

**До спеціалізованої вченої ради ДФ 64.052.005**

**Харківського національного університету радіоелектроніки**

### **ВІДГУК**

офіційного опонента, завідувача кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка», доктора технічних наук, професора **Романишина Юрія Михайловича** на дисертаційну роботу **Мерзлікіна Анатолія Олександровича** «Методи та засоби підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

#### **1. Актуальність теми дисертації**

Впровадження нових засобів та технологій бездротового зв'язку, зокрема покоління 5G, розвивається швидкими темпами у всьому світі. Забезпечення ефективності впровадження нових поколінь мереж бездротового зв'язку передбачає необхідність попереднього проведення великого комплексу теоретичних, експериментальних, практичних досліджень, використання відповідного апаратного обладнання. Очевидно, що метою впровадження нових частотних діапазонів зв'язку, зокрема міліметрового діапазону електромагнітних хвиль, є підвищення продуктивності, надійності зв'язку, надання широкого спектру різних сервісних послуг. Впровадження мереж 5G в Україні в значній мірі гальмується недостатнім рівнем інформації та її узагальненням щодо впливу опадів та атмосферних особливостей в окремих регіонах на поширення радіохвиль діапазону 30-300 ГГц.

В результаті створення бази даних щодо кількості та типу опадів, атмосферні особливості в різних регіонах України дасть можливість оптимальним чином розгортати бездротові мережі, які працюють в міліметровому діапазоні хвиль.

Виходячи з цього, тема дисертації, присвяченої розробленню методів підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку в міліметровому

діапазоні хвиль, є актуальною в контексті росту обсягів передачі даних, розвитку технологій 5G та впровадження Інтернету речей. Дослідження цієї теми є ключовим для забезпечення ефективного та стабільного бездротового зв'язку, необхідного для майбутніх високотехнологічних застосувань.

## **2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності й оформлення**

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (105 найменувань) та семи додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, у виконанні яких брав участь дисертант, наведено мету та задачі досліджень, об'єкт, предмет та методи досліджень, інформацію про апробацію результатів дисертації та публікації за матеріалами дисертації, структуру дисертації та її обсяг.

У **першому розділі** детальніше розглянуто актуальність та необхідність проведення досліджень в області бездротових технологій передачі даних в міліметровому діапазоні радіохвиль, перспективи розвитку сучасних технологій передачі інформації, бездротових технологій передачі в Україні, особливості ослаблення в міліметровому діапазоні хвиль за різних умов розповсюдження. Розглянута оцінка енергетичних характеристик каналів зв'язку, представлені моделі та методи, які використовувалися до цього часу, їх особливості та недоліки. Розглядаються перспективи впровадження нового покоління 5G та критерії оцінки якості сервісів для систем зв'язку 5G.

Цей розділ має важливе значення для встановлення обґрунтованості і актуальності обраної теми дисертації, а також для чіткої постановки завдань дослідження, що визначає напрямки подальших розділів.

**Другий розділ** дисертації присвячений розробленню та вдосконаленню математичних моделей оцінки продуктивності та готовності систем зв'язку в міліметровому діапазоні радіохвиль, зокрема, визначення граничної швидкості передачі інформації в залежності від довжини радіоканалу з урахуванням діаграм спрямованості антен, що дасть змогу виконувати дослідження в умовах щільної міської забудови. Крім математичного

обґрунтування, в розділі розглядається практична реалізація моделей, які враховують конкретні умови та фактори, що впливають на продуктивність та готовність систем зв'язку в міліметровому діапазоні радіохвиль.

Розглянуто методичне забезпечення радіометрії для України, зокрема наведено експериментальний підхід щодо вимірів, який заснований на визначенні значень повного вертикального ослаблення за даними безперервного радіометричного моніторингу інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери в діапазоні довжини хвиль 8 мм. Побудовано кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення в атмосфері за теплий період року для частоти 39 ГГц.

