

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпроводних систем зв'язку п'ятого покоління.

ДРТР. 2017046.02.12. ПЗ

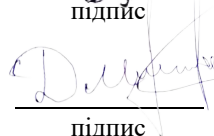
Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-2



підпис

В.О. Фененко
Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доц.



підпис

Д.А. Макаришкін
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



підпис

Ю.М. Бойко
Ініціали, прізвище

«05» грудня 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікації та радіотехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТР

 Ю.М. Бойко

«07» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Фененко Владислав Олександрович

1 Тема роботи: Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпроводних систем зв'язку n'ятого покоління

керівник роботи Макаришкін Денис Анатолійович, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «2» вересня 2019р. № 131.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 29.11.2019р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розроблення методу передачі інформації в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.

Об'єкт дослідження: процес передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

Предмет дослідження: методи та засоби передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Аналіз відомих методів та засобів для розроблення зв'язку між мобільним абонентом та базовими станціями. Моделювання зв'язку зі змінною частотою. Моделювання направлених зв'язків зі сферичними кутами. Схема направленого зв'язку міліметрової хвилі мобільних абонентів.

Завдання отримав



В.О. Фененко

Науковий керівник

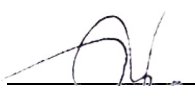


Д.А. Макаришкін

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	<i>Вибір тематики</i>	<i>до 1.09.20</i>	<i>обрано</i>
2	<i>Аналіз початкових даних</i>	<i>5.09.20-14.09.20</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Написання вступу та 1 розділу (аналіз)</i>	<i>15.09.20-30.09.20</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Написання 2 розділу (аналоги та моделі)</i>	<i>1.10.20-14.10.20</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення та подання публікації</i>	<i>10.10.20-20.10.20</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Написання 3 розділу (розробка моделей, моделювання)</i>	<i>15.10.20-30.10.20</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Обробка експериментальних даних, оформлення текстової частини</i>	<i>1.11.20-14.11.20</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Обробка експериментальних даних, оформлення графічної частини</i>	<i>10.11.20-20.11.20</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Корекція зауважень наукового керівника, рецензування</i>	<i>20.11.20-30.11.20</i>	<i>виконано</i>
10	<i>Підготовка доповіді, контроль антиплагіату</i>	<i>27.11.20-3.11.20</i>	<i>виконано</i>
11	<i>Подіння готової роботи для доступу до захисту</i>	<i>1.12.20</i>	<i>виконано</i>
12	<i>Захист дипломної роботи магістра</i>	<i>1.12.20-14.12.20</i>	

Студент



В.О. Фененко

Керівник роботи



Д.А. Макаришкін

ЗМІСТ

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ЗВ’ЯКУ МІЖ МОБІЛЬНИМ АБОНЕНТОМ І БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ.....	9
1.1 Вступ	9
1.2 Типи каналів зв’язку.....	9
1.2.1 Детермінована модель	10
1.2.2 Стохастична модель	10
1.2.3 Гібридні моделі.....	13
1.3 Моделювання каналів МмХв.....	13
1.3.1 Стандартні моделі каналів МмХв.....	14
1.3.2 ПЗЕТЕ 802.11ad і ПЗЕТЕ 802.15.3с	14
1.3.3 METIS	15
1.3.4 MmMagic	16
1.3.5 Моделі 3GPP, вище 6 ГГц	17
1.3.6 Специфічні характеристики каналів МмХв.....	17
1.3.7 Характеристики, що залежать від частоти	18
1.3.8 Втрата даних та блокування проникнення	19
1.3.9 Спрямованість каналів ммХв.....	20
1.3.10 Бездротові моделі NYU	21
1.3.11 Дослідження автомобільних / мобільних каналів МмХв.....	21
1.4 Вимірювання каналів МмХв	22
1.4.1 Принцип роботи широкосмугових каналів	23
1.4.2 Ехолот каналу МмХв	24
1.5 Висновки.....	25
2 МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ’ЯЗКУ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ.....	26
2.1 Вступ	26
2.2 Частота і просторові домени	29
2.2.1 ПСЗТ метод.....	29

2.2.2	Застосування методу ПСЗТ у просторовому домені	31
2.2.3	Застосування методу ПСЗТ у частотному домені	31
2.2.4	1 випадок середнє за знімком.....	32
2.2.5	2 випадок середнє за масивом антен	34
2.3	Вимірювання каналів та аналіз даних	35
2.3.1	Вимірювання каналів та обробка даних.....	35
2.3.2	Аналіз FRS	38
2.3.3	Варіація статистичних властивостей каналів	41
2.4	Висновки.....	45
3	МОДЕЛЮВАННЯ НАПРАВЛЕНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ЗІ СФЕРИЧНИМИ КУТАМИ	46
3.1	Вступ	46
3.2	Моделі спільних каналів	48
3.2.1	Процедура моделювання направлених каналів МмХв.....	49
3.2.2	Стаціонарні та нестаціонарні моделі каналів	50
3.2.3	Оцінка статичних параметрів.....	50
3.2.4	Оцінка параметрів	52
3.3	Генерація коефіцієнтів для каналу зв'язку на основі стаціонарної моделі каналу	55
3.4	Моделювання та перевірка стаціонарних та нестаціонарних моделей.....	57
3.3.1	Перевірка стаціонарної моделі станів ПРВД	58
3.3.2	Перевірка не стаціонарної моделі станів НПРВД.....	58
3.5	Висновки.....	60
4	СХЕМА НАПРАВЛЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОЇ ХВИЛІ МОБІЛЬНИХ АБОНЕНТІВ	61
4.1	Вступ	61
4.2	Зв'язок подвійних гауссових променів	62
4.2.1	Промінь Гауса.....	62
4.2.2	Схема зв'язку ПГП.....	63
4.3	МмХв канали станів Маркова	64
4.3.1	ПГП канали в трьох станах Маркова	64

4.3.2	Вимірювання каналів та три стани Маркова вимірюваних каналів	65
4.3.3	Вимірювання станів Маркова	66
4.4	Вивчення та порівняння коефіцієнтів підключення	67
4.4.1	Коефіцієнти підключення станів маркова до каналів ПГП	68
4.4.2	Синхронізовані ПГП канали	69
4.4.3	Асинхронізовані ПГП канали	73
4.4.4	Коефіцієнти підключення станів Маркова для вимірюваних mm-Wave каналів	73
4.4.5	Порівняння коефіцієнтів підключення	74
4.5	Висновки.....	75
ВИСНОВКИ.....		76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ		77
ДОДАТОК А Тези і стаття.....		Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б Презентація.....		93

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FFT– Швидкі перетворення Фур'є

HF – Високо частотний

ІЗЕТЕ – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки

ITU – Міжнародний союз електрозв'язку

LF – Низько частотний

ммХв – Міліметрові хвилі

METIS – Мобільний та бездротовий зв'язок достатній для інформаційного суспільства 2020 року

PDP – Профіль затримки живлення

PPG – Піковий приріст потужності

RMS – Середньоквадратичне

ToA – Час прибуття

ЄКМ – Єдиний круговий масив

УШД – Ультра широкий діапазон

ммХв – міліметрові хвилі

прВд – пряма видимість

нпрВд – не пряма видимість

ВСЧ – використання статичної частоти

ОРВ – виправлення однакових рівнів

ПСЗТ – профіль середньої затримки тяги

ФСПТ – функція середньо передачі тяги

КПВ – канал з прямою імпульсною відповіддю

СБПНР– світова безпроводна програма нове радіо

ШСН – широке стаціонарне направлення

ППП – Подвійний промінь гауса

ВСТУП

Актуальність теми. Завдяки розвитку інтернету та його користувачів, збільшується загальна кількість інформації, яка передається через інтернет. Дротова передача даних вже давно готова для збільшення передачі інформації, наприклад гігабітна швидкість оптоволоконних магістралей. Однак бездротова передача даних, потребує покращення. Це є актуальна проблема проблема, рішенням якої займаються провідні науковці та інженери світу. З'являються все нові версії G мереж (0, 1, 2, 3, 4, 5). Вже запланована 6 версія. Однак при запуску або розгортанні мережі 5G з'являються нові проблеми, які не враховувалися до цього. Наприклад, є актуальним питання щодо безпеки через використання мережних слайсів, які не можуть мати належного захисту. Одним з таких питань є вибір частоти, чим більша довжина хвилі, тим більшу площу можна охопити мережею, але швидкість передачі даних зменшується, тобто швидкість обернено пропорційна довжини хвилі. Якщо абонент знаходить в прямому доступі до станції і не рухається - це найкращий варіант, оскільки при цьому забезпечується найвища швидкість. Однак, як тільки абонент починає рухатися, відразу виникають проблеми, які пов'язані з напрямком руху та швидкістю. Тому необхідно швидко застосовувати методи направленої поширення, тобто питання вибору частоти і поширення є досить актуальним.

Мета і задачі дослідження.

Метою дипломної роботи є розроблення методу передачі інформації в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:

- аналіз відомих методів та засобів передачі інформації між передавальними і приймальними системами в міліметровому діапазоні хвиль у мережах 5 покоління;
- провести моделювання каналу зв'язку на основі міліметрових хвиль для забезпечення достатньої смуги пропускання;

– розробити метод передачі в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.

Об'єкт дослідження - передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

Предмет дослідження є методи та засоби передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених наукових завдань використовується.

Наукова новизна отриманих результатів:

— набув подальшого розвитку модель зв'язку мобільних пристроїв з базовими станціями, яка на відміну від існуючих дозволяє використовувати широку смугу пропускання та надає направлені характеристики поширення;

— набула подальшого розвитку технологія вибору діапазону хвиль для розроблення моделі передачі інформації до користувача;

— запропоновано структуру схеми передачі даних, що забезпечує широку смугу пропуску і направлені характеристики поширення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розробленої структури каналів міліметрових хвиль для забезпечення широкої смуги пропускання та направлених характеристик поширення, що у свою чергу дозволяє покращити параметри каналу зв'язку між мобільними пристроями з базовими станціями у мережах 5 покоління.

Публікації. Результати дипломної роботи магістра опубліковані в одній статті у науковому журналі «Вісник хмельницького національного університету».

Структура та обсяг магістерської атестаційної роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатків. Дипломна робота магістра має загальний обсяг 79 сторінок, з яких основний зміст викладений на 70 сторінках друкованого тексту, містить 24 рисунків та 2 таблиці. Перелік джерел посилання складається з 81 джерел.

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ЗВ'ЯКУ МІЖ МОБІЛЬНИМ АБОНЕНТОМ І БАЗОВИМИ СТАНЦІЯМИ

1.1 Вступ

Бездротові радіоканали є середовищем передачі для передачі інформаційних сигналів від Tx та Rx. Дослідження в цій галузі відіграють фундаментальну роль у проектуванні радіосистеми, оскільки всі дослідження в областях бездротового зв'язку спрямовані на подолання негативного впливу на сигнали, спричинені радіоканалами. Вимірювання каналів та моделі каналів - це методи вивчення радіоканалів. Характеристики каналу аналізуються та оцінюються на основі даних вимірювань каналу, і вони моделюються як посилення для проектування та оцінок на рівні системи. Для звичайних бездротових каналів 3G / 4G робочі частоти в основному нижче 6 ГГц. Для каналів ммХв ми вважаємо, що робочі частоти перевищують 6 ГГц і до 100 ГГц або навіть вище.

Дослідження каналів ммХв - дуже популярна тема. У цій галузі працює багато університетів, науково-дослідних інститутів та компаній. Можна знайти досить багато оглядових робіт, опублікованих за останні роки [13], [17], [25], [26]. Зміст цього розділу стосується довідкової інформації та загальної ідеї вимірювання та моделювання каналів ммХв. Їх можна розглядати як довідкові / базові для тем дослідження в цій дисертації.

У цьому розділі спочатку представлені категорії моделей каналів. Потім представлені стандартні моделі каналів ммХв та остання розробка каналів ммХв. Далі вводиться фон вимірювань каналів, звукові сигнали каналів та короткий опис кампаній вимірювань каналів ммХв.

1.2 Типи каналів зв'язку

Моделі бездротових каналів можна умовно розділити на три категорії. Методи, що використовуються при розробці цих моделей, можна відсортувати так

модель детермінованого каналу, модель стохастичного каналу та модель гібридного каналу (комбінована стохастична модель та модель на основі карти).

1.2.1 Детермінована модель

Типовими детермінованими моделями каналів є специфічні для сайту моделі як одна з основних галузей на рис. 2.1. Це може бути вирішене далі (1) відновлені імпульсні відгуки та (2) моделі трасування променів. Відновлені імпульсні відгуки отримуються за допомогою вимірювань каналів, вони є найбільш прямим способом представлення бездротових каналів. Всі дані вимірювань каналів, записані в літературі, можуть розглядатися як цей тип моделі каналу. Моделі трасування променів також реєструються у вигляді імпульсних реакцій каналу, які отримуються з детермінованого рішення рівнянь Максвелла або деяких наближень на основі географічної та морфологічної інформації певних бездротових сценаріїв [26]. Моделі трасування променів використовуються для доповнення трудомістких та дорогих вимірювальних кампаній при дослідженні характеристик поширення, охоплення та продуктивності системи [27] [29]. Хоча з недоліком того, що потрібні великі обчислювальні зусилля, а результати по суті менш точні, моделі трасування променів визнані надійними інструментами для моделювання точних властивостей каналу ммХв [29], [32]. Цей тип методу каналної моделі використовувався як частина стандартних моделей каналів, таких як ПЗЕТЕ 802.15.3с [30], ПЗЕТЕ 802.11ad [84], MiWEBA [31], METIS [13] тощо.

1.2.2 Стохастична модель

Моделі стохастичних каналів, як ще одна головна галузь, були розроблені з метою швидкого моделювання рівня системи (порівняйте з моделями трасування променів) [54]. Вони є найбільш широко використовуваними моделями каналів при моделюванні рівня системи. Вони не призначені для правильного прогнозування імпульсної характеристики в одному конкретному місці, але їх можна

використовувати для прогнозування функції щільності ймовірності (PDF) на великій площі [25]. Цей тип моделей спирається на статистичні спостереження за каналами з різними вимірами у різних типових сценаріях. Розподіл різних характеристик каналу оцінюється за допомогою вимірювань. Стохастичну модель каналу можна загалом розділити на дві категорії: (1) стохастичну модель каналу на основі кореляції (CBSM або CSCM) та (2) модель стохастичного каналу на основі геометрії (GBSM або GSCM).

Модель каналу CBSM описує характеристики MIMO за допомогою кореляційних матриць. Його заслугою є нижча обчислювальна складність порівняно з моделями каналів інших категорій. Він широко використовується системним моделюванням продуктивності. До цієї категорії належать добре відомі та широко використовувані моделі Кронекера та Вайхсельбергера [28]. Різниця між цими двома моделями полягає в тому, що модель Кронекера вважає, що T_x і R_x не взаємно корельовані, але модель Вейхсельбергера цілком може представити спільну кореляцію між T_x і R_x .

Моделі каналів GBSM є більш точними, ніж моделі каналів CBSM, але вони набагато складніші обчислювальні. В основному існує два типи GBSM: (1) GBSM на основі правильної форми та (2) GBSM на основі неправильної форми. Більшість основоположних форм GBSM є аналітичними моделями, такими як модель Кларка [29] та моделі [24], [28] [31]. Зазвичай розсіювання каналів розподіляється на основі геометричної форми, такої як кільце, еліпс тощо з певними функціями щільності розподілу. При такому підході до моделювання всі параметри каналу можна відстежувати та обчислювати геометрично. Особливістю таких моделей є те, що еталонними моделями GBSM на основі правильної форми є математичні моделі каналів, засновані на геометричному розрахунку, а методи апроксимації, такі як точний доплерівський метод, метод L_p -норми (LPNM), часто використовуються в імітаційній моделі для наближення еталонних моделей. Порівняно з цим, у GBSM на основі неправильної форми положення розсіювачів слідує певним розподілам, і вони випадково розташовані, а не розташовані на геометричній фігурі в GBSM на основі неправильної форми. Параметри, що використовуються в

імітаційних моделях, оцінюються на основі даних реальних вимірювань каналів у різних сценаріях. Отже, більшість стандартних моделей каналів належать до цієї категорії, наприклад СБПНР II / + [31], [32], QuaDRiGa [23], COST2100 [32] тощо, а також моделі каналів ммХв, такі як 3GPP [33], METIS [35], mmMagic [34], 5GCM [1]. Зважаючи, що, слідуючи гілці стохастичної моделі на рис. 1.1, GBSM на основі неправильної форми можна розділити на дві гілки: (1) підхід на системному рівні (найбільш швидкі моделі зникнення стандартних моделей), (2) рівень кластера підхід (використовується у COST2100).

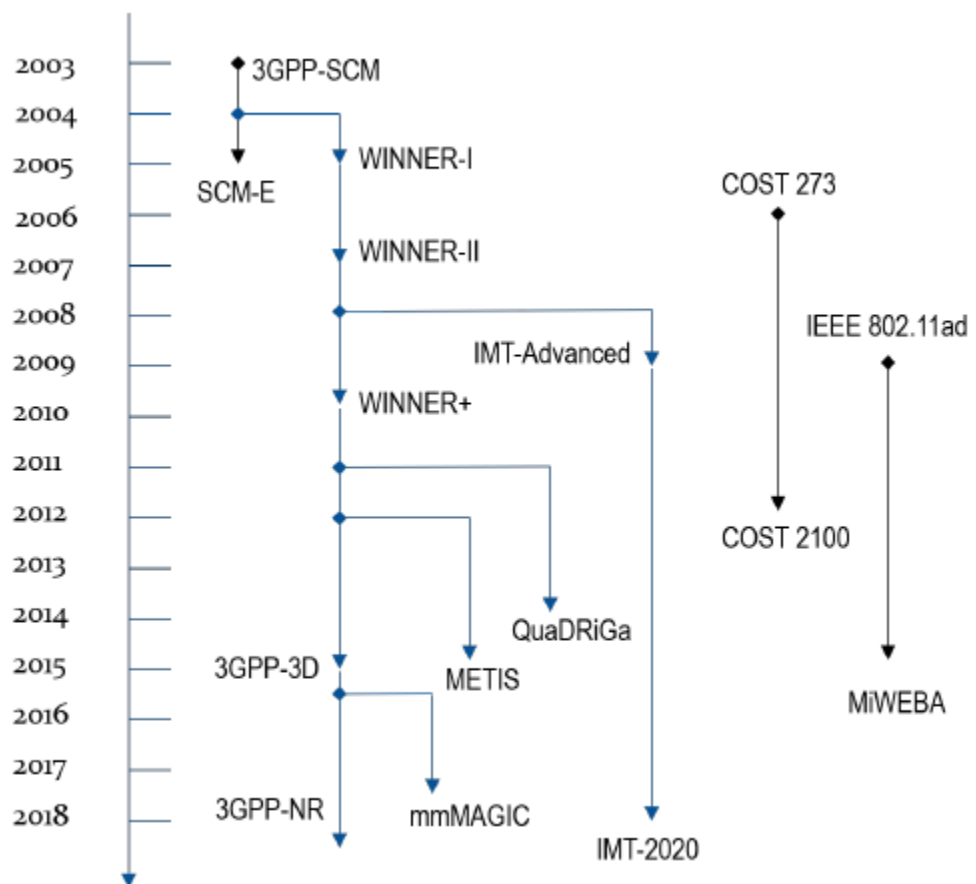


Рисунок 1.1: Стандартні моделі зв'язків та їх історія.

Моделі стохастичних каналів постійно розробляються для адаптації до нових функцій бездротових систем зв'язку. З топології на рисунку 1.2 [18] ми бачимо, що провідні дослідження моделей каналів слідує розвиваючій лінії 3GPP-SCM (SCM означає просторову модель каналу) [32], СБПНР-I / II / + [29], [31], а потім 3GPP-3D [33] та 3GPP-NR [30]. Ці моделі охопили більшість аспектів бездротових

каналів у різних сценаріях, які включають компонування мережі, великомасштабні та дрібномасштабні параметри, перехід сценарію каналу (сегмент каналу, падіння та розвиток часу) тощо. Деякі коди Matlab також доступні для довідки на веб-сайтах цих проектів. Що стосується інших ліній, що розвиваються, вони не є всеохоплюючими моделями каналів, але їх схильні розробляти для конкретних додатків / сценаріїв бездротового зв'язку або з використанням інших підходів для кращого моделювання властивостей бездротових каналів у певних аспектах. Наприклад, COST 2100 [32] фокусується на багатокористувацьких, розподілених МІМО та рухомих сценаріях Tx / Rx в системі зв'язку 4G.

1.2.3 Гібридні моделі

Існує комбінований підхід стохастичного та детермінованого моделювання каналів, який у METIS називається гібридною моделлю каналу [13], як третя основна гілка моделей каналів. Зазвичай, під час моделювання каналу, розташування базових станцій (BS) та користувальницького обладнання (UE) повинні бути xx на першій карті. Втрати на шляху (PL) та затінення обчислюються на основі карти, а випадкові затінення об'єктів можуть бути сформовані на основі методу моделювання трасування променів, що пояснюється в розділі 2.2.1. Потім усі інші обчислення виконуються за стохастичною моделлю [13]. Підхід гібридного моделювання бере переваги як детермінованої, так і стохастичної моделей, і він широко прийнятий при моделюванні каналів ммХв. У проекті mmMagic він розширює існуючу модель каналу QuaDRiGa [23], використовуючи підхід детермінованого каналу в моделюванні [10], [33].

1.3 Моделювання каналів МмХв

Європейська комісія фінансувала проекти з 5G-комунікації в рамках перспективи Горизонт 2020. Державно-приватне партнерство 5G-інфраструктури (5GPPP) [34] бере на себе лідерство Європи у стандартизації 5G-зв'язку, а дослідження каналів ммХв є однією з найважливіших областей. Розроблені моделі

каналів ммХв успадковують дух моделей сімейства СБПНР і включили більшість аспектів каналів ммХв в різні сценарії. Такі методології, як підхід стохастичного моделювання каналів, підхід моделювання трасування променів та підхід гібридного моделювання, усі прийняті при розробці цих моделей, таких як 5GCM, ПЗЕТЕ 802.11ay [35], ІМТ 2020 [36]

1.3.1 Стандартні моделі каналів МмХв

Існує досить багато стандартних моделей каналів, які підтримують сценарії каналів ммХв. З рисунка 1.1 [42] ми бачимо, що моделі MiWEBA, METIS, MSHFB (5GCM), 3GPP, mmMagic можна використовувати для моделювання каналів ммХв. При порівнянні цих моделей, заснованих на відповідних матеріалах, можна виявити, що в різних стандартних моделях існують деякі загальні вимірювання каналів та методи моделювання, оскільки ці моделі розробляються паралельно, а партнери належать до одного проекту, а також активно сприяють іншим проектів. Наприклад, партнери проекту mmMagic також беруть участь у проектах 3GPP та ІМТ 2020. Однак кожна окрема модель має унікальний внесок. Стан / очікування існуючої інформації про високочастотні канали можна знайти в документі 3GPP-NR \ Дослідження моделі каналу для частотного спектру вище 6 ГГц [31]. У цьому розділі коротко описується деякі часто процитовані стандартні моделі каналів ммХв.

1.3.2 ПЗЕТЕ 802.11ad і ПЗЕТЕ 802.15.3с

Моделі ПЗЕТЕ 802.11ad [28] та ПЗЕТЕ 802.15.3с [29] - це раніше запропоновані моделі каналів ммХв з діапазоном частот 60 ГГц. ПЗЕТЕ 802.11ad - це 3D-модель, а ПЗЕТЕ 802.15.3с - 2D-модель. Вони були розроблені для різних сценаріїв каналів. ПЗЕТЕ 802.11ad фокусується на моделюванні каналів у сценаріях WLAN (бездротові локальні мережі), таких як конференц-зал, вітальня та середовище кабіни. ПЗЕТЕ802.15.3с фокусується на моделюванні каналів у

сценаріях WPAN (бездротових персональних мереж), таких як житлові, офісні, бібліотечні, настільні та кіоски. Усі ці моделі кореняться у підході кластерного променя, подібному до моделі Салеха-Валенсуели (SV) [35], [36], а амплітуди та затримки описуються певними статистичними розподілами. Хоча вони обидва були розроблені на основі статистичних параметрів, оцінених за результатами вимірювань, і для моделювання використовували трасування променів, але вони не є точно такими ж, як гібридна модель METIS щодо їх методології моделювання. Наприклад, емпіричні статистичні розподіли дико використовуються для моделювання кластерних затримок і кутів тощо в ПЗЕТЕ 802.11ad, який називається квазі детермінованою моделлю [13].

1.3.3 METIS

Моделі каналів METIS успадковують дух загальної моделі каналів, таких як моделі сімейства СБПНР. Моделі розроблені на основі великих оглядів літератури, масивного аналізу даних реальних вимірювань та моделювання трасування променів. Розроблені моделі призначені для загальних сценаріїв 5G, що включає характеристики як масивних каналів MIMO, так і каналів ммХв. METIS також класифікує загальні методи моделювання за моделями на основі карт, стохастичними моделями та гібридними моделями. Це дуже важлива інформація для пізніше розроблених моделей каналів. Користувачеві потрібно зробити вибір, якщо цільовий сценарій розповсюдження може бути змодельований кількома методами моделювання. Вибір моделі залежить від діапазону частот, точності, обчислювальної складності та часу моделювання (який здебільшого залежить від модельованої системи, як кількість BS та UE). Ключові результати досліджень моделі каналу METIS можна знайти із специфікації в [13] .

У порівнянні моделей METIS моделі на основі карти є найбільш повноцінними моделями, що охоплюють більшість тестових випадків, сценарії поширення та бажаний діапазон частот. Моделі каналів ммХв на основі карт розраховані на діапазон частот до 100 ГГц, а пропускна здатність каналів ммХв

може досягати 10% від центральної частоти. Стохастична модель найкраще підходить для міських та менших середовищах, включаючи сценарії зовнішнього та зовнішнього (O2O) та зовнішнього та внутрішнього (O2I) сценаріїв. Гібридна модель - це поєднання обох. Це можна розглядати як зручну та масштабовану структуру для задоволення різноманітних вимог до моделювання / моделювання каналів [13].

1.3.4 MmMagic

Модель каналу mmMAGIC - це стохастична модель на основі геометрії (GSCM / GBSM), що складається з базової основи моделювання та додаткових функцій, що розширюють її точність та придатність. Особливостями моделі є дослідження ефектів відбиття землі та блокування, втрати проникнення будівлі, підтримка великих смуг пропускання та великих антенних решіток, а також просторова узгодженість. Існує більше 20 кампаній вимірювань каналів, проведених за різними сценаріями, таких як каньйон вулиці UMi, відкрита площа UMi, офіс, зона реєстрації в аеропорту та відкритий до внутрішнього простору, в діапазонах частот від 6 ГГц до 100 ГГц. (скоротити розрив між традиційними стільниковими частотами та частотами ммХв). Конкретні вимірювання проводили для вивчення дзеркального та дифузного розсіювання, впливу реакції і завалу на землю та характеристик каналу, що залежать від частоти.

Зокрема, модель блокування на основі роботи METIS була розроблена на основі дифракційної формули Кірхгофа та перевірена в реальних вимірах. Досліджено процедуру моделювання просторової узгодженості, яку ініціював 3GPP. Запропоновано GSCM на основі сітки (частково на основі METIS), що використовує кути варіації часу та кластерну смерть та народження в міру руху UE. Це також важлива характеристика для оцінки мобільності та відстеження променя. Мало масштабні характеристики вицвітання, спричинені компонентами розсіяного сигналу, досліджувались при вимірах, пов'язаних з шорсткістю поверхні різних будівельних матеріалів.

1.3.5 Моделі 3GPP, вище 6 ГГц

Моделі 3GPP - це загальні моделі каналів, які успадковують методи моделювання, що використовуються з часу розробки моделей сімейства СБПНР. Це модель каналу на системному рівні, що включає всі аспекти характеристик каналів усіх пов'язаних великомасштабних та дрібномасштабних параметрів. Він також включає в себе моделі лінії затримки часу / кластера (TDL / CDL) для зручності оцінки рівня зв'язку, а калібрування моделі каналу забезпечено базовою лінією для всіх галузевих та наукових інститутів при розробці імітаторів каналів 3GPP. Для останньої розробки модель 3GPP, яка підтримує моделювання каналів вище 6 ГГц, зазвичай називається 3GPP-NR.

У 3GPP NR є стохастичні моделі та гібридні моделі на основі карт, розроблені для підтримки каналів ммХв. Сценарії, які підтримують стохастичні моделі, включають міський та менші (UMi) -вуличний та міський середовище (UMa), UMi-відкрита площа, офіс, критий торговий центр та сільський макрос (RMa). За винятком моделювання характеристик каналів, пов'язаних із втратою траси, ймовірністю ПРВД, проникненням, швидким вицвітанням (дрібномасштабна модель) тощо, специфічні характеристики каналів ммХв моделюються шляхом додавання додаткових компонентів, таких як поглинання кисню, блокування, кореляція моделювання для багато частотного моделювання. Гібридні моделі на основі карти складаються з детермінованої моделі (на основі роботи METIS) та відповідної стохастичної моделі, згаданої раніше. Впроваджуючи в моделювання цифрову карту, її можна використовувати для оцінки та прогнозування продуктивності системи з урахуванням впливу структур навколишнього середовища та матеріалів

1.3.6 Специфічні характеристики каналів МмХв

Оскільки робочі частоти каналів мМХв перевищують 6 ГГц (можуть бути до 100 ГГц або вище), існують деякі специфічні характеристики каналів, які відрізняються від попередніх звичайних каналів 3G / 4G. У стандартних моделях каналів мМХв специфічні характеристики каналів мМХв вводяться додатковими компонентами, такими як розділи 7.6 3GPP-NR [12]: поглинання кисню (частоти від 53 до 67 ГГц), ефекти блокування тощо. Через обмеженість дипломної роботи ми робимо лише короткий зміст деяких важливих специфічних характеристик каналів мМХв, досліджених у стандартних моделях каналів мМХв.

1.3.7 Характеристики, що залежать від частоти

Для моделювання характеристик каналу в діапазоні робочих частот від 6 ГГц до 100 ГГц параметри, що залежать від частоти, вводяться в стандартні моделі каналів. Наприклад, у 3GPP-NR [32] схеми антен, геометрії решіток, центральна частота та смуга пропускання системи, поглинання кисню, потужності кластера, розподіл затримки та кутові розширення вважаються залежними від частоти. Окрім 5GCM версії 2.0 [13], він забезпечує значне оновлення широкомасштабного та дрібномасштабного моделювання параметрів, включаючи нещодавно запропонований алгоритм кластеризації та моделі, які фіксують залежні від частоти параметри. При моделюванні каналів мМХв з кількома частотами, наприклад, що передають сигнали як на низькочастотних (НЧ), так і на високочастотних (ВЧ) каналах, необхідні дослідження узгодженості та кореляції між ними. Коефіцієнт кореляції використовується як метрика для вивчення кореляції сигналів у часовій / просторовій областях тощо. Узгодженість каналу можна розглядати як загальний опис кореляцій для кожного масштабного параметра, специфічного параметра кластера та параметра специфічного променя каналів [36]. Подібні дослідження були проведені в частотній області для багатьох частотних каналів. В даний час узгодженість каналів декількох смуг частот в гетерогенній мережі досліджена за допомогою моделі трасування променів у 5GCM [1]. Між частотна кореляція LSP була вивчена в IMT 2020 [34]. Частотно-залежна поведінка каналів та стратегія

моделювання для створення багато смугових частотно-залежних каналів були вивчені в [14].

