рис.7), можна зробити висновок, що ні через міжкімнатні перегородки, ні тим більш через несучу стіну сигнал міліметрових хвиль не проникне. І для забезпечення зв'язку в приміщеннях необхідно буде встановлювати додаткове обладнання.

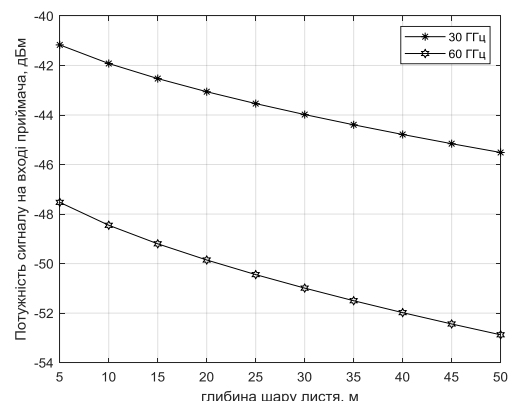
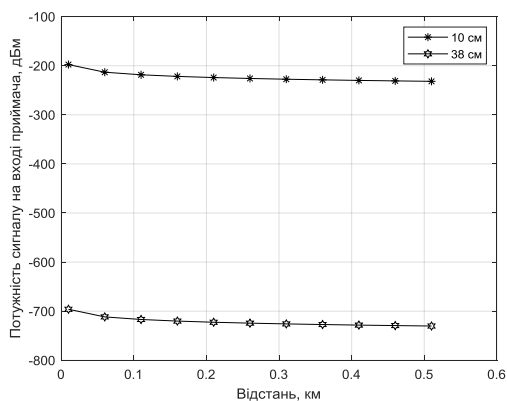


Рис. 7. Залежність потужності сигналу на вході приймача від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц

Рис. 8. Залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис.8). Відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя. Судячи з проведеного аналізу залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис.8), можна зробити висновок, що потужність сигналу зменшується при збільшенні глибини шару листя і при збільшенні частоти випромінювання, але знаходиться в допустимих межах не зменшуючись до чутливості приймача.

Висновки

Технологія нового покоління 5G / ІМТ-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її впровадження. Одним з таких особливо важливих аспектів є електромагнітна сумісність. На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, необхідно завчасно потурбуватися про вжиття заходів щодо ефективної оцінки умов ЕМС для цих мереж на основі ретельного аналізу особливостей технології 5G, а правильно і точно оцінивши ці умови - успішно забезпечити електромагнітну сумісність радіозасобів нових мереж.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше проведено аналіз загасання сигналу ММД у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Вперше проведено аналіз загасання сигналу ММД при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Вперше проведено аналіз загасання сигналу ММД від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що проведені дослідження показників ЕМС дозволяють дати рекомендації щодо застосування технології 5G в конкретних практичних ситуаціях.

Література

1. 3GPP TR 22.891, "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers," Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
2. 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies," Ver. 14.3.0, June. 2017.
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, Sep 2018.
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture," July 2016.
5. Abuarqoub A. Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology / Abuarqoub A., Hammoudeh M. H. // Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology. - 2016. - PP. 1-4. DOI:<https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. Agiwal M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N // IEEE Communications Surveys & Tutorials. - №18(3). - 2016. - pp.1617-1655. DOI:<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>

7. Aijaz A. Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks / A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos, Frodigh, M. // *IEEE Wireless Comm.* - 24(2). – 2017. - PP.82-89. DOI:<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
8. Aijaz A. Shaping 5G for the Tactile Internet / Aijaz, A.; Simsek, M.; Dohler M. and Fettweis, G. *5G Mobile Communications*, Springer International Publishing, pp.677-691, 2017. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25
9. Aijaz A. Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications / A.Aijaz// In *Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Doha, Qatar, 3-6 April 2016. - PP. 1-6. DOI:<https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Raza U. Low Power Wide Area Networks: An Overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* - 2017. - Vol. 19. - P. 855-873 <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
11. Radio Regulations. - Ed. ITU, in 4 volumes. -2016
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
13. Mokrov E. Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities / E. Mokrov, A. Ponomarenko-Timofeev, I. Gudkova, et al. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* - 2018. -<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
14. Markova E. Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework / E. Markova, I. Gudkova, A. Ometov, et al. // *IEEE Access.* - 2017. - Vol. 5. - Pp. 22252-22261. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
15. Talwar, S. Enabling technologies and architectures for 5G wireless / S. Talwar, D. Choudhury, K. Dimou, et al. // *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) / IEEE.* - Tampa, FL, USA, 2014. - Pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
16. Kurakova T. How ITU can help develop future networks/ T. Kurakova, M.Valdburger // *ITU News.* - 2013, № 1. - p. 38-41. DOI:<https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
17. Galinina O. Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem / O. Galinina, S. Andreev, M. Komarov, et al. // *Computer Networks.* - 2017. - Vol. 128. - Pp. 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
18. Кременецька Я.А. Аналіз обмежуючих та компенсуючих факторів при розрахунку енергетичної ефективності радіосистем в міліметровому діапазоні /Я.А. Кременецька, С.Ю. Марков, Н.В. Градобоева, Є.М. Харченко // *Телекомунікаційні та інформаційні технології.*-2019.-№1.- С. 12-21. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2019_1_4 . -DOI: 10.31673/2412-4338.2019.011221
19. Коляденко Ю.Ю. Аналіз показників електромагнітної сумісності мереж зв'язку 5 G/ Ю.Ю. Коляденко, М.О.Чурсанов / *Радіоелектроніка, інформатика, управління.* ISSN 1607-3274. 2021. № 3 (58) с. 7-16. DOI 10.15588/1607-3274-2021-3-1