МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кременецька Яна Адольфівна

УДК 621.396/383

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Державному університеті телекомунікацій Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Заїка Віктор Федорович,
Державний університет телекомунікацій Міністерства освіти і науки України,
завідуючий кафедрою телекомунікаційних систем та мереж

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Климаш Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
Фриз Сергій Петрович,
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова Міністерства оборони України,
начальник кафедри телекомунікацій та радіотехніки

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Самков Олександр Всеволодович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук України, заступник директора

Захист відбудеться “18” березня 2021 року о 12.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01 в Державному університеті телекомунікацій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом’янська, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету телекомунікацій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом’янська, 7.

Автореферат розісланий “11” лютого 2021 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.861.01 Л.В. Дакова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. П'яте покоління (англ. 5th Generation, 5G) безпроводових телекомунікаційних технологій розробляється для користувачів мобільних мереж з 2015 року та є важливим орієнтиром для розвитку. Для реалізації всього потенціалу 5G, різних нових додатків, таких як: штучний інтелект, передача відеотрафіка в форматах HDTV (англ. High Definition Television − телебачення високої чіткості), UHDTV (англ. Ultra High Definition Television − телебачення надвисокої чіткості) та 3D (англ. 3 Dimensions − тривимірне) відео, Інтернет речей (англ. Internet of Everything, IoT) та інших інновацій, необхідно збільшення обсягу трафіку даних, яке в свою чергу вимагає дуже високої пропускної здатності для кожного пристрою (до декілька Гбіт/с) з ємністю трафіку на одиницю площі на рівні 10 Мбіт/с/м^2. Швидкість відеотрафіка в мобільних мережах для форматів HDTV та UHDTV для нестиснутої передачі може досягати відповідно 24 Гбіт/с і 100 Гбіт/с. Рішенням такого завдання може бути використання частотного ресурсу міліметрового діапазону (ММД, 30-300 ГГц), оскільки швидкість передачі даних перетворюється в попит на доступну смугу пропускання. З іншого боку, такі унікальні особливості хвиль ММД, як наявність вікон прозорості та піків поглинання в атмосфері, можливість проникнення через деякі неметалеві матеріали, стійкість до інтерференційних завад, можливість формування вузькоспрямованого випромінювання і роздільна здатність, роблять ММД перспективним для використання не тільки в наземних системах зв'язку. Цей діапазон є перспективним для застосування в системах безпеки, відеоспостереження, сенсорних технологіях, в системах зв'язку з безпілотними літальних апаратів, тощо. За рекомендаціями Міжнародного Союзу Електрозв'язку ITU-R M.2083-0 до завдань майбутнього розвитку мобільних телекомунікацій на період до 2020 року та далі відносять впровадження нових сценаріїв використання, можливостей, забезпечення адаптації та гнучкості.

В даний час спектр ММХ широко використовується для супутникового, транзитного зв'язку, в стандартах безпроводового зв'язку IEEE 802.15.3c, IEEE 802.15.3ad, але проблеми створення телекомунікаційних систем в ММД залишаються значними. Дослідження в області генерації і модуляції радіосигналів, моделювання радіоканалів і мережевих архітектур в ММД у поєднанні з енергоефективністю, надійністю, високою пропускною здатністю та безпекою, є основними завданнями для розробників майбутніх телекомунікаційних систем.

Освоєння ММД хвиль для телекомунікацій в значній мірі пов'язано з фундаментальними дослідженнями: моделюванням каналів з урахуванням шумів, пов'язаних з молекулярним поглинанням (перевипромінюванням) в атмосфері та апаратними обмеженнями, ефектів множинного відбиття та дифракцій в умовах щільної міської забудови. Найбільш перспективними для реалізації технологій 5G і наступних поколінь розглядаються діапазони 28 ГГЦ, 38 ГГц, 60 ГГц, 73 ГГц, 100 ГГц для стільників різних розмірів та сценаріїв використання, як всередині, так і поза приміщеннями. Характерні для

безпроводових сигналів ММД явища блокування, поглинання, а також шумові, та динамічні обмеження потужності приймально-передавальних пристроїв можуть бути компенсовані гібридними технологіями в ММД, які сьогодні також розвиваються. Неоднорідні гетерогенні (HetNet) структури мереж, що підтримують різні технології і працюють в різних діапазонах довжин хвиль, мають різні розміри зон покриття. Малі стільники у відкритих середовищах (30-150 м) і всередині приміщень в ММД можуть бути інтегровані з іншими більш низькочастотними діапазонами або іншими піддіапазонами ММД. Гетерогенні технології, в тому числі з використанням ММД, можуть забезпечити ефективне просторово-рознесене повторне використання радіоресурсів.

Оптоелектронні методи формування сигналів ММД у порівнянні з електронними вважаються більш ефективними і економічно обґрунтованими для практичної реалізації у волоконно-ефірних інтегрованих системах і мережах телекомунікацій. Застосування оптоелектронних технологій і волоконно-ефірних структур мереж сприяє усуненню проблем, пов'язаних з електричними фазовими шумами, I/Q-дисбалансом, нелінійними характеристиками електричних підсилювачів потужності, проблемами створення аналого-цифрових перетворювачів, які б працювали в смузі ММХ. Такі переваги оптоелектронних методів використовуються при формуванні діаграм спрямованості фазованих антенних решіток (ФАР), що дозволяє використовувати поляризаційний та спектральний розділ сигналів, а також високі динамічні та підсилювальні характеристики ФАР.

Розробці нових методів підвищення ефективності широкосмугових телекомунікаційних систем присвячено значну кількість робіт вчених: В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, М.М. Климаш, В.Л. Банкет, М.І. Мазурков, Е.О. Сукачов, Л.О. Уривський, C.M. Akujuobi, X. Zhang, J. G. Andrews. В розвиток телекомунікацій в ММД значний внесок зробили вчені: М.Є. Ільченко, Т.М. Наритник, В.І. Слюсар, К.С. Сундучков, С.О. Кравчук, T.S. Rappaport, C. R. Anderson, F. Khan, H. Shokri-Ghadikolaei, V.J. Urick, J. Yao та багато інших.

Розробка моделей архітектур і методів підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД є тривалим процесом і ґрунтується на закономірностях, які відрізняються від підходів до моделювання інших систем, що працюють в більш низькочастотних діапазонах.

Зважаючи на вищенаведене, актуальним питанням є розробка методів підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД на основі інтеграції гібридних технологій. Це є перспективним, важливим і економічно обґрунтованим напрямом розвитку науки і техніки на сучасному етапі.

Науковою проблемою, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота, є розробка методів підвищення ефективності перспективних телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль на основі гібридних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проведено в межах науково-дослідних робіт: «Елементи фотонних мереж зв’язку» (ДР № 0115U004265), «Дослідження застосування міліметрового і субміліметрового діапазонів в телекомунікаційних системах» (ДР № 0116U006294) і «Розробка методів поліпшення характеристик фотонних

компонентів для їх застосування в перспективних телекомунікаційних мережах» (ДР № 0117U003962).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка нових концепцій, підходів для створення методів побудови та підвищення ефективності перспективних телекомунікаційних систем на основі гібридних технологій в ММД хвиль.

Для досягнення мети вирішуються наступні наукові задачі:

– аналіз особливостей та переваг, обмежуючих факторів та методів їх компенсації при застосуванні хвиль міліметрового та субміліметрового діапазонів в наступних поколіннях телекомунікаційних систем;

– аналіз методів та підходів при математичному моделюванні радіоканалів в ММД;

– розробка принципів інтеграції технологій, завдяки яким підвищується ефективність телекомунікаційних систем в ММД;

– розробка та обґрунтування застосування оптоелектронних методів формування, модуляції та передачі радіочастотного сигналу ММД з урахуванням шумових та обмежуючих характеристик електричних та оптичних компонентів;

– розробка квазіоптичної моделі радіоканалу в ММД, яка може бути використана для розрахунку інтерференційних завад, втрат сигналу в багатопроменевих моделях поширення з урахуванням розбіжності випромінювання, множинного відбиття та дифракцій, а також ефектів поглинання сигналу в різних середовищах;

– розробка інтегрованої волоконно-ефірної архітектури мережі з дистанційним гетеродинуванням, з поляризаційним та спектральним мультиплексуванням каналів для безшовної інтеграції мереж HetNet з високою пропускною спроможністю, порівняною з швидкістю передачі у волоконо-оптичних мережах;

– розробка математичної моделі, що описує закономірності оптоелектронного формування випромінювання в ММД хвиль з високим коефіцієнтом підсилення для ФАР з урахуванням оптичних та електричних шумів;

– розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності та напрямків подальших досліджень телекомунікаційних систем в ММД.

Об'єкт дослідження – процеси реалізації та шляхи підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД хвиль.

Предмет дослідження – методи розробки архітектури мереж, моделей радіоканалів, методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД хвиль з використанням гібридних технологій.

Методи досліджень: універсальна теорія дифракції, теорія ймовірності, в тому числі стохастична геометрія, теорія масового обслуговування, теорія антен, теорія фазованих антенних решіток, теорія лінійних стаціонарних систем, теорія нелінійних динамічних систем, числові методи, методи диференціального й інтегрального числення, математичне та комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

У ході виконання дисертаційної роботи одержані нові наукові положення і результати:

– вперше створений метод для розрахунку енергетичного бюджету радіоканалу в ММД хвиль із застосування квазіоптичної моделі, в якому враховується розбіжність випромінювання, множинні відбиття та дифракції, ефекти поглинання в різних середовищах, що, на відміну від сучасних емпіричних моделей розрахунку втрат сигналу в радіоканалі, дозволяє збільшити дальність зв'язку та точність розрахунку рівня сигналу в точці прийому для зон прямої та поза прямої видимості;

– удосконалено методику розрахунку шумів в каналі ММД, які пов’язані з шумами молекулярного поглинання та перевипромінювання в атмосфері, інтерференційними ефектами, шумами, пов’язаними з оптоелектронними методами генерації та модуляції радіосигналу, що на відміну від існуючих класичних методів дозволяє збільшити точність розрахунку бюджету каналу;

– вперше запропоновано архітектуру волоконно-ефірної мережі в ММД хвиль, в якій об’єднано технології дистанційного гетеродинування, поляризаційного та спектрального мультиплексування, інтегрованого з методом MIMO, зовнішньої модуляції з можливістю множення частоти та відновлення оптичного сигналу з радіосигналу ММД, переданого через безпроводовий канал, що дозволяє знизити вимоги до пропускної здатності для оптичних та електричних компонентів;

– вперше запропоновано метод безшовної інтеграції складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж з можливістю використання форматів модуляції високого порядку, переналаштування частоти для різних діапазонів частот, в тому числі для піддіапазонів в міліметровій смузі для гібридних гетерогенних мереж на основі інтеграції радіо- та волоконно-оптичних технологій;

– вперше розроблено методику підвищення ефективності телекомунікаційних систем у ММД хвиль, що базуються на гібридних технологіях, де узгоджені обмежуючі та динамічні характеристики передавального модуля інтегрованої волоконно-ефірної архітектури мережі, на основі вдосконаленної енергетичної моделі радіоканалу, що дозволяє реалізувати безшовну інтеграцію складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж з можливістю адаптації під різні вимоги та підвищити пропускну здатність до швидкостей в волоконно-оптичних системах передачі.

Отримані методи, методики, моделі формують сукупність методів підвищення ефективності перспективних телекомунікаційних мереж та систем у ММД хвиль за допомогою використання гібридних технологій, що визначено предметом дисертаційного дослідження.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає в створенні теоретико-прикладних основ енергетичного аналізу, методів проектування та підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД хвиль із застосуванням гібридних технологій, а саме:

на основі проведеного аналізу існуючих емпіричних методів та підходів до математичного моделювання радіосистем 5G в ММД хвиль встановлено, що для вдосконалення розрахунків потрібна подальша розробка концепцій моделей радіоканалів та систем в ММД хвиль, які ґрунтуються на фундаментальних фізичних підходах з урахуванням характеристик і обмежень приймально-передавального обладнання, в тому числі, що працюють на основі гібридних технологій із забезпеченням безшовної інтеграції, характеристик поширення ММХ всередині приміщень та у відкритих середовищах;

удосконалено методику розрахунку енергетичного бюджету радіолінії, в якій на відміну від класичних підходів враховуються наступні фізичні ефекти: квазіоптична модель поширення випромінювання, в якій враховуються втрати, зумовлені геометричною розбіжністю випромінювання, ефекти множинного відбиття та дифракцій, ефекти молекулярного поглинання та перевипромінювання в атмосфері, шуми та обмеження, пов'язані з оптоелектронними методами генерації, формування випромінювання радіосигналів в ФАР. Розроблена методика дозволяє оцінити для зон поза прямої видимості міської забудови можливість підсилення сигналу ММД до 5 дБ за рахунок ефектів відбиття та дифракції, із застосуванням штучних відбивачів підсилення досягає 25 дБ, значення відношення сигнал/шум для оптоелектронного методу формування вузькоспрямованого випромінювання в ФАР для ММД приймає значення нижче 20 дБ, точність розрахунків із застосуванням квазіоптичної моделі радіоканалу збільшується на 10 дБ;

на основі розробленої методики проведений порівняльний аналіз складових енергетичного бюджету радіолінії ММД, з якого встановлена значимість впливів як інтерференційних завад, так і шумів, обмежень пов'язаних з гібридними методами генерації, модуляції, формуванням випромінювання радіосигналів, ефектів поширення в атмосфері, ефектів відбиття та дифракції сигналів в міській забудові. Розроблений метод дозволяє збільшити достовірність розрахунків втрат в каналі ММД на 17 %;

розроблена гібридна архітектура телекомунікаційної мережі, в якій враховуються показники якості, обмежуючи фактори, динамічні характеристики як електричних так і оптичних компонентів, використані технології множення частоти на основі методів зовнішньої модуляції, дистанційного оптичного гетеродину, фотонної демодуляції, поляризаційного та спектрального мультиплексування. На основі розробленої архітектури досягнуто можливість безшовної інтеграції HetNet мереж, які працюють в різних діапазонах частот, в тому числі в різних піддіапазонах ММД, збільшення пропускної здатності до значень, які можливо порівняти зі швидкістю передачі в волоконно-оптичних мережах.

Отримані в результаті дисертаційного дослідження положення, методи, методики, моделі зможуть бути використані при проектуванні, енергетичних розрахунках телекомунікаційних систем в ММД та подальшому дослідженні збільшення їх енергетичної ефективності.

Науково-технічні рішення щодо практичного використання розробленої методики підвищення ефективності телекомунікаційних систем зв’язку із

застосуванням гетерогенних технологій та волоконно-ефірної гібридної конфігурації мереж використані в навчальному процесі Державного університету телекомунікацій, зокрема для введення інноваційного змісту навчання з дисциплін: «Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління», «Проектування та технічна експлуатація РЕЗ та комплексів», «Мережі та системи радіозв'язку і радіодоступу нового покоління».

