

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
«Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-20м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка.
_____ Юрченко Ю.Ю.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ
_____ Васильківський М.В.
« ____ » _____ 2021 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. РТ
_____ Осадчук В.С.
« ____ » _____ 2021 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ТКСТБ
_____ д.т.н., проф. Кичак В.М.
« ____ » _____ 2021 р.

Вінниця ВНТУ - 2021 рік

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
 Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації
 (шифр і назва)
 Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)
 Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
д.т.н., професор В.М. Кичак
 “ ” 2021 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Юрченко Юрію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 09 2021 року № 277

2. Строк подання студентом роботи - 01 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи сценарій використання позиціонування – мобільні пристрої; призначення - послуги геолокації LBS; зона обслуговування – позиціонування 5G зовні/всередині приміщень; точність позиціонування по вертикалі – 0,1-3 м; точність позиціонування по горизонталі – 2 м; доступність – 90 %; тривалість оновлення – 30-300 с; TTFF – 10 с; затримка - 1 с; сценарій використання позиціонування – медичні пристрої; призначення - послуги з охорони здоров'я; зона обслуговування – позиціонування з підвищеною точністю зовні/всередині приміщень; точність позиціонування по вертикалі – 2 м; точність позиціонування по горизонталі – 3 м; доступність – 99 %; затримка - 60 с; сценарій використання позиціонування – віддалене керування БПЛА; призначення - БПЛА; зона обслуговування – позиціонування 5G зовні приміщень; точність позиціонування по вертикалі – 0,3 м; точність позиціонування по горизонталі – 0,5 м; доступність – 99 %; затримка - 150 мс.

4. Зміст текстової частини: комплекс сценаріїв мережевого позиціонування; послуги та сценарії позиціонування в мережах 5G; еволюція технологій позиціонування в мережах 5G; використання технологій позиціонування в мережах 5G; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G; топології організації радіозв'язку в МРД 5G; архітектура гетерогенної мережі радіодоступу 5G; структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням; схеми

позиціонування під час організації радіозв'язку; архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G; архітектура системи мережевого позиціонування у МРД 5G; структури методів позиціонування у МРД 5G; сценарії підвищення точності та уточнення наукової проблеми.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ТКСТБ		

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	10.09.2021р.	
2.	Комплекс сценаріїв мережевого позиціонування	17.09.2021р.	
3.	Послуги та сценарії позиціонування в мережах 5G	01.10.2021р.	
4.	Еволюція технологій позиціонування в мережах 5G	29.10.2021р.	
5.	Використання технологій позиціонування в мережах 5G	19.11.2021р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	30.11.2021р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	06.12.2021р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	13.12.2021р.	
9.	Нормоконтроль МКР	14.12.2021р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	17.12.2021р.	
11.	Захист МКР ЕК	20.12.2021р.	

Студент

(підпис)

Юрченко Ю.Ю.

Керівник роботи

(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Юрченко Юрій Юрійович. Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G. Магістерська кваліфікаційна робота.– Вінниця: ВНТУ, 2021. – 206с.

На українській мові. Бібліогр.: 31 назв; Рис.:36; Табл.: 35

Мережі 5G є актуальним напрямком дослідження і, безсумнівно, інноваційною екосистемою для постановки і рішення задач мережевого позиціонування. Для уточнення об'єкта і предмета дослідження було досліджено нові послуги мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь і технології мережевого позиціонування пристроїв засобами інфраструктури МРЗ.

Проведено формалізація і систематизація комплексу сценаріїв і методів позиціонування пристроїв для реалізації нових послуг мереж п'ятого і наступних поколінь.

Розроблено метод позиціонування в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь, що забезпечує з достатньою точністю визначення розташування пристроїв Інтернету Речей та інших пристроїв мереж зв'язку п'ятого поколінь, у тому числі при забезпеченні взаємодії пристрій-пристрій.

Ключові слова: Адаптивна антенна система, безпілотний літальний апарат, визначення місце розташування, глобальна навігаційна супутникова система, мережа радіодоступу, мережа рухомого зв'язку, розповсюдження радіохвиль.

ABSTRACT

Positioning of devices in 5G telecommunication networks. Master's thesis..–
Vinnytsia: VNTU, 2021. – 206c.

In Ukrainian language. Bibliogr .: 31 titles; Fig : 36; Table: 35.

5G networks are a relevant area of research and, undoubtedly, an innovative ecosystem for setting and solving network positioning problems. To clarify the object and subject of the research, new communication network services of the fifth and subsequent generations and technologies for network positioning of devices by means of the MCN infrastructure were studied.

Formalization and systematization of a set of scenarios and methods for positioning devices for implementing new network services of the fifth and subsequent generations is carried out.

A positioning methodology has been developed in communication networks of the fifth and subsequent generations, which provides sufficient accuracy in determining the location of Internet of Things devices and other devices of communication networks of the fifth generation, including when ensuring device-device interaction.

Keywords: Adaptive antenna system, unmanned aerial vehicle, location determination, global navigation satellite system, radio access network, mobile network, propagation of radio waves.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 КОМПЛЕКС СЦЕНАРІЇВ МЕРЕЖЕВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....	19
1.1 Еволюція послуг і технологій при переході до мереж 5G.....	19
1.1.1 Еволюція послуг і поколінь мереж 1G-5G.....	19
1.2 Мережі 5G як основа цифрової економіки та трансформації.....	22
1.3 Нові діапазони частот мереж 5G.....	25
1.4 Нові технології та архітектура мереж 5G.....	29
1.5 Висновки до розділу 1.....	39
2 ПОСЛУГИ ТА СЦЕНАРІЇ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G.....	41
2.1 Постановка задачі.....	41
2.2 Показники ефективності позиціонування в мережах 5G.....	43
2.3 Аналіз сценаріїв позиціонування в мережах 5G.....	46
2.4 Вимоги до технологій позиціонування в мережах 5G.....	65
2.5 Висновки до розділу 2.....	68
3 ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G.....	70
3.1 Постановка задачі.....	70
3.2 Еволюція інтерфейсів та архітектури позиціонування.....	71
3.3 Еволюція стандартів та методів позиціонування.....	80
3.4 Аналіз точності технологій позиціонування.....	99
3.5 Висновки до розділу 3.....	102
4 ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G.....	105
4.1 Постановка задачі.....	105
4.2 Діаграмоутворення на основі позиціонування в мережах 5G.....	106
4.3 Організація зв'язку на основі позиціонування у мережах 5G.....	112
4.4 Тенденції розвитку технологій позиціонування у мережах 5G.....	120
4.5 Висновки до розділу 4.....	127
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	130

5.1 Оцінювання наукового ефекту	130
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	133
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	134
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи.....	137
5.2.3 Сировина та матеріали.....	137
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	138
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	139
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	140
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	141
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	142
5.2.9 Службові відрядження.....	144
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	144
5.2.11 Інші витрати.....	145
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	145
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	146
5.4 Висновок до розділу 5	148
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	149
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	149
6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	149
6.1.2 Електробезпека приміщення.....	151
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	152
6.2.1 Мікроклімат	152
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	152
6.2.3 Виробниче освітлення	154
6.2.4 Виробничий шум	155
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	155
6.2.6 Напруженість праці.....	157

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.	157
6.3.1 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії іонізуючого випромінювання.....	158
6.3.2 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	160
6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах надзвичайних ситуацій.	161
ВИСНОВКИ.....	164
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	167
ДОДАТКИ.....	171
Додаток А (Технічне завдання).....	172
Додаток Б (Архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G).....	180
Додаток В (Топології організації радіозв'язку в МРД 5G).....	182
Додаток Г (Архітектура гетерогенної мережі радіодоступу)	184
Додаток Д (Структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням).....	186
Додаток Е (Схеми позиціонування під час організації радіозв'язку).....	188
Додаток Ж (Архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G).....	190
Додаток И (Архітектура системи мережевого позиціонування у МРД 5G)	192
Додаток К (Структури методів позиціонування у МРД 5G)	194
Додаток Л (Сценарії підвищення точності та уточнення наукової проблеми)	196
Додаток М (Позиціонування у мережах 5G та вимоги до них).....	198
Додаток Н (Сценарії позиціонування та вимоги щодо категорій пристроїв) ...	201
Додаток П (Вимоги точності та доступності послуг позиціонування)	203
Додаток Р (Положення, внесок та технічне рішення за результатами розділів 1 - 4.).....	205

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ААС – Адаптивна антенна система.
АТ – Абонентський термінал
АР – Антенна решітка.
АЦП – Аналоговий-цифровий перетворювач.
БД – База даних
БПК – Багатопроменеві компоненти.
БПЛА – Безпілотний літальний апарат.
БПРХ – Багатопроменеве поширення радіохвиль
БПСР – Багатопозиційні системи пасивної радіолокації.
БС – Базова станція.
ВМР – Визначення місце розташування.
ГНСС – Глобальна навігаційна супутникова система.
ДУ – Діаграмоутворення.
ДМХ – Дециметрові хвилі.
ДРВ – Джерело радіовипромінювання.
ДСА – Діаграма спрямованості антени.
ІНС – Інерційні навігаційні системи.
КП – Коефіцієнт підсилення.
МДХ – Міліметровий діапазон хвиль.
МЗ – Місцезнаходження
МРД – Мережа радіодоступу.
МРЗ – Мережа рухомого зв'язку.
МШП – Мало шумуюче посилення.
ОК – Оцінка координат.
ПОС – Просторова обробка сигналу.
ПП – Пункт прийому.
РДМ – Різницево-далекомірні.
РРХ – Розповсюдження радіохвиль.
СМХ – Сантиметрові хвилі.
УВЧ – Ультрависокі частоти.
ЦАП – Цифро-аналоговий перетворювач.
ЦММ – Цифрова модель місцевості.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Аналіз еволюції мереж рухомого зв'язку (МРЗ) попередніх поколінь 1G-4G показав, що мережеве позиціонування традиційно розглядалося як одна з додаткових можливостей в процесі стандартизації, побудови та експлуатації мереж, який користувався попитом тоді, коли сигнали глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) виявлялися недоступні; визначення місця розташування (ВМР) в МРЗ здійснювали при цьому переважно в інтересах екстрених служб і забезпечення правопорядку. Однак розвинена інфраструктура МРЗ відкривала широкі можливості для мережевої геолокації пристроїв, тому в процесі еволюції, починаючи з аналогових МРЗ 1G, удосконалювалися методи і засоби мережевого позиціонування. Цифрові МРЗ 2G GSM сприяли розвитку мережевого позиціонування з точністю до десятків метрів на вимогу регулятора. Глобалізація МРЗ пов'язана з утворенням партнерського проекту 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для стандартизації мереж 3G UMTS. Починаючи з покоління 3G в процесі стандартизації МРЗ в специфікаціях 3GPP стали пред'явлені технічні вимоги до мережевого ВМР. Дана тенденція отримала продовження в мережах 4G LTE і подальший розвиток в мережах 5G NR.

Для мереж 5G в останніх специфікаціях 3GPP, на відміну від МРЗ попередніх поколінь, вперше були формалізовані вимоги до точності мережевого позиціонування до одного метра для різних сценаріїв. При цьому, крім традиційних для МРЗ 2G-4G випадків екстреного виклику, були описані різні сценарії мережевого позиціонування для народного господарства: послуги на основі позиціонування LBS (Location-based service), позиціонування в промисловості та охороні здоров'я, при керуванні дорожнім рухом, для залізничних і морських вантажоперевезень, а також позиціонування з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Відмінними рисами нових вимог до сценаріїв позиціонування 5G є ключові показники ефективності KPI (Key Performance Indicators), серед яких, крім точності оцінки координат (ОК) по горизонталі і вертикалі, виділяють точність оцінки швидкості і напрямку руху, доступність ОК, затримка в її наданні, частота оновлення ОК, енергоспоживання на сеанс ВМР і ін.

Для досягнення амбітної задачі позиціонування з точністю до одного метра, що приблизно на порядок менше, ніж в МРЗ попередніх поколінь, в мережах 5G планується використовувати нові технології мережевого позиціонування, а також комбінування первинних вимірювань і оцінок координат різних існуючих технологій ВМР, як входять до специфікації 3GPP, так і сторонніх: ГНСС (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS), системи наземного позиціонування з використанням маяка TBS (Terrestrial Beacon Systems), інерційні вимірювальні модулі IMU (Inertial Measurement Unit), мережі радіодоступу (МРД) WiFi / Bluetooth і ін. Існуючі технології позиціонування задовольняють досить широкий спектр вимог в різних сценаріях, особливо при їх спільному використанні. Однак залишаються і такі сценарії, в яких вони не забезпечують необхідної точності, наприклад, всередині приміщень, при відсутності прямої видимості, в умовах щільної забудови, в сценаріях з використанням БПЛА і зонах підвищеної точності ВМР. Тому питання мережевого позиціонування для потреб народного господарства, без сумніву, є актуальними.