1.13 Втрати даних через відстань та поглинання кисню

Формула передачі Фрііса зазвичай використовується при передачі у вільному просторі [11], [18]. Він також може бути використаний для приблизно опису потужності прийнятого сигналу при розповсюдженні зайнятого простору. Наприклад, вказівка відповідного значення n , яке може приблизно описати втрату шляху на основі даних вимірювань [18]. Відповідно до формули передачі Фрііса, втрата шляху сигналів ммХв набагато вища, ніж у сигналів нижче 6 ГГц, якщо всі інші умови, включаючи посилення антени, однакові. Ослаблення дощу та поглинання атмосфери / молекули / кисню збільшують втрати шляху та обмежують діапазон зв'язку [40], [41]. Частоти механічного резонансу газоподібних молекул також збігаються з сигналами ммХв, і важливі піки поглинання виникають на частотах 24 і 60 ГГц [42].

На підставі вимірювань у 5GCM [1] показано, що для смуг ммХв нижче 100 ГГц у затуханні переважає поглинання кисню, де пік становить близько 60 ГГц. У mmMagic [9] було зафіксовано втрату до 4 дБ, спричинену поглинанням кисню на відстані 1 м на основі вимірювань каналу НПРВД між Tx та Rx. У 3GPP [31] поглинання кисню змінюється залежно від частоти. Моделювання поглинання кисню між 53 ГГц та 67 ГГц може слідувати таблиці 7.6.1-1 у [31], і немає поглинання кисню на частотах нижче та вище.

1.3.8 Втрати даних та блокування проникнення

Зі збільшенням несучих частот поведінка розповсюдження сигналів ммХв більше нагадує оптичне поширення [42]. Загалом вони мають великі втрати при проникненні, і вони дуже чутливі до перекриття стінами та іншими предметами [42]. У дослідженнях передачі НПРВД він продемонстрував обґрунтовані втрати на

реакцію та великі дифракційні втрати. Ми також вважаємо, що металеві та бетонні стіни спричиняють великі втрати при проникненні, а важке листя - серйозні втрати тіней [18]. Сильні зміни втрат на проникнення залежать від складу віконного матеріалу, спостерігалися в mmMagic [29]. Залежно від матеріалу моделі втрат проникнення були розроблені окремо в 3GPP, а моделі низького та високого проникнення - для сценаріїв O2I [32].

Багато вимірювань каналів, пов'язаних із блокуванням, проводились у стандартних моделях каналів, таких як mmMagic [29] та 5GCM. У 5GCM [30] розглядаються дві категорії блокування: динамічне блокування та індуковане геометрією блокування. Динамічний завал спричинений рухомими предметами (тобто автомобілями, людьми). Вплив є тимчасовою додатковою втратою на шляхах, які перехоплює рухомий об'єкт. Індукована геометрією блокування - це статична властивість або об'єкт навколишнього середовища, що блокують шляхи передачі сигналу. У 3GPP-NR [31] модель блокування є додатковою функцією (розробленою в компоненті). Він моделює ефект блокування моделями А та В. Модель використовує стохастичний метод, а модель В використовує геометричний метод фіксації блокування людей та транспортних засобів. Інші підходи моделювання блокування можна знайти в [42] та літературі.

Зверніть увагу, що вимірювання втрат шляху в міських районах часто включають втрати, спричинені деревами та іншою рослинністю у випадку UMA та UMi. Важливо не враховувати втрати листя двічі в моделі каналу [41].

1.3.9 Спрямованість каналів ммХв

Формування променя використовується як технологія, що сприяє зв'язку 5G ммХв [2], [11], [18], [25], [30], [42], [44]. Як передавач (Tx), так і приймач (Rx) використовують фізичні промені під час зв'язку, і промені повинні бути вирівняні один до одного. Це одна з основних особливостей каналів ммХв, згаданих раніше. У цьому випадку передані сигнали взаємодіють лише з об'єктами в напрямку передачі між Tx і Rx в навколишньому середовищі. Статистичні властивості

спрямованих бездротових каналів ммХв можуть залежати від напрямку, що пов'язано з неоднорідністю середовища каналу. На даний момент описи властивостей спрямованості каналів ммХв можна знайти у нещодавно розроблених моделях каналів, таких як моделі каналів втрат спрямованого шляху в mm-MAGIC, [43], [45], модель із роздільною здатністю спрямованих каналів у METIS [15] та бездротові моделі NYU.

1.3.10 Бездротові моделі NYU

На основі численних вимірювань розповсюдження, проведених з 2011 по 2015 рік, для одного з міст запропоновано статистичну модель просторового каналу (SSCM), яка порушує загальноприйняті способи моделювання дрібномасштабних параметрів спрямованих каналів ммХв у стандартних моделях каналів ммХв. У цій моделі тимчасовий та просторовий / кутовий статистичні описи каналів спочатку були розділені при моделюванні каналів ммХв та введені кроки генерації коефіцієнтів залежних від кута каналів [44] [47].

SSCM розроблений із використанням підходу часової кластерно-просторової частини (TCSL). На основі існуючої моделі 3GPP, просторові частки були додані за допомогою додаткових параметрів моделі: спрямованих середньоквадратичних кутових розмахів часток [44]. SSCM може використовуватися для генерації однонаправлених і спрямованих багатопроменевих параметрів каналів між TX і RX через локальну область. Структура TCSL може краще відтворювати часову та кутову статистику виміряних спрямованих каналів ммХв (із використанням спрямованих антен) [46] і може більш практично відображати властивості каналів ммХв в реальності.5

1.3.11 Дослідження автомобільних / мобільних каналів МмХв

Зв'язок МмХв широко прийнятий для використання в автомобільному зв'язку 5G та зв'язку мобільного типу, наприклад D2D, V2V, M2M, транспортному засобі

до всього (V2X) та повітрі до всього (A2X) [48]. Оскільки технологія формування променя використовує як T_x , так і R_x , якщо T_x або R_x рухаються або обертаються під час зв'язку, балки будуть неправильно вирівняні, і зв'язок може бути порушена, якщо немає надійного рішення для повторного вирівнювання балок. Тому фізичне вирівнювання променів T_x та R_x є однією з найбільших проблем у зв'язку мобільного типу мМХв. Дослідження впливу мобільності користувачів на комунікації мМХв можна знайти в [49]. Розроблено два шари для вирівнювання променя [21], [22], перемикання променя [25], навчання променя [25], інтелектуальні алгоритми відстеження пошуку променя [27] та інші схеми вирівнювання пучка. У випадках використання схем вирівнювання променя в комунікації мМХв, моделювання каналів мМХв стикається з новими проблемами, і тому слід вивчити, як правильно моделювати характеристики каналів за тими різними схемами вирівнювання променя.

На даний момент проводяться дослідження транспортних каналів мМХв на основі подібних підходів до вивчення звичайних автомобільних каналів в системах 3G / 4G, таких як дослідження мало масштабних відбитків мМХв в автомобілі [41], моделювання мобільності UT та Поворот UT в 3GPP [31] та нещодавно запропонована загальна модель каналу 5G [89]. Ми також можемо знайти дослідження, пов'язані з напрямленими транспортними каналами мМХв та мобільними каналами мМХв, пов'язані з різним вирівнюванням променя в літературі. У [46], [47] вивчались характеристики спрямованих транспортних каналів мМХв. У роботі [47] зміна характеристик каналу, особливо залежність між часом когерентності та шириною променя, вивчалася при використанні схем вирівнювання променя. Схеми вирівнювання пучка серед транспортних засобів та транспортних засобів до інфраструктури були запропоновані в [24], [47] [49], і були розглянуті відповідні характеристики каналу.

1.4 Вимірювання каналів ММХв

Звукові сигнали призначені для вимірювання каналів. У міру ускладнення конструкції системи вимоги до пристроїв зондування каналів пройшли три етапи: мати можливість вимірювати силу поля в 1960-х; вміти вимірювати імпульсні відгуки, тобто затримку дисперсії (широкосмугові системи); мати можливість вимірювати (подвійні) спрямовані імпульсні характеристики з 1990-х років (багатоантенні системи / MIMO) [25]. У наш час для вимірювання бездротових каналів 5G додатково розроблені звукові сигнали, що використовуються для вимірювання спрямованих імпульсних характеристик, з розширенням для підтримки великих антенних решіток (Massive MIMO) та частот ммХв.

1.4.1 Принцип роботи широкосмугових каналів

Відповідно до [25], [48], звучання бездротового каналу можна розглядати як використання дельта-функції $\delta(t)$ для збудження системи та аналізу імпульсної характеристики. Дуже складно створити імпульс для вимірювання бездротових каналів завдяки генеруванню імпульсу, рівному генеруванню сигналу з кінцевою пропускнуою здатністю. Отже, дуже часто використовується технологія обробки сигналів для наближення імпульсу в реальності. Використання псевдо шумових (PN) послідовних звукових сигналів для вимірювання каналів за допомогою кореляційного ехолота [25] та використання звукових сигналів OFDM для вимірювання передавальної функції каналів у частотній області [49] призначені для виконання такої мети.

У системі часового варіанта (Rx або Tx в русі) період повторення звукового імпульсу є дуже важливим. Реакція каналу на імпульс збудження як один \ моментальний знімок $h(t,r)$ каналу. Для того, щоб відстежувати зміни каналу, час повторення для зйомки цих знімків повинен бути меншим за час, коли канал змінює $1/(2 \cdot v_{\max})$ [25]. Подібно використанню частоти дискретизації Найквіста (мінімальна частота дискретизації) для дискретизації сигналу з смуговим спектром, часова частота дискретизації Найквіста повинна бути задоволена, роблячи знімки часового варіанта каналу із смуговим доплерівським спектром. Отже, час

повторення T_{rep} , який можна розглядати як тимчасову частоту дискретизації, повинен бути вдвічі більшим за максимальну доплерівську частоту (на основі доплерівського спектру каналу) [25]. Крім того, час повторення повинен бути більшим за максимальну надлишкову затримку каналу, щоб уникнути перекриття імпульсних характеристик від послідовних імпульсів збудження.

1.4.2 Ехолот каналу ММХв

Як правило, існує два типи звукових сигналів каналу: (1) векторний аналізатор мережі (VNA) + антена / антена-решітка та (2) базові смуги + РЧ-компоненти, що утворює типову систему передачі РЧ-сигналу, див. Схеми 2.5 і 2.6. Перший тип озвучувачів вимірює канали в частотній області, і він може вимірювати лише інваріантні до часу (статичні) сценарії каналів, які зазвичай є середовищами закритих каналів. Другий тип озвучувачів - це кореляційні оповіщувачі (див. Попередній розділ) і озвучувачі каналів OFDM, які вимірюють бездротові канали відповідно в часовій та частотній областях. Перевага полягає в тому, що він може вимірювати часові варіанти як внутрішніх, так і зовнішніх сценаріїв, таких як сценарії V2V, машина-машина-машина (M2M).

При вимірюванні каналів ммХв перший тип озвучувачів широко використовувався університетами та науково-дослідними інститутами через низьку вартість [35]. Оскільки вимога вимірювати часові варіанти каналів ммХв, є більше універсальним, і компанії почали розробляти другий тип звукових сигналів, і все більше результатів досліджень опубліковано на основі цих звукових сигналів у літературі відомих вузів. Крім того, деякі компанії пропонують рішення щодо вимірювання каналів науково-дослідним інститутам, які мають труднощі побудувати ехолот самостійно і бажаючи купити безпосередньо ехолот.

Однак поточний ехолот ммХв не підходить для вимірювання транспортних / мобільних каналів ммХв, коли Tx і Rx рухаються. Коли і Tx, і Rx використовують все спрямовані антени, високе ослаблення обмежує зв'язок ммХв на дуже коротку відстань. Автомобільний / мобільний зв'язок може часто падати, вимірювання

каналів робити не можна. Коли і Tx, і Rx використовують антени, що формують промінь, або гудкові, в каналному ехолоті потрібно впровадити надійну схему вирівнювання променя. Незважаючи на те, що існує безліч досліджень, пов'язаних із схемами вирівнювання балок, як уже згадувалося раніше, їх впровадження не є простим. Це одна з найбільших проблем для озвучувачів каналів ммХв.

1.5 Висновки

У цьому розділі класифіковано моделі бездротових каналів переді даних, а саме детерміновані стохастичні, гібридні, і стандартні моделі міліметрових хвиль на основі геометрії. Також було розглянуто:

- особливості деяких стандартних моделей переді. ;
- характеристики каналів міліметрових хвиль;
- Дослідження щодо каналів міліметрових хвиль.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗКУ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ

2.1 Вступ

Технологія зв'язку МмХв є одним з найбільш перспективних кандидатів на бездротові мережі 5G і навіть більше, ніж 5G (B5G) [2], [25]. Ресурс пропускної здатності близько 7 ГГц доступний у діапазоні 60 ГГц (неліцензійний) та ресурс пропускної здатності 1 ГГц доступний у діапазонах 28 ГГц та 38 ГГц [10]. При поточних вимірюваннях каналів ммХв зазвичай використовуються звукові сигнали каналу з частотою 500 МГц або навіть ширшою смугою [18], [44], [58]. При такій великій пропускній здатності властивості розповсюдження каналів ммХв можуть сильно відрізнятися від властивостей каналів у системах зв'язку 4G.

Дослідження стаціонарності бездротових каналів відіграє фундаментальну роль в аналізі вимірювань каналів та моделюванні каналів. Широко змінні стаціонарні (ШСН) канали були введені в [59], а припущення про стаціонарність у часі, частоті та просторових областях можна знайти в [25], [60]. У моделях каналів СБПНР II / + [30], [31], ITUR [60] та 3GPP [32] концепція сегментів і крапель використовувалася для визначення \ квазістаціонарних "періодів, протягом яких канали задовольняють припущення ШСН. У QuaDRiGa [23], COST 2100 [33] та нещодавно розроблених моделях каналів, заснованих на СБПНР +, [43], [59], еволюція часу була використана для вивчення не стаціонарності каналів у часовій області, заснований на траєкторії руху мобільного терміналу та процесах народження-смерті. Подібним чином еволюція часу також використовувалася при моделюванні каналів швидкісних поїздів (HST) та транспортних засобів (V2V) [30], [59] [60]. При дослідженні масивних багатовхідних та багатовихідних каналів (MIMO) було показано, що потужності кластера змінюються у великій антенній решітці [42], [61]. Просторове стаціонарне припущення не виконується для всієї великої антенної решітки. Моделювання просторових змін на великих антенних решітках було запропоновано для моделі каналу COST 2100 на основі модифікації області видимості (VR) [62]. Нещодавно розроблена нова модель масивного каналу

МІМО у роботі [63] стосується просторової не стаціонарності вздовж осі антени. У роботах [24], [25], [30] було запропоновано процеси народження-смерті для моделювання як часових, так і просторових не стаціонарностей каналів подібним чином. Більш суміжні результати досліджень можна знайти в [31].

Модель каналу надширокосмугового діапазону (УШД) ІЗЕТЕ 802.15.4a може підтримувати пропускну здатність до 2 ГГц [56]. Через те, що довжини хвиль звукових сигналів, що використовуються при вимірюванні каналів, порівнянні з розмірами об'єктів у навколишньому середовищі, такі основні процеси поширення, як відбиття та дифракція, залежать від частоти в каналах УШД [62]. Оскільки припущення про стаціонарність частоти не виконується для всієї смуги пропускання, канали УШД можна розглядати як частотні нестаціонарні (FnS) канали. У [58] були виявлені частотно-селективні явища поширення каналів ммХв. У роботі [62] було показано, що результати середньоквадратичного (середньоквадратичного) розширення затримки (DS) та розвороту кута (AS) залежать від частоти в межах смуги пропускання 6 ГГц, тобто 2 {8 ГГц. Канали МмХв, як правило, мають пропускну здатність, порівнянну з пропускну здатністю каналів УШД. У METIS [13], [56] використовувались вимірювання каналів ммХв із смугою пропускання 4 ГГц. Моделі каналів ммХв на основі карт розраховані на діапазон частот до 100 ГГц, а пропускну здатність каналів ммХв може досягати 10% від центральної частоти. Ми можемо очікувати, що припущення про стаціонарність частоти не завжди виконується для каналів ммХв в межах таких широких смуг пропускання. Це може статися при використанні комунікацій ммХв в таких середовищах, як заводи, склади, шахти з вугіллям / металами, хімічні лабораторії тощо, де розміри об'єктів порівнянні з довжинами хвиль сигналів ммХв. У моделях трасування променів mmMAGIC [9] ми також можемо виявити, що дифузне розсіяння на частотах ммХв вивчалось, виходячи з подібного занепокоєння, що розміри об'єктів порівнянні з довжинами хвиль сигналів ммХв. Однак у сучасних стандартних моделях каналів ммХв, таких як ІЗЕТЕ 802.15.3c [27], ІЗЕТЕ 802.11ad [28], MiWEBA [29], mmMAGIC, METIS, i

тих моделях каналів ммХв, розроблених нещодавно [10], [35], [44], параметри каналу зазвичай розглядалися як стаціонарні частоти (FS).

При розробці моделей каналів 5G загальні дослідження частотно-залежних параметрів каналу можна знайти в моделях каналів 5GCM [19] та останніх моделях 3GPP [32]. Ми можемо спостерігати дрейф параметрів каналу в межах декількох послідовних інтервалів частот ГГц як в діапазонах частот, що перевищують 6 ГГц, так і в діапазоні мм. В останніх моделях 3GPP, IMT 2020 [34] та 5GCM був розроблений новий компонент для підтримки вдосконаленого моделювання масивних каналів МІМО з великими смугами пропускання та великими антенними решітками. Якщо смуга пропускання перевищує відношення швидкості світла до максимальної апертури антени, крок генерації коефіцієнта каналу, пов'язаний із моделюванням кластерів, оновлюється для моделювання окремих променів. Це означає, що припущення ШСН може не відповідати каналам з великою смугою пропускання та великими антенними решітками. Однак цей критерій не підходить для визначення властивостей F_nS , і його не можна використовувати для моделювання каналів F_nS . Оскільки ресурс широкої смуги пропускання є головною заслугою використання частот ммХв у зв'язку 5G, необхідні дослідження щодо властивостей F_nS каналів ммХв.

У цій главі ми спочатку вводимо метод ПСЗТ для вивчення стаціонарності каналів у часовій, частотній та просторовій областях. Ми застосовуємо його при дослідженні областей частотної стаціонарності (ВСЧ) каналів як в діапазонах частот до 6 ГГц, так і в діапазоні ммХв на основі реальних вимірювань каналів. Ця частина роботи подібна до роботи в [51]. У поточній роботі проводиться подальший аналіз даних, що показує властивості F_nS вимірюваних каналів. Потім пропонується загальна модель каналу F_nS для моделювання каналів F_nS .

2.2 Частота і просторові домени

Як зазначалося в мотивації даної дипломної роботи в розділі 1.2, для вдосконалення моделей каналів ммХв дослідження стаціонарності каналів ммХв є фундаментальним. У цій главі ми спочатку вводимо метод для вивчення області стаціонарності каналів. Потім буде запропонована модель нестаціонарного каналу, заснована на результатах досліджень стаціонарності.

В даний час метод ПСЗТ [63] та метод відстані матриці коваріації (CMD) [64] [66] зазвичай використовуються для оцінки областей стаціонарності каналів у часовій та просторовій областях. Хоча метод CMD можна використовувати для оцінки області стаціонарності в частотній області, при розрахунку необхідна кореляція каналу на основі антенних решіток. Порівняно з цим, метод ПСЗТ не має такого обмеження. Тому ми вирішили використати метод ПСЗТ у дисертації. Ми поширюємо колишній метод ПСЗТ у [63], який був використаний для вивчення областей стаціонарності каналів у часовій та просторовій областях, до частотної області.

2.2.1 ПСЗТ метод

Для широкосмугового бездротового каналу 1x1 ми визначимо h як імпульсну характеристику каналу (CIR). Тоді миттєвий профіль затримки потужності (PDP) можна розглядати як знімок каналу в заданий час t_i , $i = 1; 2; \dots N$, і ми припускаємо, що загалом є N знімків. P_h визначається як

$$\overline{P}_h(t, \tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h(t_i, \tau)|^2 \quad (2.1)$$

представити середній PDP n -знімків ($n < N$) в одному розсувному вікні на осі часу t , і визначити P_h як інший ПСЗТ n -знімків, коли він рухається вперед по осі часу t з відстанню dt . Де t - середній час t_i . Це можна розглядати як середній t_i в розсувному вікні. Коефіцієнт кореляції між ПСЗТ визначається як

$$c(t, \Delta t) = \frac{\int \overline{P_h}(t, \tau) \overline{P_h}(t + \Delta t, \tau) d\tau}{\max\{\int \overline{P_h}(t, \tau)^2 d\tau, \int \overline{P_h}(t + \Delta t, \tau)^2 d\tau\}}. \quad (2.2)$$

Якщо коефіцієнти кореляції $c(t; \Delta t)$ між ПСЗТ перевищують припуск рівня подібності (ОРВ) [51] $tc_{ОРВ}$, то стаціонарний інтервал Δt визначається як область стаціонарності у часовій області

$$d_t = \max\{\Delta t \mid c(t, \Delta t) \geq tc_{АСЛ}\}. \quad (2.3)$$

Ми припускаємо, що n -знімки, використовувані для обчислення ПСЗТ, знаходяться в межах дуже малого інтервалу, який набагато менший, ніж нерухомий регіон. Використання більшого значення у знаменнику (2.2) полягає у забезпеченні коефіцієнта кореляції менше 1 при використанні реального вимірювання дані в розрахунку. Оскільки при вимірюваннях можуть бути введені помилки, які можуть призвести до недійсності рівняння для обчислення коефіцієнта кореляції (може бути більше, ніж "1", наприклад) у книзі [64]. Зверніть увагу, що Δt може бути як позитивним, так і негативним.

На практиці, якщо ансамбль КІР, вимірюваний у різних часових точках протягом часового інтервалу, задовольняє припущення ШСН, ми вважаємо, що вони знаходяться в межах однієї області стаціонарності [65], і статистичні параметри каналу в такому інтервалі часу можуть бути оцінені. Це не те саме, що часовий інтервал узгодженості, який ці СІР в межах можна вважати приблизно однаковим [25]. ОРВ - поріг для визначення розміру області стаціонарності. Ми можемо вважати це найгіршою допустимою неточністю з точки зору систематичного рівня, коли ефективність систем зв'язку прогнозується на основі моделей бездротових каналів. Оскільки середовище кожного каналу є унікальним, рівень ОРВ потрібно ретельно підбирати для кожного окремого середовища бездротового каналу. Тому важко запропонувати єдиний вирок щодо вартості ОРВ на даний момент. Це може залежати від особистого судження при аналізі даних кожного окремого середовища.

2.2.2 Застосування методу ПСЗТ у просторовому домені

Оскільки ехолот каналу відбирає канал за допомогою імпульсів як в дискретні моменти, так і в дискретному просторі, доки задовольняється частота дискретизації Найквіста (згадана в розділі 2.4.1), аналогічно, визначення області стаціонарності в просторовій області може бути логічний зсув з часової області. Розрахунок області стаціонарності в просторовій області дуже подібний до розрахунку в часовій області. Розсувне вікно рухається вздовж просторової осі (вздовж антенної решітки) замість осі часу, тоді як інші процедури підтримують те саме. Для сценарію широкосмугового бездротового каналу $N \times 1$ ми замінюємо t на r , а dt на dr в (2.1) до (2.3).

2.2.3 Застосування методу ПСЗТ у частотному домені

На рисунку 2.2 дві кластерні карти використовуються для представлення двох різних ВСЧ одного і того ж каналу (середовища). Один знаходиться на високих частотах, а інший - на низьких. У межах кожного з ВСЧ статистичні параметри каналу не змінюються. Однак у двох ВСЧ вони різняться. Якщо смуга пропускання каналу є досить широкою, щоб охоплювати як ВСЧ на високих і низьких частотах, тоді такий канал вважається каналом F_nS . Наприклад, основні процеси розповсюдження, такі як відбиття та дифракція, залежать від частоти в межах смуги пропускання каналів УШД, оскільки довжини хвиль звукових сигналів, що використовуються при вимірюванні каналів, порівнянні з розмірами об'єктів у навколишньому середовищі [62]. Існують також багаті дослідження частотно-залежних статистичних параметрів у межах смуги пропускання каналів УШД (включаючи діапазон частот нижче 6 ГГц) [63]. Це означає, що канали УШД охопили більше одного ВСЧ. Подібне пояснення такого явища можна знайти в [65].

Запропонований метод ПСЗТ, який використовується для оцінки ВСЧ, є розширенням методу ПСЗТ [63], який використовується для оцінки областей стаціонарності у часовій та просторовій областях.

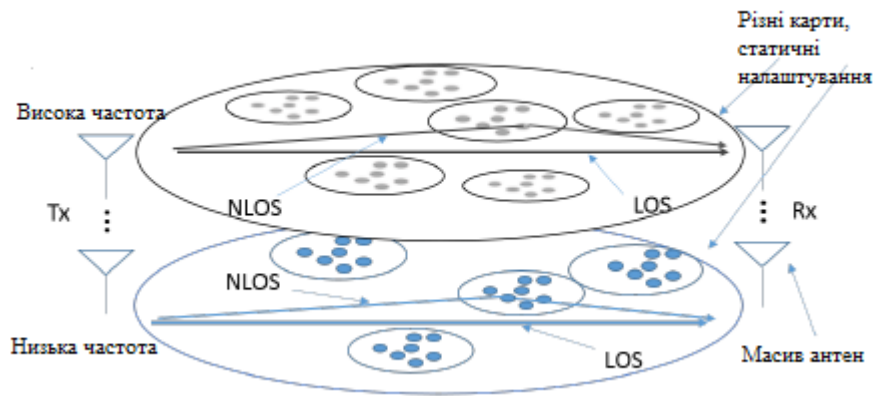


Рисунок 2.1 – ВСЧ каналів з високими і низькими частотами в однакових середовищах.

2.2.4 1 випадок середнє за знімком

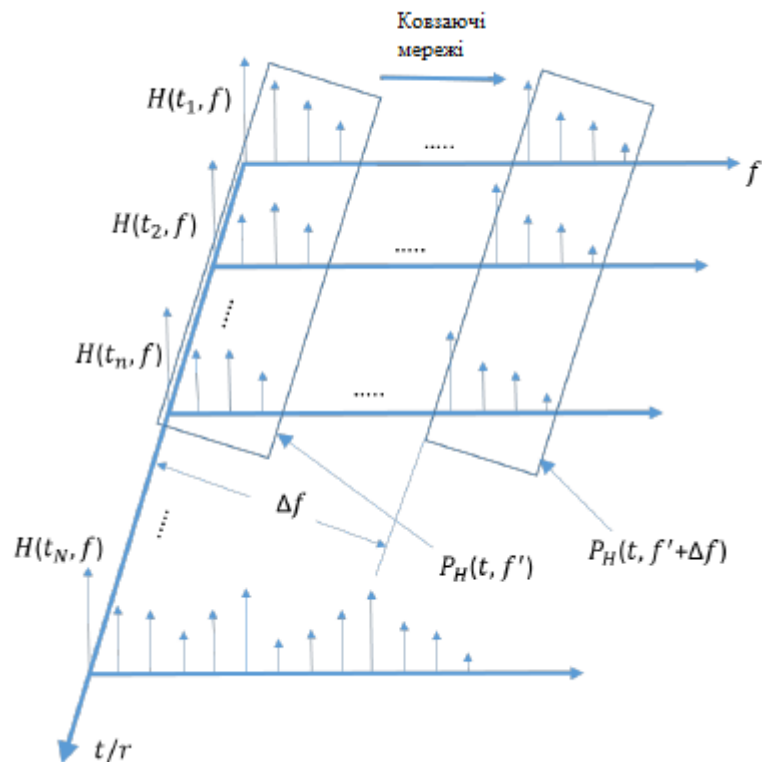


Рисунок 2.2 – Ковзаючі мережі суб-ФСПТ, що рухаються вздовж осі частоти.

Для широкосмугового бездротового каналу 1 x 1 ми визначимо H як функцію передачі каналу (перетворення Фур'є h). Тоді миттєва функція передачі потужності (РТФ) каналу РН можна також представляти знімок каналу в певний час t_i , $i = 1; 2; \dots; N$. Припускається, що загалом є N знімків, як на рисунку 2.3, а пропускна здатність кожного знімка складається з M точок частоти.

Спочатку, РТФ осереднюється за допомогою n -знімків вздовж осі часу t як середнє РТФ (ФСПТ), яке може бути виражене як

$$\overline{P_H}(t, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H(t_i, f)|^2 \quad (2.4)$$

де t - середній час t_i . По-друге, ми визначимо m -частотні точки суб-ФСПТ ($m < M$) в одній ковзаючій мережі на частотній осі f , і визначимо іншу m -частотні точки суб-ФСПТ РН, коли рухається вперед вздовж частотної осі f з відстанню Δf . Щоб уникнути непорозумінь, ми визначимо f' як частоте в ковзаючих мереж. Коефіцієнт кореляції між суб-ФСПТ визначається як

$$c(f, \Delta f) = \frac{\int \overline{P_H}(t, f') \overline{P_H}(t, f' + \Delta f) df'}{\max\{\int \overline{P_H}(t, f')^2 df', \int \overline{P_H}(t, f' + \Delta f)^2 df'\}} \quad (2.5)$$

Якщо коефіцієнти кореляції $c(f; \Delta f)$ між суб-ФСПТ перевищують ОРВ f_{cOPB} , то стаціонарна смуга пропускання d_f визначається як область стаціонарності в частотній області, тобто ВСЧ

$$d_f = \max\{\Delta f \mid c(f, \Delta f) \geq f_{cASL}\}. \quad (2.6)$$

Аналогічним чином, ми припускаємо, що суб-ФСПТ знаходяться в межах смуги пропускання, яка набагато менша, ніж стаціонарна смуга пропускання.

Зверніть увагу, що n -знімки, вибрані на першому кроці, повинні знаходитися в межах однієї області стаціонарності у часовій області (можливо, доведеться оцінити інтервал стаціонарності t_{rst} за рівняннями, згаданими в останньому розділі

2.2.1, оскільки всі умови стаціонарності повинні бути виконані в час, частота та просторова область при вивченні каналу). Для суб-ФСПТ в (2.5) ми можемо розглядати їх як уявні FS-CIR з набагато вужчою пропускнуою здатністю після перетворення Фур'є в часову область. Однак у розділах 2.2.1 та 2.2.2 слід використовувати повні CIR, оскільки передані сигнали в дійсності можуть бути FnS, і потрібно оцінити властивості каналу на основі звукових сигналів FnS, що використовуються при вимірюванні каналу.

2.2.5 2 випадок середнє за масивом антен

Для сценарію бездротового каналу $N \times 1$, такого як використання векторного аналізатора мережі (VNA) для вимірювання часового середовища, інваріантного на основі вірології віртуальних антенних решіток [65], ми замість цього обчислюємо PTF на основі антенних решіток. Тут ми визначаємо PH як PTF, а r_i - положення антени вздовж "осі r ", як на рисунку 2.3. Порівняно з випадком 1, ФСПТ слід позначати як

$$\overline{P_H}(r, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H(r_i, f)|^2. \quad (2.7)$$

Перший крок тепер змінено на середнє значення PTF на основі CIR, виміряних під матрицею n -антени. Тоді другий крок і наступні є однаковими.