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи реалізовані в рамках виконання науково-дослідних робіт «Елементи фотонних мереж зв'язку» (ДР № 0115U004265), «Дослідження застосування міліметрового і субміліметрового діапазонів в телекомунікаційних системах» (ДР № 0116U006294) і «Розробка методів поліпшення характеристик фотонних компонентів для їх застосування в перспективних телекомунікаційних мережах» (ДР № 0117U003962). Впровадження результатів дослідження підтверджуються відповідними актами, наведеними в додатку до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. В дисертації узагальнено результати досліджень, виконаних автором самостійно [3, 13, 14, 16, 18, 25, 26] та в співавторстві [1, 2, 4-12, 15, 17, 19-24, 27]. Особисто автором здійснена розробка загальної концепції дисертації, вибір об'єктів, визначено мету та задачі роботи, обрано та обґрунтовано методи досліджень. В наукових публікаціях у співавторстві автору належать: провідна роль у виборі та обґрунтуванні напрямку досліджень, постановка задачі на різних етапах виконання роботи, аналіз та інтерпретація одержаних результатів. У статтях із співавторами: [10, 15, 17, 19, 27] відокремлено основні проблеми реалізації телекомунікаційних технологій в ММД та визначені концепції та підходи для створення методів побудови та підвищення ефективності перспективних телекомунікаційних систем та мереж в ММД хвиль; [1, 2, 20-22] визначено архітектури мереж на основі гібридних технологій, що сприяють реалізації телекомунікацій у ММД; [4, 5, 12] розроблена квазіоптична модель радіоканалу ММД та розроблені методи збільшення дальності та доступності зв'язку за рахунок створення зон підсилення сигналу, розроблена модель радіоканалу із застосуванням штучних відбивачів та проаналізована енергетична ефективність такого рішення; [7, 9, 11, 23, 24] запропонована волоконно-ефірна архітектура мережі в ММД та методи безшовної інтеграції гетерогенних мереж; [6, 8, 26] розроблено математичну модель на основі стохастичної геометрії для розрахунку інтерференційних шумів, розроблено методику розрахунку шумів, пов'язаних з оптоелектронними методами формування радіосигналів ММД.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях та семінарах професорсько-викладацького складу і наукових співробітників Державного університету телекомунікацій 2009 – 2019 р.; VI науковій конференції «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті» (м. Київ, ДУІКТ, 05-06.11.2009 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (м. Київ, ДУІКТ, 10-14.10.2011); IX науковій конференції «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті» (м. Київ, ДУІКТ, 22-

23.11.2012); V Міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м. Київ, ДУТ, 29-30.10.2015); регіональному семінарі МСЕ «Тенденції розвитку конвергентних мереж: рішення пост-NGN, 4G та 5G» (м. Київ, ДУТ, 17-18.11.2016); міжнародній технічній конференції «РТПСАС-2017» (Київ, НТУУ "КПІ", 20-26.03.2017); Eleventh International Scientific Conference «Modern challenges in telecommunications» (МСТ-2017, Kyiv, 18-21.04.2017); IEEE XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'17, Kyiv, 24-27.05.2017); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017, Kyiv, 29.05-05.06.2017); IEEE 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications «Science and Technology (PIC S&T, Kyiv, 10-13.10.2017); регіональній конференції МСЕ «Перспективи надання послуг на основі мереж пост-NGN, 4G і 5G. Організаційні та технічні рішення по їх побудові та захисту» (Київ, ДУТ, 07-09.06.2017); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (Київ, НТУУ “КПІ”, 16-20.04.2018); IEEE Conference Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT’2018, Kyiv, 24-27.05.2018); 9th International IEEE Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018, Kyiv, 04-07.09.2018); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи телекомунікацій» (Київ, НТУУ “КПІ”, 15-19.04.2019); IEEE 6th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications «Science and Technology (PIC S&T, Kyiv, 8-10.10.2019); The IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo, Odessa, 9-13.09.2019).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано після захисту кандидатської дисертації в 27 наукових працях та 1 монографії. Зроблено 17 доповідей на міжнародних наукових та науково-технічних конференціях, з яких 13 міжнародних, 7 зареєстровані за підтримкою асоціації IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 316 с. друкарського тексту, у тому числі містить 127 рисунків та таблиць, 26 с. списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено об’єкт, предмет, розкрито зв'язок роботи з науковими планами та програмами, показано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, відзначено особистий внесок автора, наведено дані про апробацію та практичне впровадження, публікації та структуру роботи.

У першому розділі на основі опрацьованих науково-технічних джерел проведено аналіз питання та визначено основні завдання, які необхідно вирішити для розробки методів підвищення ефективності телекомунікаційних мереж і систем в ММД хвиль на основі гібридних технологій. Виконано аналіз переваг, перспектив та технічних проблем реалізації міліметрового та субміліметрового

діапазонів в телекомунікаційних системах. Виконано аналіз сучасних досліджень в галузі особливостей поширення хвиль міліметрового та субміліметрового діапазонів як в атмосфері, так і в інших середовищах, в різних сценаріях розгортання, зокрема для міського сценарію. Проаналізовані стандарти та технології телекомунікацій, що працюють в ММД, зокрема перспективні ділянки спектру для розвитку телекомунікацій.

Проаналізовано та виділено основні сучасні методи та підходи до моделювання радіоканалів ММД. З аналізу найбільш поширених моделей радіоканалів для мобільних і безпроводових мереж в діапазоні 0,5-100 ГГц, розроблених дослідницькими групами: 3GPP, 3GPP 3D, WINNER I (WINNER II), COST 273/2100, QuaDRiGa, IEEE 802.11ad, MiWEBA, METIS, IMT-Advanced, mmMAGIC, 3GPP-like, зроблено висновок, що розрахунки енергетичних втрат за цими моделями відрізняються. Вище зазначені моделі радіоканалів в діапазонах 0,5-100 ГГц можна поділити на наступні типи: ймовірнісні моделі та моделі, наближені до моделей втрат у вільному просторі - CI модель (англ. Close-in Model). Моделі класифікують також за різним сценаріями застосування: мікростільники (Umi) і макростільники (Uma) для міської забудови, моделі втрат всередині приміщень, моделі для сільської місцевості (англ. Rural macrocell; RMa). Відзначено, що застосування ММД пов'язано з використанням гетерогенних (HetNets) або гібридних технологій, наприклад, для зв'язку між транспортними засобами (англ. vehicle-to-vehicle, V2V) та інфраструктурою, міжмашинна взаємодія (англ. machine-to-machine, M2M), піринговий одноранговий зв'язок (англ. peer-to-peer, P2P) і та ін., для забезпечення безшовної передачі інформації через транзитні з'єднання гетерогенних мереж різних розмірів і призначень. Для зв'язку базових станцій мобільних мереж з центрами обробки і зберігання інформації в ММД ефективним рішенням є використання оптоволоконних мереж, в яких сигнали ММД конвертуються в оптичний діапазон за технологією Radio over fiber (RoF) та можуть передаватися на великі відстані. Із застосуванням технології RoF здійснюються оптоелектронні методи формування діаграм спрямованості ФАР**.** ФАР відіграють важливе значення для майбутніх широкосмугових мобільних додатків 5G і наступних поколінь, особливо в ММД. Оптоелектронні (фотонні) методи формування діаграм спрямованості ФАР забезпечують більш широку смугу пропускання і менші втрати в порівнянні з електронними компонентами, що робить оптоелектронні методи управління ФАР ефективним рішенням для інтелектуальних антен в ММД. Останнім часом активно розвивається напрямок MIMO систем зв'язку, в яких ФАР використовуються як на приймальній стороні, так і на передавальній стороні.

В першому розділі відмічено, що важливою проблемою при проектуванні та моделюванні систем ММД є математичний аналіз особливостей поширення в багатопроменевих моделях каналу з урахуванням ефектів дифракції, поглинання, відбиття, блокування сигналів ММД. Також важливою проблемою при проектуванні та моделюванні систем ММД є характеристики приймально-передавального обладнання, які пов’язані з фазовими шумами, нелінійними характеристиками підсилювачів, дисбалансом I/Q. Такі ефекти обмежують

пропускну здатність телекомунікаційних систем, особливо коли передбачається висока спектральна ефективність, і впливають на вибір методів модуляції сигналів, ущільнення каналів, енергетичний потенціал каналів.

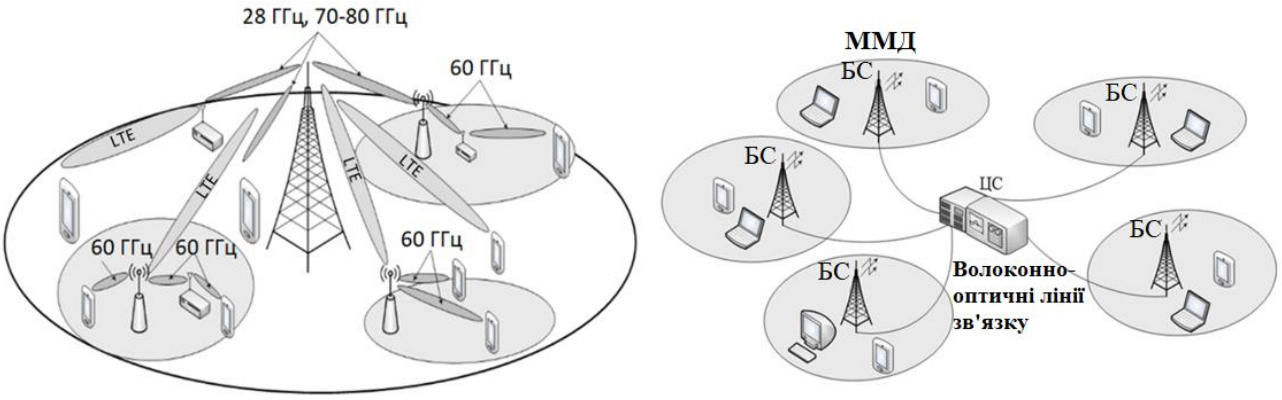
Відзначено, що дослідження в галузі освоєння ММД часто фокусуються на вузьких та розрізнених технічних проблемах. Для реалізації телекомунікаційних систем в ММД необхідне всебічне дослідження, що об'єднає досягнення в галузі гібридних технологій, які працюють в ММД. Моделювання каналів для 5G в ММД має ґрунтуватися на фундаментальних фізичних підходах, з урахуванням параметрів, характеристик і обмежень як в приймально-передавальному обладнанні, в тому числі устаткуванні, що працює на основі гібридних технологій із забезпеченням безшовної інтеграції, так і характеристик поширення ММХ.

У другому розділі для реалізації та підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД проведено аналіз та запропоновано застосування гібридних технологій: оптоелектронні методи формування радіосигналів та діаграм спрямованості ФАР; гібридні архітектури мереж: волоконно-ефірні, гетерогенні мережі HetNet, застосування магістральних рішень або з’єднань типу «точка - точка», «точка - множина точок» у вікнах прозорості ММД для наземних та стратосферних комплексів зв’язку. Застосування вищенаведених гібридних технологій може сприяти ефективному використанню радіочастотного ресурсу, зокрема в ММД, збільшити щільність покриття та пропускну здатність мереж. Проблемою розвитку HetNets є висока щільність користувачів і точок доступу в мережах, що створює значні завади між користувачами, які необхідно послаблювати за допомогою складних схем зниження завад. Для вирішення таких проблем пропонується гібридна HetNets, в якій використовуються різні піддіапазони ММД, що використовують широку смугу пропускання та різні характеристики поширення в смугах 60 ГГц і 70-80 ГГц, з метою зменшення впливу завад та збільшення продуктивності мережі. Основними характеристиками смуг 60 ГГц є високі втрати, пов'язані з поглинанням в молекулах кисню до 14 дБ/км, обмежена потужність передачі і втрати сигналу через затінення. На відміну від 60 ГГц діапазону, в E-діапазоні 70-80 ГГц немає значного послаблення каналу (до 0,5 дБ/км) в атмосфері та доступна смуга 10 ГГц. У гібридній системі HetNets, що використовує спектри 60 ГГц і 70-80 ГГц передбачається наступний сценарій:

- використання щільно розгорнутих мереж в діапазоні 60 ГГц в зоні обслуговування макростільниками, де високе згасання забезпечує зниження загального рівня завад в мережі;

- діапазон 70-80 ГГц використовується в режимі сильних завад або для встановлення ліній зв'язку на більш довгі дистанції, наприклад, для з’єднання базових станцій макростільників.

Гібридна конфігурація HetNets з використанням ММД і діапазону LTE може значно збільшити пропускну здатність мереж. В даній конфігурації базові станції оснащені кількома приймально-передавальними антенами, що працюють в різних смугах (рис.1,*а*).



а) *б)*

Рис.1. Гібридні конфігурації мереж: *а*) Het-Nets з використанням ММД та діапазону LTE , *б*) з використанням технології RoF, базові станції стільників, що працюють в ММД зв'язані через волоконно-оптичні ліній

Використання гібридних оптоелектронних технологій для генерації і модуляції, передачі сигналів ММД, а також оптоелектронних методів формування діаграм спрямованості ФАР може не тільки істотно підвищити пропускну здатність, але й вирішити проблеми слабких місць в конфігурації безпроводових мереж. Волоконно-ефірні архітектури мереж мають переваги як оптоволоконної, так і безпроводової передачі. Волоконні оптичні лінії можуть з'єднувати базові станції і центри обробки інформації (рис.1,б) з забезпеченням високої пропускної здатності за рахунок можливості спектрального мультиплексування та використання форматів модуляції високого порядку. До технології безшовної волоконно-ефірної інтеграції відносять гібридні оптоелектронні методи генерації, модуляції і передачі сигналів ММД. Фотонні методи обробки сигналів стають більш ефективними у порівнянні з електронними методами, тому сучасні дослідження спрямовані на створення повністю оптичних систем обробки сигналів. Фотонні методи понижуючого перетворення частоти (ППЧ) дозволяють розв’язати деякі проблеми радіотехнічних пристроїв ППЧ – такі як ізоляція між входами сигналу та гетеродину, нелінійність, масштабованість та ефективність.

Конкурентом волоконно-оптичних ліній зв'язку можуть стати стратосферні системи, в яких використовуються канали зв'язку з ретрансляторами на висоті близько 20 км (рис.2).

Стратосферні ретранслятори, які можуть виконувати функцію базових станцій, розподілені в горизонтальний ланцюг, де коригування положення і зв'язок виконується в оптичному діапазоні.

До найбільших переваг використання стратосферних систем зв'язку для поліпшення техніко-економічних показників телекомунікаційних систем можна віднести: розширення частотного ресурсу (дефіцит якого є загальносвітовою проблемою) з використанням ММД; створення високошвидкісних магістралей поряд з оптичними; розширення зони обслуговування; істотне зниження показника ціна/послуга для забезпечення зв'язку, що може стати стимулом розвитку інноваційних технологій.

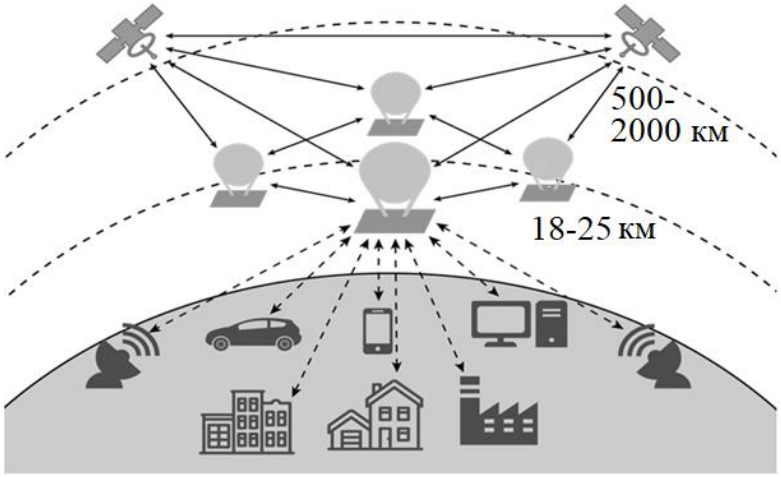


Рис.2. Телекомунікаційна схема роботи стратосферного комплексу зв’язку

Приблизно з 2010 року знову збільшилась зацікавленість ІТ-компаній до стратосферних систем зв'язку завдяки розвитку інноваційних технологій, особливо в області регенераційних енергетичних елементів, телекомунікаційного обладнання, нанотехнологій. За останніми даними, компанії Google і Facebook для збільшення числа користувачів в малонаселених і малодоступних районах Землі, проводять з 2013 року випробування по запуску стратосферних ретрансляторів. З 2016 року Google проводить випробування в Е-діапазоні 71-76 ГГц, 81-86 ГГц.

В третьому розділі проаналізовано методи побудови та обчислено радіочастотні передавальні характеристики (показники якості) фотонних компонентів для оптичних ліній передач із зовнішньою модуляцією інтенсивності випромінювання і прямим детектуванням. Зроблено висновок, що методи зовнішньої модуляції на основі оптоелектронних модуляторів шляхом множення частоти вхідного радіочастотного сигналу RF дозволяють генерувати сигнали ММД до 100 ГГц (теоретично до 160 ГГц) з наступною передачею по оптоволокну. Методи оптичного гетеродину дозволяють конвертувати радіосигнали у волоконно-оптичне середовище в усьому субміліметровому діапазоні (до 1 ТГц) без суттєвих обмежень, проте для оберненої генерації радіосигналів у відкритих системах головним обмежуючим фактором є смуга пропускання фотодіода (PD).