З технічної точки зору мережеве позиціонування пристроїв в МРЗ, є джерелом радіовипромінювання (ДРВ), яке можна розглядати як ВМР в багатопозиційних системах пасивної радіолокації (БПСР), коли безліч позицій представлено базовими станціями (БС) МРД, які є опорними пунктами прийому (ПП) первинних вимірювань. Позиціонування ДРВ в БПСР здійснюється за вимірюваннями на просторово рознесених ПП часу і / або напряму приходу сигналів, випромінюваних ДРВ. Найбільш розповсюдженими пасивними вимірюваннями є різницево-далекомірні (РДМ) і кутомірні (КМ). Розробка комплексу моделей і методів ВМР з точки зору БПСР, як предмета дослідження, в контексті нових особливостей побудови і функціонування МРЗ п'ятого і наступного поколінь, як об'єкта дослідження, дозволяє підкреслити принципово важливі відмінності і нові можливості мережевого позиціонування, що відрізняють його від попередніх поколінь, особливо з огляду на перехід технологій 5G на якісно новий рівень.

З одного боку, новий радіоінтерфейс 5G, включаючи більш широкі смуги частот, багатоантенні системи massive MIMO (mMIMO) з можливістю адаптивного діаграмоутворення (ДУ), діапазон міліметрових хвиль (ММХ, mmWave), а також нова архітектура МРД 5G, в тому числі, безпосередній

радіозв'язок один з одним D2D (Device-to-Device) в надщільних МРД UDN (Ultra Dense Network), відкривають як нові можливості, так і породжують нові проблеми і завдання для мережевого позиціонування. Дані обставини вимагають вдосконалення відомого в БПСПР комплексу моделей і методів ВМР в нових умовах функціонування МРД 5G і, таким чином, виділяють мережеве позиціонування 5G як новий науковий напрям досліджень.

З іншого боку, використання даних про місцезнаходження (МЗ) пристроїв сприяє реалізації нових механізмів встановлення і ведення радіозв'язку на основі геолокації; в зарубіжній літературі даний підхід отримав назву LAC (Location-Aware Communication). Відомим прикладом LAC є маршрутизація в само організованих МРД на основі МЗ сусідніх ретрансляторів. Відносно новим прикладом геолокації в когнітивних МРД є сумісне використання спектра первинними і вторинними ДРВ за рахунок їх попереднього позиціонування для усунення перешкод. В останні роки друге дихання знайшли дослідження, присвячені на основі позиціонування LAB (Location-Aware Beamforming), що особливо актуально для просторового ущільнення SDMA (Space-Division Multiple Access) в мережах UDN при переході в діапазон ММХ з мініатюризацією пристроїв massive MIMO. Таким чином, в МРД 5G мережеве позиціонування буде вже не тільки однією з додаткових послуг, а засобом досягнення якісно нового рівня функціонування мережі. Викладені обставини дозволяють розглядати позиціонування в мережах п'ятого і наступних поколінь, як предмет дослідження, з двох сторін: по-перше, як цільове завдання безпосереднього географічного ВМР мережевих пристроїв в МРЗ; по-друге, як інструмент підвищення ефективності побудови та функціонування МРД на основі даних про МЗ пристроїв.

Розробленість теми дослідження. На сьогоднішній день МРЗ, принципом їх побудови, використання і особливостей функціонування, як об'єкту дослідження, присвячено достатню кількість фундаментальних і прикладних дослідчих робіт вітчизняного і зарубіжного походження.

Визначальний внесок у розвиток теорії МРЗ і їх контенту внесли наступні вітчизняні вчені: О.С. Аджемов [1], В.Ю. Бабков [3], В.В. Бутенко [4], В.М. Вишневський [5], А.А. Гоголь [7], Б.С. Гольдштейн [8], Ю.А. Громаков, В.Г. [9], Карташевський [10], Ю.А. Ковалгін [11], Р.В. Киричок [12], В.Б. Крейнделін [13], А.Е. Кучерявий [14], Е.А. Кучерявий [15], Д.А. Молчанов [17], А.І.

Парамонов[18], А.Е. Рижков [19], К.Є. Самуйлов [20], В.К. Сарьян [2], М.А. Сіверс [13], В.О. Тихвинський [15] і ін. Серед зарубіжних наукових шкіл, які зробили новий внесок, слід зазначити J.G. Andrews [12], M.S. Alouini [13], E. Dalmann [14], M. Dohler [5], A. Goldsmith [9], C. Hoymann [7], W.C.Y. Lee [8], T.S. Rappaport [9], G. Stuber [10], D. Tse [11] і ін.

На відміну від традиційних в своїй постановці питань побудови, функціонування і керування МРЗ з метою підвищення ефективності надання послуги телекомунікацій, в магістерській кваліфікаційній роботі вперше робиться спроба створення методології постановки і рішення задач позиціонування мережевих пристроїв з використанням інфраструктури МРД п'ятого покоління при наданні нових послуг мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь, пов'язаних з визначенням місця розташування.

Визначальний внесок у області БПСРП внесли російські вчені Є.Г. Борисов, В.С. Верба, В.П. Іпатов, В.С. Кондратьєв, А.Ф. Крячко, В.М. Кутузов, С.Б. Макаров, А.М. Рембовській, Б.Г. Татарський, В.С. Черняк, Я.Д. Ширман і ін. Серед зарубіжних вчених, які зробили істотний внесок у мережеве позиціонування, Y. Bar-Shalom, R.M. Buehrer, R.S. Campos, Y.T. Chan, R. Chen, A. Dammann, G. Høye, L. Lovisolo, C. Mensing, S. Sand, H.C. So, D.J. Torrieri, R. Zekavat і ін.

На сьогоднішній день в частині розробленості теми дослідження можна констатувати наступні передумови для протиріччя гносеологічного характеру. З одного боку, є досить зрілий методологічний апарат постановки і рішення задач ВМР пристроїв з використанням теорії БПСРП. З іншого боку, на рубежі чергового десятиліття при переході до мереж п'ятого покоління і новий радіоінтерфейс, і нова архітектура МРД 5G відкривають принципово нові можливості для мережевого позиціонування, яких не було в мережах попередніх поколінь: а) на порядок ширші смуги частот від сотень МГц до десятків ГГц дозволяють істотно підвищити точність збору і кореляційної обробки первинних ДМ і РДМ вимірювань; б) поширення багато антенних систем з числом елементів від десятків до тисяч дозволяють набагато більше широко використовувати КМ вимірювання не тільки в обладнанні БС, але і в портативних пристроях; в) умови надщільного розподілу в МРД з щільністю до 1 пристрою на 1 м² обумовлюють необхідність переходу від площинних до просторових оцінок координат; г) можливість безпосереднього радіозв'язку пристроїв один з одним сприяють

розвитку систем кооперативного позиціонування в умовах мережевої самоорганізації. Таким чином, суть гносеологічного протиріччя полягає в назрілу необхідності створення методологічного апарату постановки і рішення задач позиціонування мережевих пристроїв з використанням інфраструктури МРЗ 5G при наданні нових послуг мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь для потреб цифрової економіки.

На відміну від відомих в мережах попередніх поколінь технічних рішень ВМР, в даній роботі розроблена методологія мережевого позиціонування, що враховує специфіку радіоінтерфейсу і архітектури МРД п'ятого і подальших поколінь, для верифікації відомих і перспективних сценаріїв, що розрізняються географічної протяжністю, рухливістю і щільністю позиціонуються і опорних пристроїв, а також комплексуванням первинних вимірювань гетерогенної МРД.

З огляду на певної специфіки постановки і рішення задач ВМР з використанням стаціонарних ПП в складі наземного сегмента і рухливих ПП на борту БПЛА в складі повітряного сегмента, слід окремо позначити внесок зарубіжних вчених, що займалися позиціонуванням з використанням БПЛА: L. Badriasl, K. Dogancay, S.P. Drake, H.J. Du, P.Y. Lee, N. Okello, D. Musicki і ін.

Внаслідок особливостей багатопроменевого поширення радіохвиль (БПРХ), слід виділити внесок зарубіжних вчених, що займалися ВМР у відсутності прямої видимості: J. Borrás, P.C. Chen, L. Cong, P. Hatrack, N. Garcia, J. Holtzman, E.G. Larsson, N.B. Mandayam, R. Mendrzik, M.B. Montminy, Z. Wang, M.P. Wylie, W. Xu, W. Zhuang і ін.

Розроблений в даній роботі комплекс моделей і методів позиціонування при відсутності прямої видимості дозволив вирішити проблему ВМР в умовах БПРХ з використанням єдиного підходу як для стаціонарних ПП в складі наземного сегмента, так і для рухливих ПП на БПЛА в складі повітряного сегмента.

Внесок встановлення мережевого позиціонування 5G, як нового наукового напрямку, зробили зарубіжні вчені: S. Bartoletti, A. Conti, A. Dammann, D. Dardari, G. Destino, S. He, G.E. Garcia, A. Giorgetti, A. Guerra, F. Guidi, C. Gustafson, I. Guvenc, S. Kim, E. Leitinger, Y. Liu, J. Lu, J.C. McEachen, P. Meissner, A.F. Molish, J.D. Roth, M. Ruble, A. Shahmansoori, G. Seco-Granados, Y. Shen, X. Shi, Z. Shi, F. Tufvesson, M. Tummala, P. Zhang, Q. Wang, Y. Wang, F. Wen, M.Z. Win, K. Witrisal, H. Wymeersch і ін. Окремо слід відзначити зарубіжних вчених,

які трактували мережеве позиціонування, як засіб реалізації нових механізмів встановлення і ведення радіозв'язку на основі M3 (LAC): S. Muppirisetty, R. Raulefs, D.T.M. Slock, T. Svensson, R.Di Taranto; і, зокрема, ДУ на основі позиціонування (LAB): M. Koivisto, J. Talvitie M. Valkama і ін.

Метою роботи є розробка моделей і методів, сценаріїв і рішень для позиціонування пристроїв в мережах п'ятого і наступних поколінь.

Для досягнення мети вирішуються наступні завдання дослідження:

1. Формалізація і систематизація комплексу сценаріїв і методів позиціонування пристроїв для реалізації нових послуг мереж п'ятого і наступних поколінь.

2. Розробка методології оцінки і візуалізації точності позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж 5G для комплексу сценаріїв в мережах п'ятого і наступних поколінь.

3. Дослідження і розробка комплексу моделей і методів позиціонування при відсутності прямої видимості шляхом порівняння дисперсій проміжних оцінок координат в оброблюваних наборах пунктів прийому в мережах радіодоступу.

4. Дослідження і розробка комплексу моделей і методів обробки різницево-віддалемірних і кутомірних вимірювань для різних топологій стаціонарних пунктів прийому в складі наземного сегмента і траєкторій руху пунктів прийому на борту БПЛА в складі повітряного сегмента.

Об'єктом дослідження є інфраструктура мереж п'ятого і послідуєчих поколінь.

Предметом дослідження є комплекс моделей і методів позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж п'ятого і наступних поколінь і організація радіозв'язку на основі розташування.

Науковою проблемою, що має важливе господарське значення для галузі зв'язку, є розробка комплексу моделей і методів позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж 5G для реалізації нових послуг мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь.

Наукова новизна. У магістерській кваліфікаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. На відміну від відомих досліджень в області позиціонування для мереж зв'язку загального користування в магістерській кваліфікаційній роботі

розроблена методологія позиціонування в мережах зв'язку п'ятого і наступних поколінь, які забезпечують з достатньою точністю визначення місця розташування пристроїв Інтернету Речей і інших пристроїв мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь, в тому числі при забезпеченні взаємодії пристрій-пристрій.

2. Для реалізації запропонованої в магістерській кваліфікаційній роботі методології розроблені сценарії позиціонування, що відрізняються тим, що вони враховують специфіку побудови гетерогенних мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь, в тому числі, надщільного мереж радіодоступу та просторовий розподіл мережевих пристроїв, а також необхідність комбінування різноманітних первинних вимірювань для гетерогенної мережі радіодоступу.

3. У розробленому комплексі методів позиціонування для мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь, що функціонують в умовах відсутності прямої видимості, на відміну від відомих методів реалізовані процедури порівняння дисперсій проміжних оцінок координат в оброблюваних наборах і комбінаціях пунктів прийому, що дозволяють ідентифікувати та виключити безліч пунктів прийому, що знаходяться в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль, якщо число залишилися після виключення джерел вимірювань з прямою видимістю перевищує мінімально необхідне на одиницю.

4. Розроблено комплекс моделей і методів позиціонування для мереж п'ятого і наступних поколінь з використанням БПЛА і цифрових моделей місцевості на основі радарної топографічної зйомки SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), що відрізняється від відомих комбінуванням розносно-віддалемірних і кутомірних первинних вимірювань, урахуванням можливих траєкторій БПЛА в умовах відсутності прямої видимості з об'єктом позиціонування і реалізацією геометричній трасування променів з використанням SRTM для прогнозу умов відсутності прямої видимості з об'єктом позиціонування внаслідок перешкод, розмір яких кратний елементарної майданчику просторового дозволу.