Подібним чином, під матриця n -антени, яка використовується для обчислення ФСПТ, повинна бути вибрана в межах однієї нерухомої області в просторовій області (згідно з останнім розділом).

2.3 Вимірювання каналів та аналіз даних

2.3.1 Вимірювання каналів та обробка даних

Вимірювання каналу проводили у великому та порожньому приміщенні підвалу [21]. Ехолот каналу складається з VNA та великого віртуального рівномірного кругового масиву (ЄКМ) радіусом 0,5 м. Канал вимірювався в діапазоні частот до 6 ГГц 2-4 ГГц та двох діапазонах частот ммХв 14-16 ГГц і 28-30 ГГц. У кожному з діапазонів частот є 750 точок частоти (інтервал частот становить 2,67 МГц). Площа підвалу становила 7:85 м x 7:71 м, як на рисунку 2.4. Дві біконічні антени з діапазоном частот від 2-30 ГГц використовувались як на Tx, так і на Rx кожна. Діаграма їх випромінювання все спрямована на горизонтальній площині. Одна антена була закріплена на висоті близько 1 м з боку Tx. Інша переміщається по траєкторії віртуального ЄКМ на висоті 1 м з боку Rx. Весь ЄКМ складається з 720 віртуальних антен, а відстань між кожними двома сусідніми положеннями віртуальних антен становила 0,0044 м (менше ніж 30 ГГц). Було виміряно як сценарії прямої видимості (ПРВД), так і не ПРВД (НПРВД), а металеву дошку помістили між Tx і Rx для сценарію НПРВД.

Зверніть увагу, що ми вибираємо використання віртуальної антенної решітки порівняно з реальною антенною решіткою для зниження вартості звукового сигналу каналу та зменшення кореляції між реальними антенами. Це також широко використовуваний метод вимірювання каналів [22] для вивчення каналів у різних стандартних моделях каналів. Наприклад, неможливо використовувати 720 реальних антен для вимірювання каналу одночасно, насправді, враховуючи вищезазначене вимірювання каналу. Також зауважте, що інтервал між кожними двома послідовними антенними елементами антенної решітки повинен становити приблизно половину довжини хвилі (не набагато більшу або меншу, ніж половина довжини хвилі), щоб зменшити бічні пелюстки і зберегти вузьку діаграму випромінювання. В іншому випадку спрямованість пучка зменшується, і несподівані багатопроменеві компоненти в неоднозначному напрямку прибуття [18] можуть отримувати при вимірюванні каналу.

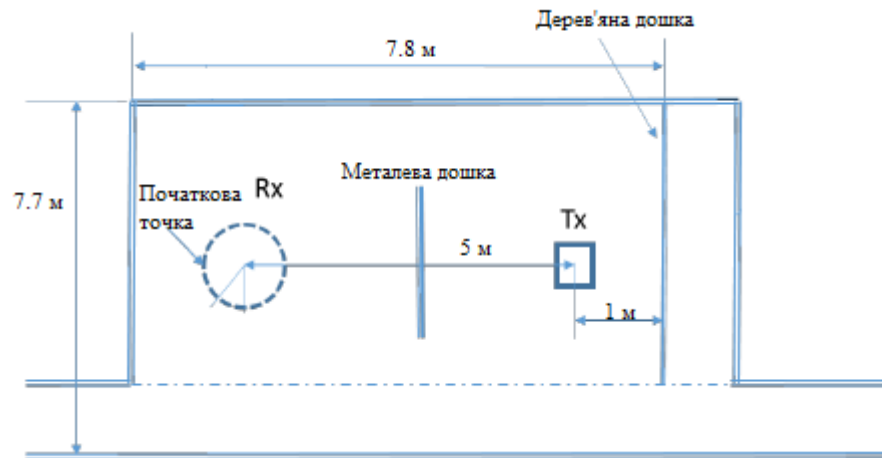


Рисунок 2.3 – План приміщення в якому відбувалося вимірювання.

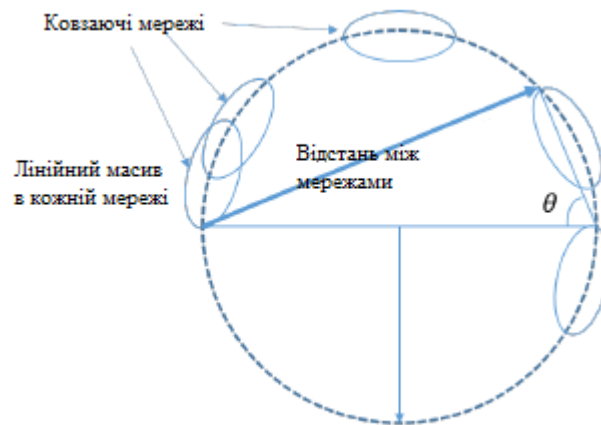


Рисунок 2.4 – Наближення лінійних антенних підрешіток.

Таблиця 2.1 – Розмір ВСЧ у сценарії НПРВД.

Діапазон частот (ГГц)	Розмір ВСЧ в МГц для OPB = 0,5	Розмір ВСЧ в МГц для OPB = 0,8
2-4	18.69	2.67
14-16	638.13	104.13
28-30	638.13	285.29

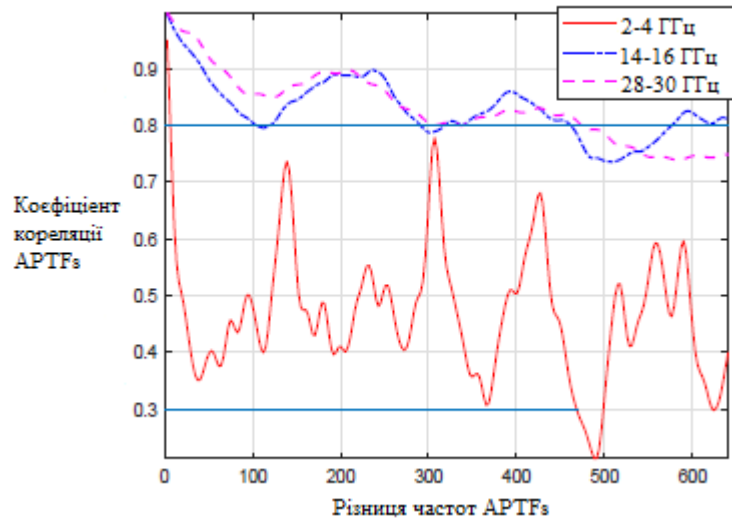


Рисунок 2.5 – ВСЧ для каналу, сценарій НПРВД коефіцієнти кореляції суб-ФСПТ.

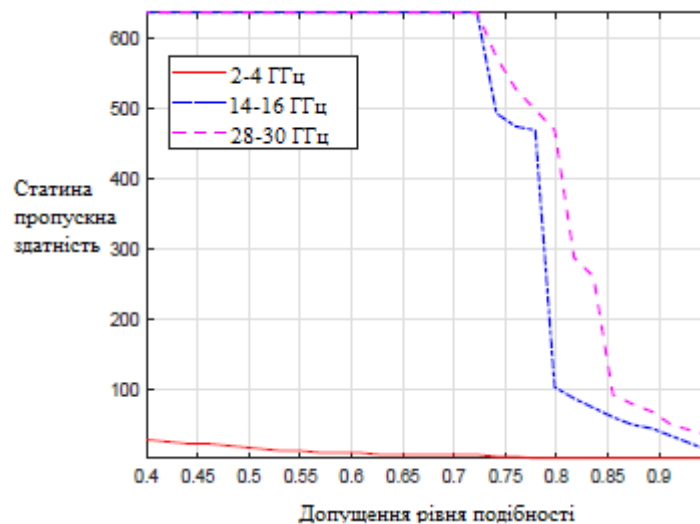


Рисунок 2.6 – ВСЧ для каналу, сценарій НПРВД стаціонарна пропускну здатність проти ОРВ.

Оскільки відстань Релея [14] всієї ЄКМ перевищує 200 метрів (на частоті 30 ГГц), при аналізі даних 16 послідовних віртуальних антен вибираються як віртуальна лінійна решітка в кожному розсувному вікні вздовж половини віртуального ЄКМ, як на рисунку 2.5. Розмір віртуального лінійного підмасиву становить приблизно 0,07 м. Відстань Релея вважається коротшою, ніж відстань

між T_x і R_x . Щоб уникнути дублювання вмісту, більше деталей обробки даних можна знайти в розділах 2.3.3 та 2.4.

2.3.2 Аналіз FRS

Розрахунок коефіцієнтів кореляції частоти базувався на методі ПСЗТ, застосованому в частотній області: усереднення на антенну решітку, як у розділі 2.4.4. Для того, щоб зменшити коливання результатів, пропускна здатність суб-ФСПТ в розсувних вікнах становила 5% від центральної частоти в кожному з діапазонів частот для всіх результатів, показаних нижче. Результати відповідали результатам, розрахованим при використанні вужчої смуги пропускання. Припускається, що пропускна здатність 5% менша, ніж ВСЧ каналів у всіх трьох смугах.

При оцінці коефіцієнтів коефіцієнта коригування на основі рисунку 2.6, ми зчитуємо значення з осі x як стаціонарну смугу пропускання (ВСЧ), коли коефіцієнти кореляції перетинають рівень ОРВ вперше. Якщо взяти ОРВ = 0,8 як приклад, очевидно, що стаціонарні смуги пропускання в діапазонах 14-16 ГГц та 28-30 ГГц більші, ніж у смугах 2-4 ГГц. На рисунку 2.7 проілюстровано стаціонарні смуги пропускання всіх трьох смуг для ОРВ від 0,4 до 0,95. Це показує, що частотні коефіцієнти частот у діапазонах 14-16 ГГц та 28-30 ГГц набагато більші, ніж у смугах 2-4 ГГц. Показані результати базуються на усередненні першого віртуального лінійного підмасиву віртуального ЄКМ (16 віртуальних антен із 720). Також обчислюються коефіцієнти частотних коефіцієнтів на основі інших віртуальних лінійних підмасивів навколо всієї ЄКМ, і знаходять порівнянні результати оцінки між діапазоном 14-16 ГГц та 28-30 ГГц. Однак усі оцінені коефіцієнти ВСЧ в діапазонах частот ммХв набагато більші, ніж у смугах частот до 6 ГГц для різних ОРВ. Це є важливою базовою лінією для аналізу та моделювання даних у решті розділу.

Моделі каналів СБПНР II підтримують пропускну здатність системи 100 МГц, яка враховується в межах одного ВСЧ. Значення ВСЧ, знайдене в діапазоні

2,4 ГГц для $OPB = 0,5$, становить 18,69 МГц, що набагато менше, див. Таблицю 3.1. Однією з причин може бути те, що обраний рівень OPB занадто високий. Іншою причиною може бути те, що розміри розсіювачів в підвалі ближче до довжин хвиль частот в діапазонах 2-4 ГГц, таких як стіни, стеля, вікна тощо (якщо розміри об'єктів у каналі є більш порівнянні з довжиною хвилі, статистика каналу стає більш різноманітною). Можна виявити, що залежні від частоти коефіцієнти розсіювання та відбиття стають меншими, коли частота зростає в [14], [18]. Отже, звукові сигнали на нижчих частотах є більш інтерактивними з об'єктами в цьому сценарії. Це також пояснює, що коефіцієнти кореляції набагато більші в діапазонах 14-16 ГГц та 28-30 ГГц, ніж ті, що знаходяться в діапазоні 2-4 ГГц на рисунку 2.6. Також можемо спостерігати, що, наприклад, коефіцієнти кореляції суб-ФСПТ в діапазоні 2-4 ГГц перевищують 0,3 для стаціонарної смуги пропускання в межах 467,25 МГц на рисунку 2.6, тобто ВСЧ становить 467,25 МГц на основі $OPB = 0,3$. Хоча ця смуга пропускання здається занадто великою, але для цього конкретного сценарію це може бути розумний розмір ВСЧ для діапазону 2-4 ГГц.

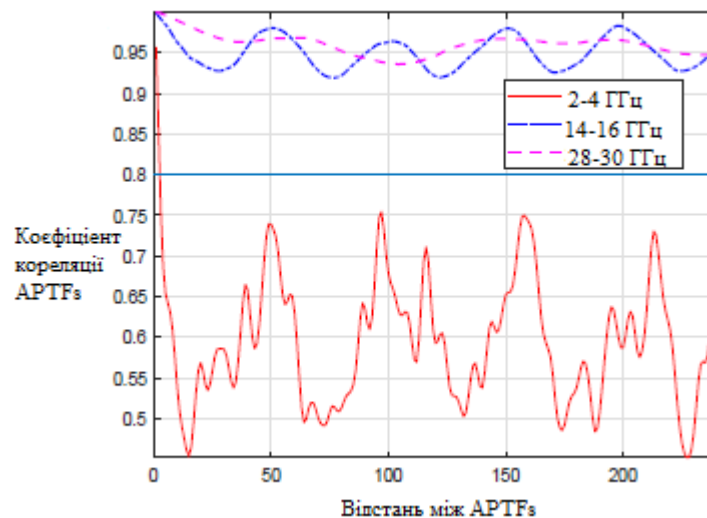


Рисунок 2.7 – Коефіцієнти кореляції суб-ФСПТ для сценарію ПРВД.

Для сценарію ПРВД коефіцієнти кореляції 14-16 ГГц та 28-30 ГГц смуги частот дуже подібні при дуже високих значеннях, як на рисунку 2.7. Складно знайти OPB , щоб визначити, яка смуга частот має більшу стаціонарну смугу

пропускання. Причиною може бути те, що загасання на метр сигналів різко зростає із збільшенням частоти. Тому компонент ПРВД стає більш домінуючим у вимірюваних CIR на більш високих частотах. Співвідношення компонента ПРВД до компонентів НПРВД, тобто коефіцієнти K [8], [20], оцінюються на основі ПСЗТ, отриманих з першого віртуального лінійного під масиву (аналогічні результати з інших віртуальних лінійних під масивів). K -коефіцієнт в діапазоні 2-4 ГГц становить близько 3 дБ, він становить близько 12 дБ в діапазоні 14-16 ГГц і близько 15 дБ в діапазоні 28-30 ГГц. Має сенс, що компонент ПРВД є більш домінуючим у вимірюваних CIR в діапазонах 14-16 ГГц і 28-30 ГГц, а коефіцієнти кореляції, оцінені з цих двох смуг, в основному відбивають сам компонент ПРВД.

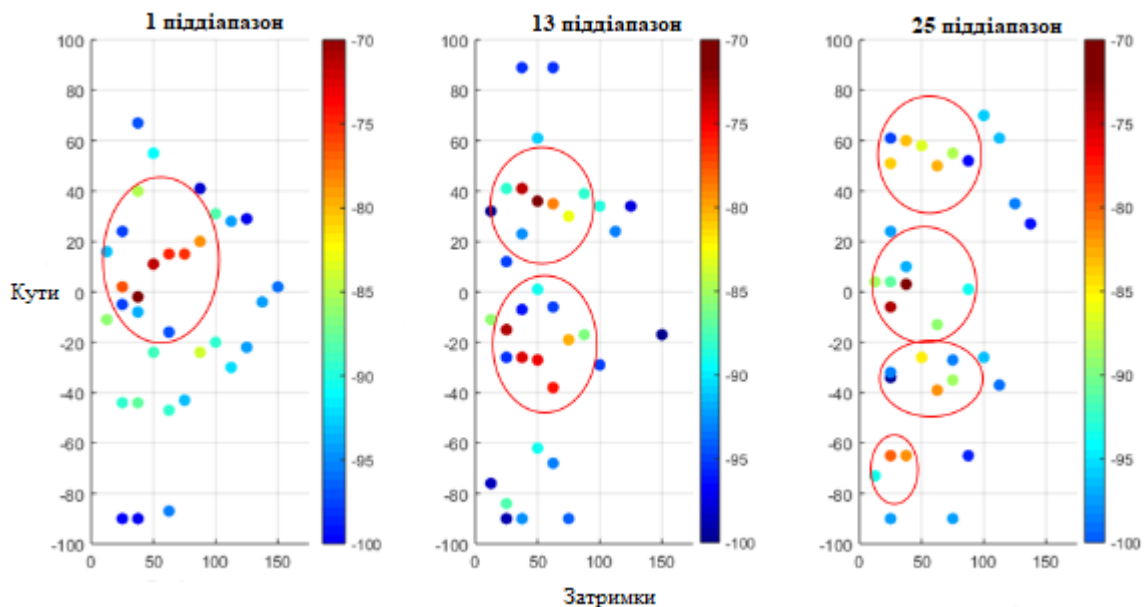


Рисунок 2.8 – Розрахункові МРС в деяких каналах піддіапазону від 2 до 4 ГГц (сценарій ПРВД).

Ми помічаємо, що ВСЧ (стаціонарні смуги частот) не є лінійно пропорційними центральній частоті в кожному вимірюваному діапазоні частот. Ми бачимо, На рисунку 2.9 коефіцієнти кореляції суб-ФСПТ дуже близькі між собою для діапазонів 14-16 ГГц і 28-30 ГГц. Оскільки ВСЧ визначаються з коефіцієнтів кореляції суб-ФСПТ за даними ОРВ, ВСЧ однакові в діапазоні 14-16 ГГц та в діапазоні 28-30 ГГц на основі результатів, та таблиці 3.1., особливо коли заданий

рівень ОРВ менше приблизно 0,72. Розміри ВСЧ на різних частотах не схожі на розміри визначення смуги пропускання когерентності (фрактальної пропускну здатності), 10% від центральної частоти (велике правило), в межах якої канал приблизно вважається частотою на [22].

2.3.3 Варіація статистичних властивостей каналів

Оскільки оціночні ВСЧ менше, ніж 2 ГГц, для каналів у цих трьох смугах частот, припущення ШСН є дійсним лише в межах одного ВСЧ, а не всієї смуги пропускання 2 ГГц. Тому ці канали слід розглядати як FnS. Для зручності розділили порівну смугу пропускання смуги 2-4 ГГц на 25 піддіапазонів, кожна з пропускну здатністю 80,1 МГц (30 точок частоти \times df , $df = 2,67$ МГц). Також порівну розділили пропускну здатність смуги 28-30 ГГц на 3 піддіапазони, кожна з пропускну здатністю 667,5 МГц (250 точок частоти). (Стационарні) смуги пропускання вибраних піддіапазонів каналів близькі до стандартних моделей каналів, таких як СБПНР II (100 МГц в діапазонах до 6 ГГц) та METIS (500 МГц або більше в діапазонах хвильових хвиль).

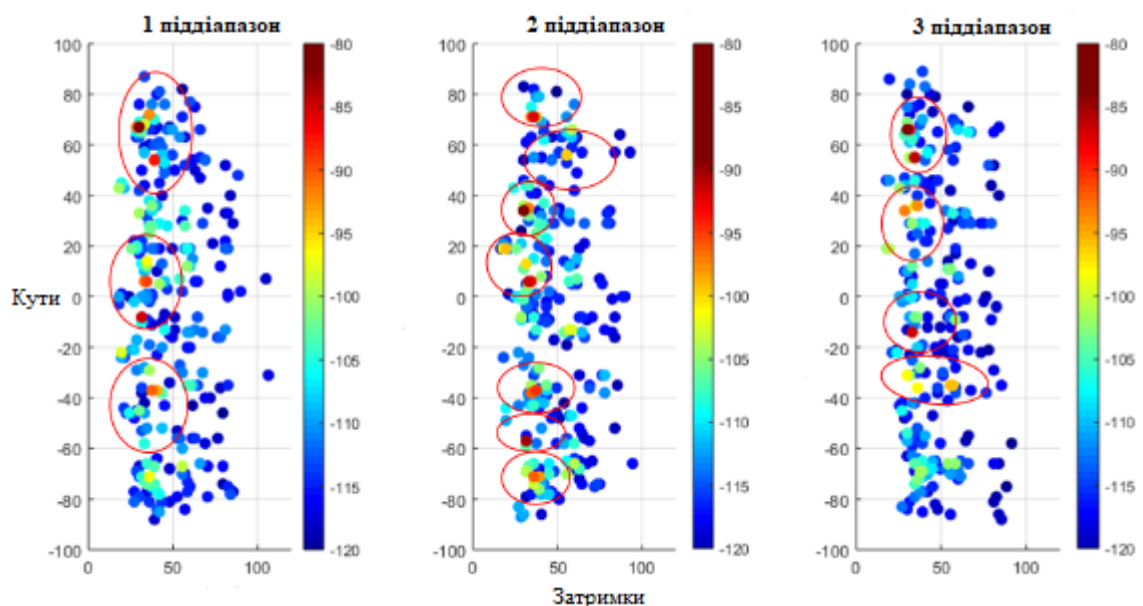


Рисунок 2.9 – Розрахункові МРС в піддіапазонах каналів від 28 до 30 ГГц (сценарій ПРВД).

Було обрано динамічний діапазон 30 дБ та 40 дБ для діапазону CIR в 2-4 ГГц та в діапазонах частот 14-16 / 28-30 ГГц відповідно. SAGE [21], [23] використовується для оцінки азимутального кута прибуття (AoA), часу прибуття (ToA) та амплітуди багатопробеневи компонентів (MPC) у кожному піддіапазоні каналів на основі перших 16 - віртуальний лінійний під масив. Ми оцінюємо 35 ГДК з піддіапазонів каналів у діапазоні 2-4 ГГц та 250 ГДК із каналів у діапазоні 28-30 ГГц (кількість передбачуваних ГДК порівнянн з такою в [11], [21]). Результати проілюстровано на рисунку 2.9 та рисунку 2.10. За віртуальним судженням ми можемо обвести кластери на основі ГДК з найсильнішими силами червоного кольору. Ми можемо спостерігати чітко різні затримки та кути ГДК з більшими потужностями на рисунку 2.9 та незначні відмінності на рисунку 2.10. Також оцінюються MPC каналів піддіапазону на основі інших 16 віртуальних лінійних під масивів. Подібне явище було виявлено. Ми не показуємо їх тут для стислості.

Зверніть увагу, що він показує більший розрив перед першим оціненим кластером на рисунку 2.10, ніж на рисунку 2.9. Однак надмірна затримка перед першим приходом MPC у діапазоні 2-4 ГГц повинна бути порівнянн із затримкою в діапазоні 28-30 ГГц. Причиною може бути те, що тривалість затримок в імпульсних відгуках піддіапазонів в межах 2-4 ГГц ($1 / 80.1$ МГц) набагато більше, ніж у піддіапазонах в межах 28-30 ГГц ($1 / 667.5$ МГц), які визначаються пропускною здатністю каналів піддіапазонів, згаданих на початку цього розділу. Оскільки передбачувані кластери завжди розташовані в середині затримки, передбачувана надлишкова затримка першого MPC в першому великому бункері затримки імпульсної характеристики в діапазоні 2-4 ГГц виглядає набагато коротшою. Тривалість затримки імпульсних характеристик у діапазоні 28-30 ГГц набагато менша, ніж у смузі 2-4 ГГц, передбачувана надлишкова затримка першого приходу MPC може бути більш точно оцінена в діапазоні 28-30 ГГц, а надмірна затримка MPC першого прибуття (половина тривалості контейнера затримки) виглядає довшою.

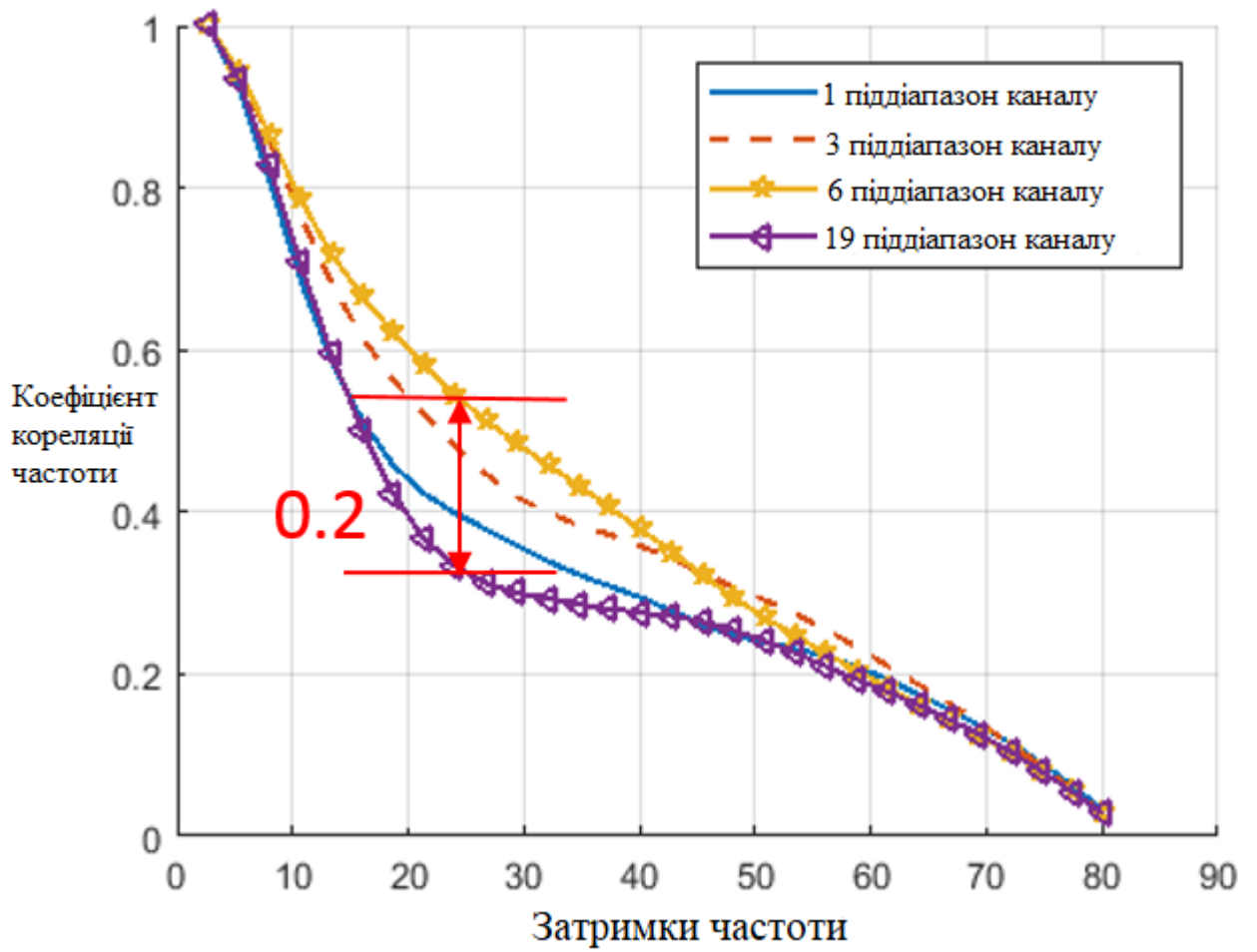


Рисунок 2.10 – FCF каналів піддіапазону, для сценарій НПРВД в діапазоні 2-4 ГГц.

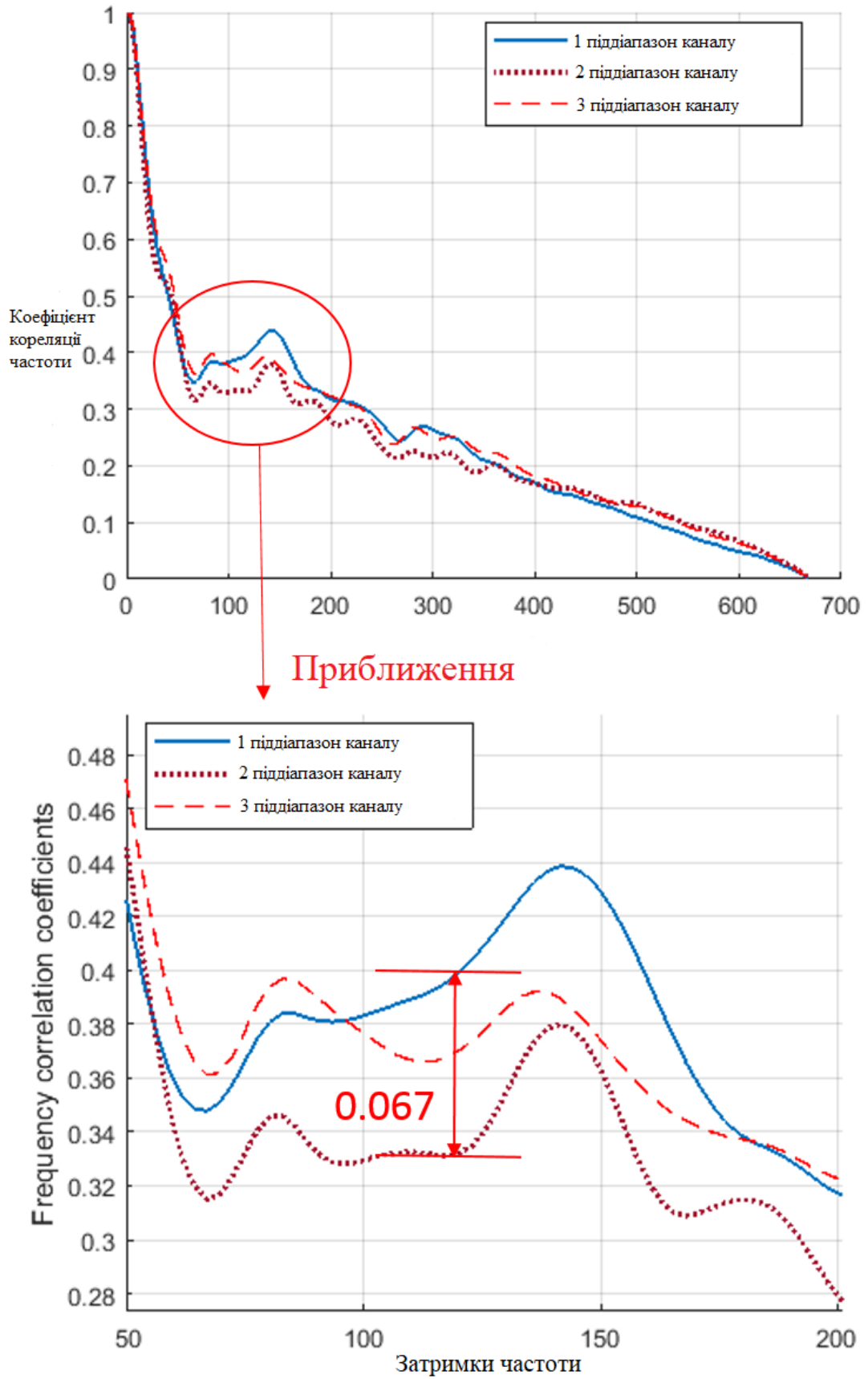


Рисунок 2.11 – FCF каналів піддіапазону, для сценарій НПРВД в діапазоні 28-30 ГГц.

2.4 Висновки

Запропоновано покращення методу профіль затримки потужності. Застосувавши цей метод для низьких частот, виявлено що доступність каналів зі стаціонарною частотою краща у міліметрових хвилях ніж в 6 ГГц. Також запропоновано модель зі змінною частотою яка підходить як для каналів до 6 ГГц так і для міліметрових хвиль. Основна ідея - розділити канал з змінною частотою на декілька із постійною, змодельювати кожен під канал і об'єднати їх як один канал із змінною частотою.