На рис. 3, 4 подані базові схеми зовнішньої модуляції на основі двохпаралельного модулятора Маха-Цендера (ДПММЦ) для модуляції оптичного випромінювання сигналом ММХ. Сучасні ММЦ мають верхню граничну частоту модуляції близько 40 ГГц, однак способи модуляції, засновані на ДПММЦ, здатні формувати сигнали частотою до 160 ГГц.

Змішування двох близьких за частотою оптичних хвиль створює биття у фотоприймачі, причому різниця між частотами випромінювання лазерів відповідає сигналу ММХ (рис. 5). Такий метод є найбільш перспективним для формування сигналів вище 30 ГГц до субміліметрового діапазону включно, однак головні труднощі методу пов’язані із обмеженою смугою пропускання фотоприймача.

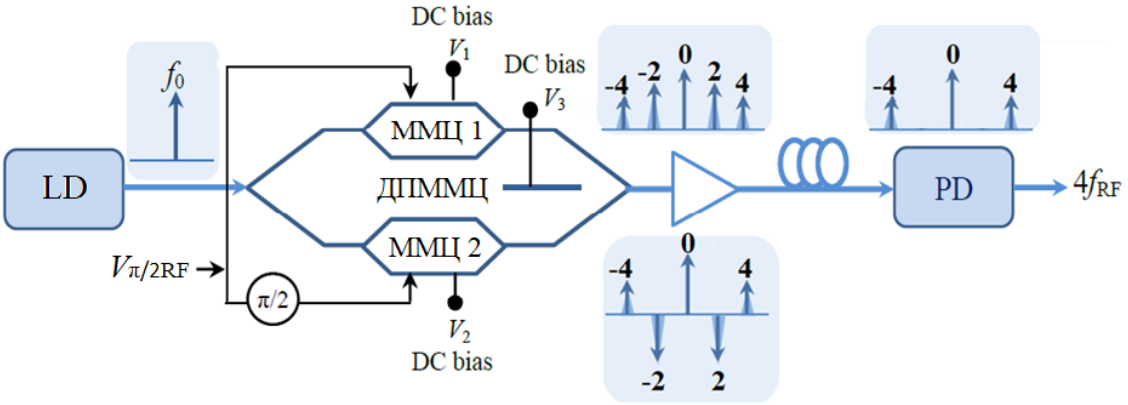


Рис. 3. Базова схема чотириразового множення частоти RF сигналу

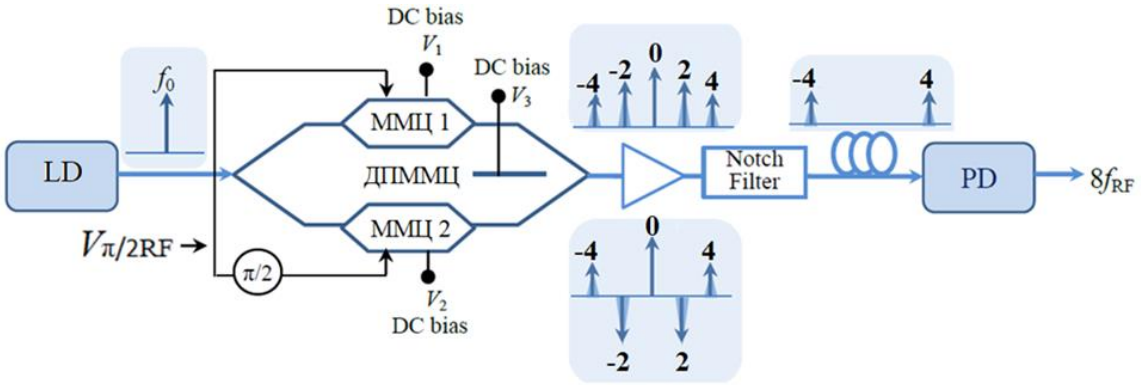


Рис. 4. Базова схема восьмикратного множення частоти RF сигналу

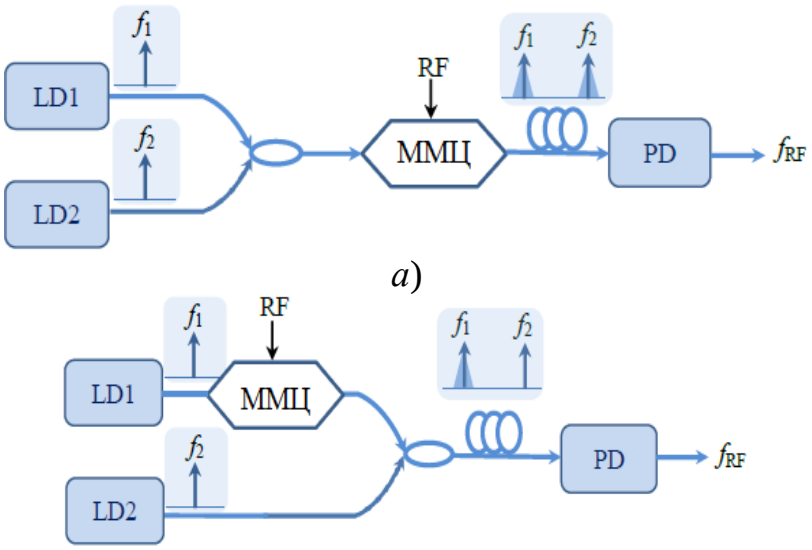


Рис.5. Схеми некогерентних оптоелектронних методів модуляції та передачі сигналів ММД, що використовують гетеродинне змішування оптичних хвиль в фотодіоді від двох не корельованих лазерних діодів

На рис. 5,*а* вхідні дані накладені на дві незалежні оптичні несучі частоти, які рознесені на $|f_1 - f_2|$ для формату модуляції OCS-DSB, рис. 5,*б* дані накладені на одну оптичну несучу та далі об'єднану з іншою оптичною несучою для

формату модуляції OSSB + C.

Для визначення основних радіочастотних характеристик ліній передачі проведено одночастотний та двохчастотний аналіз. За допомогою одночастотного аналізу визначено коефіцієнт підсилення радіочастотного сигналу RF, коефіцієнт шуму і динамічний діапазон по компресії підсилення для лінії із зовнішньою модуляцією інтенсивності випромінювання і прямим детектуванням (МІВПД).

Лінійність радіочастотних систем визначалась двохчастотним аналізом вхідного сигналу. Первинною вхідною напругою в аналізі є двохчастотний сигнал на частотах ω_{RF1} і ω_{RF2} за формою:

$$V_{\text{вх}}(t) = V_{\text{зм}} + V_1 \sin(\omega_{\text{RF1}} t) + V_2 \sin(\omega_{\text{RF2}} t), \tag{1}$$

з фазовим зсув між плечами ММЦ:

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{зм}} + \varphi_1 \sin(\omega_{\text{RF1}} t) + \varphi_2 \sin(\omega_{\text{RF2}} t), \tag{2}$$

$V_{\text{зм}}$ і $\varphi_{\text{зм}}$ – напруга і фаза постійного зміщення; V_1 і V_2, φ_1 і φ_2 – амплітуди і фази складових двохчастотного сигналу, які пов'язані співвідношенням:

$$\varphi_1 = \pi V_1 / V_\pi(\omega_{\text{RF1}}), \varphi_2 = \pi V_2 / V_\pi(\omega_{\text{RF2}}),$$

V_π – частотно залежна величина напруги, необхідна для отримання в ММЦ відносного фазового зсуву на π радіан.

Як показано в третьому розділі, форму електричного струму при двохчастотній модуляції на виході фотоприймача (PD) можна подати у вигляді трьох складових $I_{1,2}^{\text{сер}}$, $I_{1,2}^{\text{непар}}$, $I_{1,2}^{\text{пар}}$:

$$I_{1,2}^{\text{сер}} = I_{\text{зм}} \mp I_{\text{зм}} J_0(\varphi_1) J_0(\varphi_2) \cos(\varphi_{\text{зм}}), \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
I_{1,2}^{\text{непар}}(t) = {} & \pm 2 \sin(\varphi_{\text{зм}}) I_{\text{зм}} \times \left\{ J_0(\varphi_2) \sum_{j=0}^{\infty} J_{2j+1}(\varphi_1) \sin[2j+1] \omega_{\text{RF1}} t \right\} + \\
& + J_0(\varphi_1) \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(\varphi_2) \sin[2k+1] \omega_{\text{RF2}} t - \\
& - \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_{2j+1}(\varphi_1) J_{2m}(\varphi_2) \sin\left[\left(2m\omega_{\text{RF2}} - (2j+1)\omega_{\text{RF1}} \right) t \right] - \\
& - \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} J_{2k+1}(\varphi_2) J_{2h}(\varphi_1) \sin\left[\left(2h\omega_{\text{RF1}} - (2k+1)\omega_{\text{RF2}} \right) t \right] + \\
& + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_{2j+1}(\varphi_1) J_{2m}(\varphi_2) \sin\left[\left(2m\omega_{\text{RF2}} + (2j+1)\omega_{\text{RF1}} \right) t \right] - \\
& - \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} J_{2k+1}(\varphi_2) J_{2h}(\varphi_1) \sin\left[\left(2h\omega_{\text{RF1}} + (2k+1)\omega_{\text{RF2}} \right) t \right] \Bigg\},
\end{aligned} \tag{4}$$

$$I_{1,2}^{\text{пар}}(t) = \mp 2\cos(\varphi_{\text{зм}})I_{\text{зм}} \times \Bigg\{ J_0(\varphi_2)\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\varphi_1)\cos(2k\omega_{\text{RF1}}t) +$$

$$+ J_0(\varphi_1)\sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(\varphi_2)\cos(2m\omega_{\text{RF2}}t) -$$

$$- \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{p=0}^{\infty} J_{2n+1}(\varphi_1)J_{2p+1}(\varphi_2)\cos\left[\left((2p+1)\omega_{\text{RF2}} - (2n+1)\omega_{\text{RF1}}\right)t\right] +$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{p=0}^{\infty} J_{2n+1}(\varphi_1)J_{2p+1}(\varphi_2)\cos\left[\left((2p+1)\omega_{\text{RF2}} + (2n+1)\omega_{\text{RF1}}\right)t\right] + \qquad (5)$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} J_{2k}(\varphi_1)J_{2m}(\varphi_2)\cos\left[2\left(m\omega_{\text{RF2}} - k\omega_{\text{RF1}}\right)t\right] +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} J_{2k}(\varphi_1)J_{2m}(\varphi_2)\cos\left[2\left(m\omega_{\text{RF2}} + k\omega_{\text{RF1}}\right)t\right]\Bigg\}.$$

де $I_{\text{зм}} = \Re g_0 a_{\text{ММЦ}} P_{\text{сер}} / 2$ – постійна складова фотоструму, $\Re$ – чутливість фотоприймача, g_0 – підсилення оптичного сигналу між модулятором та фотодіодом, $a_{\text{ММЦ}}$ – коефіцієнт втрат оптичної потужності в ММЦ, $P_{\text{сер}}$ – середнє значення оптичної потужності, J_n - функція Бесселя першого роду *n*-го порядку.

Рівняння (3) характеризує середній струм для кожного плеча, де член $I_{\text{зм}}$ багаторазово використовується для ідентифікації постійного струму при квадратурному зміщенні [$\varphi_{\text{зм}} = (2n+1)\pi$, n – ціле число]. Члени непарного порядку, в тому числі обидві перші гармоніки, зібрані в (4), а спотворення парного порядку даються в (5). Знаки суми включають гармонічні спотворення, в той час як подвійні суми відповідають інтермодуляційним спотворенням.

Нелінійні спотворення для ліній з МІВПД характеризуються особливим параметром – вихідною точкою перетину *n*-го порядку (англ. order output intercept point, OIP). З аналізу рівнянь (4) та (5) значення OIP2 для другого порядку знаходиться як функція від $\varphi_{\text{зм}}$:

$$\text{OIP2}(\varphi_{\text{зм}}) = \frac{2\sin^2(\varphi_{\text{зм}})I_{\text{зм}}^2 R_{\text{вих}}\left|H_{\text{PD}}\right|^2}{\cos^2(\varphi_{\text{зм}})}, \qquad (6)$$

де $R_{\text{вих}}$ – вихідний опір, $H_{\text{PD}}(f)$ – фільтруюча функція схеми фотодіоду (прямими дужками позначено усереднення за часом, в ідеальному випадку $H_{\text{PD}} = 1$).

З аналізу експериментальних даних значення OIP2 знаходиться близько 35 дБм і обмежується спотвореннями в фотодіоді. Параметр OIP3 для розрахунку спотворень третього порядку з (4) можна виразити як:

$$\text{OIP3} = 4I_{\text{зм}}^2 R_{\text{вих}}\left|H_{\text{PD}}\right|^2 . \qquad (7)$$

Рівняння (7) можна переписати в логарифмічному форматі для $R_{\text{вих}}$ = 50 Ом і H_{pd} = ½: $\text{OIP3}[\text{дБм}] = -13{,}0 + 120\log(I_{\text{зм}}[\text{мА}])$.

З аналізу експериментальних даних значення OIP3 знаходиться близько 23 дБм. Важливими передавальними характеристиками радіофотонних (гібридних волоконно-ефірних) систем є спектральна щільність потужності шуму (СЩПШ), відношення сигнал/шум (SNR), коефіцієнт шуму (*F*), динамічний діапазон по компресії підсилення (англ. compression dynamic range, CDR), динамічний діапазон за завадами (англ. spurious-free dynamic range, SFDR). СЩПШ на виході лінії передачі з МІВПД на базі зовнішнього ММЦ має вигляд:

$$N_{\text{вих}} = \frac{I_{\text{зм}}^2}{V_\pi^2}\pi^2 R_{\text{вх}} R_{\text{вих}} \left|H_{\text{PD}}\right|^2 k_{\text{B}} T_{\text{s}} + k_{\text{B}} T_{\text{s}} + 2qI_{\text{зм}} R_{\text{вих}} \left|H_{\text{PD}}\right|^2 + \text{RIN} \cdot I_{\text{зм}}^2 R_{\text{вих}} \left|H_{\text{PD}}\right|^2, \qquad (8)$$

де RIN – відносний шум інтенсивності; k_{B} – стала Больцмана, T_{s} – стандартна шумова температура ($T_{\text{s}} = 290\,\text{К}$); $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вих}}$ – вхідний та вихідний опори, q – заряд електрона.

Перша складова в (8) пов'язана з тепловим шумом на вході лінії, друга складова враховує тепловий шум на виході лінії передачі, третя складова кількісно враховує внесок дробового шуму, четверта складова описує додатковий оптичний шум, виміряний в термінах відносного шуму інтенсивності (RIN).

Максимальне значення для 1-дБ CDR лінії з МІВПД має межу за вхідним тепловим шумом:

$$\text{CDR}_{\text{1дБ,max}} = \frac{(0,4516)V_\pi^2}{\pi^2 R_{\text{вх}} k_{\text{B}} T_{\text{s}} B}, \qquad (9)$$

B- ширина смуги сигналу, одержана після перетворення оптичного сигналу в електричний в PD.

Якщо переважним джерелом вихідного шуму є тепловий шум на вході лінії, то динамічний діапазон стає обмеженим. Це пояснюється тим, що нижня межа шуму і вихідна потужність за рівнем компресії 1 дБ пропорційні $I_{\text{зм}}^2$.