5. Розроблено комплекс моделей око-діаграми, що відрізняється тим, що в умовах надщільних мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь установлена залежність територіального розносу пристроїв від точності формованого променю.

Теоретична значимість роботи полягає в розробці комплексу моделей і методів, сценаріїв і рішень для мережевого позиціонування в надщільних

мережах зв'язку п'ятого і наступних поколінь, а також встановлення взаємозв'язку мережевого позиціонування як інструменту вирішення завдань визначення місце положення при реалізації нових послуг мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь. Самостійну теоретичну значимість має визначення залежності точності позиціонування пристрою в просторі від похибки визначення часу і напряму приходу сигналу по замкнутому куту місця стаціонарну пунктами прийому в складі наземного сегмента і рухомим пунктом прийому на борту БПЛА в складі повітряного сегмента і встановлена на основі цього можливість ідентифікації і виключення перевідбиттів сигналів, прийнятих рухомим пунктом прийому на борту БПЛА. Розроблений комплекс методів позиціонування при відсутності прямої видимості реалізує процедури порівняння дисперсій проміжних оцінок координат в оброблюваних наборах і комбінаціях пунктів прийому, що дозволяють ідентифікувати та виключити безліч пунктів прийому, що знаходяться в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль, якщо число залишилися після виключення джерел вимірювань з прямою видимістю перевищує мінімально необхідне на одиницю. Важливими теоретичними результатами представляються також встановлення залежності рівня перешкод від точності і ширини формованого променя для пристроїв, працюючих в режимі діаграмоутворення в складі надщільних мереж радіодоступу п'ятого і наступних поколінь і визначення залежності їх територіального розносу при роботі вузько направленими променями в режимі ДУ на основі їх розташування.

Практична значимість роботи полягає в створенні комплексу моделей і методів мережевого позиціонування в надщільних мережах, що дозволяє науково-обґрунтовано планувати впровадження і розвиток мереж зв'язку п'ятого і послідуєчих поколінь, зокрема, запропонована методологія мережевого позиціонування дозволяє прогнозувати і візуалізувати точність визначення місце-положення для: а) різних топологій стаціонарних пунктів прийому в складі наземного сегмента і траєкторій руху пунктів прийому на борту БПЛА в складі повітряного сегмента; б) варіантів комбінування первинних вимірювань гетерогенної мережі радіодоступу в мережах п'ятого і наступних поколінь; в) умов функціонування рухомих (до 160 км / ч) і нерухомих пристроїв в зонах з широкою зоною охоплення, високої (до 3 м) і дуже високою (до 0,3 м) точністю; г) умов пере відбиття сигналів з використанням цифрової моделі місцевості на основі радарної топографічної зйомки. Розроблений комплекс моделей

діаграмоутворення на основі позиціонування дозволяє сформулювати і обґрунтувати практичні рекомендації для функціонування та керування пристроями, що працюють в режимі діаграмоутворення при їх надщільному розподілі з урахуванням точності і ширини формованого променя. В тому числі, показано, що діаграмоутворення на основі позиціонування сусідніх пристроїв в умовах їх надщільного розподілу дозволяє знизити рівень перешкод на 15 дБ при звуженні ширини ДСА з 360° до 2° , а територіальний рознос сусідніх пристроїв може досягати 20% від дальності радіо покриття при точності визначення кута приходу сигналу в 2. Крім того, експериментально апробований науковий інструментарій для прототипування систем локального позиціонування, розроблений засобами модельно-орієнтованого проектування і програмно-конфігуруючого радіо для суміщеної телекомунікаційної та вимірювальної системи.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2021), 03 – 05 листопада 2021 року, ВНТУ, м. Вінниця [31].

1 КОМПЛЕКС СЦЕНАРІЇВ МЕРЕЖЕВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

1.1 Еволюція послуг і технологій при переході до мереж 5G

1.1.1 Еволюція послуг і поколінь мереж 1G-5G

На сьогоднішній день стільникові мережі рухомого радіозв'язку (МРЗ), принципам їх побудови, використання і особливостей функціонування, як об'єкту дослідження, присвячене достатню кількість фундаментальних і прикладних дослідницьких робіт вітчизняного і зарубіжного походження.

Визначальний внесок у розвиток теорії МРЗ і їх контенту внесли наступні вітчизняні вчені: О.С. Аджемов [1], С.Д. Андрєєв [2], В.Ю. Бабков [3], В.В. Бутенко [4], В.М. Вишневський [5], Ю.В. Гайдамака [6], А.А. Гоголь [7], Б.С. Гольдштейн [8], Ю.А. Громаков [9], В.Г. Карташевський [10], Ю.А. Ковалгін [11], Р.В. Киричок [12], В.Б. Крейнделін [13], А.Е. Кучерявий [14], Е.А. Кучерявий [15], М.А. Маколкін [16], Д.А. Молчанов [17], А.І. Парамонов [18], А.Е. Рижков [19], К.С. Самуйлов [20], М.А. Сіверс [13], В.О. Тихвинський [15], І.А. Цікін [17], І.В. Шахновіч [9] та ін. Істотний внесок в теорію побудови мереж радіодоступу внесли також російські вчені В.А. Галкін [7], А.І. Ляхов [8], В.Г. Скринніков [9], Є.М. Хорів [3], Ю.С. Шинаков [1] та ін.

Серед зарубіжних наукових шкіл і учених, які зробили основний внесок в розвиток мереж мобільного зв'язку та радіодоступу, слід зазначити дослідницькі групи під керівництвом J.G. Andrews [12], M.-S. Alouini [13], E. Dalmann [14], M. Dohler [5], A. Goldsmith [9], C. Hoymann [7], W.C.Y. Lee [8], T.S. Rappaport [9], G. Stuber [10], D. Tse [11] та ін.

На відміну від традиційних в своїй постановці питань побудови, функціонування і керування стільниковими мережами рухомого радіозв'язку з метою збільшення ефективності надання послуг телекомунікацій, в магістерській кваліфікаційній роботі вперше робиться спроба створення методології позиціонування пристроїв з використанням інфраструктури мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь для надання нових послуг геолокації.

Мережі 5G / IMT-2020 (International Mobile Telecommunications) [12], продовжують еволюцію 4G, є закономірним етапом розвитку Б.

У 1990-ті роки перехід від аналогових МРД першого покоління 1G AMPS (Advanced Mobile Phone Service) з частотним поділом каналів FDMA (Frequency Division Multiple Access) до МРД 2G GSM (Global System for Mobile Communications) з частотно-тимчасовим FDMA / TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA One з кодовою CDMA (Code-Division Multiple Access) і D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) з тимчасовим поділом каналів означав перехід до цифрових технологій на технічному рівні і до перших сервісів передачі даних на рівні користувача [3].

У 2000-ті роки перехід до 3G UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) відкрив технічну можливість передачі даних на швидкостях, необхідних для перегляду мультимедійного контенту [11], що стало якісно новим етапом еволюції з точки зору користувача. З технічної точки зору цей етап заснований на прорив в розробці і масовому виробництві компонентів мікроелектроніки субмікронного рівня (65-45 нм і нижче), що забезпечили радикальне зниження енергоспоживання і збільшення функціональності [9]. Глобалізація МРД пов'язана з утворенням партнерського проекту 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для стандартизації мереж 3G UMTS [3].

В еволюції МРД чергове покоління відрізняється від попереднього якісного як на технічному, так і на рівні споживання послуг. Важливими обставинами переходу до 4G було те, що не дивлячись на наявність в МРД 3G технологій високошвидкісної передачі HSPA (High Speed Packet Access), вони не змогли конкурувати з LTE (Long-Term Evolution) [4]. Визначальним стало і масове поширення портативних пристроїв з відображенням відео контенту, наближались за якістю до стаціонарних комп'ютерів. Смартфони стали тим елементом 4G, без якого нові швидкості були раніше не потрібні, так як екрани апаратів 3G не могли повною мірою реалізувати перегляд відео контенту.

У 2010-і роки перехід до 4G LTE-A (LTE- Advanced) [15] мав на меті досягнення вимог ITU-R M.1645 [16] комітету IMT-Advanced Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ / ITU (International Telecommunication Union) : швидкість в низхідному каналі до 100 Мбіт / с для мобільних і 1 Гбіт / с для

малорухомих абонентів. Така швидкість зробила доступними перегляд якісного відео контенту і використання інших сервісів, які раніше користувач отримував тільки вдома або в офісі. Щоб перейти до МРД 4G, треба було принципово змінити архітектуру мереж радіодоступу (МРД) і опорних мереж. У МРД було покінчено з «телефонним спадщиною» стільникового зв'язку: адже навіть системи 3G, по суті, були радіо подовжувачами, що зв'язують абонентів з автоматичними телефонними станціями (АТС): мережа 4G - це плоска IP-мережу з пакетною передачею даних, можливістю розподіленої архітектури та каналами прямого обміну між базовими станціями [18]. LTE-A еволюціонували в LTE-A Pro, однак вибухове зростання трафіку і обмеженість спектра традиційних для МРД дециметрових хвиль (ДМХ), зумовили перехід до нових МРД 5G.

Крім збільшення потреб в пропускну здатності для окремих абонентів, зростає число самих абонентів і активних пристроїв Інтернету речей [19]. З одного боку, частотний ресурс ДМХ і нижній частині сантиметрового (СМХ) діапазону вже перевантажений існуючими МРД. З іншого боку, виробників напівпровідникових приладів підійшли до створення над мало потребуючих пристроїв, а елементна база діапазону міліметрових хвиль ММХ (з довжиною хвилі від 10 мм до 1 мм, що відповідає частоті від 30 ГГц до 300 ГГц) стала промисловою реальністю [16]. Таким чином, експоненціальне зростання трафіку на рівні МРД як один із стимулів побудови МРД 5G, підтримується і поширенням портативних пристроїв високої продуктивності, і якісним відображенням не тільки відео, але і тактильних відчуттів [7].

У 2020-і роки МРД 5G покликані забезпечити надшвидкість (1-10 Гбіт / с), зверх малі затримки (менше 1 мс), надвеликі числа активних фізичних з'єднань і їх надвисоку щільність, енергетичну і спектральну надфективні, що не піддається реалізації в рамках концепції МРД 4G [2].

1.2 Мережі 5G як основа цифрової економіки та трансформації

Вимоги до ключових показників ефективності KPI (Key Performance Indicators) мереж 5G / IMT-2020 визначені в 3GPP TR 38.913 [8]: а) пікова швидкість передачі даних: в каналі вниз (DL) 20 Гбіт / с; в каналі вгору (UL) 10 Гбіт / с; б) пікова спектральна ефективність: DL - 30 біт / с / Гц; UL - 15 біт / с / Гц; в) наскрізна затримка на рівні користувача (user plane latency): 4 мс в UL / DL для послуг типу eMBB, 0,5 мс для послуг типу URLLC в UL / DL; наскрізна затримка на рівні керування (control plane latency) 10 мс; надійність передачі даних (вірогідність втрати пакета): 10^{-5} для пакета 32 байт з наскрізною затримкою в мережі в 1 мс для послуг URLLC; г) щільність підключених пристроїв: 1 млн на 1 км²; д) термін роботи батареї пристрою: 10 - 15 років для пристроїв IoT / M2M / D2D; е) швидкість пересування абонентського пристрою - до 500 км / год; безперервне обслуговування при хендовера. Таким чином, можна констатувати, що необхідні показники мережі KPI, досягнення яких дозволяє віднести її до 5G, говорить про: а) збільшення пропускної здатності в 10 разів; б) зростання спектральної ефективності до 3 разів; в) зменшення наскрізної затримки передачі в 10 разів до 1 мс; г) збільшення кількості пристроїв, що підключаються в соті в 10-100 разів - до 10^6 на 1 км²; д) збільшення часу автономної роботи пристроїв IoT / M2M / D2D – до 10 років.

Сценарії використання мереж 5G класифіковані МСЕ на 3 групи [3].

Удосконалений рухливий широкопasmовий зв'язок eMBB (Enhanced Mobile Broadband) охоплює сценарії використання, орієнтовані на людину і забезпечують доступ до мультимедійного контенту, послуг та даними. До таких послуг належать: 3D відео, в тому числі в реальному часі, онлайн ігри, віртуальна реальність (в освіті, розвагах, охороні здоров'я), розширені сервіси соціальних мереж, хмарні сервіси (в державні послуги, бізнес-додатках, обчисленнях), голос, в тому числі потоковий, віщання, музика в реальному часі. Для eMBB важливі для користувача швидкість передачі даних, трафік на одиницю площі, мобільність, енергоефективність та ефективність використання спектра.