**Третій розділ** дисертації присвячено створенню та розвитку радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц та вперше розробленій методиці проведення річних цілодобових експериментів з високою часовою роздільною здатністю. При цьому взяті до уваги рекомендації ІТУ стосовно поширення радіохвиль міліметрового діапазону. Проаналізовано відомі в світі методи розрахунків загасання в атмосфері та розроблено модель для розрахунку повного вертикального ослаблення міліметрового діапазону хвиль атмосферою. Отримані дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення протягом року та в найгірших місяцях року. Наведено методи розрахунку ослаблення радіохвиль внаслідок хмарності на похилих трасах на основі цифрових карт світу та місцевих даних.

Результати експериментів та їхнє статистичне опрацювання дають змогу забезпечити надійний зв'язок в розглянутому діапазоні частот.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено результатам експериментів з використанням точок доступу MikroTik Wireless Wire у діапазоні 60 ГГц для створення приземної лінії зв'язку. Досліджено максимальний радіус обслуговування, враховуючи різноманітні параметри. Також описано створення наземного радіометричного комплексу для цілодобового моніторингу з використанням точного радіометра та погодної станції.

У розділі представлено програмно-апаратний модуль для передачі інформації з радіометра в електронну таблицю, а також методику налаштування програмного додатку для керування пристроями MikroTik. Зазначено, що ці результати використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки.

**Висновки** до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування.

В **додатках** наведено тексти програм в системі MatLab для моделювання різних варіантів системи зв'язку міліметрового діапазону хвиль.

### **3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Дослідження є продовженням реалізації програми «Проект спільних досліджень поширення міліметрових хвиль для українських перспективних ліній зв'язку 5G», яка була представлена провідними науковцями України на 9<sup>th</sup> International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW) у 2016 році. Робота виконувалась протягом періоду з 2018 по 2023 роки на кафедрі радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем (РТІКС) Харківського національного університету радіоелектроніки, включаючи роботу в рамках науково-дослідної роботи № 334 на спеціальну тему (№ ДР 0121U000040т). В рамках виконання завдань, запланованих у бюджетній науково-дослідній роботі, автор був виконавцем одного з розділів програми.

### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Використання перевірених підходів та методів опрацювання інформації забезпечило належну обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій. Отримані наукові результати були презентовані та обговорені на чотирьох міжнародних наукових конференціях, що підтверджує їхню

важливість та достовірність. Це також свідчить про актуальність отриманих результатів для наукової спільноти.

## **5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх наукова новизна**

Основні результати, які складають зміст дисертації, в достатньо повній мірі відображені у 21 науковій праці, що свідчить про вагомість отриманих здобувачем висновків. Окремо слід відзначити наявність 6 статей у фахових наукових виданнях та у виданнях, які індексовані в наукометричній базі Scopus.

Зокрема, здобувач отримав такі нові наукові результати.

1. Вперше були отримані кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення міліметрового діапазону радіохвиль за річний період та помісячно на основі використання розроблених засобів радіометрії, які забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та космічних каналів зв'язку в Україні.

2. Розроблено нову багатопроменеву модель поширення радіохвиль міліметрового діапазону хвиль для закритого простору, яка відрізняється врахуванням діелектричних характеристик матеріалів стін, підлоги та стелі, що дало змогу отримати теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель (Indoor) мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (MCS) і різні типи антен.

3. Отримані нові дані про енергетичний потенціал ліній зв'язку для відкритого простору (Outdoor) з використанням створеної експериментальної приземної лінії зв'язку на основі використання точок доступу MikroTik Wireless Wire (RBwAPG60ad kit) у діапазоні 60 ГГц (5 мм), що показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сот (Small Cell).

## **6. Практичне значення одержаних у роботі результатів**

Отримані у роботі результати мають велике практичне значення в контексті розвитку та оптимізації мереж бездротового зв'язку, зокрема у міліметровому діапазоні хвиль. Вони надають важливу інформацію щодо ефективності та готовності систем зв'язку в умовах різних кліматичних умов. Розроблені математичні моделі та експериментальні дослідження можуть служити основою для оптимізації розгортання та функціонування мереж 5G.