3 МОДЕЛЮВАННЯ НАПРАВЛЕНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ЗІ СФЕРИЧНИМИ КУТАМИ

3.1 Вступ

Технологія формування променя є ключовою технологією для забезпечення зв'язку ммХв для бездротових мереж 5G і навіть B5G [1], [18], [25], [30], [42], [43], [60], [61]. Він використовується як на сторонах Tx, так і на Rx, і в зв'язку необхідне фізичне вирівнювання пучків Tx і Rx. У цьому випадку переданий сигнал ммХв відчуває лише частину всього середовища (каналу). Через неоднорідне середовище менш каналів у різних напрямках об'єкти, що вносять вклад в характеристики каналів DC, можуть бути дуже різними, а статистичні властивості цих DC можуть бути різними. Наприклад, у вимірюваннях каналів ммХв [10], [42], [53] виміряні КППВ (із використанням обертової антени) були різноманітними в різних напрямках, так само були оцінені стохастичні параметри їх.

При дослідженні масивних багатовхідних та багатовихідних каналів (MIMO), якщо діафрагма антенних решіток більша за просторову стаціонарну відстань, широкомасштабне стаціонарне (ШСН) припущення в просторі, тобто однорідний канал (НО) над кілька десятків відстані когерентності [58], [69], не виконується [42], [61]. Це явище було добре вивчене у стандартних моделях каналів [1], [13], [31] та інших літературних джерелах [2], [24], [25], [61], [65]. При дослідженнях каналів ммХв, враховуючи різницю стохастичних властивостей постійних струмів, спричинених неоднорідністю середовища, припущення ШСН також не займає простір, зайнятий кількома постійними струмами. Піднімаються питання про те, як визначити стаціонарність на постійних точках та як його оцінити. Однак теми, пов'язані з цими питаннями, рідко зустрічаються в літературі.

У стандартних моделях каналів ммХв, таких як METIS [13], 3GPP [31], 5GSM [1], mmMAGIC [9], спочатку було розроблено моделювання середовищ цілих каналів ммХв. Потім, помноживши спрямовану структуру антени або застосувавши технологію формування променя до антенних решіток як на Tx, так і на Rx, були отримані спрямовані канали ммХв. У згаданому підході до

моделювання спрямованих каналів ммХв характеристики цілого всеспрямованого каналу моделювались без поглибленого аналізу неоднорідності середовища. Статистична властивість усього каналу в різних напрямках однакова. Моделі, засновані на такому підході, не можуть належним чином відображати властивості спрямованих каналів ммХв під різними кутами. У найсучасніших дослідженнях каналів ммХв спрямованість є однією з тем дослідження. У роботі [44] [46] часові та просторові (кутові) статистичні описи каналів ммХв були розділені в моделях каналів. У mmMAGIC [9] та [43], [44] були вивчені моделі каналів втрати спрямованого шляху. У [69], [70] моделі доменних каналів променя використовувались для вивчення багатокористувацьких багатокористувацьких систем MIMO (MU-MIMO) та масивних систем MIMO ммХв. Однак дослідження стаціонарності спрямованих каналів ммХв, як фундаментального дослідження спрямованості, навряд чи можна знайти в літературі, а дослідження властивостей напрямлених каналів ммХв все ще недостатні.

Послідовність дуже важлива при розробці стохастичних моделей каналів. У часовій області, якщо середовище каналу не змінюється суттєво з плином часу, CIR, виміряні в одному фіксованому положенні в такому середовищі, корелюються. Таким чином, було запропоновано еволюцію часу для забезпечення узгодженості модельованих каналів у програмах СБПНР II / + [30], [31] та QuaDRiGa [22], реалізованих на основі траєкторій руху мобільних терміналів. Просторова узгодженість враховувалась при розробці стандартних моделей каналів 5G. Оскільки система зв'язку 5G складається з різних типів ліній зв'язку (каналів), які співіснують в одній і тій же області, це вимагає, щоб канал еволюціонував плавно, без розривів між різними типами ліній зв'язку та в ситуації, коли T_x та R_x рухаються або повертаються [70]. Компоненти, що стосуються просторової узгодженості, були включені до METIS, останніх 3GPP, 5GCM та інших стандартних моделей каналів 5G. METIS [13] запропонував моделювати постійні великомасштабні / дрібномасштабні параметри, такі як потужність, кутові властивості, стан поляризації тощо, на основі геометричних розташувань першого та останнього розсіювачів розсіювання кожного шляху (T_x до розсіювача і

розсіювач до R_x), процес народження та смерті та видимість областей скупчень. У частотній області між частотна кореляція великомасштабних параметрів (LSP) була включена в ІМТ 2020 [34]. Узгодженість та кореляція між низькочастотними (НЧ) та високочастотними (ВЧ) каналами досліджувались за допомогою моделі трасування променів, а узгодженість між каналами декількох смуг частот вивчалась у гетерогенній мережі 5G [70]. Подібним чином, узгодженість необхідно враховувати при моделюванні сусідніх спрямованих каналів мМХв.

У цій главі спочатку вводиться метод А-ПСЗТ для вивчення областей кутової стаціонарності (ASR) каналів. Ми оцінюємо ASR та інші статистичні параметри на основі вимірювань КППВ в діапазоні 60 ГГц з офісного середовища, і три типові КППВ знайдено в аналізі даних. Ця частина роботи подібна до нашого колишнього дослідження [22]. Потім ми визначаємо DC на основі ширини променя пучків T_x / R_x і використовуємо три класи для класифікації DC відповідно до цих трьох типових КППВ. Ми пропонуємо моделювати DC за модифікованою моделлю Салеха-Валенсуели (SV) [40], і еволюція кластера в азимутальній області використовується для генерації постійних коефіцієнтів каналів DC.

3.2 Моделі спільних каналів

Моделі каналів у попередніх дослідженнях [25], [27], [44], [45] та іншій схожій літературі базуються на кластерній моделі, яку можна записати як

$$h^D(\tau) = \sum_{l=1}^L a_l \delta(\tau - \tau_l) \underbrace{\delta(\phi - \phi_l) \delta(\theta - \theta_l)}_{(3.1)} \quad (3.1)$$

де припускається, що є l кластерів, $l = 1, 2, \dots, L$, а a - амплітуда кластера.

З огляду на знання спрямованих каналів мМХв у кожному стані Маркова, можна описати будь-який КППВ одним із станів Маркова, замість того, щоб описувати їх за точними напрямками в кутовій області (азимут та кути піднесення). Зокрема, використати три стани Маркова для підстановки прямих частин у (3.11) (видалення кутової інформації з моделі, оскільки кутова інформація кластерів

знаходиться лише в межах -3 дБ (кутовий діапазон кожного вузького променя) і група моделей спільних каналів можуть бути використані для моделювання спрямованих каналів мМХв у цих марківських станах. Складність моделей каналів у кожному штаті Маркова набагато менша порівняно з тими, що існують у поточних моделях каналів мМХв, згаданих у Розділі 3.1.

3.2.1 Процедура моделювання направлених каналів ММХв

Процедура моделювання миттєво спрямованих каналів мМХв проілюстрована на рисунку 3.1. Спочатку розрізняється випадок ПРВД та НПРВД. Тоді ми визначимо три стани Маркова у випадку ПРВД і дві стани Маркова у випадку НПРВД. Кожному стану Маркова присвоюється модель каналу на основі моделей із відсотком. Нарешті, можна отримати моделі спільних каналів, що складаються із стаціонарної / нестаціонарної моделі та нульової моделі.

У випадку НПРВД існують лише НПРВД і відключення станів Маркова, а спільні моделі містять лише h та $Null$. Оскільки це аналогічно обробці даних та моделюванню спрямованих каналів мМХв у випадку НПРВД, ми зосередимося лише на трьох станах Маркова у випадку ПРВД у решті розділу. Зрозуміло, що якщо T_x розглядається як базова станція або реле, він зазвичай фіксується в положенні з високою ймовірністю встановлення ПРВД-зв'язку з користувачем/ R_x .

На основі результатів аналізу даних у розділі 2.3.3 також можна розділити DCIR в різні стани Маркова за азимутальними кутами. Однак моделювання, засноване на обмежувальному розподілі, вважається більш універсальним у випадку різних каналів. Це дозволяє нам моделювати миттєво спрямовані канали мМХв без урахування кутів напрямлених каналів мМХв. На системному рівні, якщо нам потрібно лише оцінити продуктивність системи на основі масивних передач сигналу мМХв і точність кута/напрямку кожного згенерованого КППВ не суттєво впливає на результати моделювання, запропоновані моделі спільних каналів дуже придатні для обслуговування цілі і набагато менш складні в порівнянні зі стандартними моделями каналів мМХв.

3.2.2 Стаціонарні та нестаціонарні моделі каналів

На основі аналізу даних, КППВ в стані ПРВД належить до однієї великої S-ASR. Отже, статистичні параметри цих КППВ в кутовому покритті стану ПРВД є постійними, і пропонується використовувати стаціонарну модель каналу для опису цих КППВ. Навпаки, КППВ у стані НПРВД перевищують декілька S-ASR. Тому вважається що статистичні параметри цих КППВ в межах кутового охоплення стану НПРВД є різними, і пропонується використовувати нестаціонарну модель каналу для опису цих КППВ. Хоча використовується “нуль” для моделювання потужності КППВ в стані відключення.

Таблиця 3.1 – Статистичні параметри для ПРВД і НПРВД стану

КППВs в станах маркова	Коефіцієнт передачі між кластерами	Коефіцієнт затухання потужності кластерів	Коефіцієнт прибуття променя	Коефіцієнт затухання потужності променя	FCPR
ПРВД стан	4.4723 (1/0.2236)	-0.3543 (12.2578 c)	1.0494 (1/0.9529)	-0.4147 (10.4725 c)	24.346
НПРВД стан	3.3400 (1/0.2994)	-	1.086 (1/0.9208)	-0.4321 (10.0508 ns)	-

3.2.3 Оцінка статичних параметрів

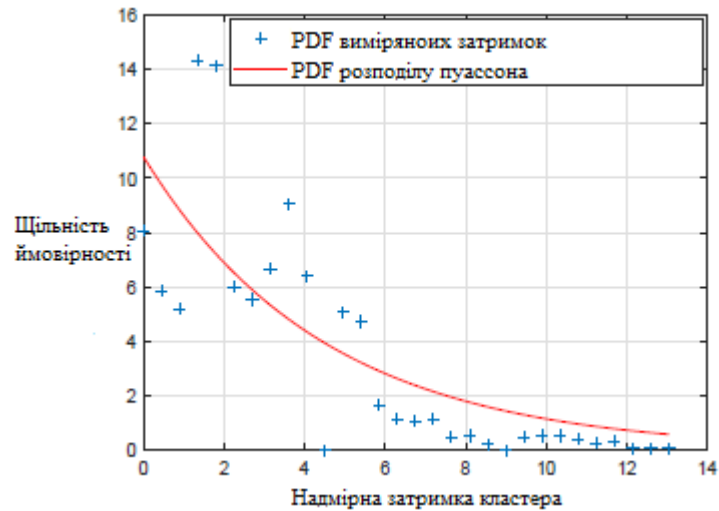


Рисунок 3.1 – PDF між кластерного променя надмірної затримки на основі КПВ в стані ПРВД у випадку ПРВД.

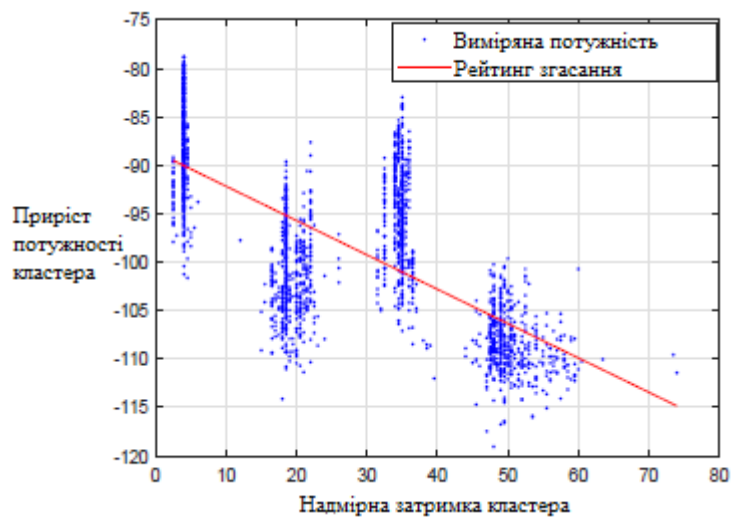


Рисунок 3.2 – Швидкість спаду потужності між кластерного променя на основі КПВ в стані ПРВД у випадку ПРВД.

В аналізі даних ми використовуємо динамічні діапазони вимірюваних КПВ 40 дБ. Перший кластер (компонент ПРВД або перший компонент НПРВД) з кожного КПВ видаляється і зберігається для оцінок FCPR відповідно до (4.11), потім піковий аналіз використовується для обробки решти КПВ в оцінці міжкластерних та внутрішньо кластерних параметрів. Ми знаємо, що мінімальний інтервал між кластерами 12 нс підходить для розділення кластерів (просторові розміри 3,6 м, тобто приблизно 12 нс, є обґрунтованими для відстані між двома

кластерами в офісному середовищі), і це дозволяє нам щоб врахувати особливості КППВ в обох ПРВД та НПРВД в штатах Маркова. Ми визначаємо межу кожних двох послідовних кластерів за одним із мінімальних пікових рівнів потужності між ними і переконуємось, що тривалість кожного кластера перевищує 12 нс. З кожного КППВ фіксуються чотири кластери, на основі яких оцінюються параметри між кластерами та внутрішніми кластерами.

Мінімальний між кластерний інтервал, що використовується в аналізаторі піків, суттєво впливає на результати оцінки. Він подібний до роботи в [44]. Швидкість передачі між двома кластерами фактично дорівнює $4.4723 + 12 = 16.4723$ нс, для випадку ПРВД і $3.34 + 12 = 15.34$ нс для випадку НПРВД. Розрахункові швидкості спаду потужності кластера/променя - це нахили в моделі SV, як на рисунку 2.9. Рівняння для передачі швидкості затухання в нс наступне $\text{затухання}(c) = -1/\ln(10)$, що є співвідношенням між лінійним примірком та експоненціальним даними.

3.2.4 Оцінка параметрів

Базуючись на КППВ в стані ПРВД, проводиться оцінка внутрішніх та між кластерних параметрів. Рисунок 3.3 показує PDF затримок між кластерами, а рисунок 3.4 - швидкість затухання потужності між кластерами. Аналіз цих параметрів на основі КППВ в стані НПРВД було проведено подібним чином, за винятком FCPR і швидкості затухання потужності між кластерами. Було помічено, що є дві високі ймовірності (вище 14%), які далекі від модельованого PDF розподілу Пуассона (червоним кольором) на рисунку 3.3. На основі значень, показаних у цій групі (різниця затримки між двома кластерами) приблизно 1,5-1,8 нс, було розраховано відповідну відстань цих двох кластерів, що дорівнює близько 0,5 метра.

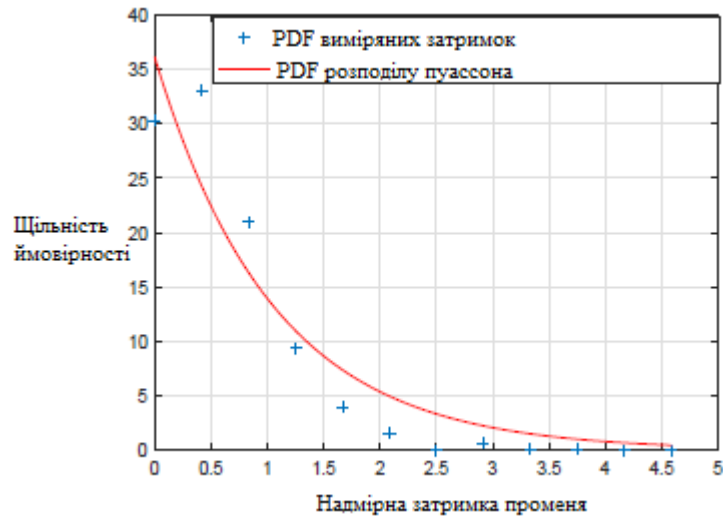


Рисунок 3.3 – Надмірна швидкість спаду потужності між кластерами на основі КПВ в стані ПРВД у випадку ПРВД.

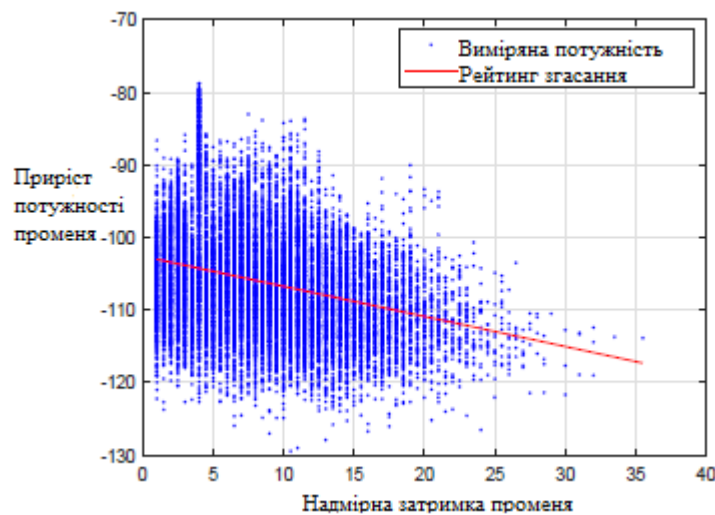


Рисунок 3.4 – Надмірна швидкість спаду променя між кластерами на основі КПВ в стані ПРВД у випадку ПРВД.

Ймовірніше за все, це може бути через відбиття / розсіювання компонента ПРВД, спричинене великим ехолотом. Оскільки ехолот не можна розглядати як частину середовища каналу, цим можна знехтувати.

Далі використовується звичайний розподіл для фіксування статистики FSPR, $K \sim c1 N(2; 898; 13:67)$, як показано на рисунку 3.5 (CDF на рисунках означає функцію кумулятивного розподілу). Логарифмічно-нормальний розподіл використовується для підбору статистики швидкостей спаду потужності між

кластерами, $\ln(\Gamma) \sim N(11.1077, 2.4291)$, як показано на рисунку 3.6. Можна помітити, що нормальні розподіли здаються не такими хорошими, як фіксування. Це пояснюється тим, що результати на рисунку 3.5 та рисунку 3.6 базуються на КПВ у всіх трьох групах НПРВД.

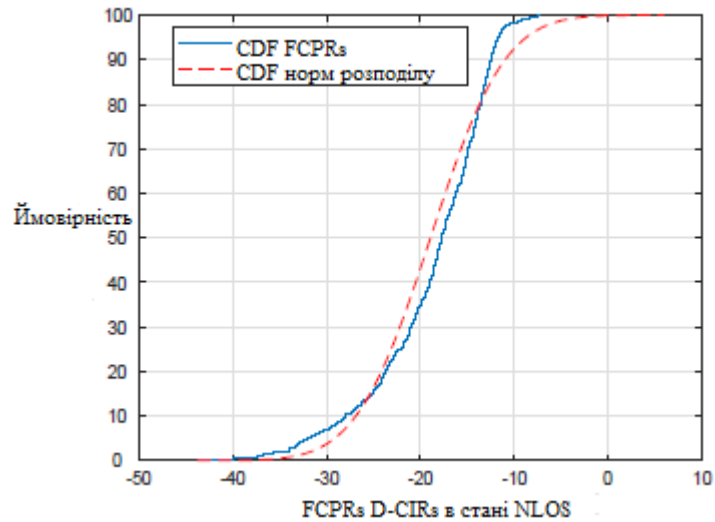


Рисунок 3.5 – Нормальний розподіл FCPR, оцінений на основі КПВ в стані НПРВД.

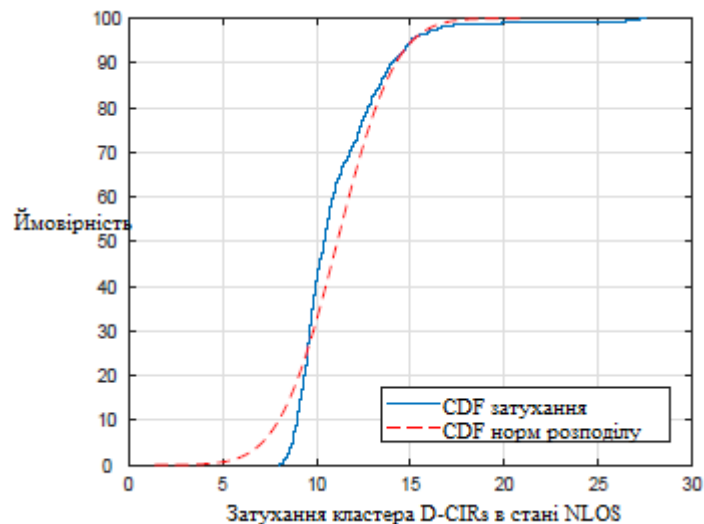


Рисунок 3.6 – Логарифмічний розподіл коефіцієнту затухання між кластерами (дані відповідають нормальному розподілу), оцінений на основі КПВ в стані НПРВД.

Дані містять інформацію про канали в різних частинах середовища каналу (об'єкти різні, як і властивості каналу). Однак було продовжено використання звичайних розподілів для опису властивостей каналу як у минулому розділі. Звичайні розподіли все ще досить добре підходять для даних. Точність прийнятна на основі результатів у наступному розділі. Усі розрахункові параметри (наприклад SV модель), такі як швидкість надходження кластера/променя, швидкість спаду потужності, можна знайти в таблиці 3.1.

3.3 Генерація коефіцієнтів для каналу зв'язку на основі стаціонарної моделі каналу

Перший крок, створення випадкових затримок.

$$\tau_l' = \text{Poisson}(\Lambda) \quad (3.2)$$

на основі коефіцієнта кластера Λ . Здійснюється вирівняття у порядку зменшення як

$$\Delta\tau_l = \text{sort}(\tau_l' - \min(\tau_l')). \quad (3.3)$$

Тоді фінальна між кластерна затримка може бути сформована як

$$\tau_l = \begin{cases} 0, & l = 1 \\ \Delta\tau_{l-1} + 12 + \epsilon_{\tau_l}, & l = 2, 3, \dots, L \end{cases} \quad (3.4)$$

де $\epsilon(t)$ - компенсація інтервалу затримки між першим кластером та рештою кластерів порівняно з мінімальним між кластерним інтервалом (12 нс, які були виявлені раніше).

Другий крок, потужність кластера формується як

$$a_l'^2 = \begin{cases} 1, & l = 1, \\ \exp(-\frac{\tau_l}{\Gamma})/10^{\frac{K_{c1}}{10}}, & l = 2, 3, \dots, L \end{cases} \quad (3.5)$$

де K_{c1} - FCPR (К-коефіцієнт). Тоді фінальна потужність між кластерами а може бути сформована як

$$a_l^2 = \frac{a_l'^2}{\sum_{l=1}^L a_l'^2}. \quad (3.6)$$

В роботі не розглядається відбивання сигналу, оскільки це досить складні розрахунки.

Третій крок, формування внутрішньо кластерної затримки променя l ; m та потужності променя a . Сума потужностей променів, дорівнює відповідній потужності кластера. Загальна процедура подібна до тієї, яка застосовується для формування між кластерних затримок та потужностей на кроці 1 та 2. Однак зараз використовується

$$\tau_{l,m} = \Delta\tau_{l,m}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.7)$$

$$a_{l,m}'^2 = \exp(-\frac{\tau_{l,m}}{\gamma}), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.8)$$

замість (3.16) та (3.17) відповідно. Далі використовується внутрішньо кластерні параметри для підстановки відповідних між кластерних параметрів у (3.14), (3.15) та (3.18). Промені в кластері ПРВД генеруються так само, як і промені в кластерах НПРВД для спрощення моделі. В цьому випадку не було додано жодної затримки чи інтервалу компенсації для кожного із затримок променя.

Четвертий крок, проводиться масштабування/зсув параметрів внутрішнього кластера на основі параметрів між кластерами, а потім підсумовується потужності променів, які потрапляють в ті самі сегменти затримки (залежить від пропускної здатності каналу).

Кожен коефіцієнт сформованого каналу (КПВ) є вирівнюванням потужностей внутрішньо кластерних променів на основі затримок внутрішньо кластерних променів згідно (3.13). В кожному кластері зберігається певна кількість променів як модель SV. Оскільки дуже велика пропускна здатність є перевагою каналів ммХв, ШСН у частотній області може не задовольнятися [51], і сусідні затримки можуть бути корельовані. Тому промені всередині кожного скупчення не підсумовуються як одна кластерна потужність. Це не те саме, що у моделях СБПНР та 3GPP.

3.4 Моделювання та перевірка стаціонарних та нестаціонарних моделей

У дослідженнях вузько смугових каналів за марковськими станами опис загального ефекту каналу може бути записаний у формі, як у [73]. Зверніть увагу, що позначення вузько смугового каналу дорівнює $h(t)$ замість $h()$, оскільки вплив каналу розглядається як потужності, представлені комплексними значеннями вздовж осі часу t (відсутність затримки, оскільки вузько смуговий канал не може розрізнити ГДК). Однак при дослідженні широкосмугових каналів за станами Маркова вплив каналу розглядається як імпульсна характеристика $h()$ (із затримкою) в один конкретний момент часу (точка), оскільки ГДК можна розрізнити за допомогою бункерів затримки. У цьому випадку загальний ефект каналу може бути записаний як (5.12). Нам потрібно вивчити ймовірність Маркова та кожен широкосмугову модель каналу, яка представляє канал, впливає в кожному стані Маркова.

$$\text{pdf}(h(t)) = \text{pdf}(h^{\text{LOS}}(t)) \times \pi_1 + \text{pdf}(\text{Null}) \times \pi_2 + \text{pdf}(h^{\text{NLOS}}(t)) \times \pi_3 \quad (3.9)$$

Оскільки ймовірність Маркова була оцінена за реальними даними вимірювань у розділі 2.2.4, ми не будемо далі обговорювати це. У цьому розділі основна увага приділяється верифікації стаціонарних та нестаціонарних моделей каналів. Ми безпосередньо моделюємо моделі у випадку ПРВД на основі

параметрів, наведених у таблиці 2.3, і вони відповідають нормальному / логарифмічному розподілу. Ми порівнюємо CDF середньоквадратичних DS, оцінених на основі модельованих КППВ і тих, що оцінюються на основі вимірних КППВ.

3.3.1 Перевірка стаціонарної моделі станів ПРВД

Ми проводимо моделювання моделі стаціонарного каналу в 1000 разів (більше 340 вимірних КППВ в стані ПРВД. Один імітований D-PDP показаний на рисунку 3.7. Порівняння CDF середньоквадратичних DS між модельованими КППВ та вимірними КППВ показано на рисунку 3.8. Ми бачимо, що статистика змодельованих КППВ не може отримати даних. Зверніть увагу, що компенсація інтервалу затримки 1 у (5.16) є дуже важливим фактором у наближенні даних, показаному на рисунку 3.18.

3.3.2 Перевірка не стаціонарної моделі станів НПРВД

У кожному прогоні моделювання ми дозволяємо FCPR генерувати випадково відповідно до розподілу, а також швидкості затримки між кластерами. Один модельований D-PDP показаний на рисунку 3.7. 1 дорівнює -2 нс. Ми вже 1000 раз проводили моделювання нестаціонарної моделі. Порівняння CDF середньоквадратичних DS між модельованими КППВ та вимірними КППВ показано на рисунку 3.8. Ми бачимо, що статистика модельованих КППВ не може дати даних.

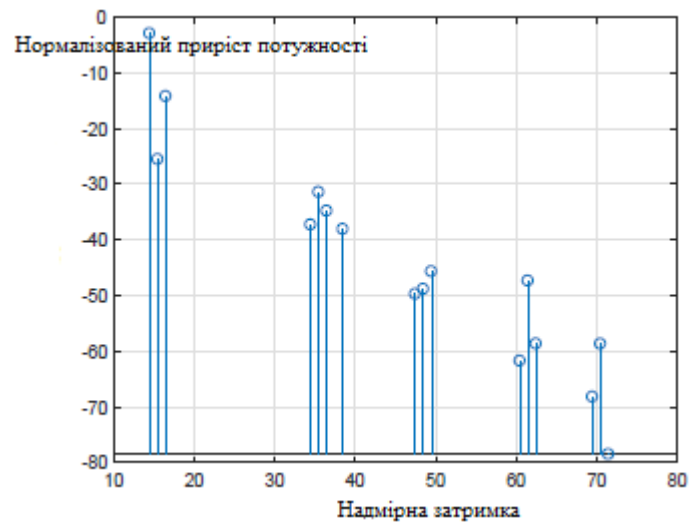


Рисунок 3.7 – Змодельований стан НПРВД D-PDP (τ).

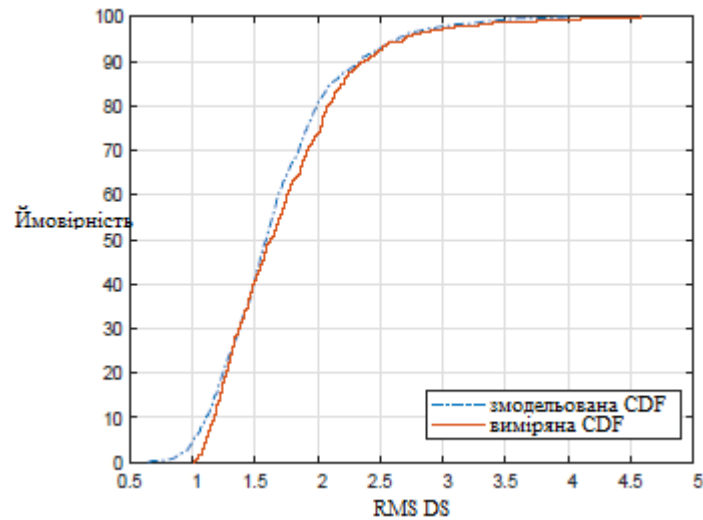


Рисунок 3.8 – Порівняння CDF середньоквадратичних DS між модельованими КПВ та виміряними КПВ, для стан НПРВД.

3.5 Висновки

У цьому розділі введено метод кутового усередненого профіля затримки потужності. Цей метод використовує кути піднесення і азимут. Під час аналізу даних вимірювань міліметрових хвиль було описано декілька коефіцієнтів. Виявлено три типових імпульсних реакцій направленою каналу у випадку прямої видимості передавача і приймача, і дві типових реакції під час не прямої видимості пристроїв. Було запропоновано три стани маркова для моделювання направлених каналів міліметрових хвиль який базується на методі кутового усередненого профіля зі станами прямої і не прямої видимості.

4 СХЕМА НАПРАВЛЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОЇ ХВИЛІ МОБІЛЬНИХ АБОНЕНТІВ

4.1 Вступ

Техніка формування променя широко використовується в системах зв'язку ммХв [18], і типово, що T_x і R_x є відливаючими променями для вирівнювання один з одним для передачі інформації. Якщо T_x або R_x рухаються, промені будуть неправильно вирівняні, і зв'язок між T_x і R_x може порушитися. У [46] були дослідження щодо впливу мобільності користувачів на комунікації ммХв. У попередніх главах вивчались напрямні ммХв-канали в статичних середовищах. Для сценаріїв T_x та R_x у сценаріях руху технологія ммХв також широко адаптована для значного покращення швидкості передачі даних у бездротовому зв'язку. У цій главі вивчаються напрямки, що розповсюджуються ммХв-каналами, коли розглядаються T_x і R_x в русі.

Щоб забезпечити зв'язок ммХв між T_x і R_x в русі, потрібна надійна схема вирівнювання балки. Супутні сучасні дослідження в основному полягають у наступному: адаптивне формування променя [30], [32], гібридна антенна решітка [63], два шари вирівнювання променя [31], [35], перемикання промені [32], подвійне підключення [33], навчання променями [34], інтелектуальні алгоритми пошуку та відстеження променя [39] тощо.