Великомасштабні системи між машинами зв'язку mMTC (massive Machine Type Communications) характеризуються великою кількістю підключених

пристроїв, що передають невеликий обсяг даних, не настільки чутливих до затримки. Для якісної підтримки цих послуг необхідно забезпечити низьку вартість абонентських пристроїв при підтримці великої зони охоплення і тривалості часу роботи від батареї. Основні області застосування: енергетика, транспорт, охорона здоров'я, торгівля, громадська безпека, промисловість, ЖКГ, безпілотні транспортні засоби. Сценаріями МІоТ властива висока щільність з'єднань і необхідність функціонування більшого числа пристроїв [9].

Наднадійна передача даних з малою затримкою URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications) пред'являє жорсткі вимоги до пропускну здатності, затримки і готовності. Прикладами можуть служити бездротове керування промисловими і виробничими процесами (роботизація), дистанційна хірургія, автоматизація розподілу енергії в «розумних» електромережах, безпеку на транспорті. У деяких сценаріях URLLC високе значення має низька затримка для того, щоб забезпечити роботу критично важливих служб безпеки, а також мобільність в сфері послуг безпеки перевезень.

Мережі 5G / IMT-2020 року - це також і нова парадигма інфокомунікаційних технологій (ІКТ) з впровадженням принципово нових послуг [19]: а) послуги на основі голограм і мультимедіа з ефектом присутності, включаючи трансляції спортивних матчів і інтерактивні фільми з охопленням в 360 °; б) повномасштабні послуги віртуальної і доповненої реальності VR / AR (Virtual Reality / Augmented Reality), включаючи послуги AR при навігації і водінні автомобіля, керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА), діагностику і хірургічне втручання на відстані за допомогою робота; в) послуги з наднизькою затримкою, включаючи дистанційне керування рятувальним роботом, автономне водіння автомобіля; г) послуги Інтернету речей ІоТ на основі масового підключення пристроїв; д) інтелектуальні послуги на основі технологій великих об'ємів даних Big Data; е) тактильний Інтернет.

У національній програмі «Цифрова економіка України» визначено завдання створення глобальної конкурентоспроможної інфраструктури передачі, обробки та зберігання даних переважно на основі вітчизняних розробок і перетворення пріоритетних галузей економіки і соціальної сфери, включаючи охорону здоров'я, освіту, промисловість, сільське господарство, будівництво ,

міське господарство, транспортну та енергетичну інфраструктуру, фінансові послуги, за допомогою впровадження цифрових технологій [20]. Вирішення зазначених завдань передбачає розвиток мереж 5G / IMT-2020 року, які дозволять спростити впровадження нових ІКТ в традиційні галузі промисловості та народного господарства і використовувати інноваційні високошвидкісні послуги і сервіси в усіх галузях економіки [20]. Перспективні цифрові технології, в тому числі, мережі 5G / IMT-2020 року, штучний інтелект та Інтернет речей є одним з основних стимулів економічного зростання і цифрової трансформації DT (Digital Transformation) в масштабах держави.

Четверта промислова революція «Індустрія 4.0» і цифрова трансформація засновані на ІКТ та штучному інтелекті (ШІ) [4]. Першими областями, що освоюють нові цифрові технології, імовірно стануть комунальне господарство, транспорт, виробництво, охорона здоров'я, сільське господарство і фінанси. Цифрова трансформація має на увазі зміни у виробничих і соціальних процесах шляхом прийняття цифрових технологій.

Цифрова економіка являє собою господарську діяльність, в яку ключовими факторами є дані в цифровому вигляді, обробка результатів аналізу яких дозволяють істотно підвищити, в порівнянні з традиційними формами господарювання, ефективність різних видів виробництва, технологій, обладнання, зберігання, продажу, доставки товарів і послуг [11, 12].

Цифрова трансформація сучасної економіки як складова «індустрії 4.0» і програма «Цифрова економіка України», затвердження на державному рівні і є одним з національних проєктів, диктують необхідність створення сучасної інфраструктури мереж передачі, обробки і зберігання даних, тому розвиток радіо технологій стає однією з найважливіших складових процесу цифровізації традиційних галузей промисловості і народного господарства, який, неможливий без впровадження мереж 5G / IMT-2020 & IoT [4]. Розгортання мереж 5G / IMT-2020 є одним із пріоритетних завдань Національного проєкту «Цифрова економіка України», а самі мережі 5G / IMT-2020 стануть частиною критично важливої інфраструктури для забезпечення цифрової трансформації [8-10].

Технології 5G / IMT-2020 року, хмарні і сенсорні сервіси, IoT і ШІ, будуть консолідуватися і розвиватися разом, стимулюючи тим самим економічно

зростати. Основними розробниками і експлуатантами нових мереж, на базі яких будуть впроваджуватися інтелектуальні технології, стають оператори пересувні радіозв'язку [16]. Оператори використовують рішення Big Data в рекламних кампаніях, в тому числі, для аналізу потоків населення при оцінці ефективності розміщення нових офісів банків, салонів зв'язку, фітнес-клубів. Технологія дозволяє аналізувати знеособлені дані про пішохідний трафік, часу знаходження абонентів в конкретному районі. Інфраструктурною основою для реалізації завдань цифрової економіки визначені також такі наскрізні технології, як промисловий інтернет речей ІоТ (Industrial IoT), бездротовий зв'язок, віртуальної і доповнена реальність. Їх повномасштабне використання неможливо без створення і розвитку мереж 5G / IMT-2020 [15]. Нові можливості мережі 5G відкривають і перед людьми з обмеженими можливостями. Портативні пристрої типу розумних годинників, розумних очків і розумних гарнітур стануть серйозною інтелектуальною підтримкою для цієї групи населення. Так, впровадження роботів-поводирів в поєднанні з розширенням можливостей хмарних сервісів дозволить сліпим із слабким зором зажити повноцінним життям. Уже сьогодні деякі компанії працюють над створенням розумної навігаційної гарнітури, яка допоможе отримувати інформацію про своє місцезнаходження, напрямку руху і перешкоди з високою точністю в режимі реального часу [14].

Далі розглянемо нові особливості діапазону частот ММХ і його вплив на архітектуру мереж п'ятого і наступних поколінь для подальшого аналізу впливу цих факторів на технології мережевого позиціонування.

1.3 Нові діапазони частот мереж 5G

По специфікаціях 3GPP діапазони 5G / IMT-2020 розділені на два піддіапазонна (Frequency Range) FR1 (450-6000 МГц) і FR2 (24,25 - 52,6 ГГц), а документами GSMA - на 3 групи [19, 20]: нижче 1 ГГц (частотний діапазон FR1), в смузі 1 - 6 ГГц (частотний діапазон FR1) і понад 6 ГГц (частотний діапазон FR2).

Частоти нижче 1 ГГц мають найкращі характеристики розповсюдження радіохвиль (РРХ) в умовах міської, приміської та сільської місцевості, забезпечують ефективне радіо покриття великих територій і актуальні для використання IoT пристроями. В якості ключового діапазону радіочастот для впровадження мереж 5G / IMT-2020 нижче 1 ГГц розглядається смуга 694-790 МГц.

Частоти 1-6 ГГц мають як хороші характеристики РРХ в умовах міської, приміської та сільської місцевості, так і достатню ширину смуг для організації високошвидкісних каналів з шириною до 100 МГц. У цій смузі радіочастот для мереж 5G / IMT-2020 розглядаються діапазони 3400-3800 МГц, 4400-4990 МГц і 5,9 ГГц. Смуга частот 5,855 - 5,925 ГГц Рішеннями ГКРЧ і СЕРТ виділена системам ITS (Intellectual Transport Systems) [9].

Частоти вище 6 ГГц призначені для організації супер швидкісних каналів на невеликих відстанях за рахунок використання смуг до 400 МГц, забезпечення над малих затримок на радіоінтерфейсу. Частоти понад 6 ГГц мають значне ослаблення. 3GPP визначені чотири NR діапазону в смугах вище 6 ГГц: 26,5-29,5 ГГц, 24,25-27,5 ГГц, 37-40 ГГц, 27,5-28,35 ГГц [9].

Всесвітня конференція радіозв'язку 2019 (WCR-19) [13] визначила для супер швидкісної послуг рухомого зв'язку з малою затримкою в мережах 5G по-смуги частот MMX: 24,25-27,5 ГГц, 37-43,5 ГГц, 45,5- 47 ГГц, 47,2-48,2 і 66-71 ГГц.

Для збільшення пропускної здатності мереж 5G / IMT-2020 доцільно застосовувати такі нові способи його виділення і використання [20]:

1. Licensed-Assisted Access (LAA) заснований на застосуванні ділянок неліцензованого спектра з вільним доступом для формування вторинних несучих SCC (Secondary Component Carrier) в груповому агрегованому сигналі [19].

2. Licensed Sharing Access (LSA) заснований на спільному використанні ділянок ліцензованого спектру, виділених операторам, для реалізації якого в мережах 5G / IMT-2020 буде використовуватися новий функціональний мережевий елемент - спектральний менеджер HSM (Horizontal Spectrum Manager). Менеджер HSM розглядатиме лише частотні ресурси, які доступні для повторного використання, і розподілить їх між вторинними користувачами

частотного ресурсу LSA. Оператори можуть досягти взаємної згоди через менеджера спектра HSM для того, щоб мати загальний ресурс спектра, доповнений спектральними ресурсами кожного з операторів і доступний для всіх шеренгових операторів. Недоліками LSA в мережах 5G / IMT-2020 є накопичення затримки при прийнятті рішення HSM про використання смуг LSA за рахунок необхідності звернення до геолокації бази даних (БД), що робить їх незастосовані для критичних послуг 5G / IMT-2020 RLLC [11]. Остання обставина підтверджує важливість технологій мережевого позиціонування для підвищення ефективності побудови, функціонування та керування мережами 5G.

Діапазон міліметрових хвиль ММХ є визначальними аспектом побудови і функціонування перспективних мереж радіодоступу п'ятого і подальших поколінь на рівні радіоінтерфейсу [14-16] і включає сантиметрові (3 ГГц - 30 ГГц) і міліметрові хвилі (30 ГГц - 300 ГГц). Строго кажучи, до міліметрових хвиль (ММХ) або вкрай високих частот (НВЧ) відноситься діапазон радіохвиль з довжиною хвилі 10 мм - 1 мм (30 ГГц - 300 ГГц), проте іноді в зарубіжних публікаціях [12] до ММХ відносять також і сантиметрові хвилі (СМХ) або надвисокі частоти (НВЧ) з довжиною хвилі 10 см - 1 см (3 ГГц - 30 ГГц). Пристрої поколінь 2G - 4G працюють переважно з дециметровими хвилями (ДМХ) або ультрависокими частотами (УВЧ) з довжиною хвилі 1 м - 10 см (300 МГц - 3 ГГц). Мікрохвильове випромінювання включає в себе ДМХ, СМХ та ММХ діапазони 300 МГц - 300 ГГц (1 м - 1 мм). Пристрої 5G, крім УВЧ, працюватимуть також в діапазонах НВЧ і КВЧ. Для зручності подальшого аналізу будемо під ММХ розуміти радіохвилі діапазонів НВЧ (3 - 30 ГГц) і КВЧ (30 - 300 ГГц).

Діапазон ММХ визначає революційний етап при побудові нового радіоінтерфейса 5G. Якщо в діапазоні нижче 6 ГГц мова йде переважно про еволюційний розвиток (перехід від OFDM до N-OFDM - Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing), то в діапазоні від 28 до 95 ГГц є всі підстави говорити про революційний підхід за рахунок наступних чинників: а) значно більш широкі смуги частот понад 1 ГГц, що забезпечує швидкість передачі 1-10 Гбіт / с і вище; б) активні / адаптивні антенні системи (ААС) з адаптивно формуючими діаграмами спрямованості антени (ДСА) для компенсації втрат розповсюдження радіохвиль (РРХ) в діапазоні ММХ в порівнянні з енергетикою

традиційних ДМХ радіоліній; в) значно менші фізичні розміри ААС за рахунок меншої довжини хвилі діапазону ММХ: крок між елементами антеної решітки (АР) становить половину довжини хвилі, тобто кілька міліметрів (5 мм - для 30 ГГц, 2,5 мм - для 60 ГГц); антенні решітки (АР) можна формувати на підкладках мікросхем, і завдяки малим фізичним розмірам їх можна вбудовувати в АТ; г) висока просторова селективність досягається за рахунок високої спрямованості ААС діапазону ММХ: сусідні радіостанції можуть працювати на одній частоті, не заважаючи один одному, за рахунок просторового ущільнення одночасних передач SDMA; д) високе затухання ММХ природним чином вирішує проблему інтерференції, в тому числі для організації опорної мережі.