Крім того, практичне застосування висновків та рекомендацій цієї роботи розширюється на сферу розробки нових технологій у галузі бездротового зв'язку та може послужити основою для покращення ефективності зв'язку в міських умовах. Отримані результати можуть бути корисні для інженерів, розробників мережевого обладнання та операторів зв'язку при плануванні та впровадженні мереж міліметрового діапазону.

## **7. Дотримання здобувачем академічної доброчесності**

За результатами аналізу дисертації та публікацій автора за її темою не виявлено фактів порушення академічної доброчесності. Відсутні елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі. Це свідчить про високий ступінь наукової добросовісності та відповідність вимогам етичних стандартів у проведенні наукових досліджень.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

1. Методика проведення річних цілодобових експериментів з високою частотою оновлення дає змогу отримати дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення у найгірших місяцях протягом року, однак, незважаючи на універсальність самої методики, результат проведених досліджень, пов'язаний з конкретною територією, має частковий характер.

2. В тексті нижче формули (1.3) на с. 43 замість  $L_R=2500$  км написано  $L_{link}=2500$  км. Не пояснено також величини  $B_j$  та  $C_j$  в формулі (1.3).

3. Не пояснено в достатній мірі рисунок 1.1.

4. Не пояснено величини  $h$ ,  $a$ ,  $a_1$ ,  $b$ ,  $c$  в формулі (1.13).

5. На с. 41 в формулі (1.1) ширина смуги пропускання позначена як  $B$ , а далі в тексті як  $W$ .

Проте зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи і рівня отриманих наукових результатів.

### **Висновок**

У ході виконання дисертації було проведено комплексний аналіз питань, пов'язаних з методами та засобами підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль. Отримані результати та висновки є важливим внеском у сучасне розуміння можливостей та обмежень мереж 5G та технологій міліметрового зв'язку.

Аналіз перспектив розвитку бездротових технологій та їх перехід на міліметровий діапазон хвиль виявив великий потенціал для поліпшення продуктивності та готовності каналів зв'язку. Особлива увага приділена розвитку технологій передачі інформації нового покоління 5G.

Досліджено вплив клімату на поширення та загасання радіохвиль міліметрового діапазону, а також розроблено математичні моделі та експериментальні методи, які враховують різноманітні фактори, такі як характеристики опадів та ослаблення в атмосфері.

Розроблено програмно-апаратний радіометричний комплекс та методику проведення досліджень, що дають змогу отримати дані про атмосферне послаблення радіохвиль міліметрового діапазону протягом року. Це є важливим кроком у розумінні та управлінні радіочастотним середовищем для ефективної роботи систем міліметрового зв'язку.

Практичні експерименти з використанням точок доступу MikroTik Wireless Wire у діапазоні 60 ГГц також допомогли визначити максимальний радіус зони обслуговування та врахувати вплив різних параметрів, що сприяє оптимізації розгортання систем зв'язку в даному діапазоні.

Результати цієї роботи мають практичне значення для розробників та інженерів у сфері телекомунікацій, а також можуть служити основою для подальших наукових досліджень у розвитку мереж міліметрового зв'язку.

Вважаю, що дисертація Мерзлікіна Анатолія Олександровича «Методи та засоби підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль» є актуальною, завершеною науковою працею, яка виконана на належному науковому рівні з чіткою та логічною структурою, її оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022, № 44) та «Вимогам до оформлення дисертації» (наказ Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017, № 40), а її автор, Мерзлікін А.О., заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

Завідувач кафедри  
електронних засобів  
інформаційно-комп'ютерних технологій  
Національного університету  
«Львівська політехніка»,  
д.т.н., професор



Юрій РОМАНИШИН

Підпис д.т.н., проф. Юрія Романишина засвідчую.

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