Згадані вище схеми вимагають системного контролю рівня з протокольного та прикладного рівнів. Вони порівняно складні для реалізації у сценаріях зв'язку ммХв від мобільного до мобільного (M2M). У цій главі ми пропонуємо просту схему подвійних гауссових променів (ППП) фізичного рівня для зв'язку M2M ммХв. Він обробляє як статичний, так і рухомий сценарії T_x та R_x однаково.

Решта цього розділу організована таким чином. Розділ 6.2 вводить схему PPP. У розділі 6.3 ми моделюємо як канали PPP, так і вимірювані канали ммХв за трьома станами Маркова. У Розділі 6.4 оцінюються коефіцієнти підключення трьох каналів PPP Маркова, а також порівнюються співвідношення між каналами PPP та вимірюваними каналами ммХв.

4.2 Зв'язок подвійних гауссових променів

У зв'язку з оптичним та видимим світлом (VLC) [77] [79] Tx передає гауссів промінь із діаграмою випромінювання, яка поступово поширюється в міру поширення на подальшу відстань, як показано на рисунку 4.1 [78]. У фігурі на вертикальному куті є промінь факела. Ми називаємо такий пучок гауссовим, оскільки поперечна інтенсивність енергії пучка розподілена по Гаусу. Аналогічно, ми можемо створити подібний гауссів промінь із технологією формування променів і використовувати його для подолання неправильного вирівнювання пучків Tx та Rx, спричиненого рухом у комунікаціях ммХв.

4.2.1 Промінь Гауса

Припустимо, що існує радіосистема, оснащена антенними решітками, як на рисунку 4.2, і вона використовує технологію формування променя під час передачі / прийому сигналу. Ми визначаємо швидкість блимання як, кількість пучків які можна генерувати в секунду. Всі генеровані промені мають ширину променя, і кути наведення їх обмежені в межах коливання (ψ). Ми припускаємо, що це центральний кут дальності повороту і кутова зміна центру променя. Статистично, поперечна інтенсивність потужності в діапазоні коливань є гауссовим розподіленням $N(\psi; \sigma)$ вздовж напрямку поширення. Поперечна енергетична інтенсивність у такому діапазоні коливань є гауссово розподіленою. Виходячи з [64], приблизно 99,7 відсотка потужності лежить в межах трьох стандартних відхилень (3σ) діапазону коливань, тому ми визначаємо співвідношення як

$$\frac{\psi}{2} \approx +3\sigma \approx -3\sigma (\text{i.e., } -3\sigma \leq \psi \leq +3\sigma). \quad (4.1)$$

4.2.2 Схема зв'язку ППП

Ми застосовуємо гауссові пучки як до Tx, так і до Rx у сценарії каналу. Якщо ми розглядаємо миттєве вирівнювання променів Tx та Rx як одне з'єднання, то комунікації між Tx та Rx залишаються зв'язаними та роз'єднаними, поки є зона перекриття гаусових балок Tx та Rx. Якщо Tx і Rx можна підключити (наприклад, спілкуватися між собою, передавати дані тощо), то ми вважаємо це вдалим з'єднанням. Ми визначили коефіцієнт сполучення p як метрику для вивчення успішних зв'язків між Tx та Rx.

$$p = \frac{\text{Successful connections per second}}{\gamma}. \quad (4.2)$$

Запропонована схема зв'язку може бути використана для передачі пакетів даних, як це робить Ethernet. Кожен пакет даних не гарантовано доставляється до приймача, але Tx намагається якнайкраще доставити їх.

З реалізації схеми ППП за допомогою апаратного (друкована плата та мікросхеми) точки зору існують схеми, що підключаються до кожного антенного елемента антенної решітки (технологія формування променя вимагає антенної решітки). Вони використовуються для управління амплітудою та фазою сигналів, що подаються в елементи антени, що генерують пучки з шириною променя θ , і забезпечують обмеження кутів їх наведення в межах коливання ψ . Виходячи з цього, можна вставити високошвидкісний радіочастотний (RF) перемикач перед ланцюгами, що підключаються до елементів антени. Перемикач використовується для контролю швидкості блимання y , згаданої вище. Швидкість перемикання променя може бути короткою за кілька наносекунд [79], і РЧ-перемикачі з такою швидкістю перемикання широко використовуються в промисловості. В решті розділу ми припускаємо, що і Tx, і Rx можуть генерувати 20 випадкових променів за мілісекунду, тобто $y = 20; 000$.

4.3 ММХв канали станів Маркова

Зазвичай ммХв зв'язок базується на технології формування променя, направлені бездротові канали між Tx і Rx можуть моделюватися трьома станами Маркова. Якщо промені Tx і Rx вирівняні між собою під час зв'язку, канали можуть розглядатися в стані ПРВД. Коли Tx / Rx рухається або обертається, балки стають неправильно вирівняними. Якщо зв'язок може підтримуватися на основі потужних сигналів НПРВД, канали можуть розглядатися в стані НПРВД. В іншому випадку він перебуває у стані відключення. Для сторони Rx отримані КППВs можна змоделювати як

$$h^D(\tau) = \begin{cases} h^{D,LOS}(\tau), & p_{LOS} \\ h^{D,NLOS}(\tau), & p_{NLOS} \\ \text{Null}, & 1 - p_{LOS} - p_{NLOS} \end{cases} \quad (4.3)$$

де p - відсоток КППВ у стані ПРВД або НПРВД над швидкістю блимання у h і Null як КППВ у стані ПРВД, НПРВД та відключення відповідно.

4.3.1 ПГП канали в трьох станах Маркова

Припустимо, що в каналі ПГП є об'єкт, як формулі 6.3. Центр цього об'єкта розташований у випадковому порядку, і він досить великий, щоб перекрити шлях ПРВД між Tx та Rx. У кожен миттєвий час Rx, отриманий КППВ h , потрапляє в одне з трьох станів Маркова. Коли промені Tx і Rx відбиті один до одного безпосередньо в межах допустимого неправильно вирівняного кута, канал ПГП знаходиться в стані ПРВД. Коли Tx і Rx всі відкидають пучки до об'єкта в межах допустимого неправильно вирівняного кута і розсіяні сигнали можуть підтримувати зв'язок між ними, канал ПГП знаходиться в стані НПРВД. У випадках, коли об'єкт перекриває шлях ПРВД між Tx і Rx, а кути променів Tx і Rx не знаходяться всередині допустимих неправильно вирівняних кутів, канал ПГП знаходиться у стані відключення.

Одномоментні ймовірності переходу станів Маркова сильно залежать від навколишнього середовища в межах ділянки, що перекривається. Через складність і високу вартість впровадження схеми ПГП в ехолоті каналу ммХв, ми не можемо виконати реальне вимірювання каналу ПГП і оцінили ці параметри з даних на даний момент (вимірювання каналу в наступному підрозділі не на основі схеми ПГП). Однак, порівняно з високою швидкістю зоління ПГП, ми припускаємо, що канал ПГП нерухомий протягом певного обмеженого часу, в той час як T_x та R_x рухаються з відносно низькою швидкістю. Ми розглядаємо граничний розподіл станів Маркова [65] у цьому випадку пов'язаний з рПРВД. Граничний розподіл станів Маркова є ключовими параметрами для досягнення висновку.

4.3.2 Вимірювання каналів та три стани Маркова вимірюваних каналів

У літературі [27], [43], [53] спрямовані антени широко використовувались при вимірюванні каналів ммХв. У цьому розділі ми обираємо один порівняно простий і типовий вимірювання каналу ммХв, згаданий як приклад, та моделюємо виміряні спрямовані канали ммХв за трьома станами Маркова.

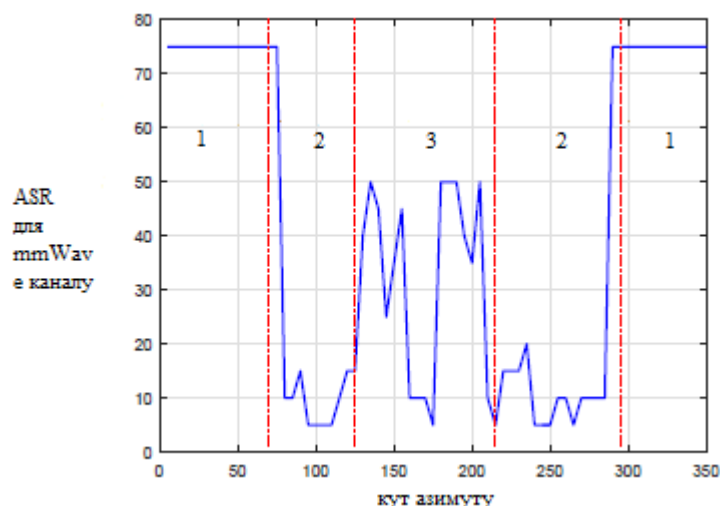


Рисунок 4.1 – Розрахункові значення ASR для каналу ммХв від КППВ в різних кутах азимуту, ОРВ становить 0,8.

Ми все ще використовуємо дані вимірювань каналів ммХв, описані в розділі 4.2.2 останнього розділу. Для стислості ми не повторюємо деталей. Однак ми використовуємо дані лише в азимутальній площині з кутом підйому 90.

4.3.3 Вимірювання станів Маркова

В аналізі даних, оцінені ASR каналу в азимутальній площині з кутом підйому 90, середньоквадратичним розподілом затримок (DSs), K-коефіцієнтами та трьома типами вимірних КПВ однакові у Розділі 3.2.1. Ми відокремлюємо КПВ на основі трьох станів Маркова на основі оцінених ASR, як на рисунок 4.1. Ми можемо прочитати кутовий діапазон цих трьох типових КПВ, як (також у [23]):

- Тип 1: КПВ, виміряні при азимутальних кутах менше 70 і більше 295
- Тип 2: КПВ, виміряні під азимутальними кутами між 70 і 125 і між 215 та 295
- Тип 3: КПВ, виміряні під азимутальними кутами від 125 до 215

Ми також розглядаємо ці три типові КПВ як три стану Маркова, як визначено у Розділі 5.4.1. Ми вважаємо, що КПВ містять один сильний компонент ПРВД, а кілька слабких компонентів НПРВД знаходяться в стані ПРВД; ті, що містять один відносно сильний компонент НПРВД і кілька слабких компонентів НПРВД, перебувають у стані НПРВД; а ті, що містять лише слабкі компоненти НПРВД, перебувають у стані відключення. На рисунку 4.2 показано як розташування, так і відсоток кутових площ покриття цих трьох типових КПВ у кожному штаті Маркова. Вони становлять: 29% у штаті ПРВД, 28% у штаті НПРВД та 43% у штаті Outage.

Зверніть увагу, що поділ трьох типових КПВ не є однаковим, як розділи у Розділі 4.2.3 та Розділі 5.3.3 в останніх двох Главах, які базувались на рівнях RRG. Це пов'язано з історичними причинами хронологічного періоду публікації паперу. Це також означає, що в літературі немає єдиного вердикту щодо визначення трьох

типових КПВ. Це може залежати від ситуації в оточенні окремого каналу та особистого судження щодо даних.

4.4 Вивчення та порівняння коефіцієнтів підключення

Статичний та рухомий сценарії Tx / Rx обробляються так само, як у схемі ПГП. Для меншої заплутаності ми розглядаємо Tx і Rx, які стикаються один з одним саме на рисунку 4.4, як локалізований корпус, а Tx і Rx, які не звернені точно одне до одного з відхиленням на рисунку 4.5, як вивих корпусів. Припускається що, виявленні та не виявленні випадки, не залежать від руху Tx та Rx.

Дослідження каналів ПГП базуються на моделюванні в цьому розділі. Однак ми порівнюємо коефіцієнти з'єднання каналів ПГП з тими, що оцінюються на основі реальних вимірювань каналів ммХв, описаних раніше.

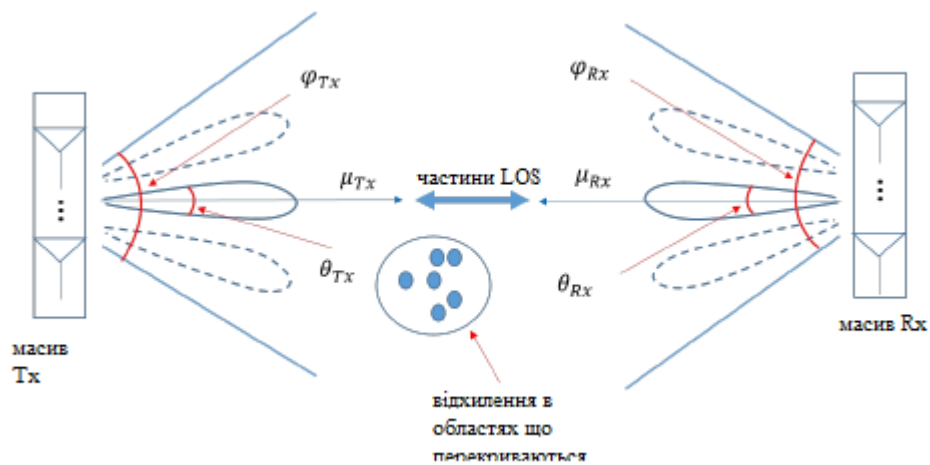


Рисунок 4.2 – ПГП в розташованому випадку

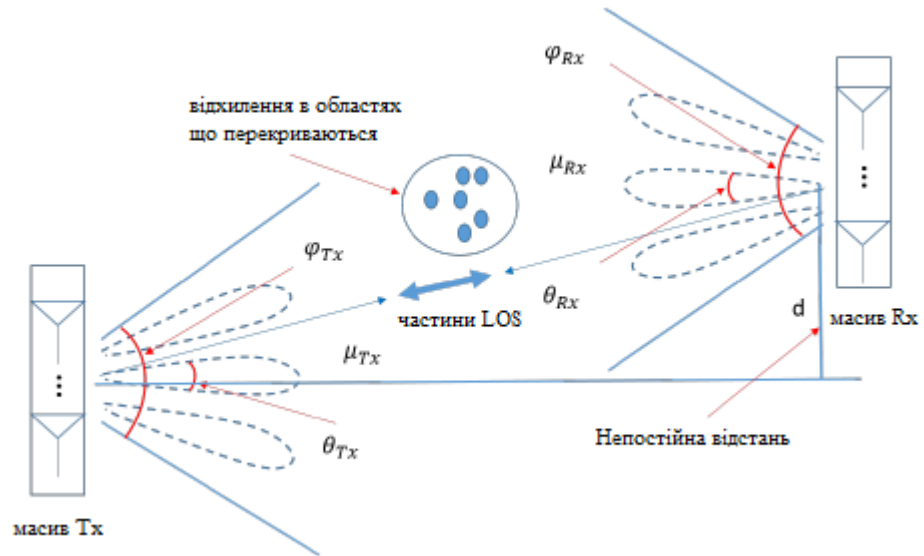


Рисунок 4.3 – ППП в не розташованому випадку

4.4.1 Коefіцієнти підключення станів маркова до каналів ППП

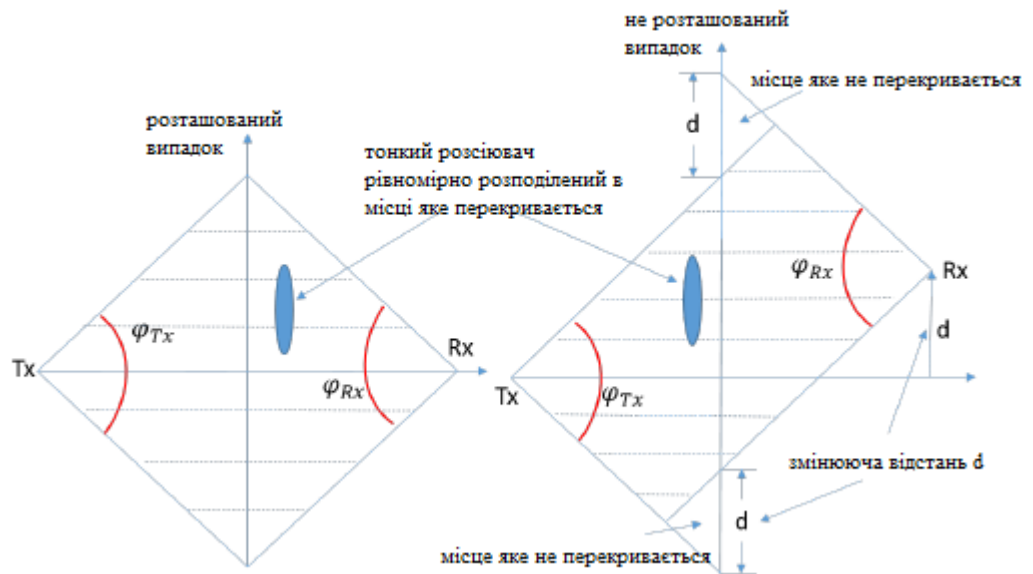


Рисунок 4.4 – Місце яке перекривається ППП для розташованих і не розташованих випадків

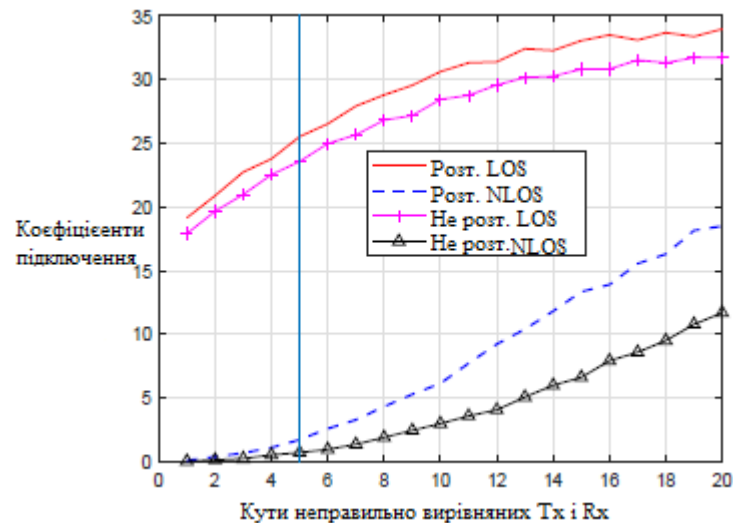


Рисунок 4.5 – Синхронізовані канали ПГП (діапазони поворотів $T_x = R_x = 60$, довжина вертикально розташованого тонкого об'єкта дорівнює 1 м, відстань між T_x і R_x дорівнює 10 м, а відстань зсуву d становить 2 м для дислокованого корпусу).

Ймовірність ПРВД є одним із компонентів у моделях СБПНР [30] та інших стандартних моделях каналів. Він оцінює ймовірність того, що зв'язок між T_x і R_x знаходиться в найкращій ситуації, яка базується на шляху ПРВД каналів. Подібну ідею можна використовувати для перевірки ймовірностей спрямованих ммХв-каналів у кожному стані Маркова.

4.4.2 Синхронізовані ПГП канали

Ми припускаємо, що T_x і R_x є відливаючими променями в секунду один до одного, і терміни відливання кожного одночасного променя з обох сторін T_x і R_x синхронізовані. Під час моделювання ми допустимо, що відстань між T_x і R_x дорівнює 10 м; діапазони коливань гауссових пучків T_x та R_x , T_x та R_x , дорівнюють 60 ; варіація центру гауссового пучка дорівнює 10 як на стороні T_x , так і на R_x ; а відстань зсуву d становить 2 м для дислокованого корпусу.

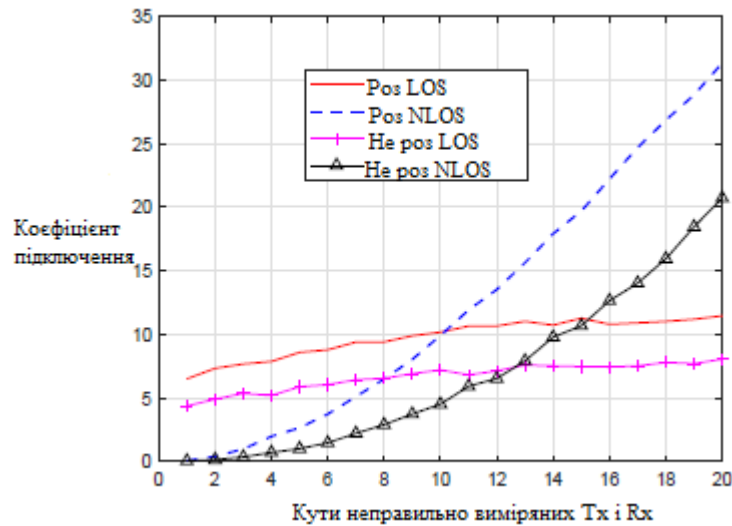


Рисунок 4.6 – Синхронізовані канали ПГП (діапазони поворотів $T_x = R_x = 60$, довжина вертикально розташованого тонкого об'єкта дорівнює 3 м, відстань між T_x і R_x дорівнює 10 м, а відстань зсуву d становить 2 м для дислокованого корпусу).

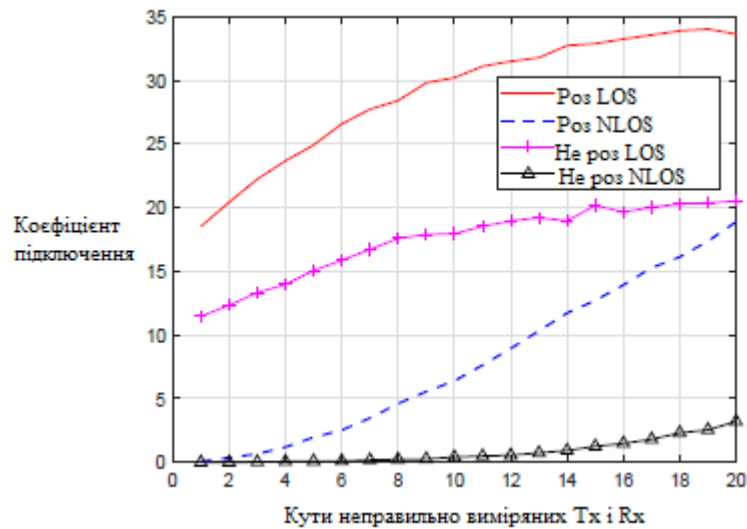


Рисунок 4.7 – Синхронізовані канали ПГП (діапазони поворотів $T_x = R_x = 60$, довжина вертикально розташованого тонкого об'єкта дорівнює 1 м, відстань між T_x та R_x дорівнює 10 м, а відстань зсуву d становить 4 м для дислокованого корпусу).

Також припускається, що об'єкт тонкий, його ширина може бути проігнорована, а його довжина становить 1 м (приблизно 8,7% розміру площі каналу ПГП по осі y), що достатньо довго, щоб перекрити шлях ПРВД між T_x і R_x . Ми розміщуємо його вертикально в області перекриття ПГП, як на рисунку 4.6, після рівномірного розподілу.

Зверніть увагу, що ми не враховуємо ширину променя балок T_x та R_x , T_x та R_x , під час моделювання. Натомість ми припускаємо, що ширина променя завжди придатна для отримання результатів моделювання (наприклад, завжди вдвічі більше кожного кута неправильно вирівняних балок) Ми також не враховуємо частоти сигналів ммХв при моделюванні. Ми дозволяємо відстань між T_x та R_x дорівнювати 10 м просто завдяки високому ослабленню сигналів ммХв.

На рисунку 4.5 показано співвідношення зв'язків каналів ПГП в ПРВД і НПРВД станів маркова у порівнянні з кутами неправильно вирівняних пучків T_x та R_x від 1 до 20. Ми можемо бачити, що як для знайдених так і для не знайдених випадків, коли ми збільшуємо кут неправильно вирівняних пучків T_x та R_x , коефіцієнти з'єднання як станів ПРВД, так і НПРВД стають вищими. Коефіцієнти підключення ПРВД-станів в локалізованому корпусі становлять від 18,92% до 33,79%, а в дислокованому випадку - від 17,93% до 31,74% при відстані зсуву $d = 2$ м. Коефіцієнти зв'язку НПРВД-станів у знайденому випадку становлять від 0,025% до 18,83%, а в дислокованому випадку - від 0,025% до 11,7%.

На рисунку 4.6 ми збільшуємо довжину вертикально розташованого тонкого об'єкта до 3 м і зберігаємо інші параметри, як на рисунку 4.5. Ми можемо спостерігати, що як для знайдених так і для не знайдених випадків коефіцієнти підключення до стану ПРВД зменшуються, тоді як коефіцієнти підключення до стану НПРВД збільшуються. Має сенс, що зі збільшенням довжини тонких об'єктів зростає ймовірність того, що ПРВД-шляхи між T_x і R_x заблоковані, тоді як шанс того, що зв'язок між T_x і R_x може підтримуватися на основі сигналів, які розсіює тонкий об'єкт збільшується.

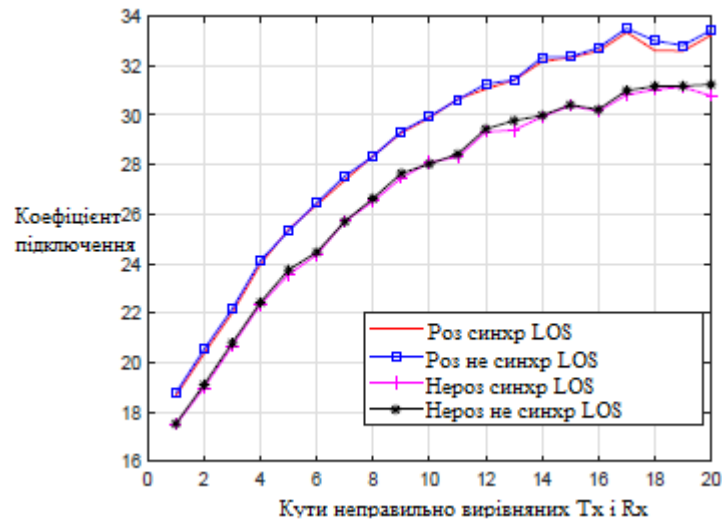


Рисунок 4.8 – Синхронізовані і асинхронізовані ПГП зв'язки для ПРВД випадку

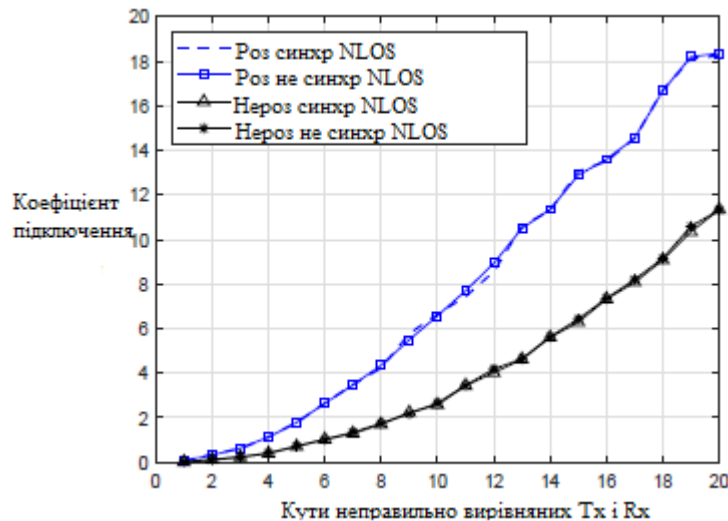


Рисунок 4.9 – Синхронізовані і асинхронізовані ПГП зв'язки для НПРВД випадку

На рисунку 4.7, показано дозволена відстань зсуву d що дорівнює 4 м, а інші налаштування будуть такими ж, як на рисунку 4.5. Можна спостерігати, що коефіцієнти зв'язку як ПРВД, так і НПРВД станів у дислокованому випадку зменшуються в порівнянні з показниками на рисунку 4.8. Причина полягає в тому, що коли відстань зсуву d збільшується, розмір області перекриття ПГП зменшується, так як коефіцієнти з'єднання каналів ПГП в обох станах ПРВД і НПРВД. Виявлено подібні явища при моделюванні з різними діапазонами коливань (120 та 60), різними відстанями між Tx та Rx та різними довжинами

тонкого об'єкта. Оскільки площа перекриття ПГП зменшується, коефіцієнти підключення каналів ПГП відповідно зменшуються.

4.4.3 Асинхронізовані ПГП канали

Ми припускаємо, що Tx і Rx втратили синхронізацію синхронізації для відтворення кожного одночасного променя. Ми дозволяємо Tx відкидати кожен одночасний промінь раніше, ніж Rx (навпаки) з різницею в часі 50% тривалості променя. Загальну тривалість з'єднань у стані ПРВД або НПРВД протягом однієї секунди ми враховуємо як коефіцієнт з'єднання. З результатів на рисунку 4.9 ми бачимо, що коефіцієнти синхронізованого та асинхронного з'єднань станів ПРВД та НПРВД як у знайдених так і в не знайдених випадках майже однакові. Якщо змінити різницю в часі на інші значення (різниця в часі 80% тривалості променя тощо), коефіцієнти з'єднання в асинхронних каналах ПГП також дуже близькі до співвідношень у синхронізованих каналах ПГП. Це вказує на те, що синхронізація миттєвих променів Tx і Rx не має суттєвого впливу на коефіцієнти підключення каналів ПГП. Ефективність схеми ПГП дуже стабільна, і можна передбачити коефіцієнт з'єднання на основі розміру площі перекриття.

4.4.4 Коефіцієнти підключення станів Маркова для вимірних mm-Wave каналів

У розділі 4.3.2 ми оцінили відсоток кутових площ покриття трьох типових КППВ в кожному штаті Маркова. Якщо ми розглядаємо вимірювання каналу як незмінене середовище, і базова станція продовжує передавати один стабільний промінь користувачам без зміни кута променя. Тоді ми можемо припустити, що якщо одна людина випадково гуляє в такому середовищі каналу, вона / вона може підключитися до базової станції, коли вона / вона прогулюється всередині кутових зон покриття станів ПРВД та НПРВД. У цьому випадку відсотки кутових площ покриття штатів Маркова можна розглядати як обмежувальний розподіл станів

Маркова, які також є коефіцієнтами зв'язку спрямованих ммВхвильових каналів у цих штатах Маркова. Вони становлять: 29% для коефіцієнта підключення стану ПРВД, 28% для коефіцієнта підключення стану НПРВД і 43% для коефіцієнта підключення стану виходу.

4.4.5 Порівняння коефіцієнтів підключення

Припустимо, що ширина променя пучків T_x та R_x , T_x та R_x , що використовуються у зв'язку ПГП, дорівнює 10, що є однаковим із шириною рупорних антен, що використовуються у згаданому вище вимірюванні каналу. Для того, щоб зберегти зв'язок між T_x та R_x в "хорошій ситуації", ми дозволили вирівняним пучкам T_x та R_x принаймні на 50% перекривати ширину променя (-3 дБ). Отже, неправильно вирівняний кут балок T_x та R_x повинен бути обмежений 5, і ми можемо знайти відповідні коефіцієнти з'єднання з рисунку 4.5. У цьому випадку коефіцієнт підключення стану ПРВД становить 25,48%, а коефіцієнт підключення стану НПРВД становить 1,66%. У дислокованому випадку коефіцієнт підключення стану ПРВД становить 23,65%, а коефіцієнт підключення стану НПРВД становить 0,84%.