Для багатьох застосувань більш важливим показником є SFDR, який, як правило, менше $\text{CDR}_{\text{1дБ}}$. Даний параметр у випадку ідеальної лінії з МІВПД обмежений за OIP третього порядку:

$$\text{SFDR}_3 = \left(\frac{4I_{\text{зм}}^2 R_{\text{вих}} \left|H_{\text{PD}}\right|^2}{N_{\text{вих}} B} \right)^{2/3}. \qquad (10)$$

Величина SFDR так само, як $\text{CDR}_{\text{1дБ}}$, збільшується з $I_{\text{зм}}$ і не залежить від V_π, доки вхідний тепловий шум не починає створювати чималий внесок. Як і при аналізі CDR, величина SFDR стає незалежною від $I_{\text{зм}}$, коли домінує вхідний тепловий шум. Вираз для максимального SFDR:

$$\text{SFDR}_{\text{max}} = \left(\frac{4V_\pi^2}{\pi^2 R_{\text{вх}} k_{\text{B}} T_{\text{s}} B} \right)^{2/3}. \qquad (11)$$

Значення SFDR другого порядку в лінії з МІВПД залежність від фази постійного зміщення:

$$\mathrm{SFDR}_2\left(\varphi_{\text{зм}}\right)=I_{\text{зм,q}}\frac{\sin^2\left(\varphi_{\text{зм}}\right)}{\left|\cos\left(\varphi_{\text{зм}}\right)\right|}\left(\frac{2R_{\text{вих}}\left|H_{\text{PD}}\right|^2}{N_{\text{вих}}\left(\varphi_{\text{зм}}\right)B}\right)^{1/2}. \qquad (12)$$

Проаналізовано та отримано значення SNR за дробовим шумом, максимальне значення можливо знайти за виразом:

$$\mathrm{SNR}_{\text{sh,max}}=\frac{(0,3386)I_{\text{зм}}}{qB}. \qquad (13)$$

Величину динамічного діапазону за компресією CDR в лінії з МІВПД, обмеженою дробовим шумом, можна визначити за виразом:

$$\mathrm{CDR}_{\text{1дБ,sh}}=\frac{\left(0,2258\right)I_{\text{зм}}}{qB} \qquad (14)$$

Отримано значення SNR, яке обмежене RIN:

$$\mathrm{SNR}_{\text{RIN}}=\frac{2J_1^2\left(\varphi_{\text{RF}}\right)}{\text{RIN}\cdot B}. \qquad (15)$$

Вищенаведені рівняння демонструють корисність формального визначення RIN для опису характеристик ліній з МІВПД. Показано, що максимальне значення SNR, SNR при 1-дБ компресії, CDR при 1-дБ компресії і SFDR є функціями тільки RIN. Коефіцієнт шуму залежить тільки від RIN і напівхвильової напруги зміщення (мінімуму пропускання) ММЦ V_π. Оскільки RIN лазера не залежить від середнього фотоструму, тому специфікація мінімального RIN для лінії передачі буде визначати декілька максимально досяжних рівнів параметрів.

Проектування лінії передачі МІВПД-типу із зовнішньої модуляцією пов’язано з вибором з великого числа рішень, які відповідають значенням коефіцієнтів підсилення, фактора шуму і SFDR. Показано, що фактор шуму зменшується із збільшенням $I_{\text{зм}}$ або зі зменшенням V_π та із зменшенням рівня RIN:

$$F=1+\frac{V_\pi^2}{\pi^2\mathrm{R}_{\text{вх}}}\left(\frac{1}{I_{\text{зм}}^2R_{\text{вих}}\left|H_{\text{PD}}\right|^2}+\frac{2q}{I_{\text{зм}}k_{\text{B}}T_{\text{s}}}+\frac{\text{RIN}}{k_{\text{B}}T_{\text{s}}}\right). \qquad (16)$$

Проте SFDR не залежить від V_π, за винятком випадків, коли параметри лінії обмежуються вхідним тепловим шумом. В такому випадку підхід до проектування залежить від режиму роботи лінії передачі і компроміс між F і SFDR може знайдений за такою залежністю:

$$\mathrm{SFDR}_3 = \left(\frac{4V_\pi^2}{\pi^2 R_{\text{вх}} k_\text{B} T_\text{s} B} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{F} \right)^{2/3} . \quad (17)$$

З аналізу радіочастотних передавальних характеристик та показників якості для оптичних ліній передач із МІВПД можна зробити висновки, що домінуючим джерелом шумів в оптичній лінії є RIN відносна інтенсивність шуму лазеру; методами інтеграції модуляторів ММЦ забезпечується вирівнювання оптичної потужності; ММЦ накладає головні обмеження на динамічні параметри системи; практичні обмеження також вносить фотодетектор. З аналізу експериментальних даних можна зробити висновок, що при ширині спектральної лінії оптичного джерела в межах 50 МГц і довжині магістралі до 50 км хроматична дисперсія в стандартному одномодовому волокні не призводить до значного збільшення фазового шуму. Шумові параметри і обмеження компонентів волоконно-ефірних систем, як електричних так і оптичних, необхідно враховувати при проектування безпроводових систем зв'язку.

В четвертому розділі запропоновано математичні моделі радіоканалу та шумів в ММД, в яких враховуються як інтерференційні завади, так і шуми, обмеження, пов'язані з гібридними оптоелектронними методами формування сигналів, враховуються ефекти молекулярного поглинання та перевипромінювання в атмосфері, ефекти відбиття та дифракції сигналів в міській забудові. Підходи до моделювання радіоканалів, завад і шумів для ММД можуть істотно відрізнятися від підходів до моделювання каналів на більш низьких частотах. Також для ММД хвиль характерна можливість вузькоспрямованої передачі. Тому для аналізу енергетичного бюджету радіосистем ММД пропонується квазіоптична модель конусоподібного випромінювання антени (рис. 6):

$$P_{\text{TX}} = P_{\text{RX}} \frac{4\pi d^2 L_{\text{atm}}(f_\text{c}, d)}{D_{\text{TX}} A_{\text{RX}}}, \quad (18)$$

де P_{RX} – потужність на вході приймальної антен, P_{TX} – потужність передавальної антени, $L_{atm}(f_\text{c}, d)$ – коефіцієнт згасання сигналу в атмосфері залежно від частоти несучої f_c, A_{RX} – ефективна площа приймальної антени, $D_{\text{TX}}(\alpha)$ – коефіцієнт спрямованої дії антени, $D_{\text{TX}} = 4\pi/\Omega = 2/\left(1-\cos(\alpha/2)\right)$, α – кут розкриття антени, d - відстань між передавачем і приймачем, параметр $4\pi r^2/D_{TX}(\alpha)$ визначає втрати сигналу, пов'язані з розбіжністю випромінювання.

Для ММД мобільних телекомунікацій 5G передбачаються малі розміри стільників для в міській забудові (30-150 м) внаслідок сильного поглинання хвиль ММД та поширення хвиль ММД в межах прямої видимості.

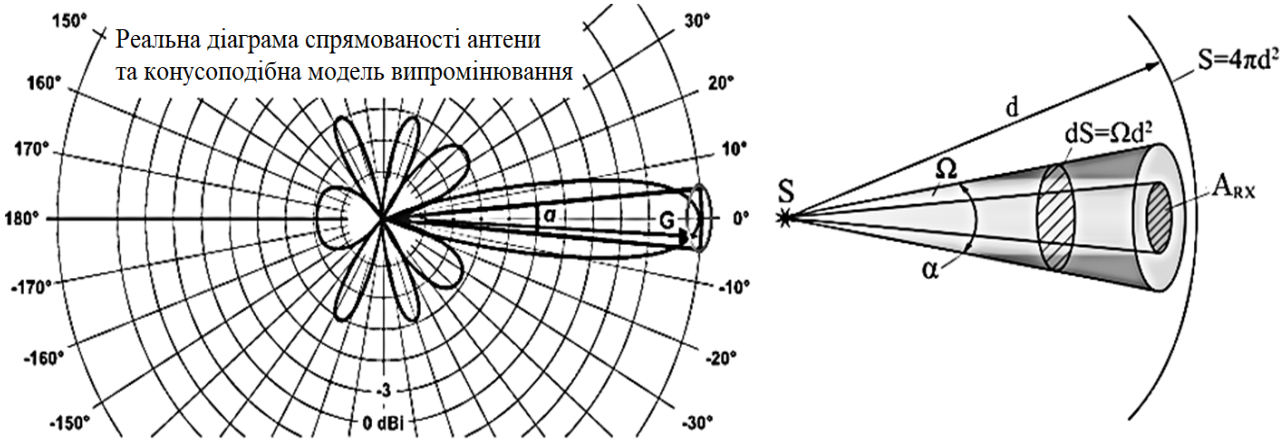


Рис. 6. Діаграма вузькоспрямованої антени та конусоподібна модель поширення випромінювання міліметрових хвиль

Багатопроменева модель поширення, в якій аналізується вплив ефектів відбиття і дифракцій на посилення сигналу для зон прямої видимості і зон поза прямої видимості, може сприяти точності та енергоефективності таких систем. Для зовнішніх будівельних матеріалів величина коефіцієнтів відбиття на частоті 28 ГГц досягає 0,896 (зареєстровані вимірювання в ММД відповідно до ліцензії США FCC 0040-EX-ML2012). Тому можна припустити, що виходячи з певних властивостей даного просторового радіоканалу ММД в заданих координатах (когерентність, розподіл електромагнітного поля в розкриві антени), поширення в заданих координатах забудови з відомими властивостями відбиваючих поверхонь, можливо з певною ймовірністю створити енергетичну модель покриття мережі. Математична модель такого енергетичного розподілу ґрунтується на методах універсальної теорії дифракції (англ. uniform theory of diffraction) та геометричної оптики. На рис.7 подані варіанти посилення сигналу ММД для міської забудови, які будуть аналізуватися нижче. У тіньових областях дифраговане поле забезпечує єдиний внесок в повне поле, а коефіцієнт посилення каналу, який визначається відношенням прийнятої та переданої потужності може бути обчислений за формулою:

$$\frac{P_{\mathrm{RX}}}{P_{\mathrm{TX}}} = \frac{D_{\mathrm{TX}}(\alpha) A_{\mathrm{RX}}}{4\pi} \frac{\left|D(\theta)\right|^2}{\cos\psi} \frac{1}{r_1 r_2 \left(r_1 + r_2\right)}, \tag{19}$$

де $\left|D(\theta)\right|$ – коефіцієнт дифракції, а кути θ, ψ та відстані r_1, r_2, що визначають дифракційне посилення, показані на рис.7,*в,г*.

В результаті сигнал, що надходить в приймальну антену, зазнає втрат, зумовлених такими факторами: розбіжністю випромінювання в атмосфері; згасанням в атмосфері для різних гідрометеорів в залежності від довжини хвилі; згасанням в зоні прямої видимості за рахунок проходження через різні матеріали (об'єкти), або блокування сигналу.

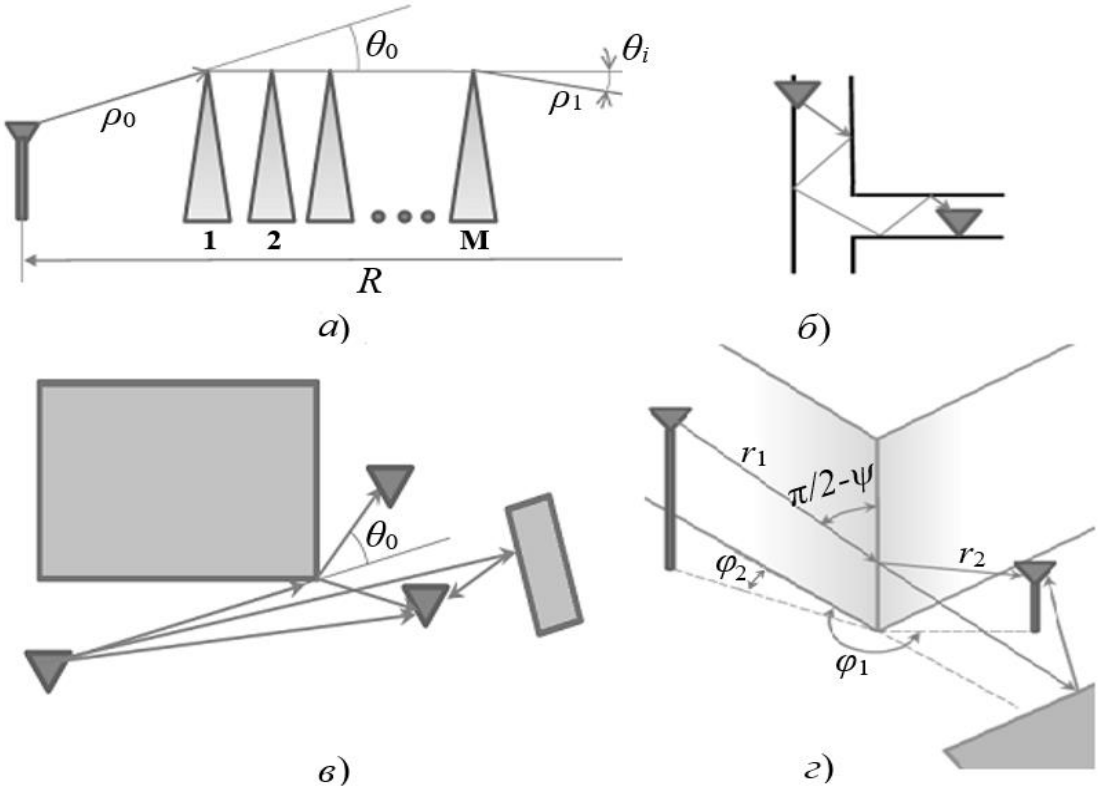


Рис. 7. Варіанти результуючого посилення сигналу ММД для міської забудови: *а)* множинна дифракція на клинах; *б)* множинне відбиття; *в)* посилення за рахунок дифракції; *г)* посилення за рахунок відбиття та дифракції на прямих кутах

Загальне посилення каналу, в разі нехтування перетворенням поляризації, є результатом посилення для кожного променю, пов'язаним в залежності від умов проходження, а саме з відбиттям (перша складова добутку), пропусканням (друга складова) і дифракційним підсиленням (третя складова):

$$\frac{P_{\mathrm{RX}}}{P_{\mathrm{TX}}} = \frac{D_{\mathrm{TX}}(\alpha)A_{\mathrm{RX}}}{4\pi r^2} \times \sum_j \left(\prod_m p_m\left(\theta_j\right) \frac{\left|\Gamma_m\left(\theta_{mj}\right)\right|^2}{\rho_m} \prod_n p_n\left(\theta_j\right) \left|\mathrm{T}_n\left(\theta_{nj}\right)\right|^2 \prod_l p_l\left(\theta_j\right) \frac{\left|D\left(\theta_{lj}\right)\right|^2}{\rho_l} \right), \quad (20)$$

де $\rho_m, \rho_l > 1$ – коефіцієнти, що визначають надлишок шляху променів через відбиття та дифракції; $p\left(\theta_j\right)$ – ймовірність відповідного процесу для певних умов; Г, Т, D – коефіцієнти відбиття, пропускання та дифракції відповідно.

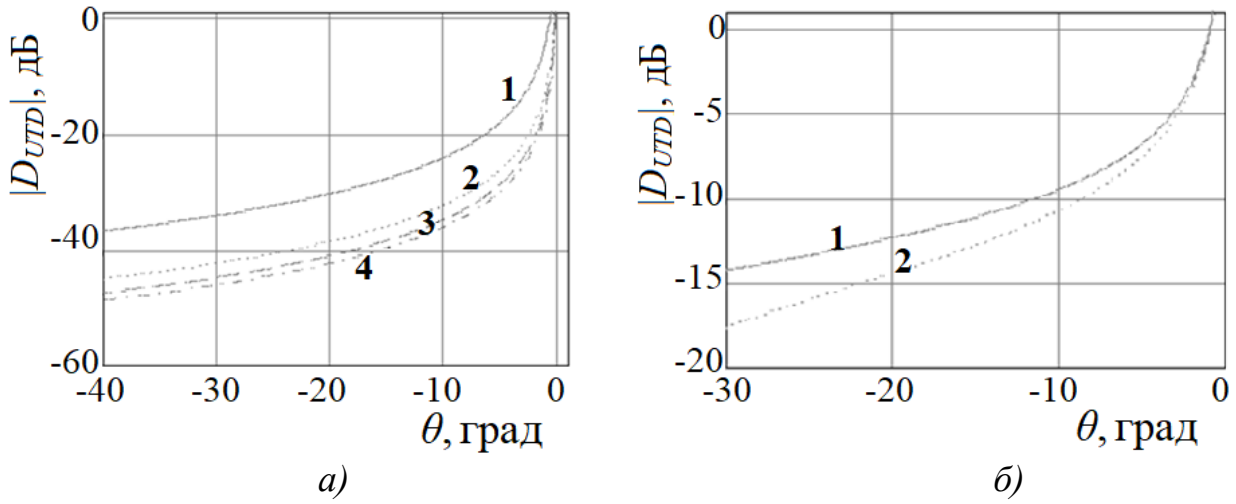
Для вузькоспрямованого випромінювання антен ММД і малої дальності передачі (для мобільних систем), *m*, *n* та *l* повинні приймати певні значення, що залежать від геометрії забудови.