Радіоканал діапазону ММХ визначає необхідність розробки нових моделей РРХ для радіоінтерфейсу 5G. В [16] для радіоканалу ММХ пропонуються параметри втрат, проникнення сигналу, багатопробеневого поширення радіохвиль (БПРХ) і доплерівського зсуву. Втрати у вільному просторі FSL (Free Space Loss) на відстань R при довжині хвилі λ визначаються як $FSL = (4 \cdot \pi \cdot R / \lambda)^2$, R і λ виражені в однакових одиницях; втрати в дБ визначаються як $LFSL = 32,4 + 20 \cdot \lg f + 20 \cdot \lg R$, де f - несуча частота в МГц, R - відстань в км [17]. Втрати РРХ підвищуються зі зростанням f і обмежують дальність радіозв'язку, проте одночасно знижується і довжина хвилі λ , що дозволяє підвищувати щільність розташування елементів АР, які, за рахунок вузько направленої передачі / прийому збільшують дальність радіозв'язку. Проникнення радіохвиль ММХ діапазону при роботі зовні приміщень через перешкоди будівельних матеріалів (скло, гіпсокартон, двері) значно слабше в порівнянні з ДМХ [18]; при роботі всередині приміщень через стіни проникнення радіохвиль ММХ діапазону також обмежена [10]; тіло людини теж є перешкодою для ММХ [11]. Внаслідок суттєвого обмеження проникнення є підстави вважати, що при організації радіозв'язку з використанням діапазону ММХ зовні приміщень, перешкоди всередині приміщень при роботі на тій же частоті будуть мінімальними. Таким чином, має місце так званий ефект indoor-outdoor isolation з локалізацією зон радіо покриття, коли для обслуговування простору зовні і всередині приміщення потрібні різні БС; це, в свою чергу, призводить до розділення обслуговування на зони зовні і всередині приміщень.

Багатопротеневе розповсюдження радіохвиль (БПРХ) і сценарій відсутності прямої видимості NLOS (Non-Line Of Sight) призводить до частотно-селективним завмирань і характеризується зі статистичними параметром середньо-квадратичного розширення RMS (Root Mean Square) профілю потужності затримок PDP (Power Delay Profile) . При відповідній просторової обробці (ПОС) багатопротеневі компоненти (БПК) можуть підвищити надійність радіозв'язку [19]. Для сценарію рухомого радіозв'язку умови LOS можливі не завжди, навіть при понадщільному розподілі БС, для цього сигнали, прийняті по відбитим променям, також можуть бути оброблені при ретельному підборі ширини і напрямки ДСА антеною системи. Між вибором ширини ДСА БС і АТ існує компроміс. З одного боку, широка ДСА краща при оцінці кута приходу сигналу. З іншого боку, вузька ДСА краща для організації спрямованих сеансів радіозв'язку і просторового ущільнення одночасних передач. Допплерівський зрушення характеризують зміщенням частот прийнятих сигналів внаслідок руху передатчика і / або приймача і викликає завмирання в тимчасовій області. Для компенсації завмирання внаслідок доплерівського зсуву використовується підбір розміру кадру в межах часу когерентності радіоканалу [19] і спрямований прийом вузьким променем для зменшення просторового розкиду БПК [12].

1.4 Нові технології та архітектура мереж 5G

На відміну від МРЗ попередніх поколінь (2G, 3G, 4G), для кожного з яких розроблявся новий радіоінтерфейс, в 5G / IMT-2020 планується застосовуватись як новий радіоінтерфейс NR (New Radio), так і існуючий LTE-A, в ході еволюції наближається за характеристиками до NR. Новий радіоінтерфейс NR спочатку розроблявся для більш високих швидкостей передачі, менших затримок і більш ефективного використання частотного ресурсу за рахунок [9]: сигналів з більшою шириною спектра; мінімальних затримок на радіоінтерфейс за допомогою збільшення частоти проходження тимчасових слотів; адаптивного до навантаження тимчасового дуплексу; більш ефективних завадостійких кодів; активних / адаптивних антенних систем (ААС) з великою кількістю елементів,

вузькою ДСА і високою просторовою вибірковістю; індивідуальних сценаріїв використання смуги каналу NR для терміналів різних типів.

З точки зору оператора мережу 5G / IMT-2020 повинна забезпечувати [19]: реалізацію послуг з різноманітними вимогами до мережі; автоматичне конфігурування послуг, віртуальних і фізичних ресурсів і їх моніторинг; підтримку великої кількості виділених мереж, в тому числі для надання послуг IoT; гарантовану якість обслуговування; ефективне використання мережевих ресурсів, включаючи радіочастотний спектр (РПС) і пропускну спроможність (ПС).

Технологічно забезпечення перерахованих вимог оператора в мережах 5G / IMT-2020 має досягатися за допомогою таких нових підходів: а) програмно-визначених мереж SDN (Software-Defined Networks - мережа передачі даних, в якій рівень керування мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно) з переходом від використання обладнання до використання програмного забезпечення, включаючи реалізацію функцій обробки даних і сигналізації, конфігурація послуг, віртуальних і фізичних ресурсів мережі; б) хмарних обчислень (Cloud Computing) з перенесенням процедур складної обробки і зберігання великих обсягів даних в центри обробки даних (ЦОД), що забезпечують емуляцію мережевих елементів за допомогою IaaS (Infrastructure as a Service) «Інфраструктури як послуги»; в) чіткого логічного відділення функцій рівня керування від рівня даних користувача, що дозволить незалежно один від одного розвивати і масштабувати програмні та фізичні ресурси, пов'язані з цими рівнями; г) логічних мережевих шарів, які дозволяють автоматизувати конфігурування мережевих ресурсів і адаптувати архітектуру мережі до вимог послуг; д) впровадження технологій віртуалізації NFV (Network Functions Virtualization - віртуалізація фізичних мережевих елементів, коли мережеві функції виконуються програмними модулями, що працюють на серверах і віртуальних машинах в них); е) реалізації функцій зберігання і надання контенту для послуг, чутливих до затримок, в тому числі, пограничних обчислень MEC (Mobile Edge Computing).

Хмарна мережа радіодоступу C-RAN (Cloud Radio Access Network) реалізує нові підходи хмарних обчислень і SDN на рівні МРД і опорної мережі в

високо швидкісному каналі передачі «сирих» даних від радіо модуля (аж до квадратурних складових) в ЦОД, де виконується їх обробка; термін Fronthaul визначає інтерфейс між базовими блоками BBU (Base band unit) і видалених ними виносними радіо модулями RRU (Remote Radio Unit). Якщо Fronthaul визначає радіолінії на рівні МРД (БС-АТ, АТ-АТ), то Backhaul визначає радіолінії між БС і між БС і опорним мережевим обладнанням. При надщільному розташуванні БС принципово іншу роль починають грати зв'язуючі їх опорні мережі; це можуть бути мережі діапазону ММХ; більш того, сама границя між опорними і МРД починає стиратися [9]. С-RAN впорається зі зростаючими вимогами нових швидкостей передачі в МРД 5G. Концепції С-RAN передбачає централізовану обробку сигналів для кількох сотень і дозволяє підвищити продуктивність за рахунок координації між сотами CoMP, а також оптимізувати експлуатацію витрат за рахунок об'єднання апаратних ресурсів підсистеми радіодоступу. Спочатку БС МРД 2G конструктивно представляли собою досить велику залізну шафу, висотою 1,5-2 метра, встановлений в кондиційованих приміщенні, або металевому контейнері «на землі»; від БС до антен, розміщених на вежах і тому інше прокладалися фідери. Пізніше почався випуск так званих розподілених БС, на основі яких в даний час побудовані МРД 2G-GSM, 3G-UMTS і 4G-LTE більшість операторів зв'язку. Така БС включає в себе базовий блок BBU, як і раніше розміщується «на землі», і кілька радіо модулів RRU, що розміщуються поблизу антен. BBU і RRU пов'язані між собою оптичним кабелем, поверх якого реалізується інтерфейс CPRI (Common Public Radio Interface). Радіо модуль здійснювали аналого-цифрове (АЦП) і цифро-аналогове (ЦАП) перетворення, посилення і фільтрацію сигналу, формування радіочастотного тракту. Весь стек протоколів взаємодії БС з АТ і БС з ядром мережі, а також алгоритми обробки сигналів реалізуються блоком BBU, який являє собою невеликий сервер, висотою 2-3 юніта і може бути встановлений або в телекомунікаційній стійці приміщення, або безпосередньо на стовпі / радіощоглі для BBU зовнішнього (outdoor) виконання [5]. Наступним кроком розвитку архітектури побудування БС стала концепція хмарних BBU або Cloud BBU, яка полягала у відмові від локальних BBU, що розміщуються безпосередньо на об'єктах БС, і переміщення їх функціональності на

віртуалізовані ресурси потужних серверів, розміщених в центрах обробки даних (ЦОД). Дана концепція за рахунок централізації ресурсів дозволяє підвищити надійність і ємність БС, одночасно знизивши витрати на їх експлуатацію. Архітектура БС МРД 5G є подальшим розвитком ідеології розподілених БС і Cloud BBU [9]. При організації хмарної МРД використовується технологія оптичного волокна як середовища передачі від передавача до якоїсь точки x - FTTx (Fiber To The x); і вже від цієї точки сигнал знову перетвориться в електричний і поширюється по кабелю. Різновидом FTTx є волокно до антени FTTA (Fiber to the Antenna) з передачею по оптоволокну від пулу блоків BBU до внесених радіо модулів RRH (Remote Radio Head), розташованих поблизу антен. Використання мережі ВОЛЗ (волоконно-оптичних ліній зв'язку) в тракті між обладнанням віртуального кластера БС і виносними радіо модулями RRH малих сот дозволяє реалізувати архітектуру хмарної МРД C-RAN (рисунок 1.1). Перевагою ВОЛЗ є низькі втрати і енергоспоживання, а також перешкодо і грозозахисного тракту.

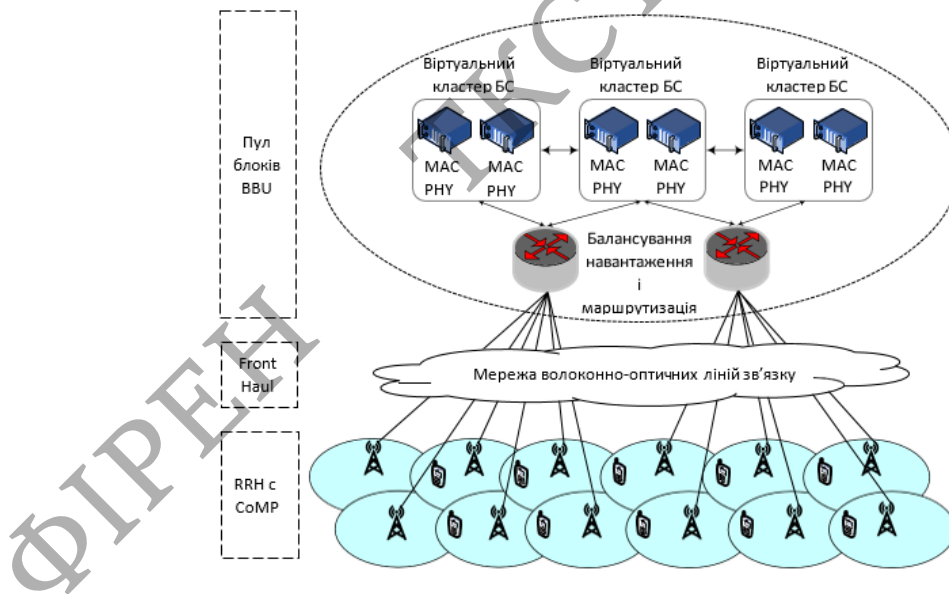


Рисунок 1.1 – Архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G

Поділ шарів в 5G разом з C-RAN дозволяє програмно централізувати керування мережею, а також віртуалізувати фізичні мережеві ресурси при багаторазовому зростанню трафіку на рівні мережі радіодоступу. Ресурси модулів BBU об'єднуються в пул, який територіально відокремлений від місць

розташування базових станцій малих надщільних сот. Виносні радіо модулі RRH еквівалентні блокам RRU і виконують переважно аналогові апаратно реалізовані функції перетворення частоти (ПЧ), посилення потужності (ПП) при передачі, мало шумуючого посилення (МШП) при прийомі, дуплексування, фільтрації, АЦП / ЦАП. Обчислювальні можливості обробки сигналів модулями BBU виявляються централізованими і можуть бути програмно конфігуровані, що підвищує масштабованість і гнучкість програмної конфігурації SDN та самоорганізації SON надщільної мережі радіодоступу. Поділ шарів в 5G продиктовано змінами архітектури і радіоінтерфейсу надщільних МРД. керування великою кількістю БС і АТ при їх понадщільному територіальному розподіленні і динамічній конфігурації топології зв'язків традиційними методами стає проблематичним. Більш гнучким є підхід програмно визначених мереж SDN, який передбачає поділ функцій керування мережевими пристроями і функцій передачі даних на користувацький шар UP (User Plane) і шар керування CP (Control Plane). Призначений для користувача шар UP включає групу основних протоколів, які переносять користувацький трафік. Шар керування CP складають допоміжні протоколи, необхідно для керування. Такий поділ дозволяє обмежити обсяг службових команд керування в площині керування CP при багаторазовому зростанні абонентського трафіку в призначеній для користувача площині UP [4]. У концепції програмно, яка визначається мережі SDN, рівень керування мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно. Підхід SDN дозволяє розділити процеси в площинах передачі керування CP і даних UP, програмно централізувати керування мережею, а також віртуалізувати фізичні мережеві ресурси.