Порівняно з коефіцієнтами зв'язку стану ПРВД, оціненими на основі вимірювання каналу, коефіцієнт підключення стану ПРВД каналів ПГП в локалізованому корпусі нижчий на 3,52%, а в дислокованому випадку - на 5,35%. Однак коефіцієнти підключення до стану НПРВД каналів ПГП в обох випадках набагато нижчі порівняно з тими, що оцінюються в результаті вимірювання каналу. Оскільки коефіцієнти підключення до стану НПРВД сильно залежать від навколишнього середовища, і припущення про моделювання каналу ПГП значно відрізняється від такого в вимірюваному каналі (об'єкти, такі як стіни, стеля, вікна та двері тощо) є розсіювачами. Згідно з аналізом у розділі 3.2.2, якщо можна зберегти перекриваючу область каналу ПГП якомога більшою, прийнятні коефіцієнти з'єднання, як на рисунку 4.5, можуть бути досягнуті в зв'язку М2М ммХв за схемою ПГП.

4.5 Висновки

Запропоновано схему подвійного розподілу гаусса для передачі даних між мобільними абонентами за допомогою міліметрових хвиль. Використано стани маркова як для самого моделювання каналу так і для направлених каналів з використанням декількох перешкод. Коефіцієнт цих станів використовувався як параметр ефективності моделі. Вони показали що запропонована схема має схожі коефіцієнти у випадку прямої видимості пристроїв, та нижчі у випадку не прямої видимості. Що спричинено різницею між реальним середовищем застосування і симуляцією схеми. Також зроблено висновок що синхронізація променів передавача і приймача майже не впливає на коефіцієнти підключення за схемою подвійного розподілу гаусса.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень удосконалено схему зв'язку мобільних абонентів з базовою станцією. На основі розробленої схеми було побудовано модель, що забезпечує широку смугу пропуску та направленні характеристики поширення.

У першому розділі проведено дослідження методів передачі даних між мобільним абонентом та базовими станціями, виявлені переваги та недоліки цих методів.

У другому розділі проведено моделювання методів передачі даних із змінною частотою. Застосовано профіль середньої затримки потужності у просторовому і частотному домені. Проведено вимірювання методів передачі.

У третьому розділі проведено моделювання направлених методів передачі даних із сферичними кутами. Застосовано стаціонарні канали передачі. Зроблена оцінка статичних параметрів.

У четвертому розділі наведено схему направленої моделі передачі даних. Використано подвійний розподіл гуасса, стани маркова, синхронні і асинхронні канали.

Набула подальшого розвитку інформаційна технологія вибору діапазону хвиль для розроблення моделі передачі інформації до користувача.

Впровадження результатів роботи дозволило створити ефективну схему каналів міліметрових хвиль .

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Johnson C. 5G New Radio in Bullets. Independently published, 2019. 590 p.
2. Dahlman E. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018. 466 p.
3. Holma H. 5G Technology: 3GPP New Radio. Wiley, 2020. 536 p.
4. Rommer S. 5G Core Networks: Powering Digitalization. Academic Press, 2019. 502 p.
5. Ahmadi S. 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards. Academic Press, 2019. 960 p.
6. Johnson C. Long Term Evolution IN BULLETS, 2nd Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. 592 p.
7. Zaidi A. 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components. Academic Press, 2018. 322 p.
8. Marsch P. 5G System Design: Architectural and Functional Considerations and Long Term Research. Wiley, 2018. 608 p.
9. Heath R. Foundations of MIMO Communication. Cambridge University Press, 2018. 800 p.
10. Hueber G. Millimeter-Wave Circuits for 5G and Radar. Cambridge University Press, 2019. 454p.
11. Kazmi A. Network Slicing for 5G and Beyond Networks. Springer, 2029. 159p.
12. Suter M. From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Wiley, 2017. 544p.
13. Enescu M. New Radio: A Beam-based Air Interface. Wiley, 2020. 280p.
14. Osseiran A. 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press. 2017. 410p.
15. Marzetta T. Fundamentals of Massive MIMO. Cambridge University Press, 2016. 220p.
16. Penttinen J. 5G Simplified: ABCs of Advanced Mobile Communications. Independently published. 2019. 168p.

17. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications. Wiley. 2014. 486p.
18. Bjornson E. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. Now Publishers Inc. 2018. 520p.
19. Dahlman E. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. Academic Press. 2016. 616p.
20. Fa-Long L. Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations. Wiley-IEEE Press. 2016. 610p.
21. Penttinen J. 5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications. Wiley. 2019. 328p.
22. Sesia S. LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. Wiley. 2011. 792p.
23. Fattah H. 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT). CRC Press. 2018. 262p.
24. Kottkamp M. 5G New Radio - Fundamentals, Procedures, Testing Aspects. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. 2019. 450p.
25. Aguilera P. 802.11ax: A Hyperconnected World and the Next-Generation WiFi. Independently published. 2018. 120p.
26. Lei W. 5G System Design: An End to End Perspective. Springer. 2019. 426p.
27. Mailloux R. Phased Array Antenna Handbook, Third Edition. Artech House Publishers. 2017. 206p.
28. Das S. Mobile Terminal Receiver Design: LTE and LTE-Advanced. Wiley. 2017. 420p.
29. Olsson M. EPC and 4G Packet Networks: Driving the Mobile Broadband Revolution. Academic Press. 2012. 624p.
30. Maral G. Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. Wiley. 2020. 792p.
31. Mumtaz S. mmWave Massive MIMO: A Paradigm for 5G. Academic Press. 2016. 372p.

32. Crassidis J. *Optimal Estimation of Dynamic Systems* (Chapman & Hall/CRC Applied Mathematics & Nonlinear Science). Chapman and Hall/CRC. 2011. 794p.
33. Blokdyk G. *802.11ax A Complete Guide - 2020 Edition*. 5STARCooks. 2019. 310p.
34. Gast M. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition*. O'Reilly Media. 2015. 672p.
35. Donahue G. *Network Warrior: Everything You Need to Know That Wasn't on the CCNA Exam*. O'Reilly Media. 2011. 788p.
36. Meyers M. *CompTIA Network+ Certification All-in-One Exam Guide*. McGraw-Hill Education. 2018. 960p.
37. Dulaney E. *CompTIA Network+ N10-007 Exam Cram*. Pearson IT Certification. 2018. 576p.
38. Lammler T. *CompTIA Network+ Deluxe Study Guide: Exam N10-007*. Sybex. 2018. 1008p.
39. Lowe D. *Networking All-in-One For Dummies*. For Dummies. 2018. 992p.
40. Kurose J. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. Pearson. 2012. 864p.
41. White R. *Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks*. Addison-Wesley Professional. 2017. 832p.
42. Tetz E. *Cisco Networking All-in-One For Dummies*. For Dummies. 2011. 720p.
43. Ramon N. *Computer Networking for Beginners: Your Guide for Mastering Computer Networking, Cisco IOS and the OSI Model*. Independently published. 2018. 219p.
44. Richards M. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. McGraw-Hill Education. 2014. 656p.
45. Mailloux R. *Phased Array Antenna Handbook, Second Edition*. Artech

46. Visser H. Array and Phased Array Antenna Basics. Wiley. 2015. 376p.
47. Kai L. Microstrip Patch Antennas. World Scientific Publishing Company. 2017. 688p.
48. Van Trees H. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley-Interscience. 2012. 1472p.
49. Pozr D. Microwave Engineering. Wiley. 2011. 752p.
50. Heath Introduction to Wireless Digital Communication: A Signal Processing Perspective. Pearson. 2017. 464p.
51. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge University Press. 2015. 674p.
52. Fa-Long L. Machine Learning for Future Wireless Communications. Wiley-IEEE Press. 2020. 496p.
53. Papadias C. Spectrum Sharing: The Next Frontier in Wireless Networks. Wiley-IEEE Press. 2020. 456p.
54. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall. 2011. 707p.
55. Molisch A. Wireless Communications. Wiley-IEEE Press. 2010. 884p.
56. Oppenheim A. Discrete-Time Signal Processing. Pearson. 2010. 1144p.
57. Razavi B. RF Microelectronics (Communications Engineering & Emerging Technology Series from Ted Rappaport). Pearson. 2011. 916p.
58. Proakis J. Fundamentals of Communication Systems, Global Edition. Pearso. 2014. 928p.
59. Olenews J. Guide to Wireless Communications. Cengage Learning. 2016. 528p.
60. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley. 2014. 704p.
61. Jianjun Y. Digital Signal Processing for High-speed Optical Communication. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2018. 276p.
62. Hampton J. Introduction to MIMO Communications. Cambridge University Press. 2013. 300p.
63. Fleisch D. A Student's Guide to Maxwell's Equations. Cambridge

64. Dobkin D. RF Engineering for Wireless Networks: Hardware, Antennas, and Propagation (Communications Engineering. Newnes. 2014. 448p.
65. Nelson B. Guide To Computer Forensics and Investigations - Standalone Book. Cengage Learning. 2018. 688p.
66. Olenewa J. Guide to Wireless Communications. Cengage Learning. 2013. 528p.
67. Chaudhrari Q. Wireless Communications from the Ground Up: An SDR Perspective. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2018. 828p.
68. Haupt Wireless Communications Systems: An Introduction (Wiley - IEEE). Wiley-IEEE Press. 2019. 464p.
69. Imran M. Enabling 5G Communication Systems to Support Vertical Industries. Wiley-IEEE Press. 2019. 340p.
70. Frenzel L. Experiments Manual for Principles of Electronic Communication Systems (Engineering Technologies & the Trades). McGraw-Hill Education. 2015. 192p.
71. Viswanathan M. Wireless Communication Systems in Matlab: Second Edition. Independently published. 2020. 382p.
72. Tranter W. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications. Prentice Hall. 2013. 800p.
73. Tse D. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press. 2015. 564p.
74. . Johnson R. Software Receiver Design: Build Your Own Digital Communication System In Five Easy Steps. Cambridge University Press. 2011. 480p.
75. Najmi A. Advanced Signal Processing: A Concise Guide. McGraw-Hill Education. 2020. 352p.
76. Mosa A. 5G Physical Layer Technologies. Wiley-IEEE Press. 2019. 592p.
77. Asplund. H. Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments: Bridging the Gap Between Theory and Practice. Academic Press. 2020. 740p.
78. Morais D. Key 5G Physical Layer Technologies: Enabling Mobile and Fixed Wireless Access. Springer. 2020. 303p.

79. Petterson L. 5G Mobile Networks: A Systems Approach (Synthesis Lectures on Network Systems). Morgan & Claypool Publishers. 2020. 174p.
80. Dodd A. Essential Guide to Telecommunications, The (Essential Guide Series). Pearson. 2019. 464p.
81. Sarver W. The 5G Deployment Plan Handbook: Volume 1, 5G technical deployment and history around building 5G and IOT businesses. (5G Deployment Handbook). Independently published. 2017. 131p.

ДОДАТОК А Публікація автора

УДК 621.317.73

І.В. ФОРКУН, Д.М. МЕДЗАТИЙ, Д.А. МАКАРИШКІН, О. В. ЧЕРВОНЕЦЬКИЙ

Хмельницький національний університет

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМ ПРОМИСЛОВИХ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ SCADA-СИСТЕМ

В статті наведено сучасний стан проблеми промислових багаторівневих систем керування на основі програмно-технічних комплексів SCADA-систем. Проведено аналіз концепції SCADA-систем. Наведені їх переваги та недоліки, а також досліджено архітектури та компоненти SCADA-систем. Встановлено, що з урахуванням концепції Індустрії 4.0 та розвитком кіберфізичного виробництва, сучасні SCADA-системи представляють собою відкриті системи промислового Інтернету речей, а тому для забезпечення ефективного проектування промислових багаторівневих систем керування необхідно використовувати новий підхід до кібербезпеки SCADA-систем, який пов'язаний з взаємозв'язком різних областей безпеки, враховуючи різні її аспекти. Набули подальшого розвитку промислові багаторівневі системи керування з використанням хмарних SCADA-систем.

Ключові слова: промислові багаторівневі системи керування, SCADA-системи, Інтернет речей, безпека SCADA-систем, архітектура та компоненти SCADA-систем.

Y. V. FORKUN, I. V. FORKUN, D.A. MAKARYSHKIN, V.O. FENENKO
Khmelnitsky national university

CURRENT STATE OF PROBLEMS OF INDUSTRIAL MULTILEVEL CONTROL SYSTEMS BASED ON THE CONCEPT OF SCADA-SYSTEMS

The article presents the current state of the problem of industrial multilevel control systems based on software and hardware SCADA-systems. The analysis of the concept of SCADA-systems is carried out. Their advantages and disadvantages are given, as well as the architectures and components of SCADA-systems are studied. It is established that taking into account the concept of Industry 4.0 and the development of cyberphysical production, modern SCADA-systems are open systems of industrial Internet of Things, and therefore to ensure effective design of industrial multilevel control systems it is necessary to use a new approach to cybersecurity SCADA-systems. the relationship of different areas of security, taking into account its various aspects. Industrial multilevel control systems using cloud SCADA systems have been further developed.

Key words: industrial multilevel control systems, SCADA-systems, Internet of Things, security of SCADA-systems, architecture and components of SCADA-systems.

Вступ

Сучасний розвиток багаторівневих систем керування є надзвичайно важливим для галузі промислової автоматизації. До складу промислових багаторівневих систем керування входять такі компоненти як системи керування та збору даних (SCADA), розподілені системи керування та інші конфігурації систем керування, такі як програмовані логічні контролери у промисловому секторі та критичній інфраструктурі. При цьому ці компоненти багаторівневих систем керування мають задовольняти унікальним вимогам цілої комплексної системи автоматизації, таким як, продуктивність, надійність та безпека. Під час проектування багаторівневих систем керування необхідно враховувати їх типи для конкретної задачі промислової автоматизації та типових топологій системи, визначати типові загрози та вразливості таких систем та пропонувати рішення і рекомендаційні заходи безпеки для зменшення пов'язаних із ними ризиків [1, 2].

Промислова багаторівнева система керування складається з комбінації наступних елементів керування, таких як електричні, механічні, гідравлічні, пневматичні та інші елементи. Елементи керування промислових багаторівневих систем керування працюють разом для досягнення промислових цілей (наприклад, виготовлення, транспортування матеріалів або енергії). Типова промислова багаторівнева система керування може включати безліч циклів керування, людино-машинні інтерфейси (НМІ) та засоби віддаленої діагностики та обслуговування, побудовані з використанням ряду мережевих протоколів. Промислові процеси керування застосовуються для електроенергії, води та стічних водах, нафті та газі, хімічних речовинах, транспорті, фармацевтиці, целюлозі та папері, продуктах харчування та напоях та дискретному виробництві (таких як автомобілі, аерокосмічна промисловість та товари тривалого користування). Фактична реалізація промислових багаторівневих систем керування може бути гібридом, який стирає межі між системами розподіленим та SCADA-системами.

На основі інтеграції ІТ -можливостей в існуючі фізичні системи, що в свою чергу доповнює або замінює фізичне керування було розроблено багато сучасних промислових багаторівневих систем керування. Наприклад, вбудовані цифрові елементи керування замінили аналогові механічні елементи керування в обертових машинах та двигунах. Зростання вартості та продуктивності зумовило цей розвиток і призвело до багатьох сучасних "розумних" технологій, таких як розумні мережі, розумне транспортування, розумні будівлі та розумне виробництво. Однак незважаючи на те, що це збільшує зв'язок та важливість таких систем, це також ставить більш високі вимоги до їхньої пристосованості, стійкості та безпеки. Інженерна технологія промислових багаторівневих систем керування

продовжує розвиватися, надаючи нові функції, зберігаючи типовий тривалий життєвий цикл цих систем. Впровадження ІТ-функцій у фізичні системи представляє нову поведінку, яка впливає на безпеку. У теперішній час розробляються інженерні моделі та аналіз для вирішення цих нових особливостей, включаючи взаємозалежність безпеки, конфіденційності та впливу на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Основні операції та компоненти, які виконуються промисловими багаторівневими системами керування представлені на рисунку 1 [1]. Типова промислова багаторівнева система керування включає безліч циклів керування, людино-машинні інтерфейси, засоби віддаленої діагностики та обслуговування, які побудовані з використанням масиву мережевих протоколів на багатоплановій архітектурі мережі. Шлейф керування використовує датчики, виконавчі механізми та контролери (наприклад програмований логічний контролер) для маніпулювання певними керуваними процесами. Датчик - це пристрій, який вимірює певні фізичні властивості, а потім надсилає цю інформацію контролеру як керовану змінну. Контролер інтерпретує сигнал відповідно до алгоритму керування і заданого значення цілі, генерує відповідну маніпульовану змінну і передає його на привід. Пускачі, такі як, регулюючі клапани, вимикачі, автоматичні вимикачі та двигуни використовуються для безпосереднього керування керованим процесом на основі команд контролера.

Оператори та інженери використовують людино-машинні інтерфейси для моніторингу та регулювання заданих значень, алгоритмів керування та налаштування параметрів в контролері. Людино-машинні інтерфейси також відображають інформацію про стан процесу та історичну інформацію. Службові програми діагностики та обслуговування використовуються для запобігання, виявлення та відновлення після ненормальних операцій або збоїв. Іноді ці цикли керування вкладені та / або каскадно - задана точка в одному циклі базується на змінній процесу, яка визначена іншим циклом. Цикл рівня керування та цикл низького рівня працюють безперервно протягом усього процесу, а час циклу становить мілісекунди до хвилин.

Під час проєктування промислової багаторівневої системи керування, є необхідним, визначення ключових факторів, що пов'язані з атрибутами керування, зв'язку, надійності та надмірності промислової багаторівневої системи керування. Оскільки ці фактори значною мірою впливають на розробку промислової багаторівневої системи керування, вони також допоможуть визначити вимоги до безпеки системи. Тому при проєктуванні промислової багаторівневої системи керування враховуються наступні вимоги до: контролю часу, географічного розподілу, ієрархії, складності керування, доступності та надійності системи, впливу нестабільності і безпеки [1, 2].

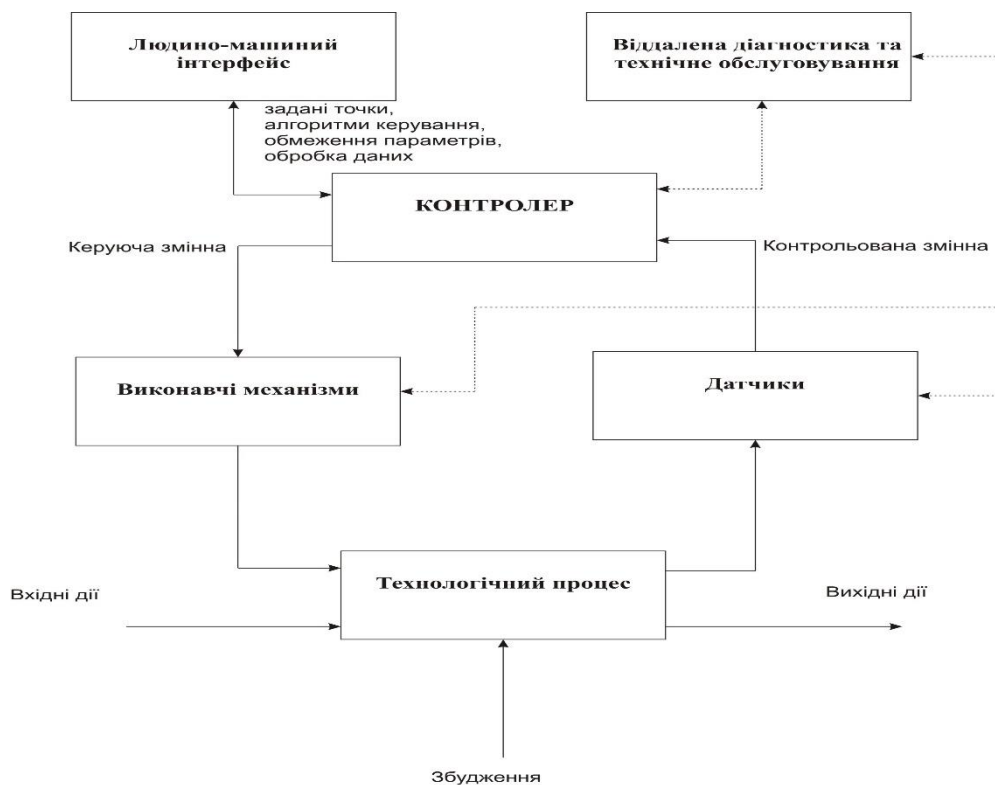


Рис. 1. Операції та компоненти промислових багаторівневих систем керування

На сьогоднішній день критична інфраструктура зазвичай описується як інфраструктура, яка забезпечує та обслуговує основні послуги системи безпеки, економіки та охорони здоров'я будь-якої країни. Кіберфізична система та Інтернет речей доповнюють традиційну критичну інфраструктуру операціями з великими даними. Список галузей, що належать до критичної інфраструктури зазвичай включають у себе сільське господарство, охорону здоров'я, ядерні реактори, транспорт, енергетичний сектор, цивільна та хімічна інженерія, структура води,

дослідження тощо, як представлено на рисунку 2. Системи диспетчерського керування та обробка даних (SCADA-системи) при проектуванні промислових багаторівневих систем керування відіграють ключову роль в управлінні та контролі критичної інфраструктури.

Система SCADA здійснює керування та моніторинг географічно розподілених активів. Історично склалося, що SCADA-системи були обмежені такими системами, як системами передачі енергії, транспортуванням природного газу та керування водою. Сучасний розвиток технологій привів до того, що SCADA-системи використовуються у таких промислових секторах, як металургія, хімічна обробка (переробка), телекомунікації, експериментальне та виробниче обладнання [2]. З розвитком концепції Індустрії 4.0 та промислового Інтернету Речей, сучасні SCADA-системи включають у себе такі компоненти, як CPS / IoT, хмарні технології, аналіз великих даних, штучний інтелект та машинне навчання. Інтеграція цих технологій значно покращує сумісність та спрощує обслуговування і зниження витрат на інфраструктуру.

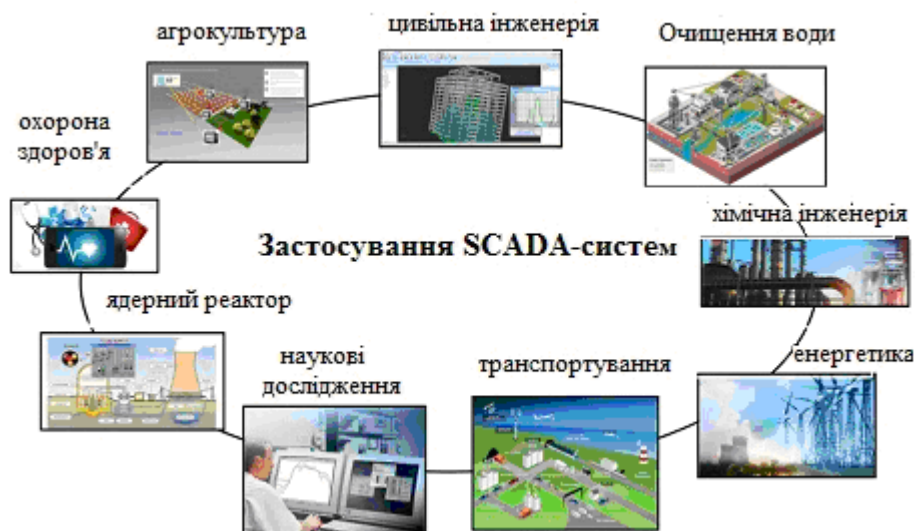


Рис. 2. Сфера застосувань SCADA-систем

SCADA- системи можуть підвищити ефективність ключових промислових систем і забезпечити більш високу ефективність захисту обладнання. Дайте структуру SCADA. SCADA- системи розроблені для роботи в автономному режимі, а сама SCADA- система була захищена через мережу повітряного зазору та власний протокол. Ось чому оригінальний проект SCADA-система, ніколи не включала до свого складу функції безпеки [3, 4]. Однак в останні роки через розширення бізнесу та центральний попит на розподілений програмний моніторинг, система SCADA- система перетворилася на складну відкриту систему, яка є з'єднаною з Інтернетом за допомогою передових технологій. Однак це призвело до того, що система SCADA стала більш вразливою для цілей зловмисників з будь-якої точки світу [5].

Вклад основного матеріалу дослідження.

Зазвичай SCADA - це комп'ютерна система, яка широко застосовується для дистанційного керування та моніторингу об'єкту керування. SCADA- система збирає інформація та дані про технологічні процеси, які аналізуються в режимі реального часу. SCADA- система складається з таких елементів: головний термінал master terminal unit (MTU), комунікація, віддалений термінал remote terminal unit (RTU) та людино-машинний інтерфейс Human-machine-interface (HMI).

Апаратна архітектура SCADA використовує програмовані логічні контролери (PLC) та віддалені термінальні блоки (RTU). Архітектура програмного забезпечення SCADA включає людино-машинний інтерфейс (HMI), центральна база даних та інші користувачі програмне забезпечення [6]. ПЛК і RTU є мікрокомп'ютерами, які взаємодіють з масивом об'єктів, таких як промислові машини, HMI, датчики та кінцеві пристрої, а потім передають інформація від цих об'єктів до комп'ютерів із програмним забезпеченням SCADA. Програмне забезпечення SCADA обробляє, розповсюджує та відображає дані, допомагаючи операторам та іншим працівникам аналізувати дані та приймати важливі рішення. SCADA-системи здатні повідомляти оператора про проблему допомагає йому для її усунення та запобігання подальшій втраті продукту. Найбільший контроль дії виконуються RTU або PLC.

Апаратна система SCADA класифікується на дві основні частини: шари клієнта та сервер даних. Шар клієнта - це шар, який обслуговує людину і машинну взаємодію. Рівень сервера даних - це той, який обробляє більшу частину процесів даних. Програмовані логічні контролери є підключеними до серверів даних безпосередньо або через мережі або шини. SCADA-система використовує, як глобальну мережу (WAN) так, і локальну мережу (LAN), яка складається з Інтернет-протоколів, що використовуються для зв'язку між головною станцією та пристроями, фізичним обладнанням, датчиками, які є підключеними до ПЛК або RTU. RTU перетворює сигнали датчика в цифрові дані і передає цифрові дані MTU. Більшість операцій з моніторингу та контролю виконуються RTU або PLC.

Більшість серверів використовуються для багатозадачності та бази даних у режимі реального часу. Сервери здійснюють збір та обробку даних. SCADA-система складається з програмного забезпечення для забезпечення тенденцій, діагностики даних та керування такою інформацією, як запланований порядок технічного обслуговування, логістичної інформації, детальні схеми для конкретного датчика або машини та за усунення несправностей системи. Взаємозв'язок компонентів зв'язку системи MTU, RTU, HMI, Historian та SCADA є представлений на рис. 3.

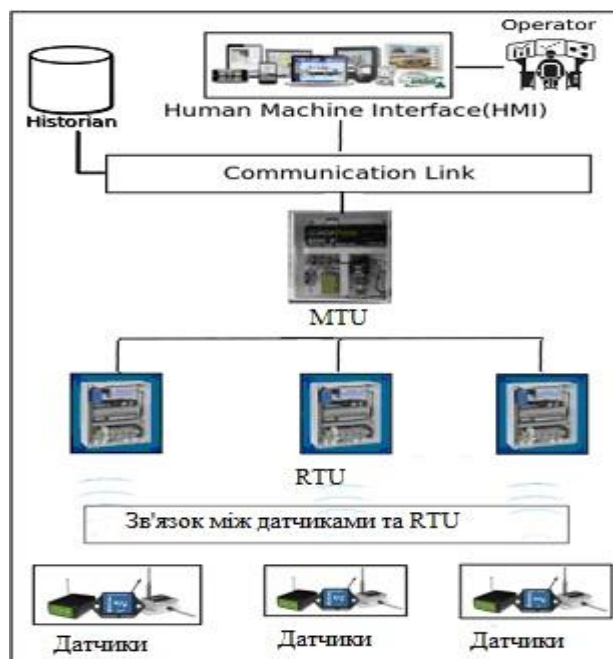


Рис.3. Взаємозв'язок компонентів зв'язку SCADA-системи

Існують різні типи SCADA-систем, які розглядаються як архітектури SCADA чотирьох різних поколінь: монолітні або ранні системи SCADA (перше покоління); Розподілені SCADA- системи (друге покоління); мережеві SCADA- системи (третє покоління); Інтернет речей.

Монолітні або ранні SCADA- системи були незалежними системами без зв'язку з іншими системами. Усі використані протоколи зв'язку були на той час власністю. Функції монолітні системи SCADA на початку першого покоління обмежуються лише датчиками моніторингу в системі та позначенням будь-яких операцій у разі перевищення запрограмованих рівнів тривоги. У таких SCADA-системах резервування було досягнуто за допомогою резервної системи мейнфреймів, підключеної до всіх сайтів RTU, і використовувалася лише у випадку виоду з ладу первинної системи мейнфреймів, у цій архітектурі RTU зв'язується з MTU з використанням глобальних мереж (WAN), як показано на рисунку 4 [7].

Розподілені SCADA- системи (керування), архітектура, якої представлена на рисунку 5, мають спільний доступ до функцій керування розподілений між декількома системами, які підключені один з одним за допомогою локальної мережі LAN [8]. При цьому кожна станція використовувалася для обміну інформацією в режимі реального часу між системами та її обробки для виконання контрольних завдань для спрацювання сигналізації, пр. певних рівнях можливих проблем, тим самим зменшуючи витрати у порівнянні з попереднім поколінням SCADA-систем. Мережеві протоколи все ще не стандартизовані в розподілених SCADA- системах, а безпека установки SCADA-систем ігнорується.

У третьому поколінні SCADA-система може бути зведена до найпростішої компоненти, яка утворюються шляхом з'єднання його за допомогою протоколів зв'язку. У SCADA-системах цього типу, мережа може бути географічно розподілена та зв'язуватися за допомогою глобальної мережі WAN через лінії передачі даних або мобільний зв'язок. Такий тип SCADA-систем використовує Ethernet або оптично волоконний з'єднувач для постійної передачі даних між вузлами. Архітектура мережевих SCADA-систем представлена на рисунку 6.

У четвертому поколінні SCADA-систем, за рахунок впровадження Інтернет технологій (Веб-технологій) з'являється можливість користувачам переглядати дані, обмінюватися інформацією та керувати процесами з будь-якої точки світу. Вартість інфраструктури та розгортання SCADA-систем зменшуються шляхом інтеграції технологій Інтернету речей з комерційно доступними хмарними обчисленнями. Технічне обслуговування та інтеграція з попередніми SCADA-системами є більш простим. Це мережа пристроїв зі значним зосередженням на передачі, контролі критичної інформації, отриманні статистичних даних з big data, тому для створення промислового Інтернету речей є необхідними інтегрувати зовнішні системи з існуючими на той момент SCADA-системами, серверними пристроями, протоколами і т.д. [7]. Архітектура четвертого покоління представлена на рисунку 7.