Згідно універсальної теорії дифракції, коефіцієнт дифракції ММХ на прямокутному провідному клині зумовлений інтерференцією прямого і дифрагованого внесків на межі тіні:

$$D_{UTD}\left(\theta\right) = D_{GTD}\left(\theta\right) F\left(S\right), \quad (21)$$

$D_{GTD}(\theta)$ – коефіцієнт дифракції відповідно до геометричної теорії дифракції; $F(S)$ – функція переходу (пов'язана з інтегралами Френеля), $S = 2k\cos^2\psi \dfrac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)}\sin^2(\theta/2)$.

На рис. 8 показані розраховані залежності коефіцієнтів дифракції D_{UTD} та D_{GTD} відповідно для різних $\lambda, r_2, \varphi_2, \theta$.



а) *б)*

Рис. 8. Залежності коефіцієнтів дифракції для λ=10 мм: *а)* $D_{UTD}(\theta)$ при r_1 = 100 м та φ_2 =10 град: 1) r_2 = 5м, 2) r_2 =15 м, 3) r_2 =30 м, 4) r_2 =45 м; *б)* $D_{GTD}(\theta)$ при 1) для φ_2 =10 град, 2) для φ_2 =35 град

Для різних довжин хвиль міліметрового діапазону значення коефіцієнтів відбиття (для бетону), помножених на коефіцієнт Релея, наведені на рис.9.

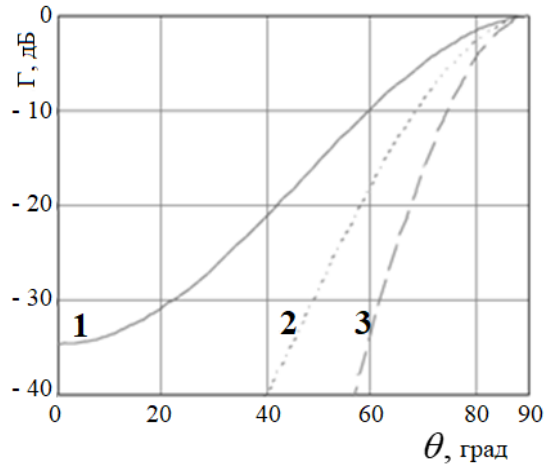


Рис. 9. Залежність коефіцієнта відбиття від кута падіння ММХ ТЕ поляризації: 1) λ = 10 мм; 2) λ = 5 мм; 3) λ = 3 мм

З порівняння коефіцієнтів підсилення за рахунок дифракцій (рис. 8) і за рахунок відбиття (рис. 9), видно, що більш істотним є внесок процесу відбиття. Однак сумарний внесок враховує багатопроменеву модель з множинними дифракціями та відбиттям для різних шляхів θ_j може призвести до істотного збільшення шляху. Для зон поза прямої видимості сумарний внесок відбиття і дифракції може призвести до підсилення близько 5 дБ (для певних умов). Рішення на основі підсилення за рахунок дифракцій і відбиття можуть бути використані при проектуванні мобільних систем ММД для міського

сценарію, для розрахунку зон підсилення корисного сигналу, що дозволить істотно підвищити енергетичну ефективність.

Для ММД для розрахунку відношення сигнал/шум запропоновано враховувати ефекти розсіювання за рахунок дифузного або множинного відбиття, молекулярного розсіювання і розсіювання сигналу на турбулентностях атмосфери. Тоді відношення сигнал/шум плюс інтерференційні завади (англ. SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio), що визначає якість сигналу, приймає форму:

$$SINR = \frac{P_{TX} D_{TX} A_{RX}}{4\pi d^2 \left(N_{int} + N_{TX} + N_{RX} \right) L_{atm}}, \qquad (22)$$

N_{TX} – потужність шуму джерела сигналу, яка включає в себе не тільки тепловий шум, а й інші компоненти, пов'язані з методом генерації сигналу; N_{RX} – втрати потужності сигналу в приймачі; N_{int} – потужність інтерференційних завад, яка включає: $N_{int} = N_K + N_M + N_{NLOS}$, де N_K – інтерференційні завади від інших каналів зв'язку; N_M – шум молекулярного поглинання; N_{NLOS} – зміни рівня сигналу, пов'язані з дифракцією і відбиттям від об'єктів міської забудови, L_{atm} – втрати, пов’язані з поглинанням сигналу в атмосфері.

Закономірності поширення радіохвиль ММД ще вивчаються - при взаємодії випромінювання з середовищем виникають не тільки процеси розсіювання, послаблення і деполяризації випромінювання, але й, наприклад, ефекти молекулярного поглинання з подальшим перевипромінюванням в атмосфері (рис.10).

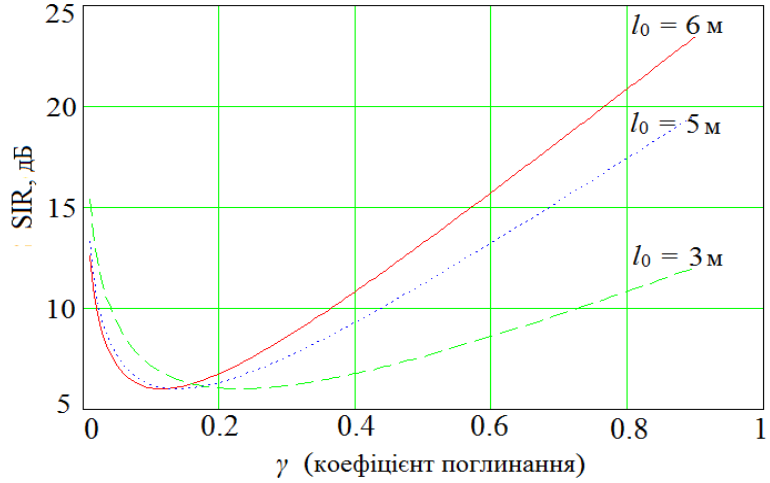


Рис.10. Розрахункові значення співвідношення сигнал/шум молекулярного поглинання з подальшим перевипромінюванням в атмосфері залежно від коефіцієнта поглинання γ для різних відстаней l_0 від передавача до приймача

Також показано, що шуми в волоконно-ефірних системах, пов’язані з оптоелектронним перетворенням та передачею сигналів ММД необхідно враховувати в енергетичних моделях. Шумові внески являють собою відносний шум інтенсивності, викликаний лазером, підсиленим шумом спонтанного

випромінювання через оптичні підсилювачі, тепловий і дробовим шум, що генерується в PD.Таким чином, незалежні внески шуму можна підсумувати як джерела струму, оскільки всі вони діють разом під час оптоелектронного перетворення.

Результати розрахунків значення сигнал/шум за формулами (8), (15) наведено на рис. 11.

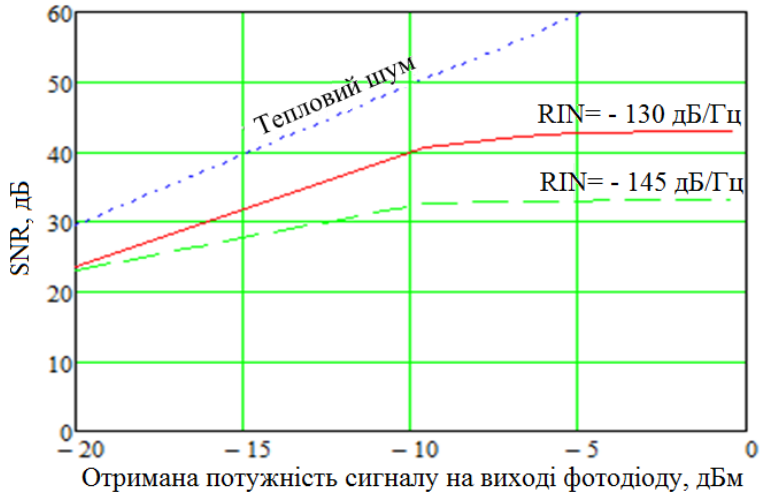


Рис. 11. Результати розрахунку значень SNR в результаті оптоелектронного перетворення сигналу ММД

У разі, коли фазовий шум є домінуючим в порівнянні з амплітудним шумом (або шумом інтенсивності), а також приймаючи умову низького коефіцієнта фазової модуляції, умову коли фазова флуктуація електричного сигналу $V_{\mathrm{RF}}(t)$ приймається як стаціонарний гауссовий випадковий процес з нульовим середнім, односмугова спектральна щільність потужності вихідного електричного сигналу $V_{\mathrm{RF,\,out}}(t)$ може бути представлена у вигляді:

$$S_{V,\mathrm{out}}(f) \cong \frac{k^2}{2}\left[1-(2n)^2 K_\varphi(0)\right]\delta(f-1nf_{\mathrm{RF}}) + \frac{k^2}{2}(2n)^2 S_\varphi(f-2nf_{\mathrm{RF}}) =$$
$$= \frac{k^2}{2}\left[1-(2n)^2 K_\varphi(0)\right]\delta(f-1nf_{\mathrm{RF}}) + \frac{k^2}{2}(2n)^2 \frac{2}{V_{\mathrm{m}}^2}\left[\frac{A}{|f-2nf_{\mathrm{RF}}|^2} + \frac{B}{|f-2nf_{\mathrm{RF}}|^3}\right], \quad (23)$$

де $K_\varphi(\tau)$ – автокореляційна функція для випадкового процесу $\varphi_{\mathrm{RF}}(t)$, $K_\varphi(\tau) = \langle \varphi_{\mathrm{RF}}(t+\tau)\varphi_{\mathrm{RF}}(t) \rangle$, τ – часовий зсув та $\langle\ \rangle$ представляє середнє по ансамблю. Приймаючи середню потужність сигналу $V_{\mathrm{RF,\,out}}(t)$ рівною $k^2/2$, спектральну щільність потужності фазових шумів вихідного електричного сигналу в одиночній бічній смузі можна виразити відповідно до (23):

$$L_{V,\mathrm{out}}(f_{\mathrm{m}}) = \frac{2S_{V,\mathrm{out}}(2nf_{\mathrm{RF}} + f_{\mathrm{m}})}{k^2} \cong (2n)^2 \frac{2}{V_{\mathrm{m}}^2}\left[\frac{A}{|f_{\mathrm{m}}|^2} + \frac{B}{|f_{\mathrm{m}}|^3}\right], \quad (24)$$

де f_m – частота відбудови від несучої f, A та B – коефіцієнти, що визначають рівень шуму.

З формули (24) видно, що щільність потужності фазових шумів вихідного генерованого електричного сигналу визначається тільки фазовим шумом сигналу електричного керуючого радіочастотного генератора та порядком множення частоти.

З проведеного аналізу експериментальних даних визначено, що при генерації сигналу 60 ГГц за технологією RoF для забезпечення швидкостей в декілька Гбіт/с значення для фазового шуму в одній бічній смузі повинні мати такі максимальні значення: -68 дБн/Гц, -84 дБн/ Гц, -100 дБн/Гц при відстроюванні частоти 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц відповідно.

На основі стохастичної геометрії проведено моделювання інтерференційних завад для стільникових мереж ММД (рис.12).

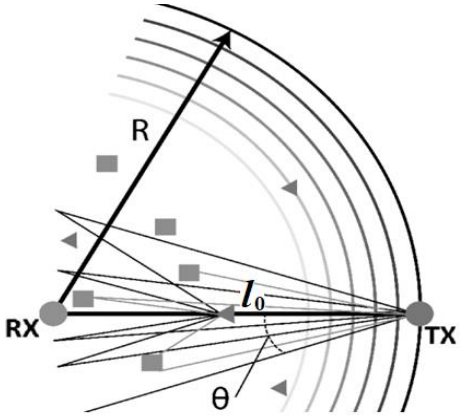


Рис. 12. Моделювання точкового розподілу Пуассона для стільника ММД: квадрати – блокування, трикутники – вузли, що вносять інтерференційний шум, кола – досліджувана пара приймач-передавач

Моделювання проводилось в круговому секторі з радіусом R для контрольної пари передавач-приймач в присутності N числа заважаючих джерел (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. Вважається, що еталонна пара передавач-приймач, відстань між якими l_0, не є частиною точкового процесу Пуассона і не заблокована.

Ефекти, пов'язані з поширенням сигналів в межах поза прямої видимості, наприклад, з ефектами відбиття (в меншій мірі дифракції), вимагають окремого вивчення. Також вважається, що ймовірність блокування для інтерферуючих вузлів не залежить від кута розкриву антени, а тільки від відстані та лінійного розміру блокування.

Сумарне значення інтерференційних завад визначається таким чином:

$$N_{\text{int}} = P_{\text{TX}} \frac{D_{\text{TX}} A_{\text{RX}}}{4\pi} \sum_{i=1}^{N} l_i^{-2} e^{-\gamma(f) l_i} = P_{\text{TX}} \frac{2/\left(1-\cos(\theta/2)\right) A_{\text{RX}}}{4\pi} \sum_{i=1}^{N} l_i^{-2} e^{-\gamma(f) l_i}, \qquad (25)$$

де N – число інтерферуючих вузлів, що впливають на приймач, l_i – відстань від інтерферуючого вузла до приймача, $\gamma(f)$ – коефіцієнт поглинання (абсорбції), що залежить від частоти несучої, θ – кут розкриву антени.

Для двомірної моделі середнє значення інтерференції в приймачі $E\left[N_{\text{int}}\right]$ може бути обчислено у відповідності з (25) наступним чином:

$$E\left[N_{\text{int}}\right] = P_{\text{TX}} \frac{A_{\text{RX}}}{2\pi\left(1-\cos(\theta/2)\right)} \int_0^R l^{-2} \exp(-\gamma l) p_l \left(1-p_b\right) 2\lambda\pi l dl$$

$$= P_{\text{TX}} \frac{A_{\text{RX}}}{2\pi\left(1-\cos(\theta/2)\right)} \int_0^R l^{-2} \exp(-\gamma l)\left[1-\exp(-l^2 \operatorname{tg}(\theta/2))\right]\left[1-\exp(-\lambda_b (l-r_b) r_b)\right] 2\lambda\pi l dl \qquad (26)$$

$$= \left|\theta \le 10^{\circ}\right| = P_{\text{TX}} \frac{4A_{\text{RX}}}{\pi\theta^2}\left[E_i(r_b,\gamma,\lambda,\lambda_b,\theta) - E_i(R,\gamma,\lambda,\lambda_b,\theta)\right],$$

$E_i(x)$ – інтегральна показова функція, p_b –ймовірність блокування сигналу, λ_b – щільність розміщення блокувань, p_l – ймовірність, що приймач знаходиться всередині основного пелюстка θ активного передавача, r_b – радіус інтерферуючих вузлів кругової форми.

Відношення сигнал /інтерференційні завади:

$$SIR = \frac{P_{\text{RX}}}{E\left[N_{\text{int}}\right]} = \frac{l_0^{-2} e^{l_0 \gamma(f)}}{\left[E_i(r_b,\gamma,\lambda,\lambda_b,\theta) - E_i(R,\gamma,\lambda,\lambda_b,\theta)\right]}. \qquad (27)$$

Для γ=0.1, λ=0.01, λ_b =0.01, r_b=0.3 м, R=100 м на рис.13 представлено розрахункове значення SIR для різних значень θ і l_0.

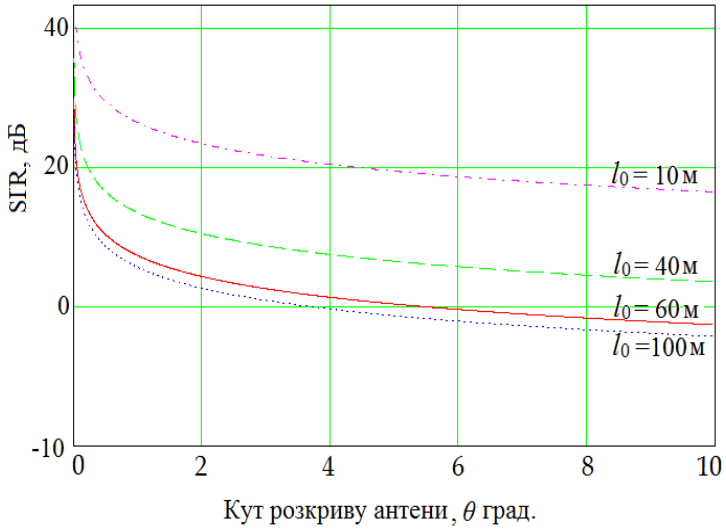


Рис.13. Результати математичного моделювання відношення сигнал/інтерференційні завади для стільникових мереж ММД

Як видно з рис.13 вузькоспрямоване випромінювання в ММД для радіоканалу може бути використано для збільшення співвідношення SIR. З

порівняння графіків на рис.8–11,13 можна зробити висновок, що значення інтерференційних завад від інших каналів зв'язку, шумів генеруючих та підсилюючих пристроїв, шумів молекулярного поглинання, підсилення або шуму сигналів за рахунок відбиття (в меншій мірі дифракції) необхідно враховувати в моделях енергетичного покриття мереж ММД.