Рисунок 1.2 ілюструє приклад поділу шарів в мережах радіодоступу 5G із надщільним розподілом базових станцій, де передача даних в UP здійснюється через БС малих сот, а сигнали керування в CP передаються базовими станціями макро сот. З точки зору організаційної мережі на рівні підсистеми радіодоступу підхід SDN дозволяє реалізувати самоорганізуючу мережу SON (Self-organizing network).

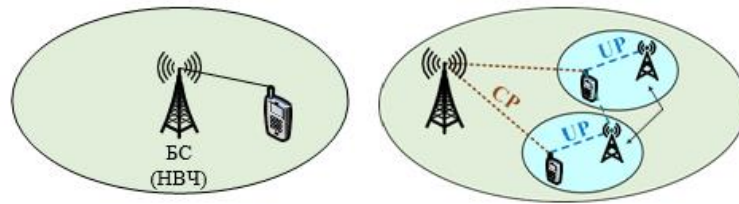
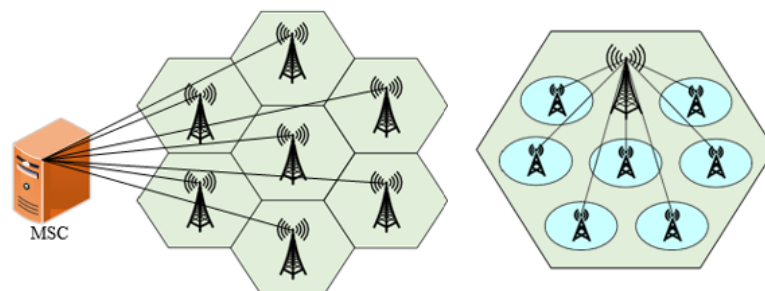


Рисунок 1.2 – Поділ шарів в мережах радіодоступу 5G

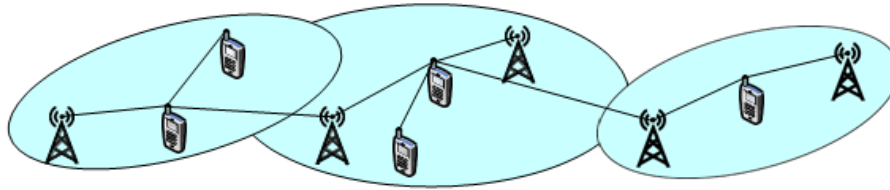
Незважаючи на ті можливості, які відкриває підхід SON, на рівні МРД може знадобитися кооперація декількох БС, для чого служить технологія координованої багато потокової передачі і прийому CoMP (Coordinated Multipoint).

Розподілена організація радіозв'язку в МРД 5G обумовлена вимогами скорочення наскрізної затримки і характеризуються переходом від централізованої організації радіозв'язку через БС до розподіленої організації радіозв'язку безпосередньо між АТ. Рисунок 1.3 ілюструє сценарії переходу від централізованої до розподіленої схеми, коли за рахунок малих надщільних сот можлива організація радіозв'язку з використанням транзитних вузлів, в якості яких виступають як БС малих сот, так і самі АТ. Надщільний територіальний розподіл сот неминуче призведе до підвищення рівня внутрішньо системних перешкод, що вимагатиме просторового ущільнення одночасних передач SDMA, за рахунок адаптивного ДУ при направленому прийомі і передачі. Одним з важливих аспектів еволюції архітектури МРД 5G є перехід до топології, орієнтованої на пристрій, в якій сам пристрій виступає не тільки як крайовий, а й як транзитний вузол надщільного МРД. Це пов'язано також зі специфікою РРХ діапазону ММХ.



а) Централізована організація радіозв'язку через БС

б) Сценарій малих надщільних сот



в) Розподілена організація радіозв'язку через АТ і БС малих надщільних сот

Рисунок 1.3 – Топології організації радіозв'язку в МРД 5G

Гетерогенна мережа радіодоступу (HetNet) утворюється з макро, мікро і фемтосот, які підвищують повторне використання частот, можуть територіально накладатися один на одного і вимагають певної мережевої координації для обмеження рівня внутрішньо системних перешкод. (Рисунок 1.4) [4]. Крім різних по географічній протяжності зон обслуговування, координуватися можуть і стільники, що розрізняються технологією радіодоступу RAT (Radio Access Technology). Конкурентне використання різних RAT в гетерогенній МРД 5G підвищує зв'язність і ПС, проте ускладнюють керування мережею.

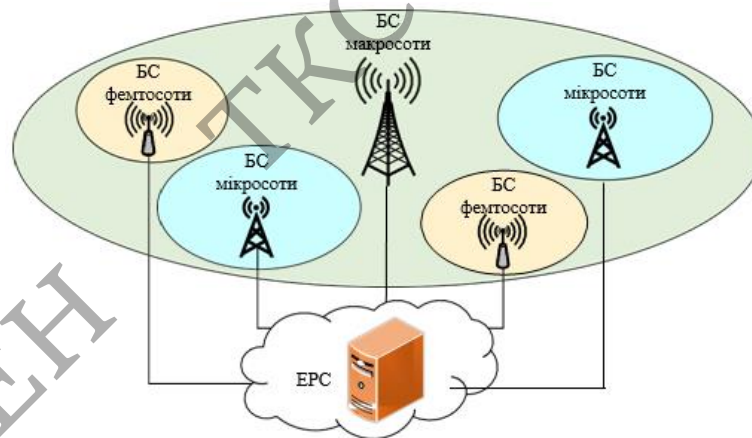


Рисунок 1.4 – Архітектура гетерогенної мережі радіодоступу 5G

З точки зору архітектури для технічної реалізації вимог мереж 5G розглядаються наступні нові технології (рисунок 1.5) [5]: а) між машина взаємодія M2M (Machine-to-Machine) і безпосередній зв'язок між пристроями D2D (Device-to-Device); б) більш щільне розташування БС і АТ з переходом від макро стільниками до мікро- і піко соти надщільних мереж UDN (Ultra- Dense Networks); в) перехід до концепції пристрій-центричної мережі, в якій самі АТ

реалізують частину функцій мережевого керування (встановлення та ведення радіозв'язку, хендовер і ін.) на відміну від МРД попередніх поколінь з архітектурою стільникового-центричної мережі, де основний елемент мережі - БС, в якій зосереджені функції мережевої організації і керування; г) динамічно змінюються мобільні розподілені і літаючі стільники.

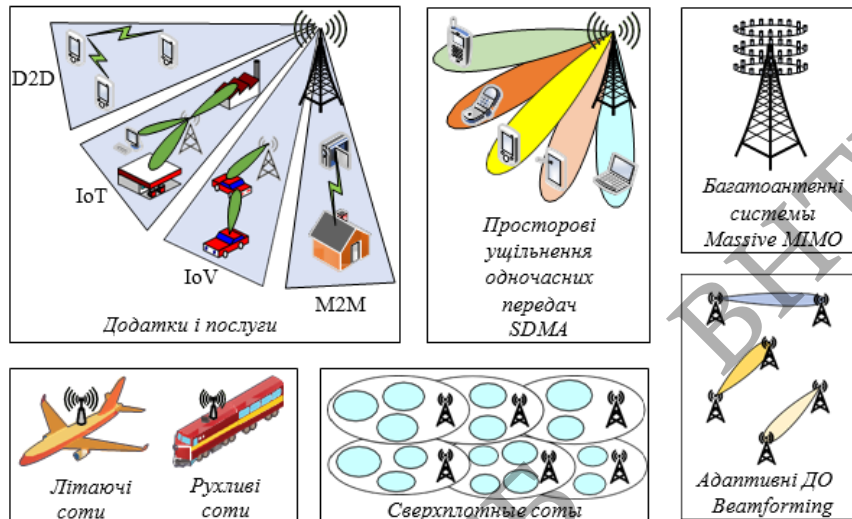


Рисунок 1.5 – Сценарії побудови і функціонування МРД 5G

На каналному і мережевому рівнях для технічної реалізації вимог мереж 5G розглядаються наступні нові технології: а) множинний доступ з просторовим ущільненням SDMA за рахунок адаптивного ДУ; б) мобільні, реконфігуровані і самоорганізуючі МРД; якщо МРД 2G і 3G допускали тільки канал БС-АТ, а в 4G з'явилася можливість прямого зв'язку між БС, то в МРД 5G передбачена безпосередній зв'язок між пристроями D2D / M2M; в) гетерогенність мережі по використовуваних технологіях, частотних діапазонах, розділення функцій між макро- і мікро-стільниковими БС; наприклад, обмін даними може здійснюватися через мікро-БС, а керуюча інформація - через макро- БС; також спадний канал DL (Downlink) БС → АТ реалізований у вузькому промені, формованому ДСА БС в діапазоні ММХ, а висхідний канал UL (Uplink) БС ← АТ- в діапазоні СМХ; д) децентралізація керування з перенесенням частини функцій в хмару; з'являється поняття хмарної МРД С-RAN - аналог SDN на рівні МРД [16]. На фізичному рівні для реалізації вимог мереж 5G розглядаються наступні нові технології: а) робота в діапазоні ММХ (30-300 ГГц); б) адаптивне

діаграмоутворення (ДУ) з формуванням вузьких ДСА в приймальних і передавальних пристроях, в тому числі, застосування багатоантенних систем Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output); в) нові сигнально-кодові конструкції (СКК), наприклад, мультиплексування з неортогонально частотним розділенням N-OFDM; д) повно дуплексний режим з прийомом і передачею в одній смузі за рахунок придушення інтерференції SIC (Self-Interference Cancellation) [17].

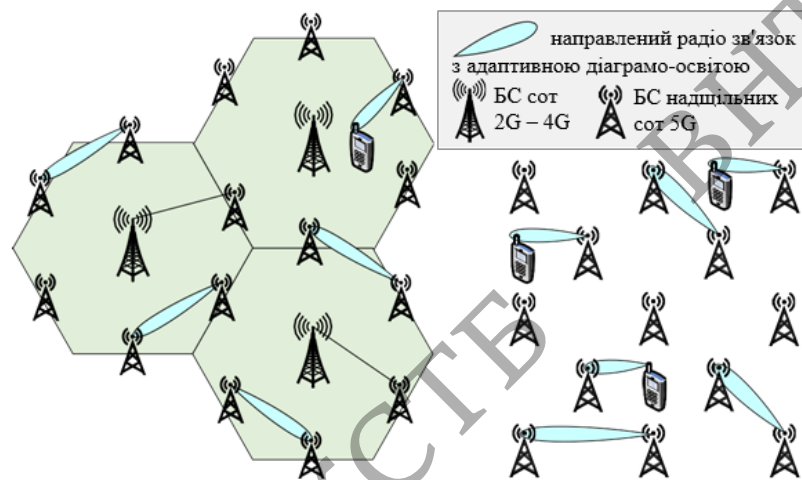
Технологія Massive MIMO (mMIMO) є розвитком систем MIMO з кількістю елементів AP (128, 256 і більше), які значно перевищують число AT в зоні БС. При певній конфігурації елементів AP можливо просторове 3D діаграмоутворення по горизонталі і вертикалі [15] (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – 3D ДУ по горизонталі і вертикалі в системах mMIMO

Занадто щільні МРД 5G є наслідком обмеженої дальності радіозв'язку діапазону ММХ зовні приміщень [18] і доповнюють традиційні макро і мікро стільники 2G - 4G (рисунок 1.7, а). Організація радіозв'язку через БС надщільних сот 5G діапазону ММХ виправдана в місцях підвищеної щільності АТ, вимагають високій швидкості передачі, наприклад, у великих торгових центрах. Кращими сценарієм РРХ для БС надщільних сот 5G діапазону ММХ є умови прямої видимості між передавачів і приймачем LOS [19], які дозволяють реалізувати адаптивне ДУ (рисунок 1.7, б). З одного боку, внаслідок обмежень на дальність радіозв'язку з ростом частоти в мережах 5G очікується розгортання надщільних МРД UDN з числом пристроїв до 10^6 на 1 км^2 , коли на кожен 1 м^2 площі може припадати один пристрій; така щільність сприяє високій ймовірності

радіозв'язку в умовах прямої видимості LOS, а також розвитку децентралізованої взаємодії пристроїв між собою. З іншого боку, зменшення довжини хвилі відкриває широкі можливості для реалізації систем mMIMO з десятками і сотнями антенних елементів в пристроях абонентських і базових станцій [17-19]. Дані обставини дозволяють виділити для надщільних МРД 5G режим функціонування з адаптивним ДУ, яке, внаслідок високої ймовірності радіоліній LOS, зможе компенсувати фізичні обмеження на дальність зв'язку.