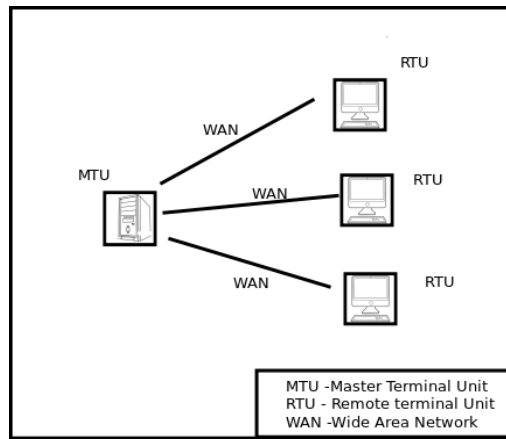


Рис. 4. Мережева архітектура монолітної SCADA-систем

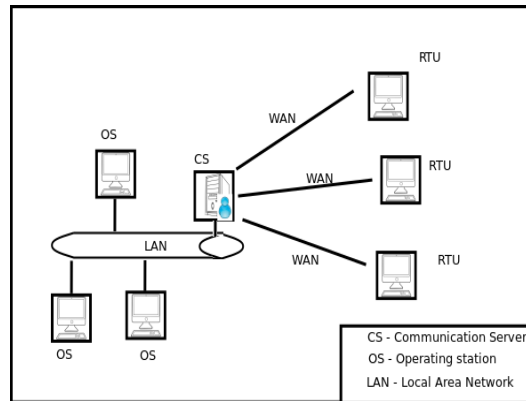


Рис. 5. Мережева архітектура розподіленої SCADA-системи

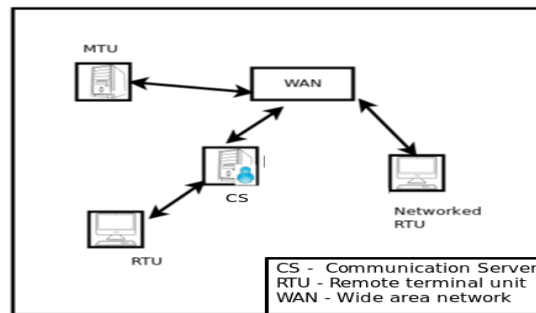


Рис. 6. Мережева SCADA-система

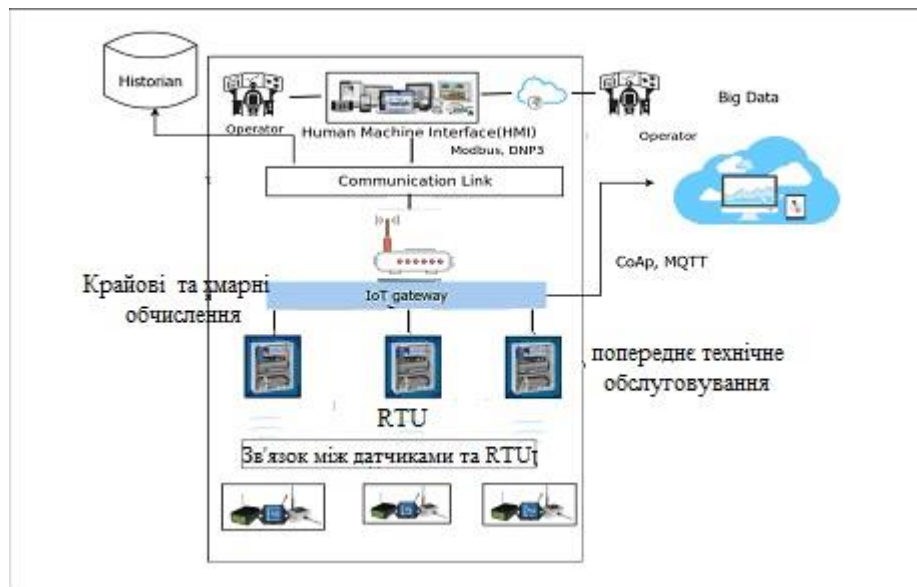


Рис. 7. Мережева архітектура Інтернету речей-четверте покоління SCADA-систем

SCADA-системи четвертого покоління здатні звітувати про стан об'єкту керування у реальному масштабі часу, при цьому використовуючи горизонтальну шкалу з хмарних обчислень. За рахунок цього можуть бути реалізовані більш складні алгоритми керування, для реалізації яких є достатніми традиційні програмовані логічні контролери. Концепція Індустрія 4.0 – це приклад четвертого покоління SCADA-системи, в яких є розподіленими когнітивні обчислення, CPS, Інтернет речей та хмарні обчислення, які використовуються для керування дії [9].

При проектуванні промислових багаторівневих систем керування різної складності використовується концепція SCADA-систем. Ці системи можуть варіюватися від десятків до тисяч контурів керування в залежності від програми. SCADA-системи використовуються для моніторингу різноманітних даних, таких як потоки, струми, напруги, тиск, температури, рівні води та тощо, в різних галузях промисловості. У виробничих галузях SCADA-системи [8] використовуються для керування виробництвом системи для досягнення цілей продуктивності, перевіряючи кількість вироблених одиниць та підрахунок завершених етапів операцій з температурами на різних стадіях виробничого процесу.

SCADA-системи використовуються для очищення промислових стічних вод. Очисні споруди для обробки поверхневих вод бувають різного типу. Однак, це в основному системи очищення води, в яких багаторівнева система керування, процеси автоматизації та розподілені системи беруть участь в обробці води. Вирішуючи такі задачі, SCADA-системи використовуються для керування автоматичними роботами, обладнанням користувача та зворотнім промиванням фільтрів на основі годин роботи або кількості потоку води, яка проходить через фільтри. Рівні резервуару для води, тиск системи, температуру рослин, седиментація, фільтрація, хімічна обробка та інші параметри або процеси контролюються за допомогою програмно-технічних комплексів SCADA-систем, програмованих логічних контролерів, робочих станцій на базі комп'ютерної техніки, які зв'язані між собою за допомогою локальної мережі LAN, використовуючи наприклад технологію Ethernet. SCADA-системи застосовуються в телекомунікаційних та IT-системах для керування різними радіочастотними системами, засобами та системами зв'язку [10]. Наприклад реєстрацію даних через антени системи, можна легко здійснити за допомогою SCADA-систем.

SCADA-система може використовуватися разом із програмним забезпеченням MATLAB для керування об'єктами. SCADAMATLAB представляє собою платформу, яка з'єднує звичайну SCADA-систему з програмним забезпеченням MATLAB для досягнення надійності та ефективності керування, при необхідності обробки складних алгоритмів керування.

Віддалені місця розташування та власні промислові мережі використовуються для того, щоб надати SCADA-системам значний ступінь захисту через ізоляцію. Зараз більшість промислових підприємств використовують мережеві сервери історичних процесів для зберігання даних про процеси та інші можливі інтерфейси бізнесу та процесів. Прийняття Ethernet та протоколу керування передачею/Інтернет-протоколу TCP / IP для мереж керування процесами та бездротових технологій, таких як IEEE 802.x та Bluetooth, ще більше зменшило ізоляцію мереж SCADA-систем. Зв'язок та деізоляція SCADA-системи представлено на рисунку 8.

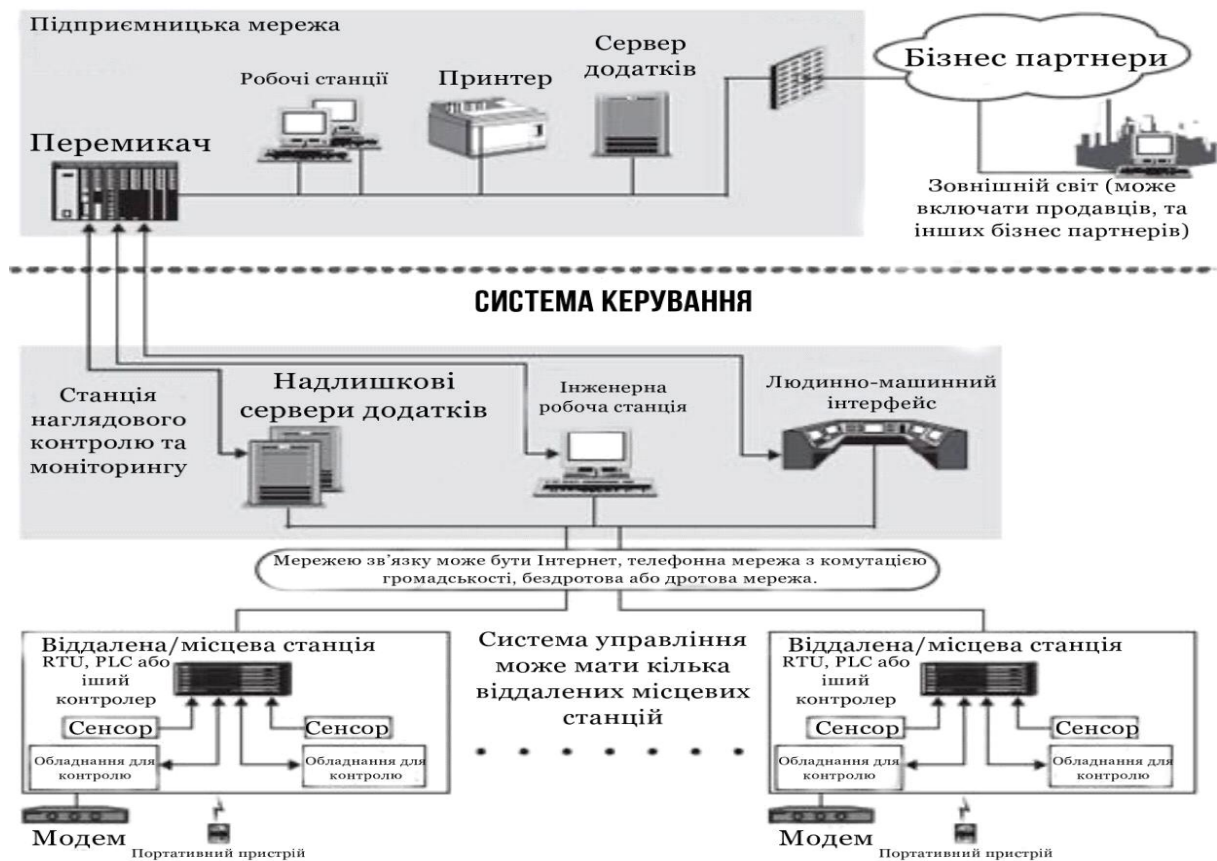


Рис. 8. Типові компоненти SCADA-систем

Кіберфізична безпека неперервних систем у режимі реального часу вимагає всебічного уявлення та цілісного розуміння мережевої безпеки, теорії управління та фізичної системи. Зрештою, будь-які життєздатні технічні рішення та напрямки досліджень щодо забезпечення систем SCADA-систем повинні бути у поєднанні з комп'ютерною безпекою, мережею зв'язку та керування. Ідея розглянути проблему в контексті ефективності керуванні має міцні напрямки. Однак дуже велика встановлена база таких систем означає, що в багатьох випадках ми повинні довгий час покладатися на реконструйовані механізми безпеки, а не мати можливість проектувати їх з нуля. Це призводить до нагальної потреби надійних SCADA-систем у виявленні вторгнень (IDS) та еластичному керуванні.

Такі міжнародні інститути, як IEEE, CPNI, AGA, ISA, NERC, NIST публікують рекомендації щодо безпечного використання SCADA-систем [11]. На рисунку 9 представлено взаємозв'язок між різними областями безпеки SCADA-системи, такими як архітектура самої системи, вразливості, атаки, виявлення вторгнень та випробувальних стендів. На сьогоднішній день, наукові праці у цьому напрямку, досліджують лише один аспект безпеки SCADA-системи, а отже недоліком є, те що, вони не розглядають взаємозв'язок між різними областями безпеки SCADA-систем, що є дуже значним при створенні механізмів безпеки для складних систем промислового Інтернет речей. Таким чином, актуальною задачею, є огляд який враховує різні аспекти безпеки SCADA-систем.



Рис. 9. Взаємозв'язок між різними областями безпеки SCADA-системи

Пропонується використовувати запропоновану у роботі [12] таксономію для вивчення аспекту архітектури та безпеки SCADA-систем, що є необхідним враховувати при проектуванні промислових багаторівневих систем керування. Така таксономія представлена на рисунку 10.

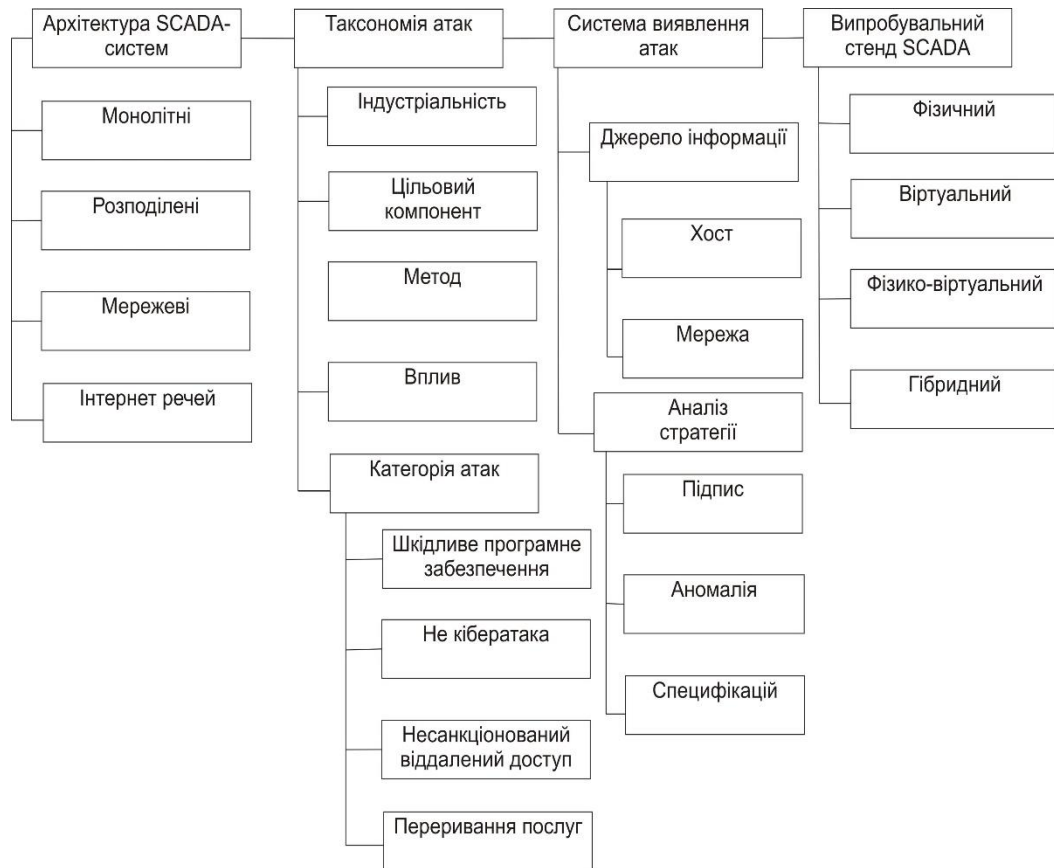


Рис. 10. Взаємозв'язок між різними областями безпеки SCADA-системи

Сучасний стан наукових досліджень, показує, що навіть із вдосконаленим алгоритмом безпеки було виявлено багато атак на SCADA-системи, а це підкреслює майбутній обсяг досліджень, що має зменшити розрив між сучасним станом SCADA-систем та передовими і надійними SCADA-системами для проектування промислових багаторівневих систем керування. Тому при проектуванні промислових багаторівневих систем керування є необхідним враховувати:

1. *Бази даних атак*: база даних інцидентів безпеки необхідна для аналізу різних вимірів атак для розробки стратегій запобігання подібним атакам у майбутньому. Набори даних KDD99, NSS-KDD, DARPA застарілі і не синхронізовані з сучасною архітектурою SCADA-системи. Набір даних NVD містить загальні вразливості у всіх доменах, які не фокусуються на специфічних вразливостях SCADA-систем. З 2015 року немає оновлення до бази даних RISI. Тому немає належної бази даних, яка охоплювала б всю безпеку інцидентів. Слід створити одне глобальне сховище для всіх цих інцидентів. Це сховище має бути загальнодоступним, доступні дослідникам для аналізу цих атак. Тоді можна обробляти лише атаки нульового дня.

2. *Масштабовані тестові стенди та методи перевірки*: на основі аналізу огляду існуючих джерел тестових стендів, можна зробити висновок, що як для фізичних, так і віртуальних тестових стендів, було досліджено програмне забезпечення та гібридний тест. Розробка випробувального стенду - це дорогий процес, який потребує величезного обсягу фінансування. Не існує такого випробувального стенду, який був би економічно вигідним, масштабованим і мав високі показники ефективності. Дослідник повинен зосередитись на масштабованості, вищому ступені ефективності, економічності та інтерполяції. Необхідними є нові протоколи зв'язку, нові методи оцінки ризику, а також перевіряти IDS. Існує нагальна вимога щодо достовірної перевірки, підходи до оцінки надійності нових методів безпеки та безпеки SCADA-систем [13].

3. *IDS для SCADA-систем*: у роботі [14] запропоновані дослідження для визначення показників продуктивності перевірки IDS. У більшості аналізів враховуються лише показники виявлення атак, такі, як хибнопозитивні та хибнонегативні. Час, необхідний для виявлення нападу, є важливим стандартом для вимірювання продуктивності. Отже, навіть якщо гарантовано, що IDS виявлять атаку, а затримка велика, зловмисник матиме достатньо часу, щоб пошкодити систему. Дослідницька робота зосереджена на розробці системи виявлення для конкретних типів атак, тобто маршрутизації та атаки DOS. Різні атаки схеми виявлення, які працюють за подібних робочих параметрів, мають бути оцінені в подальших дослідженнях і при проектуванні промислових багаторівневих систем керування. Проведено значну роботу в галузі знань, що базується на IDS. Однак ці системи все ще не здатні до обробки атак нульового дня. Визначити прийнятну поведінку при зміні середовища є складним завданням. Засновані на знаннях IDS не є надійними для невідомих атак. Поведінка кожної атаки відрізняється від інших, тому дослідник повинен зосередитись на виявленні моделі нападу. Тому дослідникам слід розробляти підходи для подальшого вдосконалення порогових методів моніторингу. У роботі [15] запропонована модель для динамічного формування правил для виявлення вторгнень у SCADA-системи. Ця порогова модель повинна бути динамічною, яка розпізнає за ступенем тяжкості минулих нападів.

4. *Новий комунікаційний протокол*: у комунікаційних протоколах основна увага приділяється додатку та захисту мережевого рівня. Протоколи мережевої безпеки повинні бути інтегровані в ці протоколи зв'язку. Протокол зв'язку для SCADA-систем на базі IoT-хмари, тобто надійний, безпечний, масштабований, відкритий, низька затримка протоколу зв'язку – це новий напрямок для дослідника. З концепцією Індустрії 4.0 протоколи IoT використовуються в SCADA-системах. Недоліком таких протоколів є надійність, що викликає потребу в надійному зв'язку. У випадку SCADA-систем, мережевих криптографічних рішень недостатньо для блокування атак. Тому актуальною проблемою є потреба у дослідженнях для більш надійних криптографічних рішень, методів аутентифікації, що входять до протоколу, механізми безпеки, які застосовуються до SCADA-систем.

5. *Безпечна архітектура та операційна система*: операційні системи DOS, VMS та UNIX, які мають різні уразливості, в основному використовувались у SCADA-системах. На сьогоднішній день працює операційна система Linux та MicrosoftWindows системи витіснили DOS із SCADA-систем на основі UNIX. Однак Linux і Windows страждають від своїх вразливостей, через великий вихідний код для операційних систем. Операційна система заснована на архітектурі мікроядра системи може бути використана для зменшення поверхні атаки для SCADA-систем. Окрім безпеки, безпеки рекомендацій завжди слід дотримуватися в максимальній мірі, щоб уникнути прийнятних ризиків. SCADA-системи можна захистити, використовуючи більш стійку до помилок архітектуру, безпечну та надійну операційну систему і використання захищених мов програмування. Безпека операційної системи є важливою проблемою. Протоколи безпеки повинні бути обов'язковими.

6. *Фокус досліджень для IoT-Cloud SCADA-систем*: у роботі [16] запропоновано декілька дослідницьких пропозицій щодо безпечного IoT-cloud SCADA-систем. Інтеграція IoT-хмари в традиційну SCADA-систему відкриває нові загрози та можливості обміну даними / інформацією / послугами через Інтернет. Існує гостра необхідність виробувати нові стратегії, придатні для керування складними та масштабними структурами. Дослідження повинні бути зосереджені на постійну безпеку цих систем. У системі хмарних технологій IoT перевантаження смуги пропускання – це велика проблема. Ці параметри залежать від постачальників хмарних послуг. Затримка з прийняттям рішень може призвести до втрати виробництва. Тож дослідження слід зосередити, щоб зробити цю систему надійною та ефективною. Слід використовувати велику пропускну здатність та низьку затримку. Потенціал цих систем залежить від взаємозв'язку відповідальних платформ. У системі, що базується на Інтернеті речей, величезна кількість даних генерується. Отже, безпека, аналітика, зберігання та складність цих даних є головною проблемою.

Висновки

1. Встановлено, що для проектування сучасних промислових багаторівневих систем керування використовуються програмно-технічні комплекси SCADA-системи, що представляють собою централізовані системи для моніторингу та керування всього технологічного процесу за допомогою програмного-апаратних компонентів. У сучасних промислових багаторівневих систем керування SCADA-системи проводять збір даних з віддаленого місця за допомогою датчиків та відправляють команди для керування технологічним процесом до програмованого логічного контролеру або людино-машинного інтерфейсу. Основна перевага SCADA-систем полягає, у тому, що вони конструктивно реалізуються у різних галузях, а це в свою чергу призводить до зменшення людських зусиль та підвищення точності вимірювання, моніторингу та контролю даних об'єкта керування в режимі реального часу і з будь-якої точки світу.

2. Сучасні SCADA-системи четвертого покоління представляють собою складні відкриті системи, які є підключеними до Інтернету. Такій підхід робить SCADA-системи, вразливими для різних зловмисників, які здійснюють напади на системи промислових багаторівневих систем керування. Безперебійна та ефективна робота SCADA-систем є однією з актуальних та найважливіших проблем для сучасного виробництва, оскільки наслідки виходу з ладу сучасної промислової багаторівневої системи керування можуть варіюватися від фінансової катастрофи до природного збитку та втрати людського життя.

3. Для забезпечення ефективного проектування промислових багаторівневих систем керування необхідно використовувати новий підхід до безпеки SCADA-систем, який поєднує різні аспекти безпеки, комплексний аналіз бази даних атак RISI, систем виявлення вторгнень та тестових стендів SCADA-систем, а також необхідно враховувати, те що, IoTization та хмарні SCADA-системи, розширили спектр проблем дослідження безпеки промислових багаторівневих систем керування.

4. У теперішній час підходи проектування промислових багаторівневих систем керування переходять до хмарних SCADA-систем. Переваги хмарних SCADA-систем є їх економічність, простота та масштабованість. Однак, незважаючи на ці переваги хмарні SCADA-системи мають ряд недоліків, такі як продуктивність, висока затримка та низька пропускну здатність, що призводить до погіршення ефективності промислових багаторівневих систем керування, тому існує актуальна потреба у розробці ефективних системних архітектур і систем для моделювання таких проблем.

References

1. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, Distributed Control Systems (DCS), and other control system configurations such as Programmable Logic Controllers (PLC) / [K. Stouffer, V. Pillitteri, S. Lightman and other]. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-82, Revision 2 Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 800-82, 2015. – 247 c.
2. Nasr P. M. An alarm based access control model for scada system / P. M. Nasr, A. Y. Varjani // Smart Grid Conference (SGC 2015), 2015. – p. 23–24.
3. Rezai A. Key management issue in scada networks: A review / A. Rezai, P. Keshavarzi, Z. Moravej // Engineering Science and Technology, an International Journal, 20(August). - 2016. – p.354–363.
4. Papa S. Securing wastewater facilities from accidental and intentional harm: A cost-benefit analysis. / S. Papa, W. Casper, T. Moore // International Journal of Critical Infrastructure Protection. - 013p. 96 – 106.
5. Miller B. A survey scada of and critical infrastructure incidents / B. Miller, D. Rowe. // In Proceedings of the 1st Annual Conference on Research in Information Technology, RIIT '12 - New York: NY, USA, 2012.- p. 51–56.
6. The scada review: System components, architecture, protocols and future security trends / A. Shahzad, S. Musa, A. Aborujilah, M. Irfan. // American Journal of Applied Sciences. – 2014. – №11. – p.1418–1425.
7. Yadav G. Architecture and Security of Scada System: A Review / G. Yadav, K. Paul // arXiv:2001.02925v1 [cs.CR]. - 2020.
8. <https://www.watelectronics.com/scada-systemarchitecture-types-applications>.
9. Industry 4.0: the fourth industrial revolution –guide to industrie 4.0. / [Y. Yang, K. McLaughlin, S. Sezer and other]. // Multiattribute scadaspecific. – 2017.
10. <https://instrumentationtools.com/applications-of-scada/>.
11. Sommestad T. Scada system cyber security x2014; a comparison of standards. / T. Sommestad, G. Ericsson, J. Nordlander // Power and Energy Society General Meeting - 2010 IEEE, 2010. - p.1–8.
12. Papa S. Securing wastewater facilities from accidental and intentional harm: A cost-benefit analysis. / S. Papa, W. Casper, T. Moore. // International Journal of Critical Infrastructure Protection.- 2013. - №6. – p. 96 – 106.
13. Lyu X. Safety and security risk assessment in cyber-physical systems. / X. Lyu. // IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications. - 2019. - №4. – p.221–232.
14. Mitchell R. A survey of intrusion detection techniques for cyber-physical systems / R. Mitchell, I. Chen // ACM Comput. Surv.- 2014. -№46. p. 1–29.
15. Zhu B. Scada-specific intrusion detection/prevention systems: A survey and taxonomy / B. Zhu, S. Sastry. - 2010.
16. Sajid A. Cloud-assisted iot-based scada systems security: A review of the state of the art and future challenges / A. Sajid, H. Abbas, K. Saleem. // IEEE SPECIAL SECTION ON THE PLETHORA OF RESEARCH IN INTERNET OF THINGS (IoT). - 2016. – №4.

ДОДАТОК Б Матеріали презентації результатів виконання дипломної
роботи

1

Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпровідних систем зв'язку п'ятого покоління

Науковий керівник
К.Т.Н. доцент
Макаришкін Д. А.

Підготував
ст. гр. ТРМ-19-1
Фененко В. О.

Актуальність роботи

Завдяки розвитку інтернету та його користувачів, збільшується загальна кількість інформації, яка передається через інтернет. Дротова передача даних вже давно готова для збільшення передачі інформації, наприклад гігабітна швидкість оптоволоконних магістралей. Однак бездротова передача даних, потребує покращення. Це є актуальна проблема рішенням якої займаються провідні науковці та інженери світу. З'являються все нові версії G мереж (0, 1, 2, 3, 4, 5). Вже запланована 6 версія. Однак при запуску або розгортанні мережі 5G з'являються нові проблеми, які не враховувалися до цього. Наприклад, є актуальним питання щодо безпеки через використання мережних слайсів, які не можуть мати належного захисту.

Актуальність роботи

Одним з таких питань є вибір частоти, чим більша довжина хвилі, тим більшу площу можна охопити мережею, але швидкість передачі даних зменшується, тобто швидкість обернено пропорційна довжині хвилі. Якщо абонент знаходить в прямому доступі до станції і не рухається - це найкращий варіант, оскільки при цьому забезпечується найвища швидкість. Однак, як тільки абонент починає рухатися, відразу виникають проблеми, які пов'язані з напрямком руху та швидкістю. Тому необхідно швидко застосовувати методи направленої поширення, тобто питання вибору частоти і поширення є досить актуальним.

Мета і завдання роботи

Метою дипломної роботи є розроблення методу передачі інформації в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних задач:

- аналіз відомих методів та засобів передачі інформації між передавальними і приймальними системами в міліметровому діапазоні хвиль у мережах 5 покоління;
 - провести моделювання каналу зв'язку на основі міліметрових хвиль для забезпечення достатньої смуги пропускання;
 - розробити метод передачі в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.
-

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

Предметом дослідження є методи та засоби передачі інформації між мобільних пристроїв з базовими станціями в міліметровому діапазоні хвиль у зв'язку 5 покоління.

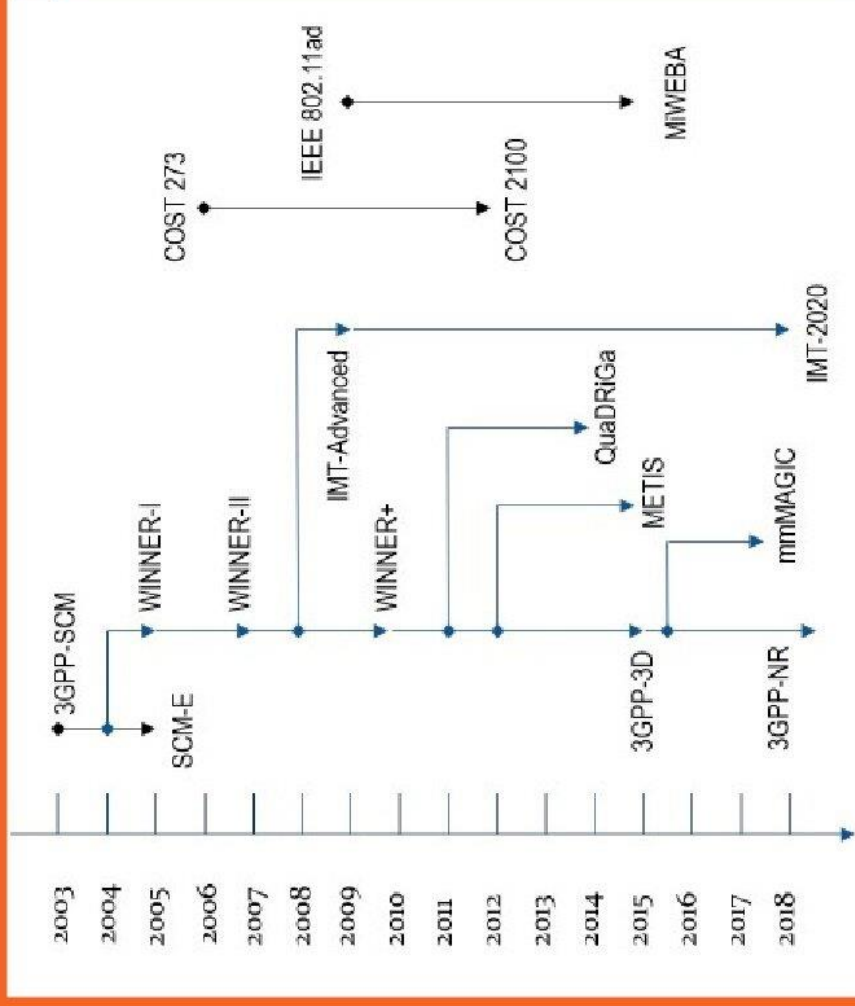
Отримані наукові результати

-набула подальшого розвитку модель зв'язку мобільних пристроїв з базовими станціями, яка на відміну від існуючих дозволяє використовувати широку смугу пропускання та надає направлені характеристики поширення;

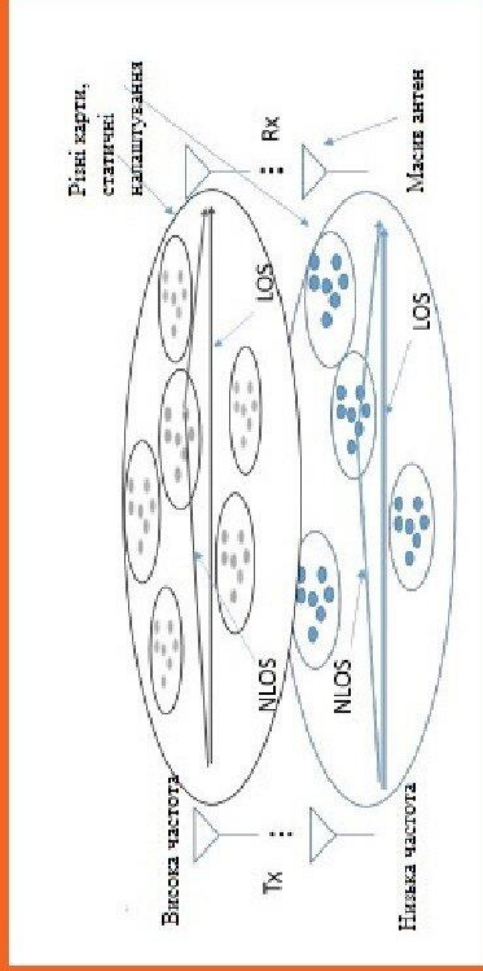
-запропоновано структуру схеми передачі даних, яка забезпечує широку смугу пропуску і направленні характеристики поширення.