Результати вищенаведених розрахунків SIR і SNR, підходи до моделювання радіоканалів можуть 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.

В **п’ятому розділі** проведено аналіз обмежень ефективності інтеграції гібридних оптоелектронних технологій в телекомунікаційних системах міліметрового діапазону хвиль та методів їх компенсацій. Як вже було проаналізовано в третьому розділі, метод оптичного гетеродинування оптичних несучих від двох незалежних лазерів дозволяє отримати швидкості 0,5-1 Гбіт/с на несучої 100 ГГц. Однак такий метод також має недоліки щодо складної структури і меншого значення SNR, оскільки фази оптичних хвиль не корелюються, що буде перенесено в згенерований сигнал ММД і призведе до сигналу з високим фазовим шумом. Переваги оптоелектронних методів генерації сигналу ММД на основі ММЦ (метод зовнішньої модуляції інтенсивності) полягають в тому, що дві оптичні піднесучі від одного лазерного джерела мають однакову частоту і фазу, що ефективно пригнічує фазовий шум. Також амплітудні і фазові алгоритми попереднього кодування можуть змінюватися для різних форматів модуляції, включаючи QPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM, 128QAM. З проведеного аналізу експериментальних даних, для волоконно-ефірних систем із зовнішньою модуляцією сигналу отримані швидкості 100 Гбіт/с в діапазоні 75-100 ГГц. Однак методи генерації ММХ на основі ММЦ мають наступні недоліки: обмеження конвертації до 160 ГГц у волоконно-оптичних лініях, низький рівень потужності гармонік, що при посилені погіршує відношення сигнал/шум, регулювання частоти не є гнучким через використання попереднього кодування передавача за амплітудою і фазою (рис.14).

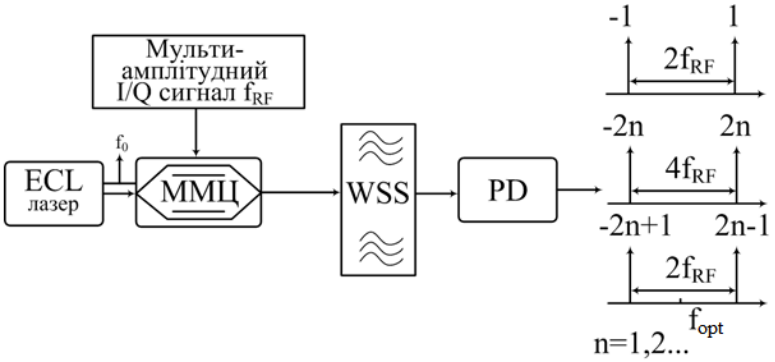


Рис.14. Принципова гібридна оптоелектронна система формування квадратурно модульованого сигналу міліметрового діапазону з можливістю множення частоти f_{RF} сигнал

Генерація векторного сигналу ММД може здійснюватися одним ММЦ в комбінації з оптичним селективним перемикачем довжин хвиль (WSS), з якого селективним чином обираються бічні смуги необхідного порядку для гетеродинного биття.

Важливими, а можливо й основними, компонентами, від яких залежить ефективність та обмеження телекомунікаційних гібридних волоконно-ефірних систем, є модулятори інтенсивності оптичного випромінювання та фотодетектори (фотодіоди). Фізичні обмеження для фотодетекторів пов'язані з обмеженою смугою пропускання та нелінійними характеристиками відгуку. З проведеного аналізу експериментальних досліджень для *p*-*i*-*n*-фотодетектору обмеження смуги пропускання складає 60-70 ГГц з вихідною потужністю до 20 дБм. Для швидкодіючих UTC-PD діодів (перенесення сигналу тільки електронами) методом гетеродину оптичних несучих від незв'язаних (вільно працюючих) лазерів з зовнішнім резонатором (ECL) на частоті 120 ГГц вихідна потужність для UTC-PD діодів становила 0 дБм (1 мВт). Для UTC-PD фотодіодів, що працюють в смузі 300 ГГц, на основі гетеродинування оптичних несучих при використанні лазерів, що працюють в режимі синхронізації мод, потужність безпроводового радіосигналу для досягнення гігабітних швидкостей обмежується значенням 30 дБм.

Для компенсації обмежень, пов'язаних з граничною частотою модуляції радіосигналів та обмеженням пропускної здатності та вихідної потужності фотодетекторів та модуляторів, запропоновано об'єднання технологій оптичного гетеродину і зовнішньої модуляції з використанням попереднього кодування передавача. В цьому випадку радіочастотний сигнал керуючого генератора на частоті f_{RF} переносить дані модуляції QAM з множиною амплітуд на двохелектродний модулятор ММЦ, якій модулює вихідний сигнал лазеру на частоті f_{opt}. Для ММЦ, зміщеного в бік максимуму коефіцієнту пропускання, вихідний сигнал може бути виражений у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{out}}(t) &= E_0\left(i\omega_{\mathrm{opt}}t\right)\exp\left[im\cos\left(\omega_{\mathrm{RF}}t+\varphi_{\mathrm{RF}}(t)\right)\right]+ \\ &+E_0\exp\left(i\omega_{\mathrm{opt}}t\right)\exp\left[-im\cos\left(\omega_{\mathrm{RF}}t\right)+\varphi_{\mathrm{RF}}(t)\right]= \\ &= E_0\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(m)\exp\left[i\left(\omega_{\mathrm{opt}}+2n\omega_{\mathrm{RF}}\right)t+i2n\varphi_{\mathrm{RF}}(t)\right], \end{aligned} \tag{28}$$

де $m=\left(\pi/2V_{\pi}\right)\cdot V_{\mathrm{m}}\cos\left[\varphi_{\mathrm{RF}}(t)\right]$, V_m та $\varphi_{\mathrm{RF}}(t)$ – амплітуда та фаза керуючого радіочастотного електричного сигналу на частоті f_{RF} ($\omega_{\mathrm{RF}}=2\pi f_{\mathrm{RF}}$).

Коли селективний перемикач WSS використовується для вибору двох оптичних піднесучих порядку $2n$ та рознесення частот $4nf_{\mathrm{RF}}$ ($n=1, 2\ldots$), на виході WSS сигнал може бути виражений у вигляді:

$$E_{\text{WSS}} = 2E_0 J_{2n}(m)\begin{bmatrix} \exp\left(i\left(\omega_{\text{opt}} + 2n\omega_{\text{RF}}\right)t + i2n\varphi_{\text{RF}}(t)\right) \\ +\exp\left(i\left(\omega_{\text{opt}} - 2n\omega_{\text{RF}}\right)t - i2n\varphi_{\text{RF}}(t)\right) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

В результаті оптичного гетеродинування на виході фотодіоду основна складова струму, що генерується приймає вигляд:

$$I_{\text{RF}} = \frac{1}{2}\Re E_0^2 J_{2n}^2(m)\cos\left(4n\omega_{\text{RF}}t + 4n\varphi_{\text{RF}}(t)\right), \quad n = 1, 2... \quad (30)$$

Аналогічним чином знайдено в п'ятому розділі складові вихідного струму для двохелектродного ММЦ, якій зміщений в своєї мінімальної точці передачі. Із знайдених виразів для форми струму на виході фотодіоду випливає, що амплітуда та фаза модульованого вихідного електричного сигналу передавача мають задовольняти вимогам:

$$A_{\text{TX}} \propto J_n^2\left\{\left(\pi/2V_\pi\right)\cdot V_{\text{m}}\cos\left[\varphi(t)\right]\right\}, \quad \varphi_{\text{TX}} \propto 2n\varphi_{\text{RF}}(t), \quad (31)$$

де n – порядок обраних оптичних піднесучих.

З (31) видно, що амплітуда і фаза радіочастотного сигналу можуть бути попередньо закодовані для необхідних даних багатоамплітудної QAM модуляції. Значення A_{TX} *і* ϕ_{TX} являють собою попередньо кодовану амплітуду і фазу, які можуть бути призначені управляючому радіочастотному сигналу.

На рис. 15 представлена запропонована схема реалізації гібридної волоконно-ефірної архітектури телекомунікаційної мережі. В такій мережевій архітектурі оптичний квадратурно-модульований сигнал з використанням поляризаційного мультиплексування (PDM-QPSK(QAM)) в основній смузі частот $\lambda_{\text{opt},1}$ (лазер 1) після волоконно-оптичної передачі по одномодовому волокну може бути отриманий центрі обробки даних (рис.15,*а*). Потім він піддається дистанційному оптичному гетеродинуванню з несучою (ECL лазер 2) на базовій станції передавача (рис.15,б), щоб сформувати безпроводовий сигнал ММД, модульований в форматі PDM-QPSK(QAM). Сигнали з підвищеним перетворенням по частоті одночасно відправляються у вільний простір і приймаються двома відповідними рупорними антенами (MIMO 2 × 2) з використанням поляризаційного мультиплексування (рис.15,*в*). У безпроводовому приймачі ММД (рис.15,*г*) є двоступеневе перетворення з пониженням частоти. В першому етапі компоненти поляризації X і Y відповідно перетворюються з пониженням частоти до нижчої проміжної частоти, потім за допомогою збалансованого змішувача і синусоїдального радіочастотного (RF) сигналу несуча частота відновлюється. Після передачі сигналу ММД через безпроводовий канал за технологією MIMO, передані дані можуть бути відновлені знову методом оптичного гетродинування, і передані через оптоволокно, наприклад, на іншу базову станцію. Такі переваги зможуть сприяти реалізації безшовної інтеграції складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж, в яких можливо перелаштовувати робочу частоту для різних мереж HetNet.

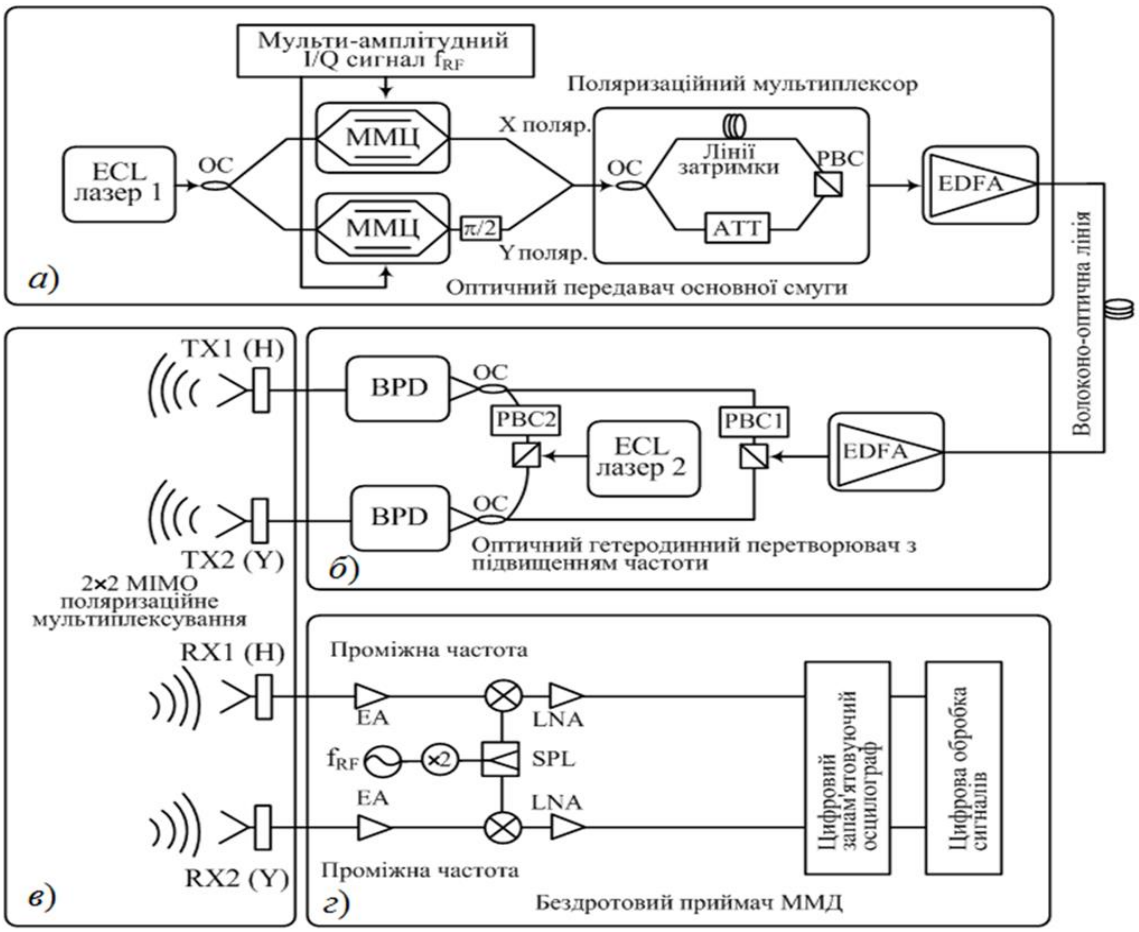


Рис. 15. Принципова схема реалізації гібридної волоконно-ефірної архітектури мережі в ММД з використанням дистанційного гетеродинування, MIMO технології з поляризаційним мультиплексуванням: LNA – малошумовий електричний підсилювач, EA - вузькосмуговий електричний підсилювач, СО - волоконно-оптичний відгалуджувач, PBC - поляризаційний мультиплексор, ATT - оптичний атенюатор (для балансу потужності двох відгалужень), EDFA – ербієвий волоконний підсилювач, SPL - дільник потужності, BPD - балансний фотодетектор

В тому числі для різних піддіапазонів ММД, включаючи перспективні смуги 18-27 ГГц, 33-50 ГГц, 57-64 ГГц, 71-76 ГГц, 81-86 ГГц, з високою пропускною здатністю порівняну зі швидкістю в волоконно-оптичних мережах, а також покращити шумові характеристики та спектральну ефективність багатоканальних систем передачі інформації.

Для ефективності застосування інтеграції швидкодіючих фотодетекторів в ФАР, для ММД необхідно моделювання архітектури формування променя з урахуванням шумових характеристик антени передавального модуля. На рис. 16 наведено результати розрахунків значення SNR для різних варіантів волоконно-оптичної архітектури ФАР: а) використання одномодового лазера, б) багаторежимного лазера, в) кілька генераторів ММХ з локальним формуванням променя, г) формування сигналу за допомогою оптичного гетеродину та балансного фотодетектору.

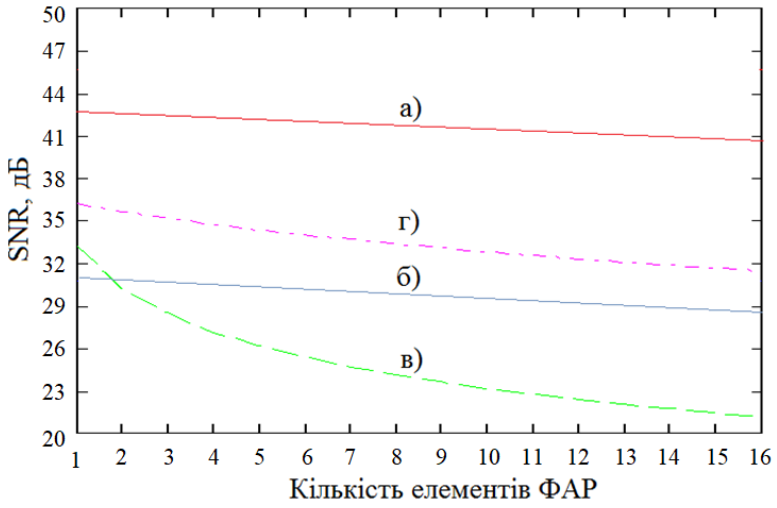


Рис. 16. Залежність співвідношення сигнал/шум від кількості випромінюючих елементів ФАР для різних архітектур формування випромінювання

Для наступних параметрів: стандартний лазер з розподіленим зворотним зв'язком (DFB), пороговий струм 15 мА (для стандартного лазера з розподіленою зворотним зв'язком), ширина лінії 1 МГц, RIN -145 дБ/Гц, і потужність випромінювання 10 дБм при 100 мА; коефіцієнт шуму підсилювача і підсилення типового ербієвого підсилювача складають 4 дБ і 20 дБ відповідно, чутливість фотодіода 0,6 А/Вт, спектральна щільність теплового шуму 10^{-12} $А^2$/Гц, $B_{el} = 10$ ГГц, $B_{opt} = 1$ МГц, $R_L = 50$ Ом.