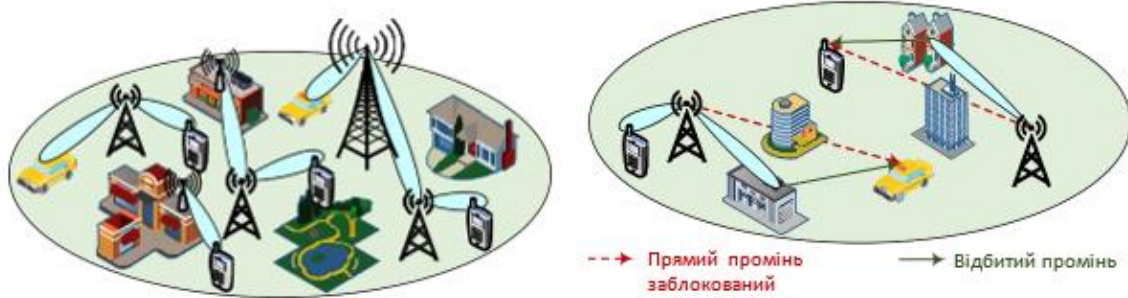


а) Організація радіозв'язку через БС сот 2G – 4G и надщільних сот 5G міліметрового діапазону

б) Організація радіозв'язку через БС надщільних сот 5G міліметрового діапазону

Рисунок 1.7 – Сценарії надщільних МРД 5G з адаптивним ДУ

Слабке проникнення радіохвиль ММХ в сукупності зі зменшенням розмірів сот і збільшенням щільності БС істотно підвищує ймовірність радіозв'язку в умовах LOS в надщільних МРД 5G (рисунок 1.8).



а) Сценарій LOS зовні приміщень

б) Сценарій NLOS зовні приміщень

Рисунок 1.8 – Сценарії LOS и NLOS в мережі радіодоступу 5G

1.5 Висновки до розділу 1

З аналізу еволюції послуг і технологій при переході до мереж п'ятого покоління можна зробити наступні висновки. Мережі 5G є закономірним етапом розвитку мереж рухомого радіозв'язку і відрізняються від попереднього покоління якісно як на технічному рівні, так і на призначеному для користувача рівні послуг. На призначеному для користувача рівні мережі 5G являють собою нову парадигму інфокомунікаційних технологій з принципово новими послугами віртуальної і доповненої реальності VR / AR, послугами з наднизькою затримкою, Інтернета речей IoT на основі масового підключення пристроїв, інтелектуальних послуг на основі великих обсягів даних Big Data , послуг тактильного Інтернету.

На технічному рівні мережі 5G повинні задовольняти вимогам: збільшення пропускної здатності в 10 разів, зростання спектральної ефективності до 3 разів, зменшення наскрізної затримки передачі в 10 разів до 1 мс, збільшення кількості, які підключаються в соті в 10-100 разів - до 10^6 на 1 км^2 , збільшення часу автономної роботи пристроїв IoT / M2M / D2D – до 10 років.

Сукупність нових технічних можливостей мереж 5G і потреб народного господарства дозволяє розглядати мережі п'ятого покоління як інфраструктурну основу цифрової економіки та цифрової трансформації. Нові діапазони частот і способи їх використання в мережах 5G є об'єктивною необхідністю збільшення

пропускної спроможності і числа пристроїв на призначеному для користувача рівні і призводять до принципово новим підходом побудови, функціонування та керування мережею на технічному рівні. Нові технології мереж 5G проявляються на рівні архітектури, при функціонуванні пристроїв, в задачах керування мережею і з точки зору моделі OSI.

Таким чином, мережі 5G є актуальним напрямком дослідження і, безсумнівно, інноваційною екосистемою для постановки і рішення задач мережевого позиціонування. Для уточнення об'єкта і предмета дослідження розглянемо далі нові послуги мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь і технології мережевого позиціонування пристроїв засобами інфраструктури МРЗ 5G.

2 ПОСЛУГИ ТА СЦЕНАРІЇ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G

2.1 Постановка задачі

Методи і засоби мережевого позиціонування на протязі останніх сорока років удосконалювалися разом з еволюцією поколінь мереж мобільного зв'язку. На відміну від попередніх поколінь в перспективних мережах п'ятого і наступних поколінь технологій позиціонування надається особливе значення, підтвердженням чого є специфікації 3GPP [8] - [10]. Згідно 3GPP TR 22.862 [8] про можливість бути реалізованим нових послуг для мереж 5G визначені сценарії використання позиціонування з підвищеною точністю. Підвищені вимоги до мережевого позиціонування включають в себе, крім точності, оперативність отримання, надійність і доступність даних місце розташування (МЗ). У деяких сценаріях необхідно передбачити передачу даних МЗ іншому мережевому пристрою. При цьому слід розрізняти передачу первинних вимірювань і результатів обробки у вигляді оцінок координат (ОК). Також слід розрізняти задачу визначення абсолютних (географічних) координат і оцінку відносного МЗ, наприклад, видалення щодо сусіднього пристрою, перешкоди. Одним з перспективних програм мереж 5G, де завдання позиціонування особливо потрібна, є визначення місця розташування (ВМР) для запобігання зіткнень транспортних засобів: кожен транспортний засіб має «Знати» своє місце розташування і МЗ сусідніх автомобілів, а також очікувані шляхи їх пересування для попередження зіткнень. Системи позиціонування в мережах п'ятого і наступних поколінь в зонах позиціонування підвищеної точності зажадають точності менше 1 м в більш ніж 95% зони обслуговування, включаючи ВМР в місті, сільській місцевості та всередині приміщень. Позиціонування з підвищеною точністю в мережах 5G має підтримуватися в зонах огрядного руху, тунелях, підземних паркінгах та всередині приміщень. Передбачається, що підвищена точність зможе бути забезпечена в умовах надщільного розміщення пристроїв, що утворюють мережу (рисунок 2.1).

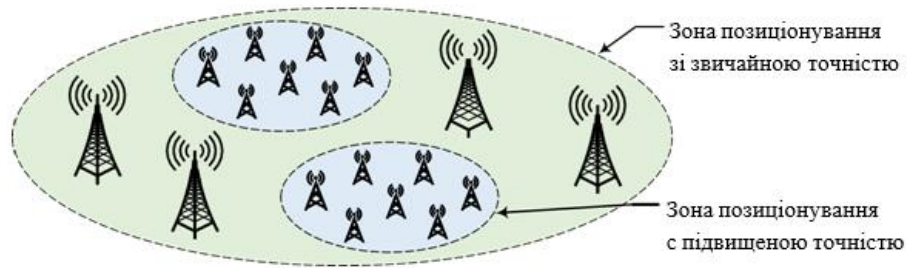


Рисунок 2.1 – Зони позиціонування з підвищеною точністю

В 3GPP TR 22.872 [8] систематизовані сценарії використання, додатка позиціонування в мережах 5G і відповідні вимоги до них. Позиціонування, згідно 3GPP TR 22.872, може виконуватися як технологіями, що входять в специфікації 3GPP, так і іншими сторонніми технологіями визначення розташування, або ж їх комбінацією: ГНСС (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS), системи наземного позиціонування з використанням маяка TBS (Terrestrial Beacon Systems), інерційні вимірювальні модулі IMU (Inertial Measurement Unit), мережі радіодоступу (МРД) WiFi / Bluetooth і ін.

Додатки позиціонування поділяються на такі сценарії: а) послуги LBS (Location-based Service) - тип інформаційних та розважальних послуг, заснованих на визначенні поточного місцезнаходження пристрою; б) в промисловості, виробництві і охороні здоров'я; в) в надзвичайних і критично важливих ситуаціях; г) в задачах керуванні дорожнім рухом; д) в керуванні залізничним і морським сполученням і вантажоперевезеннях; е) в керуванні повітряним повідомленням і позиціонування з використанням БПЛА; ж) інші сценарії позиціонування. До кожного з додатків і сценаріїв пред'являються свої специфічні вимоги визначення місця розташування.

У цьому розділі вирішуються такі приватні задачі: визначення ключових показників ефективності KPI (Key Performance Indicators) позиціонування; аналіз сценаріїв і вимог до позиціонування зовні і всередині приміщень в мережах 5G; аналіз застосовності існуючих технологій позиціонування в мережах 5G сформульованим вимогам; формалізація вимог до перспективних технологій позиціонування в мережах 5G.

2.2 Показники ефективності позиціонування в мережах 5G

Для характеристики ефективності завдань позиціонування в мережах 5G вводяться наступні ключові показники ефективності КРІ [8].

Точність позиціонування (оцінки координат) визначає близькість вимірюваної / обчисленої оцінки координат (ОК) абонентського пристрою UE до істинного місце розташування (МЗ). Може характеризувати як точність МЗ в абсолютних (географічних) координатах, так і точність відносного місце положення. Підрозділяється на горизонтальну точність на площині 2D, і вертикальну точність по висоті в просторі 3D.

Точність швидкості (оцінки швидкості) визначає близькість вимірюваної / обчислюваної швидкості UE до істинної швидкості UE.

Точність напрямки визначає близькість вимірюваного / обчисленого напрямки на пристрій UE до істинного напрямку UE. Виміряний і істинний напрям на UE визначаються в зв'язаній системі координат з використанням кутів курсу, тангажу і крена (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Зв'язана система координат: кут курсу, тангажа і крена

Для рухомого UE під напрямком розуміють напрямок вектора швидкості; даний показник можна об'єднати з точністю оцінки швидкості.

Точність тимчасової мітки визначає близькість тимчасової мітки, з якою асоціюється виміряний / обчислене місце розташування, на цей момент часу вимірювання / обчислення розташування.

Доступність визначає відсоток часу, протягом якого система забезпечує оцінку місця розташування з заданими вимогами.

Затримка визначається як час, що минув з моменту запиту на позиціонування до моменту отримання даних місцеположення. При ініціалізації (установці в початковий стан, початковому завантаженні, завданні початкових умов) системи позиціонування затримка визначається як час першого спрацювання ТТFF (Time to First Fix)

Час спрацювання ТТFF визначається як час, що минув з моменту першого після ініціалізації системи позиціонування запиту на позиціонування до моменту отримання даних місцеположення. Час спрацювання більше або дорівнює затримці.

Частота оновлення визначається як частота, з якою дані про місце положення формуються системою позиціонування. Частота оновлення є величина зворотна інтервалу часу формування двох послідовних наборів даних про місцезнаходження.

Енергоспоживання визначається як потужність в мВт, необхідна для формування набору даних про місцезнаходження.

Енергоспоживання на спрацювання визначається як енергія в мДж, необхідного для формування набору даних про місцезнаходження і являє собою інтегральну оцінку енергоспоживання системи позиціонування на заданому інтервалі часу; включає як енергоспоживання, що витрачається на обчислювальну обробку для формування набору даних про місцезнаходження, так і енергоспоживання в режимі очікування між обробкою двох послідовних запитів на формування даних про місцезнаходження. Цей показник може використовуватись замість енергоспоживання для систем зброї масового знищення, які задіюються епізодично, а в решту часу перебувають в режимі очікування.

Масштабованість визначається як число пристроїв, для яких система позиціонування може встановити їх місце розташування в заданий час з необхідною частотою оновлення.

Перераховані КРІ залежать від ступеня рухливості UE і від його МЗ в соті: в зоні зі звичайною або підвищеною точністю позиціонування.

На додаток до перерахованих КРІ при аналізі сценаріїв позиціонування слід враховувати наступні обставини.

Середовище функціонування: фізичне середовище, в якому функціонує пристрій, в тому числі масштаб зони обслуговування (будівля, зона радіо покриття БС, регіональне або глобальне радіо покриття), умови РРХ (наявність або відсутність перешкод, місто, передмістя, село, тунелі).

Зона позиціонування мережі 5G: зона обслуговування мережі 5G, в якій реалізуються як послуги зв'язку 5G, так і послуги позиціонування 5G.

Обмежена зона позиціонування: частина зони позиціонування мережі 5G, де реалізуються специфічні послуги визначення місцезнаходження, в тому числі з підвищеними показниками КРІ.

Зона позиціонування з підвищеною точністю: частина зони позиціонування мережі 5G з додатковою інфраструктурою, де реалізується ВМР з підвищеною точністю; наприклад, в лікарнях можна організувати стеження за пацієнтами і медичним персоналом з підвищеною точністю і доступністю, в тому числі за рахунок більш щільного розподілу мережевих пристроїв як зовні, так і всередині приміщень, а також за рахунок спільної обробки вимірювань.

Ступінь рухливості: абонентський пристрій UE може бути стаціонарним, або рухомих; для рухомих пристроїв показники позиціонування визначаються, в тому числі, швидкістю і траєкторією руху.

Щільність пристроїв: визначається як число пристроїв UE на км².

Щільність опорних пристроїв: визначає вплив щільності розподілення опорних пристроїв, що беруть участь в сеансі позиціонування; для деяких зон обслуговування, наприклад, лікарень, може виявитися кращим та чи інша щільність і конфігурація опорних пристроїв для підвищення КРІ.

Далі розглянемо кількісні показники ефективності позиціонування стосовно сценаріями ВМР в мережах 5G; аналіз і формалізація вимог до існуючих перспективних технологій опубліковані в [8-11].