Практична цінність

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розробленої структури каналів міліметрових хвиль для забезпечення широкої смуги пропускання та направлених характеристик поширення, що у свою чергу дозволяє покращити параметри каналу зв'язку між мобільними пристроями з базовими станціями у мережах 5 покоління.



Стандартні моделі зв'язку



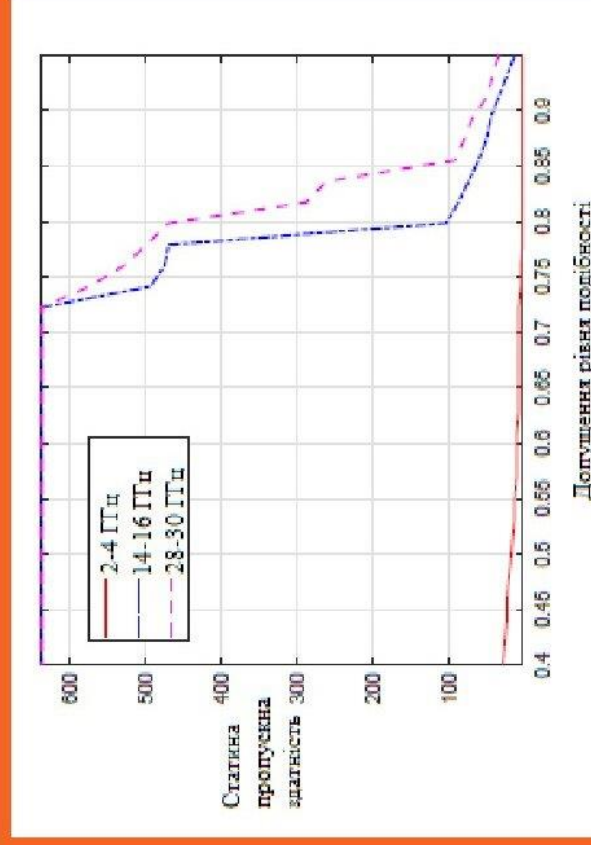
$$d_f = \max\{\Delta f \mid c(f, \Delta f) \geq f_{cASL}\}.$$

Постійна смуга пропускання d_f

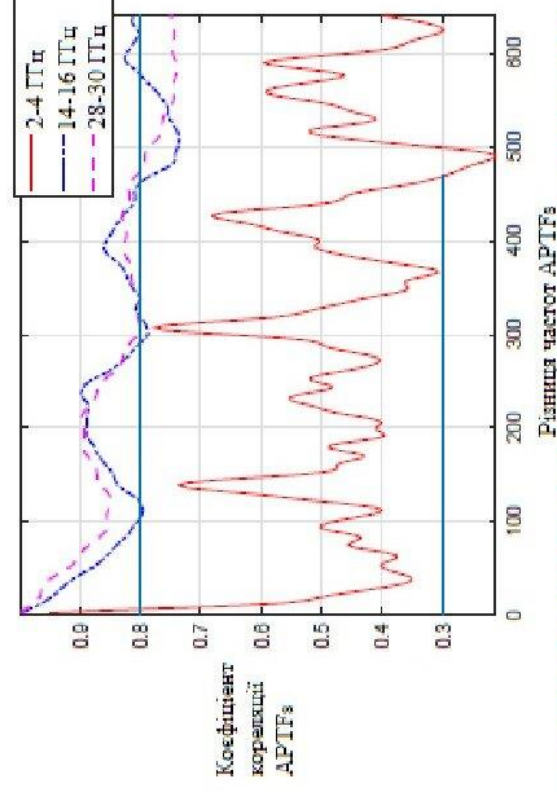
$$\overline{P_H}(r, f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H(r_i, f)|^2.$$

Використання статичної частоти для каналів з високими і низькими частотами в однакових середовищах

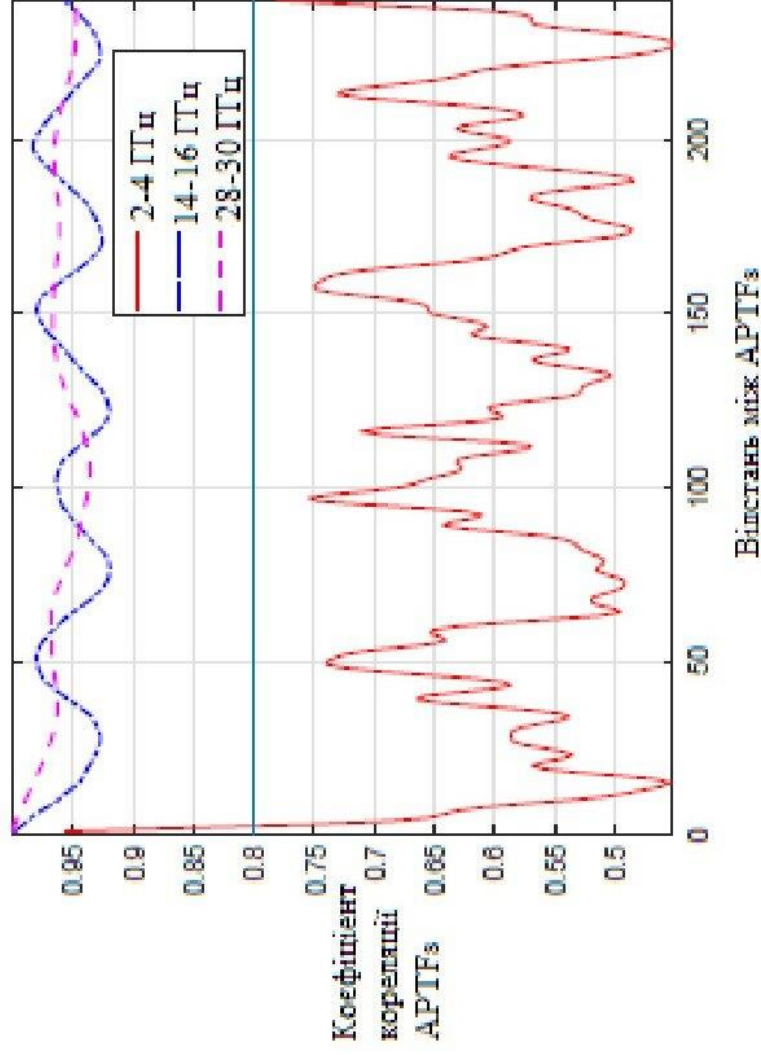
Функція передачі енергії



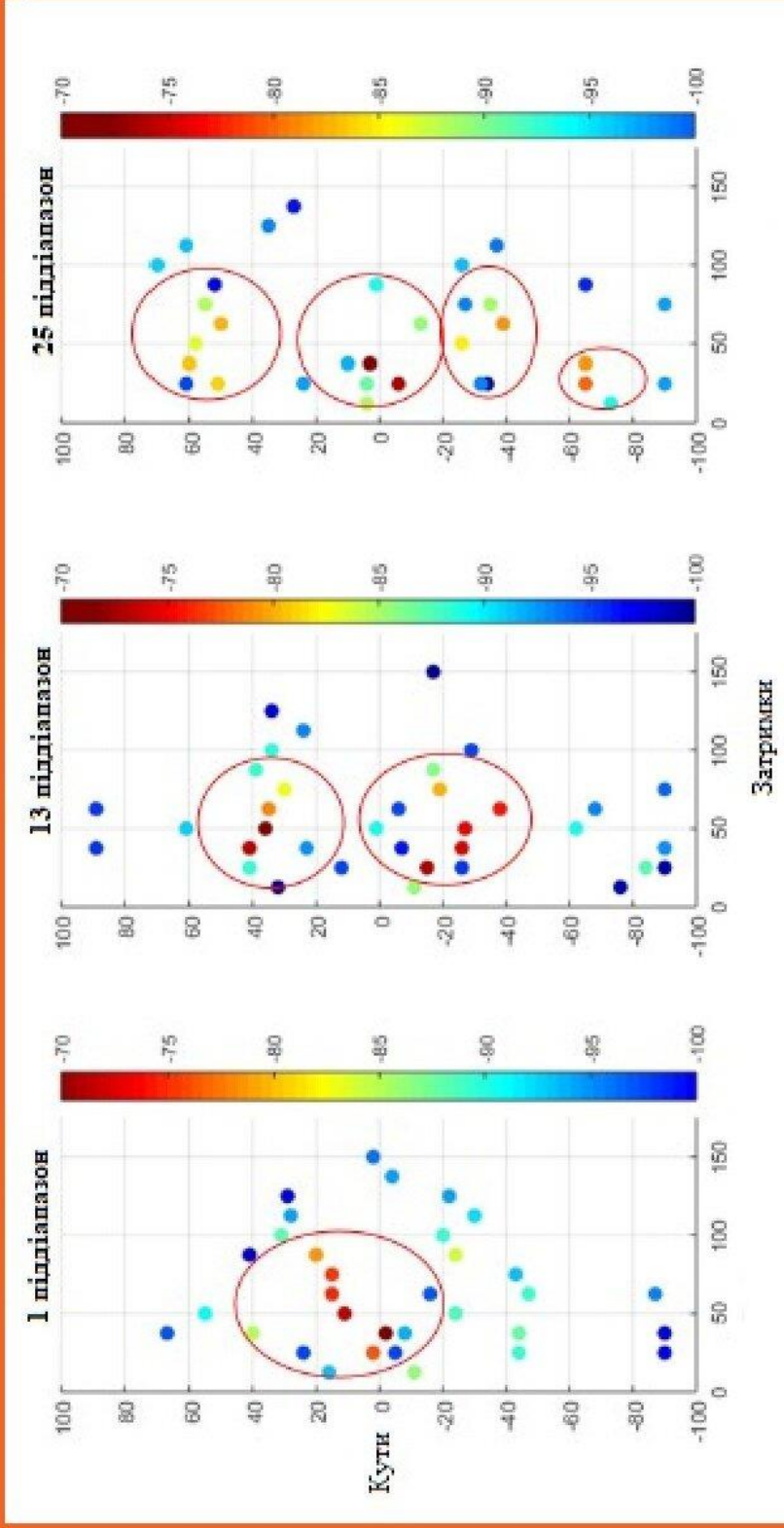
Використання статичної частоти під не прямої видимості для виправлення однакових рівнів



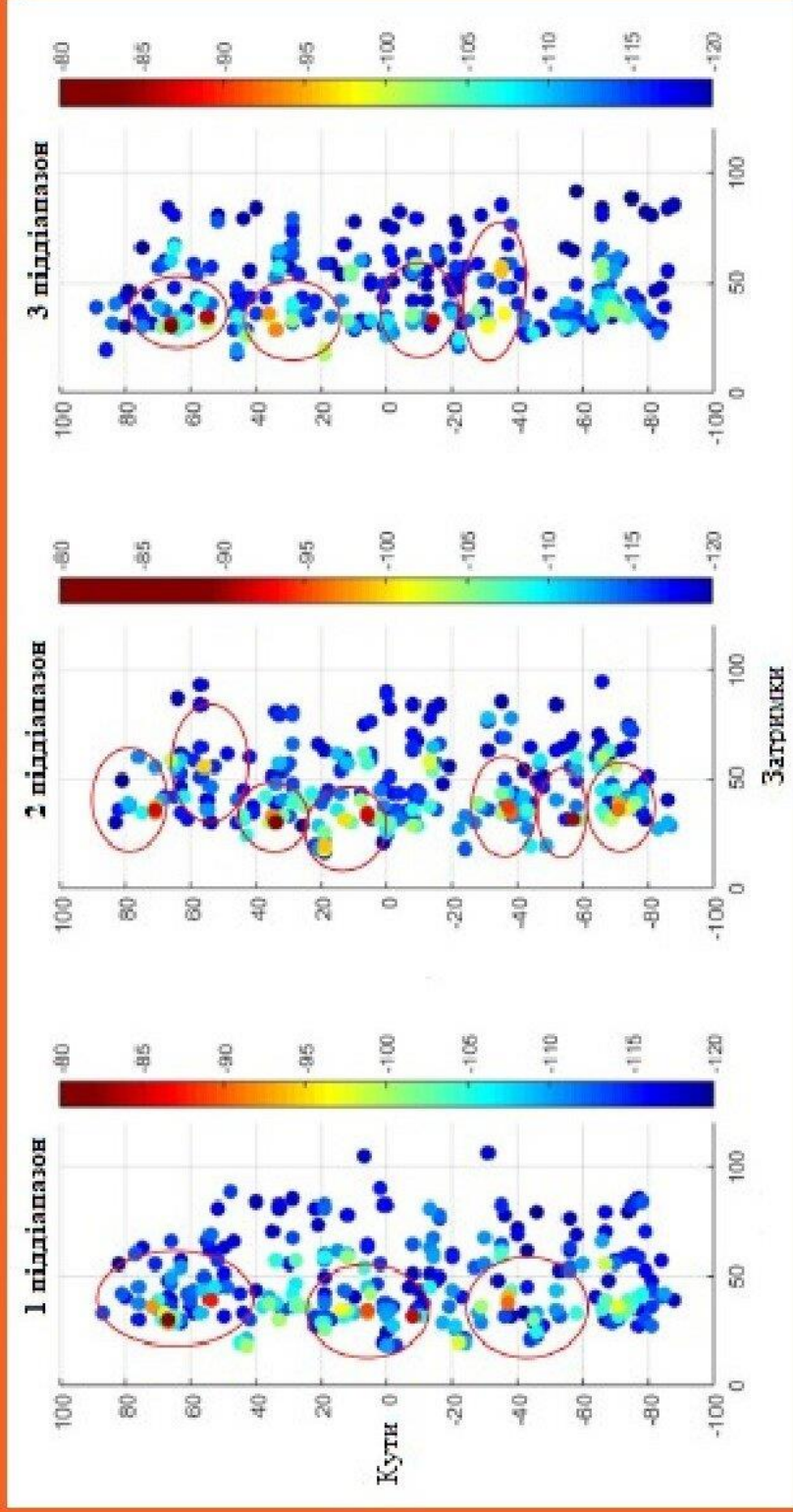
Використання статичної частоти під не прямої видимості для функції передачі середньої тяги



Коефіцієнт кореляції функції передачі середньої тяги для сцен прямої
ВИДИМОСТІ

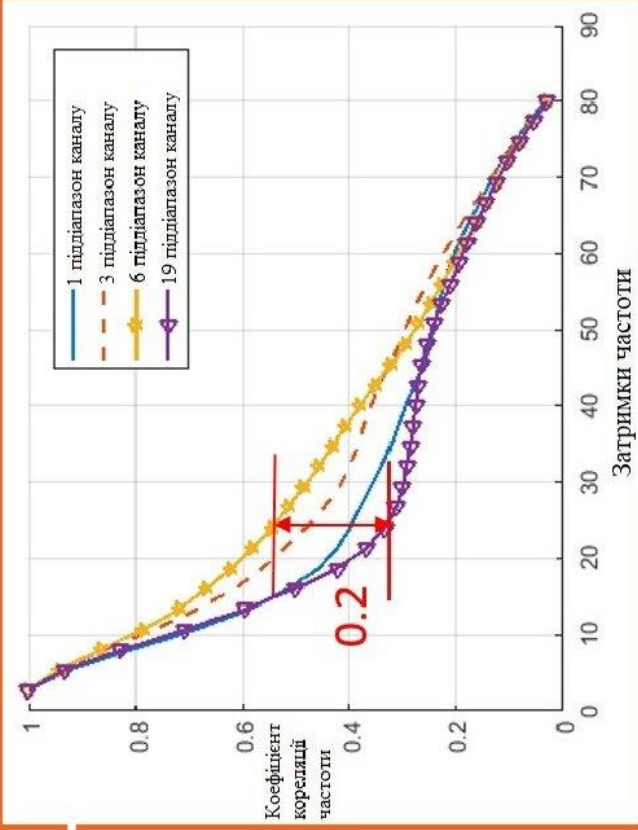
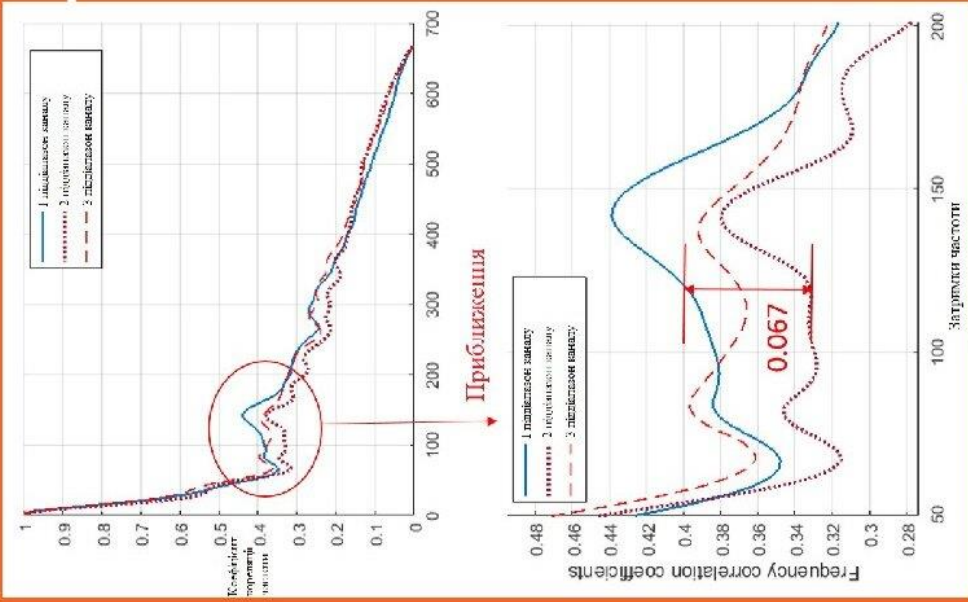


Компоненти з багатопроменевим поширенням в каналі 2 - 4 ГГц



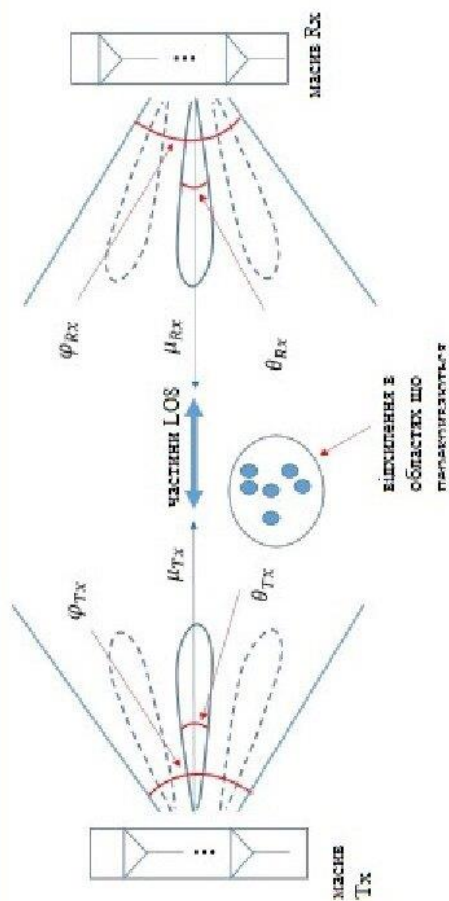
Компоненти з багатопроменевим поширенням в канал 28 - 30 ГГц

14

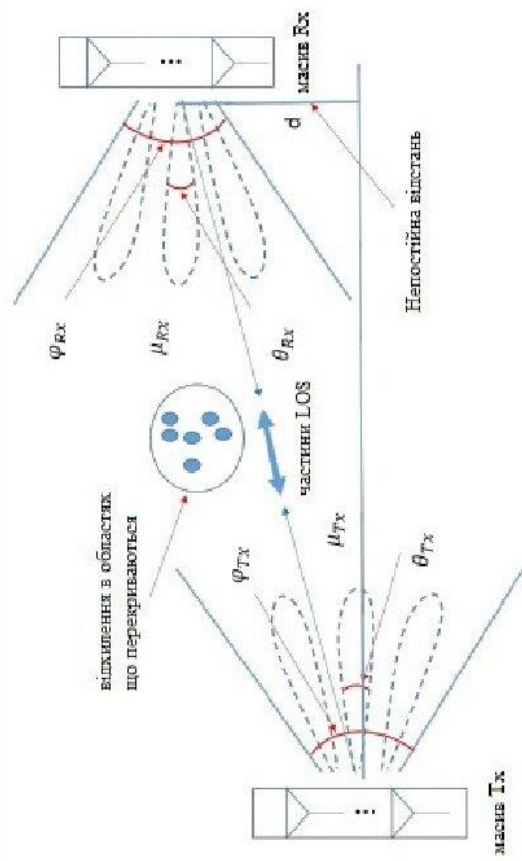


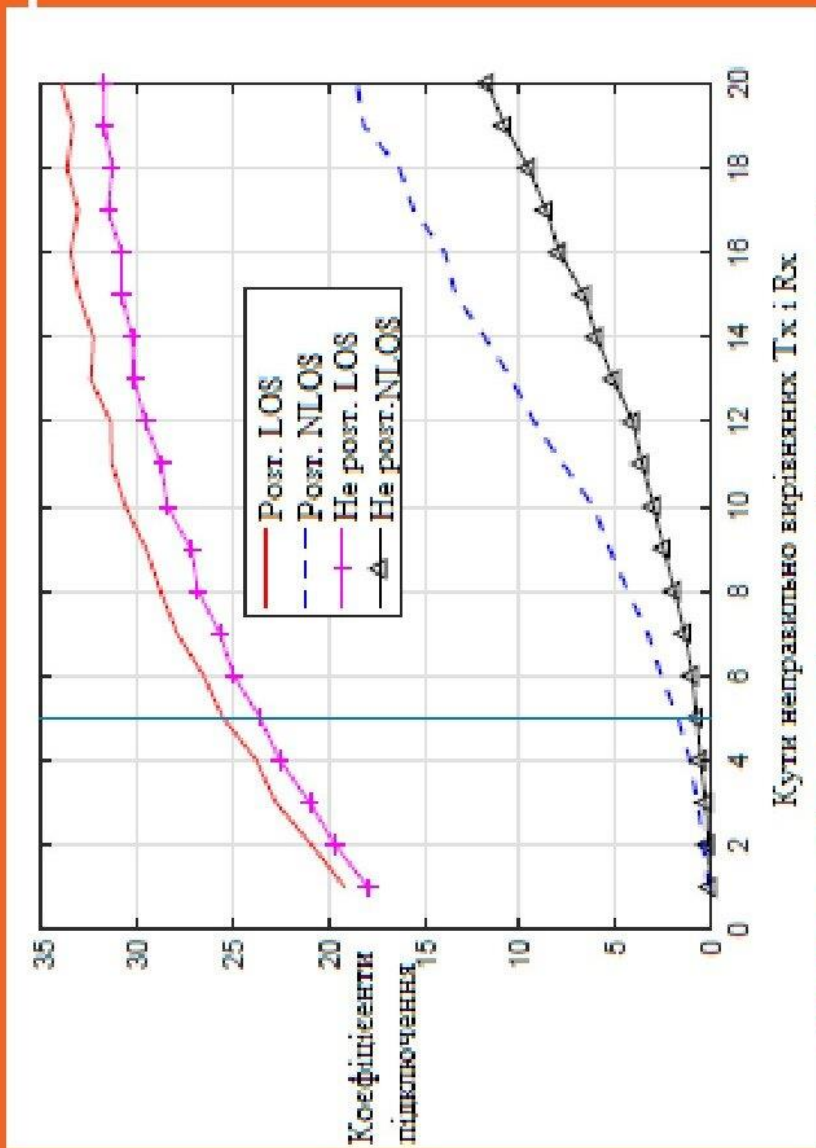
Функція кореляції частоти для каналу непрямої видимості в діапазоні, зліва 28-30ГГц, зверху 2-4ГГц

Подвійний промінь пуассона для нерухомого варіанта



Подвійний промінь пуассона для зміщеного варіанта





Синхронізовані подвійні промені
пуассона

ВИСНОВОК

- 1 проведено дослідження методів передачі даних між мобільним абонентом та базовими станціями, виявлені переваги та недоліки цих методів.
- 2 проведено моделювання методів передачі даних із змінною частотою.
- 3 наведено схему направленої моделі передачі даних.
- 4 результат роботи дозволив створити ефективну схему каналів міліметрових хвиль

Публікації за матеріалами роботи

Результати дипломної роботи магістра опубліковані в одній статті у науковому журналі «Вісник хмельницького національного університету».

Завідувачу кафедри телекомунікацій та
радіотехніки
д.т.н., професору Бойку Ю.М.
здобувача вищої освіти
Фененко В.О.
ФПКТС, гр. ТРМ-19-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

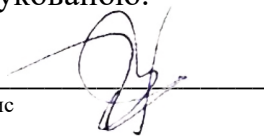
Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

23 листопада 2020 р.

дата

підпис



Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 1.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибка в документах: 10%

ID: 85757 Названье: Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпровідних систем зв'язку п'ятого покоління Добавлено в БД: 2020-12-19 Авторы: Фененко Владислав Александрович Руководитель: Макаршикін Денис Анатолійович Консультанты: Оponentы: Корещька Людмила Олександрівна	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	94197	745	731 (1%)	9 (1%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Ім'я користувача:
Kafedra telekom_radiotechniki

ID перевірки:
1005491393

Дата перевірки:
21.12.2020 20:25:43 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
21.12.2020 20:30:13 EET

ID користувача:
100005656

Назва документа: Фененко В.О. - ТРМ-19-2

Кількість сторінок: 90 Кількість слів: 14636 Кількість символів: 113122 Розмір файлу: 4.57 MB ID файлу: 1005773697

1.51% Схожість

Найбільша схожість: 1.22% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1005773519)

0.31% Джерела з Інтернету 25 Сторінка 92

1.39% Джерела з Бібліотеки 53 Сторінка 92

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 10

РІШЕННЯ КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА РАДІОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпроводних систем зв'язку п'ятого покоління

Автор: Фененко Владислав Олександрович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Макаришкін Денис Анатолійович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як відносяться до термінологічних та загальноживаних типових фраз і складають 3,86%

«18» грудня 2020 р.

Науковий керівник



Макаришкін Д.А.

Завідувач кафедрою ТР



Бойко Ю.М.

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу ст. гр. ТРм-19-2 Фененко Владислава Олександровича
 «Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпроводних систем
 зв'язку п'ятого покоління»,
 другий освітній рівень (магістр), спеціальність 172 – Телекомунікації та
 радіотехніка

Дипломна робота присвячена розгляду питань використання міліметрових хвиль безпроводних систем зв'язку п'ятого покоління для забезпечення в умовах дії середовища міста.

Актуальність теми підтверджується застосуванням міліметрових хвиль в різних модифікаціях мереж п'ятого покоління які зазвичай реалізуються разом хвилями високої частоти що дозволяє ефективно передавати дані.

В дипломній роботі магістра ставить та виконується ряд завдань, серед яких:

- аналіз відомих методів та засобів передачі інформації між передавальними і приймальними системами в міліметровому діапазоні хвиль у мережах 5 покоління;

- провести моделювання каналу зв'язку на основі міліметрових хвиль для забезпечення достатньої смуги пропускання;

- розробити метод передачі в міліметровому діапазоні хвиль мобільних пристроїв з базовими станціями у зв'язку 5 покоління.

Робота складається із вступу, 4 розділів, основних висновків по роботі, списку використаних джерел (80 бібліографічних посилання, 6 сторінок) та 2 додатків (28 сторінок). Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 70 сторінок і містить 24 рисунків на 20 сторінках по тексту та 2 таблиці, що займають 1 сторінку по тексту. Повний обсяг роботи – 111 сторінок.

Перший розділ присвячено класифікації моделей бездротових каналів переді даних, а саме детерміновані стохастичні, гібридні, і стандартні моделі міліметрових хвиль на основі геометрії. Також було розглянуто:

- особливості деяких стандартних моделей переді. ;
- характеристики каналів міліметрових хвиль;
- Дослідження щодо каналів міліметрових хвиль.

Другий розділ присвячено покращенню методу профіль затримки потужності. Застосувавши цей метод для низьких частот, виявлено що доступність каналів зі стаціонарною частотою краща у міліметрових хвилях ніж в 6 ГГц. Також запропоновано модель зі змінною частотою яка підходить як для каналів до 6 ГГц так і для міліметрових хвиль. Основна ідея - розділити канал з змінною частотою на декілька із постійною, змоделювати кожен під канал і об'єднати їх як один канал із змінною частотою.

Третій розділ присвячено методу кутового усередненого профіля затримки потужності. Цей метод використовує кути піднесення і азимут. Під час аналізу

даних вимірювань міліметрових хвиль було описано декілька коефіцієнтів. Було запропоновано три стани маркова для моделювання направлених каналів міліметрових хвиль який базується на методі кутового усередненого профіля зі станами прямої і не прямої видимості.

Четвертий розділ присвячено схемі подвійного розподілу гаусса для передачі даних між мобільними абонентами за допомогою міліметрових хвиль. Використано стани маркова як для самого моделювання каналу так і для направлених каналів з використанням декількох перешкод. Також зроблено висновок що синхронізація променів передавача і приймача майже не впливає на коефіцієнти підключення за схемою подвійного розподілу гаусса.

За змістом робота є ґрунтовною (містить загалом більше сторінок тексту) містить велику кількість посилань на літературу, висновки з отриманих результатів сформовані технічно грамотно. Викладення матеріалу є послідовним та логічно пов'язаним, застосовується велика кількість ілюстрацій та додатків. Наведені у роботі формули, припущення та висновки мають достатнє обґрунтування та детальне пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою та не перенасиченою спеціальними термінами. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні, граматичних та стилістичних помилок дуже обмежена кількість.

Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

- набув подальшого розвитку модель зв'язку мобільних пристроїв з базовими станціями, яка на відміну від існуючих дозволяє використовувати широку смугу пропускання та надає направлені характеристики поширення;
- набула подальшого розвитку технологія вибору діапазону хвиль для розроблення моделі передачі інформації до користувача;
- запропоновано структуру схеми передачі даних, що забезпечує широку смугу пропуску і направленні характеристики поширення.

Важливих недоліків робота не містить, завдання на дипломну роботу магістра виконано, але присутні незначні неточності, орфографічні та стилістичні помилки, які не впливають на суть роботи.

В цілому дипломна робота магістра Фененко Владислава Олександровича “Моделювання каналів міліметрового діапазону хвиль безпровідних систем зв'язку п'ятого покоління” повністю відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт магістра та заслуговує на оцінку “добре”, а її автор – на присвоєння кваліфікаційного рівня магістр зі спеціальності 172 – “Телекомунікації та радіотехніка”.

Доцент кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій і
телекомунікацій, Хмельницького національного університету,
канд. техн. наук, доц.



Корецька Л.О.