За результатами розрахунків можливо зробити висновок, що для ефективності інтеграції оптоелектронних технологій в телекомунікаційних мережах в ММД, зокрема, із застосуванням інтеграції швидкодіючих фотодетекторів в ФАР, необхідно враховувати шумові характеристики антени передавального модуля в залежності від архітектури формування променя.

В **шостому розділі** наведено загальні рекомендації до моделювання, підвищення ефективності та напрямків подальших досліджень телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні. Сформовано методи вирішення задач збільшення пропускної спроможності телекомунікаційних систем. Показано, що доступна смуга пропускання визначається не тільки доступним спектром, але і пропускною здатністю обладнання. Фазові спотворення, нелінійність характеристик приймально-передавального обладнання можуть, наприклад, обмежити практичне використання спектрально-ефективних модуляцій на несучих ММД. Підходи до моделювання систем в ММД повинні відрізнятися від моделей низькочастотних діапазонів. Однак сучасні підходи до моделювання систем в ММД, що проаналізовано (показані на рис.17), часто не враховують фізичні особливості поширення та формування сигналів ММД.

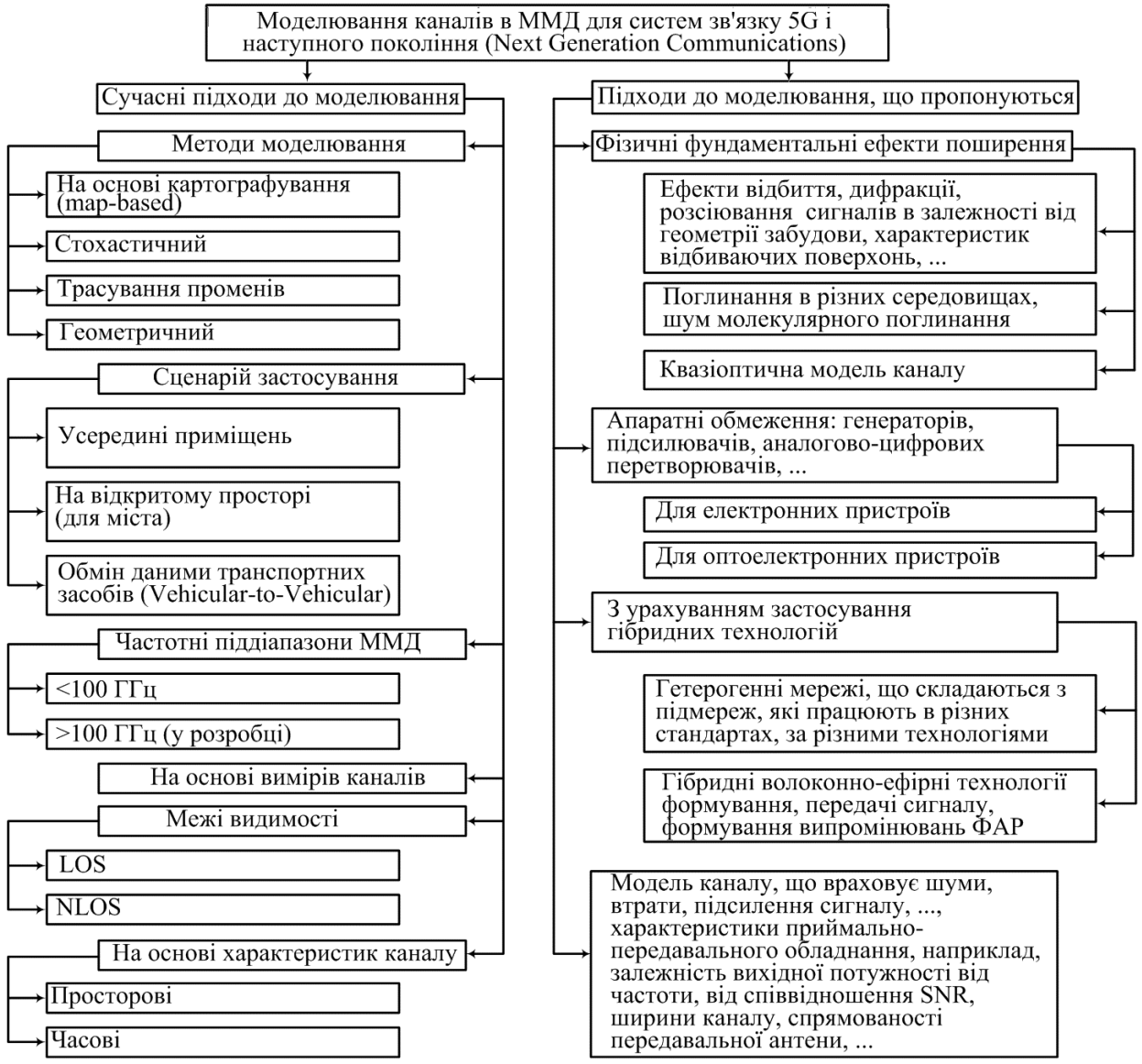


Рис.17. Сучасні підходи до моделювання радіоканалів у ММД та такі, що пропонуються на основі фізичних ефектів поширення, апаратних обмежень, з урахуванням гібридних технологій

Підходи до моделювання радіоканалів у ММД, що запропоновано на рис.17, можуть сприяти більш ефективному використанню спектрального ресурсу та продуктивності телекомунікаційних систем. Моделювання каналу для 5G триваючий процес, до того ж для телекомунікаційних систем 5G і наступних поколінь пропонуються інші додатки як, сенсорні мережі, системи безпеки, радіолокація, піринговий зв'язок (P2P), міжмашинна взаємодія (M2M) та інші спеціальні додатки, які можуть бути реалізовані на основі унікальних властивостей хвиль ММД та терагерцового діапазона. Такі додатки можуть ще більше ускладнити проектування, розрахунок і методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем.

Методами компенсацій обмежень застосування ММД є формування вузькоспрямованого випромінювання, стільників малих розмірів, гібридних волоконно-ефірних технологій, оптоелектронних методів формування діаграм

спрямованості ФАР, що засновані на дослідженнях шумів (особливо фазового шуму) і дискретності перебудови фази, частоти.

В якості компенсацій обмежень застосування ММД в телекомунікаційних системах велике значення мають використання широкосмугових методів, таких як мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) і множинний доступ з кодовим поділом каналів (multi-carrier code division multiple access, MC-CDMA). Однак OFDM страждає від високого PAPR і залежності від фазового шуму, що призводить до застосування не ефективних лінійних підсилювачів потужності в ММД, які, таким чином, погіршують загальні характеристики системи.

Альтернативний метод полягає у виборі модуляції з однією несучою (англ. Single carrier modulation, SCM) в поєднанні з вирівнюванням в частотної області (англ. Single-carrier frequency domain equalization, SC-FDE).

Перспективним рішенням може бути розрахована на багато користувачів система MIMO (MU-MIMO), мультиплексування з просторовим розділенням (MIMO-SDM), узагальнене мультиплексування з частотним розподілом (англ. generalized frequency division multiplexing, GFDM), змішані види мультиплексування, наприклад, мультиплексування з ортогональним частотно-часовим розподілом (англ. orthogonal time-frequency-space, OTFS), метод неортогонального множинного доступу (англ., non-orthogonal multiple access, NOMA).

Для методів модуляції сигналів ММД можливим ефективним рішенням є менш складні види, такі як частотна маніпуляція (англ. frequency shift keying, FSK), амплітудна маніпуляція (англ. Amplitude shift keying, ASK), двохпозиційна маніпуляція (англ. onoff keying, OOK) і фазово-імпульсна модуляція (англ. pulse position modulation, PPM). Враховуючи ефекти поглинання (завади перевипромінювання в атмосфері) також для частот вище 100 ГГц пропонуються фемтосекундні імпульсні методи модуляції.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано вирішення актуальної науково-прикладної проблеми реалізації телекомунікаційних систем в ММД хвиль та методів підвищення їх ефективності шляхом застосування гібридних технологій. Отримані в дисертаційній роботі результати носять самостійне значення й можуть бути використані для проектування, планування складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж.

В дисертаційній роботі отримано такі теоретичні та науково-практичні результати:

1. Проаналізовано сучасні емпіричні методи та підходи до математичного моделювання радіосистем 5G в ММД хвиль та гібридні технології, що сприяють реалізації та підвищенню ефективності телекомунікаційних систем в ММД.

2. Запропоновано концепцію моделювання радіоканалів та систем в ММД, що ґрунтується на фундаментальних фізичних підходах з урахуванням характеристик і обмежень приймально-передавального обладнання, в тому

числі, що працює на основі гібридних технологій із забезпеченням безшовної інтеграції, характеристик поширення ММХ всередині приміщень та у відкритих середовищах.

3. Запропоновано застосування волоконно-ефірних та гетерогенних технологій, стратосферних комплексів зв’язку, оптоелектронних методів формування та передавання радіосигналів для вирішення задач підвищення пропускної здатності, доступності та дальності зв'язку в телекомунікаційних системах ММД.

4. Вперше створений метод для енергетичного розрахунку радіоканалу в ММД хвиль із застосування квазіоптичної моделі, в якій враховується розбіжність випромінювання, множинні відбиття та дифракції, ефекти поглинання в різних середовищах, що, дозволяє збільшити дальність зв'язку та точність розрахунку рівня сигналу в точці прийому для зон прямої та поза прямої видимості. Сумарний внесок ефектів відбиття та дифракції може призвести до підсилення сигналу ММД до 5 дБ, підсилення із застосуванням штучних відбивачів досягає 25 дБ. Точність розрахунків із застосуванням квазіоптичної моделі радіоканалу збільшується на 10 дБ.

5. Удосконалено методику розрахунку шумів в каналі ММД, які пов’язані з шумами молекулярного поглинання та перевипромінювання в атмосфері, інтерференційними ефектами, шумами, пов’язаними з оптоелектронними методами генерації та модуляції радіосигналу, що дозволяє збільшувати точність розрахунку бюджету каналу. Показано, що значення відношення сигнал/шум для оптоелектронного методу формування вузькоспрямованого випромінювання в ФАР для ММД приймає значення нижче 20 дБ. Розроблений метод дозволяє збільшити достовірність розрахунків втрат в каналі ММД на 17 %.

6. Вперше запропоновано архітектуру волоконно-ефірної мережі в ММД хвиль, в якій об’єднано технології дистанційного гетеродинування, поляризаційного та спектрального мультиплексування, інтегрованого з методом MIMO, зовнішньої модуляції з можливістю множення частоти, відновлення оптичного сигналу з радіосигналу, переданого через безпроводовий канал, що дозволяє знизити вимоги до пропускної здатності для оптичних та електричних компонентів.

7. Вперше розроблено методику підвищення ефективності телекомунікаційних систем у ММД хвиль із застосуванням гібридних технологій, вдосконаленної енергетичної моделі радіоканалу, в якій враховуються обмежуючі та динамічні характеристики передавального модуля, інтегрованої волоконно-ефірної архітектури мережі, для якої проаналізовано узгодження оптимальних форматів модуляції, мультиплексування та конфігурації. Такі переваги зможуть сприяти реалізації безшовної інтеграції складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж з можливістю адаптації під різні вимоги, перелаштування робочої частоти для різних мереж HetNet, включаючи перспективні смуги ММД 18-27 ГГц, 33-50 ГГц, 57-64 ГГц, 71-76 ГГц, 81-86 ГГц, з високою пропускною здатністю порівняну зі швидкістю у волоконно-оптичних мережах.

8. Розроблено рекомендації до напрямків подальших досліджень в області моделювання, підвищення ефективності телекомунікаційних систем в ММД. Показано, що подальші дослідження в області моделювання каналів зв'язку ММД повинні ґрунтуватись на основі фізичних фундаментальних підходів, дослідження динамічних і шумових характеристик гібридних технологій, пов'язаних з реалізацією телекомунікаційних технологій в ММД.

Розроблені методи, методики, моделі формують сукупність методів побудови та підвищення ефективності перспективних телекомунікаційних систем на основі гібридних технологій в міліметровому діапазоні хвиль, що визначено метою дисертаційного дослідження. Таким чином, поставлені наукові задачі вирішено в повному обсязі, мету дослідження досягнуто.

Представлені дослідження, розроблені методи, методики охоплюють новітні технологічні рішення, сприяють підвищенню пропускної спроможності, енергетичної ефективності телекомунікаційних систем, освоєнню більш високих частотних діапазонів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Кременецкая Я.А. Можливості розширення зони обслуговування та радіочастотного ресурсу в стратосферних системах зв'язку / В.А. Дружинін, Я.А. Кременецкая, О.Р. Жукова // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – № 2. – С. 23-26.

2. Кременецкая Я. Использование миллиметрового диапазона в стратосферных системах связи / В. Дружинин, И. Пархомей, Я. Кременецкая, В. Паюн, А. Ярыч // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2016. – № 2(29). – С. 60-77.

3. Кременецкая Я.А. Влияние конфигурации умножительно-усилительных схем на основе микрогенераторов миллиметрового диапазона на возможность получения терагерцового излучения // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – № 4. – С. 25-35.

4. Кременецька Я.А. Підвищення енергетичної ефективності систем міліметрового діапазону методом створення зон підсилення сигналу внаслідок дифракцій та відбивань / Я.А. Кременецька, Н.В. Градобоєва, С.В. Морозова // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – № 3. – С. 88-97.

5. Кременецкая Я.А. Физические аспекты моделирования радиоканала и шумов в миллиметровом диапазоне / Я.А. Кременецкая, Е.Р. Жукова, Н.В. Градобоева, Д.А. Любас., Б.В. Саенко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 2(59). – С. 60-71.

6. Кременецька Я.А. Моделювання інтерференційних завад в стільникових системах зв'язку міліметрового діапазону / Я.А. Кременецька, О.Б Дудка, С.В. Морозова, В.І. Корсун // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 3(60). – С. 36-44.

7. Кременецька Я.А. Застосування інтеграції гібридних оптоелектронних технологій в телекомунікаціях наступного покоління / Я.А. Кременецька, С.Ю. Марков, С.В. Морозова, Д.М. Морозов // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 4(61). – С. 20-31.

8. Kremenetskaya Y. Comparative analysis of interference, noise and loss in the millimeter wave mobile communications / Y. Kremenetskaya, S. Markov // Computational problems of electrical engineering. – 2018. – № 1. – P. 18-25.

9. Кременецька Я.А. Перспективи, переваги та основні принципи волоконно-ефірних технологій для телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль / Я. А. Кременецька, С. В. Козелков, Ю. В. Мельник // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – Вип. 3 (55). – С. 161-165.

10. Кременецька Я.А. Аналіз обмежуючих та компнесуючих факторів при розрахунку енергетичної ефективності радіосистем в міліметровому діапазоні / Я.А. Кременецька, С.Ю. Марков Н.В., Градобоєва, Є.М. Харченко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2019. – № 1(62). – С. 12-21.

11. Перспективи застосування радіофотонних технологій для мобільних телекомунікацій в міліметровому діапазоні Р.Є. Гребеля, І.О. Гнатишин, М.С. Пилипенко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2019. – № 3(55). – С. 86-92.

12. Кременецкая Я.А. Моделювання безпроводового радіоканалу в міліметровому діапазоні з урахуванням ефектів відбиття та розсіювання / Я.А. Кременецька, Ю.В. Мельник, С.Ю. Марков // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2020. – № 1 (66). – С. 152-160.

Статті у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК України

13. Кременецкая Я.А. Цифровое телевидение DVB-H для мобильных сетей третьего и четвертого поколения в Украине // Зв'язок. – 2011. – № 2. – С. 9–12.

14. Кременецька Я.А. Фізичні обмеження в мікро-/наноелектроніці та їхній вплив на розвиток інформаційних технологій // Вісник ДУІКТ. – 2012. – № 4(10). – С. 100-103.

15. Кременецкая Я.А. Оптроны на основе CdP2 / В.О. Зуев, Я.А. Кременецкая, Л.М. Горыня // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2012. – № 2. – С. 21-24.

16. Кременецька Я.А. Сучасні тенденції розвитку джерел міліметрового і субміліметрового діапазонів для перспективних систем зв'язку // Вісник ДУІКТ. – 2013. – № 2. – С. 94-97.

17. Кременецька Я.А. Фотодіоди з бар'єром Шотткі на основі CdP2 / В.А. Зуєв, Я.А. Кременецька, Л.М. Гориня // Вісник ДУІКТ. – 2013. – № 2. - С. 91-93.

18. Кременецька Я.А. Використання ефектів сильних полів в нанорозмірних діодних структурах // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 1. – С. 37-41.

19. Кременецька Я.А. Субміліметровий діапазон і новітні досягнення на базі нанотехнологій / Манько О.О., Я.А. Кременецька, С.В. Морозова // Зв'язок. – 2015. – № 2. – С. 44-50.

20. Кременецька Я.А. Аналіз можливостей підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних систем із використанням міліметрового діапазону хвиль / В.А. Дружинін, Я.А. Кременецька, О.Р. Жукова // Зв'язок. – 2016. – № 5(123). – С. 53-55.

21. Кременецька Я.А. Сучасний стан та перспективи розвитку стратосферних систем зв'язку / В.А. Дружинін, Я.А. Кременецька, О.Р. Жукова // Зв'язок. − 2016. − № 3(121). − С. 12-18.

22. Kremenetskaya Y.A. Hybrid technology for radio systems the millimeter and terahertz range implementing / Y.A. Kremenetskaya, E. R. Zhukova., S.V. Morozova // Зв'язок. – 2017. – № 2 (126). – С. 50-54.

23. Кременецька Я.А. Особливості формування сигналів міліметрового та терагерцового діапазонів для радіофотонних систем зв'язку / Я.А. Кременецька, Г.С. Фелінський, Ю.В. Мельник, Є.О. Бондаренко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2017. – № 3(47). – С. 50-63.

24. Кременецька Я.А. Моделювання радіоканалу зв'язку міліметрового діапазону хвиль з використанням технології ROF / Я.А. Кременецька, Ю.В. Мельник Ю.В., С.Ю. Марков, Н.В. Градобоєва // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2018. – № 1. – С. 41-50.

25. Кременецька Я.А. Волоконно-ефірна архітектура телекомунікаційних мереж в міліметровому діапазоні з дистанційним гетеродинуванням // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2019. – № 2(54). – С. 31-36

26. Kremenetskaya Y.A. Approaches to modeling the channel of millimeter range for mobile communication systems // Зв'язок. − 2019. − № 6. − С. 24-29.

27. Кременецька Я.А. Телекомунікаційні технології міліметрового діапазону, що охоплюють міждисциплінарні галузі, зокрема розроблення моніторингу здоров'я / Я.А. Кременецька, А.О. Макаренко, В.І. Кравченко, С.В. Морозова // Зв'язок. − 2020. − № 2. − С. 62-67.

Матеріали і тези доповідей на конференціях

1. Кременецька Я.А. Перспективні технології зв'язку на основі міліметрового і субміліметрового діапазону // Матеріали VI наукової конференції ДУІКТ «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті». – 05-06 листопада. – 2009. – С. 101-102.

2. Кременецкая Я.А. Развитие радиотехнических систем связи с использованием сверхширокополосных сигналов // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології». – 10-14 жовтня. – 2011. –С. 199-201.

3. Кременецька Я.А. Новітні технології в інфокомунікаціях та фізичні принципи їх функціонування / Я.А. Кременецька, Р.А. Редько, С.В. Морозова // Матеріали IX наукової конференції ДУІКТ «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті». – 22-23 листопада. – 2012. – С. 137-139.

4. Кременецька Я.А. Особливості та перспективи впровадження радіосистем міліметрового та субміліметрового діапазонів в телекомунікаціях /

Я.А. Кременецька, С.В. Морозова // V Міжнародна науково-практична конференція «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє». – 29-30 жовтня. – 2015. – С. 47-50.

5. Кременецкая Я.А. Фундаментальные подходы к освоению миллиметрового диапазона для реализации пятого 5G и следующих поколений беспроводных систем / В.А. Дружинин, Я.А. Кременецкая, Е.Р. Жукова, С.В. Морозова // Региональный семинар МСЭ «Тенденции развития конвергентних сетей: решения пост-NGN, 4G и 5G». – 17-18 листопада. – 2016. – С. 39-41.

6. Kremenetskaya Y.A. Analysis of the radio links millimeter range energy budget / Y.A. Kremenetskaya, E.R. Zhukova, S.V. Morozova // Міжнародна технічна конференція КПІ «РТПСАС-2017». – 20-26 березня. – С.44-46.

7. Kremenetskaya Y.A. Methods to improve the millimeter range system based on hybrid technology throughput analysis / Y.A. Kremenetskaya, E.R. Zhukova // Eleventh International Scientific Conference «Modern challenges in telecommunications». – 18-21 April. – 2017. – P. 156-158.

8. 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 // The IEEE XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'17). – Kyiv, Ukraine, – 24-27 May, – 2017. – P. 395-398. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972673.

9. Kremenetskaya Y.A. Approaches to the evaluation of spectral and energy efficiency Millimeter Wave Cellular Networks / Y.A. Kremenetskaya, E.R. Zhukova, S.V. Morozova // The IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON 2017). – Kyiv, Ukraine, – 29 May- 5 June. – 2017. – P. 1121-1124. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100424.

10. Kremenetskaya Y.A. Non-Line-of-Sight Channel Modeling for Millimeter Wave Mobile Communications with Diffracted and Reflected Rays / Y.A. Kremenetskaya, N.V. Gradoboeva, S.V. Morozova // The IEEE 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications «Science and Technology (PIC S&T)». – Kyiv, Ukraine, – 10-13 oct. – 2017. – P. 61-64. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246350.

11. Kremenetskaya Y.A. Improvement of efficiency of millimeter range systems by method of signal zone / V.A. Druzhinin, Y.A. Kremenetskaya, E.R. Zhukova // Сборник трудов ДУТ Регіональна конференція Міжнародного союзу електрозв'язку «Перспективи надання послуг на основі мереж пост-NGN, 4G і 5G. Організаційні та технічні рішення по їх побудові та захисту». – 7-9 червня. – 2017. – С. 90-91.

12. Кременецька Я.А. Підходи до фізичного моделювання радіоканалів зв'язку муліметрового діапазону хвиль / Я.А. Кременецька, Н.О. Андреєва, С.В. Морозова // XII Міжнародна науково-технічна конференція КПІ «Проблеми телекомунікацій». – 16-20 квітня. – 2018. – С. 91-93.

13. Kremenetskaya Y. Application of hybrid millimetre wave technology for green wireless communications / Y. Kremenetskaya, S. Markov, S. Morozova // The IEEE 9th International Conference Dependable Systems, Services and Technologies

(DESSERT'2018). – Kyiv, Ukraine, – 24-27 may, – 2018, – P. 695-698. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409212.

14. Kremenetskaya Y. Features of millimeter-wave ultra-wideband signals application intelecommunications / Y. Kremenetskaya, S. Markov, S. Morozova // The IEEE 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-18). – Odessa, Ukraine, – 4-7 sept., – 2018. P. 310-313. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520169.

15. Кременецька Я.А. Гібридна архітектура телекомунікаційних систем наступного покоління / Я.А. Кременецька, Д.В. Баришев, Г.О. Дударєва // Тринадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій». – 15-19 квітня. – 2019. – С. 162-164.

16. Kremenetskaya Y. Limitations of Efficiency of Wireless Systems of Telecommunications 5G and Methods of Their Compensation / Y. Kremenetskaya, A. Makarenko, S. Markov, V. Koval // The IEEE 6th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications «Science and Technology (PIC S&T)». Kyiv, Ukraine, – 8-10 Oct. – 2019. – P. 493-496. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061493.

17. Kremenetskaya Y. Promising Green Telecommunications Based on Hybrid Network Architecture / Y. Kremenetskaya, V. Koval, S. Markov // The IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). – Odessa, Ukraine, – 9-13 Sept. – 2019. – P. 1-4. // DOI: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165525.

Монографія

1. Кременецька Я.А. Радіофотонні технології та пристрої телекомунікацій / Я.А. Кременецька, Ю.В. Мельник, С.Ю. Марков, Г.С. Фелінський // Наукове видання ДУТ, К.: Друк «ТОВ Три К», – 2019, –220 с. (ISBN 978-966-7690-44-1)

АНОТАЦІЯ

Кременецька Я.А. Методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні хвиль на основі гібридних технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Державний університет телекомунікацій, Київ, 2021 р.

Робота присвячена розробленню принципів побудови і методів підвищення ефективності телекомунікаційних мереж і систем в міліметровому діапазоні довжин хвиль на основі гібридних технологій, що є актуальним і економічно обґрунтованим напрямом розвитку науки та техніки на сучасному етапі.

Проаналізовано методи побудови телекомунікаційних систем в міліметровому діапазоні на основі волоконно-ефірних та гетерогенних мереж, стратосферних комплексів зв'язку, оптоелектронних методів формування та передавання радіосигналів.

Виконано порівняльний аналіз шумів в каналі зв’язку міліметрового діапазону, пов’язаних з інтерференційними завадами, оптоелектронними методами генерації радіосигналів, в тому числі з формуванням випромінювання в фазованих антенних решітках, ефектами молекулярного поглинання та перевипромінювання в атмосфері, результати якого можуть бути використані для побудови та підвищення ефективності майбутніх мобільних систем.

Вперше розроблено квазіоптичну модель радіоканалу в міліметровому діапазоні, в якій враховуються втрати, зумовлені геометричною розбіжністю випромінювання, багатопроменевим поширенням з урахуванням ефектів множинного відбиття та дифракцій, ефектів поглинання, що може бути використано для розроблення методів збільшення дальності та доступності зв'язку за рахунок створення зон підсилення сигналу.

На основі аналізу показників якості, шумових та динамічних радіочастотних характеристик компонентів для гібридних волоконно-ефірних систем передачі запропоновано рішення, що об’єднує технології множення частоти на основі методів зовнішньої модуляції, дистанційного оптичного гетеродину, відновлення оптичного сигналу з радіосигналу, поляризаційного та спектрального мультиплексування, інтегрованого з методом MIMO, що може бути використано для збільшення пропускної здатності та безшовної інтеграції телекомунікаційних систем, які працюють в різних діапазонах частот, в тому числі в різних піддіапазонах міліметрових хвиль.

Розроблено рекомендації для подальших досліджень моделей енергетичного розрахунку, оптимальних методів модуляції і мультиплексування сигналів, вибору архітектури мереж в міліметровому діапазоні хвиль із застосуванням гібридних технологій.

Ключові слова: міліметровий діапазон хвиль, 5G, гібридні технології, волоконно-ефірні системи, оптичне дистанційне гетеродинування, вузькоспрямовані антени, енергетичні зони покриття, відношення сигнал/шум, гетерогенні технології, енергетична ефективність, спектральна ефективність.

АННОТАЦИЯ

Кременецкая Я.А. Методы повышения эффективности телекоммуникационных систем в миллиметровом диапазоне волн на основе гибридных технологий. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на получение ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. - Государственный университет телекоммуникаций, Киев, 2021 г.

Работа посвящена разработке принципов построения и методов повышения эффективности телекоммуникационных сетей в миллиметровом диапазоне длин волн на основе гибридных технологий, является актуальным и экономически обоснованным направлением развития науки и техники на современном этапе.

Проанализированы методы построения телекоммуникационных систем в миллиметровом диапазоне на основе волоконно-эфирных и гетерогенных сетей, стратосферных комплексов связи, оптоэлектронных методов формирования и передачи радиосигналов

Выполнен сравнительный анализ шумов в канале связи миллиметрового диапазона, связанных с интерференционными помехами, оптоэлектронными методами генерации радиосигналов, в том числе с формированием излучения в фазированных антенных решетках, эффектами молекулярного поглощения и переизлучения в атмосфере, результаты которого могут быть использованы для построения и повышения эффективности будущих мобильных систем.

Впервые разработана квазиоптическая модель радиоканала в миллиметровом диапазоне, в которой учитываются потери, обусловленные геометрическим расхождением излучения, многолучевым распространением с учетом эффектов множественных отражений и дифракций, поглощения, что может быть использовано для разработки методов увеличения дальности и доступности связи за счет создания зон усиления сигнала.

На основе анализа показателей качества, шумовых и динамических радиочастотных характеристик компонентов для гибридных волоконно-эфирных систем передачи предложено решение, которое объединяет технологии умножения частоты на основе методов внешней модуляции, дистанционного оптического гетеродина, восстановления оптического сигнала из радиосигнала, поляризационного и спектрального мультиплексирования, интегрированного с методом MIMO, что может быть использовано для увеличения пропускной способности и бесшовной интеграции телекоммуникационных систем, работающих в различных диапазонах частот, в том числе в различных поддиапазонах миллиметровых волн.

Разработаны рекомендации для дальнейших исследований моделей энергетического расчета, оптимальных методов модуляции и мультиплексирования сигналов, выбора архитектур сетей в миллиметровом диапазоне волн с применением гибридных технологий.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон волн, 5G, гибридные технологии, волоконно-эфирные системы, оптическое дистанционное гетеродинирование, узконаправленные антенны, энергетические зоны покрытия, отношение сигнал/шум, гетерогенные технологии, энергетическая эффективность, спектральная эффективность.

ABSTRACT

Kremenetskaya Y. Methods of improving the efficiency of millimeter wave telecommunication systems based on hybrid technologies. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.12.02 – Telecommunication systems and networks - State University of Telecommunications, Kyiv, 2021.

The work is devoted to the development of principles of construction and methods for improving the efficiency of millimeter wave telecommunication networks based on hybrid technologies, which is a relevant and economically sound direction of the development of science and technology at the present stage.

Methods of constructing millimeter wave telecommunication systems based on fiber-wireless and heterogeneous networks, stratospheric communication systems, optoelectronic methods for generating and transmitting radio signals are analyzed

A comparative analysis of noise in the millimeter wave communication channel associated with interference, optoelectronic methods for generating radio signals, including the formation of radiation in phased array, effects of molecular absorption and reradiation in the atmosphere, the results of which can be used to construct those to increase the efficiency future mobile systems.

For the first time, a quasi-optical model of a millimeter wave radio channel was developed, which takes into account losses due to the geometric discrepancy of radiation, multipath propagation taking into account the effects of multiple reflections and diffraction, absorption, which can be used to develop methods for increasing the range and availability of communication by creating signal amplification zones.

Based on the analysis of quality indicators, noise and dynamic radio-frequency characteristics of components for hybrid fiber-wireless transmission systems, a solution is proposed that combines frequency multiplication technologies based on external modulation methods, remote optical local oscillator, restoration of an optical signal from a radio signal, polarization and spectral multiplexing integrated with MIMO method, which can be used to seamless integration of telecommunication systems that operate in different frequency ranges, including in various sub-bands of millimeter waves.

Compensating adaptive methods are proposed for the integrated architecture of fiber-wireless networks and the formation of radiation in phased antenna arrays. These methods balance the limiting radio-frequency characteristics of the main components that affect the efficiency of the application of fiber-wireless technologies in millimeter wave telecommunication systems.

Recommendations have been developed for further studies of energy calculation models, optimal methods of modulation and multiplexing of signals, the choice of network architectures in the millimeter wavelength range using hybrid technologies.

Key words: millimeter wave, 5G, hybrid technologies, fiber-wireless systems, optical remote heterodyning, narrowly directed antennas, energy coverage, signal-to-noise ratio, heterogeneous technologies, energy efficiency, spectral efficiency.