2.3 Аналіз сценаріїв позиціонування в мережах 5G

Послуги геолокації LBS (Location-based Service) [3].

Велопрокат, або система спільного використання велосипедів (байкшерінг) - система прокату, що дозволяє орендувати велосипед на одній з автоматизованих станцій, зробити поїздку і повернути велосипед у будь-який пункт прокату. На велосипедах встановлюють модуль позиціонування 5G, який може використовувати комбінацію технологій позиціонування 3GPP і сторонніх технологій, таких як ГНСС (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS), TBS (Terrestrial Beacon Systems), Bluetooth, WLAN, RFID. Система позиціонування 5G забезпечує визначення місцеположення велосипеда з горизонтальною точністю 2 м, доступністю 90% з затримкою не більше 1 с. Додаток на абонентському пристрої дозволяє визначити найближчий пункт прокату і орендувати вільний велосипед. При пересуванні зі швидкістю 15-20 км / год система позиціонування 5G відстежує місце розташування велосипеда. Після поїздки велосипед повертається на найближчий пункт прокату

Доповнена реальність (AR, Augmented Reality) - результат введення в поле сприйняття будь-яких сенсорних даних з метою доповнення відомостей про оточення і поліпшення сприйняття інформації [9]. Окуляри доповненої реальності кладуть контекстуальну інформацію в поле зору користувача в залежності від його місця розташування, швидкості і напрямку руху. Разом з сервісами LBS кошти AR підтримують різні розважальні програми, включаючи спортивні заходи, наприклад, надають актуальні відомості про погоду, силу вітру, глибині снігу для лижників, мотоциклістів, серфінгістів і ін. Модулі 5G позиціонування можуть бути інтегровані в окуляри доповненої реальності, або підключені до них. Користувач має доступ до серверів AR через мережу 5G; сервер AR, в свою чергу, має доступ до контекстуальної інформації, зв'язаної з поточним місцем розташування користувача. Система позиціонування 5G забезпечує BWP для підтримки додатків AR з горизонтальною точністю від 1 м до 3 м, доступністю 80% і швидкістю руху не більше 50 км / год зовні приміщень; при русі зі швидкістю до 130 км / год горизонтальна точність знижується до 10 м; точність визначення швидкості і напрямку руху становить при цьому не

більше 2 м / с і 10° відповідно. Дані позиціонування для додатків AR повинні мати час спрацьовування TTFF не більше 10 с.

Пристрої, які носять , набувають все більшого поширення; найбільш яскравим прикладом пристроїв, які носяться, є смарт-годинник. Сучасні розумні або смарт-годинник - це комп'ютери, які підтримують сторонні додатки, керуються мобільними операційними системами і можуть виступати в якості мобільних медіаплеєрів. За допомогою смарт-годинника можна приймати дзвінки, відповідати на SMS і електронну пошту. Деякі смарт-годинники працюють в парі зі смартфоном і виступають в ролі допоміжного екрану, який сповіщає про надходження нових повідомлень. З точки зору завдань позиціонування інтерес представляють смарт пристрої з можливістю VMP, відстеження пересування, моніторингу активності для аудиторії дітей і літніх людей. До пристроїв пред'являються вимоги зниженого енергоспоживання з можливістю тривалої автономної роботи. Завдання позиціонування можуть вирішуватися як зовні, так і всередині приміщень з точністю VMP по вертикалі від 1 до 3 м. У звичайному режимі функціонування пристроїв, які носять, де позиціонування має здійснюватися безперервно, інтервал поновлення даних про місцезнаходження повинен бути від 1 до 10 с; горизонтальна точність повинна бути не більше 2 м з доступністю 99% і затримкою не більше 1 с. У режимі енерго заощадження пристроїв, які носять, інтервал оновлення даних про місцезнаходження може бути від 30 до 300 с; горизонтальна точність позиціонування при цьому повинна бути не більше 2 м з доступністю 90% і затримкою не більше 1 с. Значення показника TTFF не повинно перевищувати 10 с.

Рекламні повідомлення. Розсилка нав'язливих рекламних повідомлень без належного гнучкого контекстуального механізму зазвичай неефективна. Виконання даних про поточне місцезнаходження абонента могло б підвищити позитивне сприйняття користувачем одержуваних рекламних повідомлень з урахуванням контекста геолокації. Користувачі мережі мають вбудований модуль позиціонування 5G, який може використовувати комбінацію технологій позиціонування 3GPP і сторонніх технологій, таких як ГНСС, TBS, Bluetooth, WLAN. Мережа 5G повинна мати у своєму розпорядженні сервером аналізу

даних геолокації користувачів, на підставі якого можна організувати комфортну та доречну для користувачів розсилку рекламних повідомлень. Реалізація даного сценарію вимагає згоди користувача і пред'являє наступні вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 3 м, вертикальна точність не більше 3 м, доступність 90%, затримка не більше 1 хв.

Керування потоками. Завдання керування потоками пасажирів актуальна у великих транспортних хабах, в тому числі, аеропортових комплексах. Технічні можливості визначення місця розташування могли б істотно полегшити пасажирам знаходження маршруту для свого рейсу всередині аеропорту. Для реалізації подібного сценарію на пристрій користувача з модулем позиціонування 5G можна встановити додаток, який прокладе оптимальний по заданих критеріям маршрут переміщення всередині аеропорту. Реалізація даного сценарію в зоні позиціонування підвищеної точності, переважно всередині приміщень, пред'являє наступні вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 10 м, вертикальна точність не більше 3 м, доступність 80%, частота оновлення 0,1 Гц, TTFF не більше 10 с.

Позиціонування в промисловості і охороні здоров'я [8]. Позиціонування медичного персоналу та обладнання в лікарні. Даний сценарій потребує в таких мед установах як психіатричні і геріатричні лікарні для ВМР пацієнтів в реальному часі на території лікарні (як всередині, так і зовні приміщень) для своєчасного оповіщення мед персоналу про прецеденти виходу пацієнтів за дозволені межі; також позиціонування потребує для визначення поточного місцезнаходження мед персоналу і медичного обладнання (наприклад, візки з реанімаційним набором), особливо в екстрених випадках. Для реалізації даного сценарію на пацієнті або лікаря / медсестри має бути переносний пристрій (наприклад, браслет у пацієнта і смартфон у медперсоналу) з модулем позиціонування 5G. Модуль позиціонування 5G працює в зв'язці з модулем 5G. Територію лікарні, що включає простір як всередині, так і зовні приміщень можна розглядати як зону позиціонування з підвищеною точністю. Реалізація даного сценарію пред'являє наступні вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 3 м, вертикальна точність не більше 2 м (з точністю до поверху), доступність 99%, затримка не більше 1 хв. Також накладаються

обмеження на форм-фактор, обчислювальні ресурси, обмежений набір технологій МРД і енергоспоживання модуля позиціонування 5G.

Позиціонування візків. У даному сценарії йдеться про так званих платформних візках, в тому числі, складських візках. Вони можуть використовуватись не тільки в складській справі, але і на заводах в промисловому виробництві, в оптовій і роздрібній торгівлі. Позиціонування візків дозволяє відстежувати потоки переміщення товарів і повинно враховувати інфраструктуру / простір промислового підприємства або складу. Передбачається, що візок обладнано модулем позиціонування 5G; розташування візка може визначатися як епізодично за запитом, так і періодично через встановлені проміжки часу. Реалізація даного сценарію пред'являє наступні вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 0,5 м, вертикальна точність від 1 до 3 м, доступність 99%, затримка не більше 20 мс при швидкості руху візка до 50 км / год всередині приміщень з площею від 1000 м² до 100000 м².

Керування відходами. У даному сценарії йдеться про комплекс заходів по збору і транспортування сміття, а також контролі за даними процесами. Різні датчики на контейнерах сміття разом з технологіями позиціонування можуть сприяти оптимізації процесу керування відходами за рахунок автоматичного збору актуальних даних (наприклад, про наповненість контейнера) і їх обробці (наприклад, адаптації традиційно регулярного маршруту слідування сміттєвозів в залежності від наповненості контейнерів). Передбачається, що контейнери обладнані датчиком наповненості і модулем позиціонування 5G; місце розташування і наповненість контейнера передається в систему керування відходами, яка може адаптивно організувати вивіз сміття.

Місцезнаходження контейнера зовні або всередині приміщень може визначатися як епізодично за запитом, так і періодично з інтервалом від 2 годин до декілька днів. Реалізація даного сценарію пред'являє наступні вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 3 м, вертикальна точність не більше 2 м, доступність 99%, затримка не більше 1 хв. Також накладаються вимоги енергоспоживання із загальним часом автономної роботи до 15 років при енерговитратах на сеанс позиціонування не більше 5% (9 місяців із 15 років).

Керування контейнерами. Товари транспортуються, як правило, в контейнерах, тому питання автономного керування контейнерами актуальні. Контейнери можуть зберігатися в різних місцях, наприклад, на кораблях, доках, складах, заводах. Для мінімізації займаного місця контейнери, як правило, ставлять один на одного, тому завдання їх позиціонування актуальна.

Позиціонування при екстреному виклику і в критичних випадках [13]. Служби екстреного виклику. У перелік екстрених оперативних служб, виклик яких цілодобово і безкоштовно зобов'язаний забезпечити оператор зв'язку користувачу послугами, входять служби: а) пожежна охорона; б) реагування в надзвичайних ситуаціях; в) поліція; г) швидка медична допомога; д) аварійна служба газової мережі; е) служба «Анти терор». Позиціонування виконується, коли абонент викликає екстрені служби за єдиним номером екстрених оперативних служб (112) за допомогою абонентського пристрою, оснащеного модулем позиціонування 5G. Коли абонент викликає екстрені служби за допомогою смартфона, пристрій автоматично активує всі засоби визначення місця розташування, щоб якомога точніше визначити свої координати, і відправляє цю інформацію в службу екстреної допомоги за допомогою SMS. Для визначення місця розташування в критичних випадках використовують, як правило, комбінацію технологій позиціонування 3GPP і сторонніх технологій, таких як GNSS, TBS, Bluetooth, WLAN. ВМР в екстрених випадках не є додатком, і процес позиціонування здійснюється без будь-якої участі користувача. До даного сценарію зазвичай пред'являються вимоги, що визначаються регулятором. Федеральною комісією з електрозв'язку США FCC (Federal Communications Commission) в 2020/2021 році сформульовані наступні вимоги до позиціонування в мережах 5G: горизонтальна точність позиціонування не більше 50 м з імовірністю не менше 80%, вертикальна точність не більше 3 м з імовірністю не менше 80%, доступність не менше 95%, затримка і TTFF не більше 30 хв. ВМР повинно здійснюватися всередині і зовні приміщень.

Точне позиціонування для служб першого / швидкого реагування. Даний сценарій, як і попередній, відноситься до позиціонування в разі екстреного виклику і в критично важливій ситуації, проте з більш високими вимогами до

показників визначення місцеположення в просторі в 3D. Для критично важливих випадків зовні приміщень пред'являються такі вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 1 м з імовірністю не менше 95%, вертикальна точність не більше 0,3 м з імовірністю не менше 95%, затримка не більше 5 с, TTFF не більше 10 с, доступність не менше 98%. Для критично важливих випадків всередині приміщень пред'являються такі вимоги: горизонтальна точність позиціонування не більше 1 м з імовірністю не менше 95%, вертикальна точність не більше 2 м з імовірністю не менше 95%, затримка не більше 1 с, TTFF не більше 10 с, доступність не менше 95%.

Оповіщення прилеглих служб екстреного виклику. Даний сценарій має місце в разі, коли, наприклад, при виклику потерпілим абонентом екстреної медичної допомоги повідомляють всіх, хто знаходяться поблизу від вхідного абонента, в тому числі фахівці – волонтери. Лікарі підходящої кваліфікації поблизу можуть і не виявитися, зате з більш високою ймовірністю оповіщення отримають ті волонтери, хто, перебуваючи поблизу, будуть в змозі надати першу невідкладну медичну допомогу. Реалізація даного сценарію передбачає наявність попередньої бази волонтерів у кількох операторів зв'язку; в разі екстреного реагування сповіщаються близько 10 волонтерів по близькості від потерпілого абонента в радіусі 5 км. Ставляться такі вимоги до визначення місця розташування волонтерів: горизонтальна точність позиціонування не більше 50 м, вертикальна точність не більше 3 м.

Позиціонування обладнання служб екстреного виклику медичної допомоги зовні лікарень. Даний сценарій може мати місце, наприклад, в разі раптової зупинки серця пацієнта. Доступність і своєчасне застосування автоматичних зовнішніх дефібриляторів AED (Automated External Defibrillator) іноді може виявитися єдиним шансом відновити ефективні серцеві скорочення і врятувати хворого з зупинкою кровообігу від неминучої смерті. Автоматичні дефібрилятори повинні стати загальнодоступними і дозволити некваліфікованій користувачеві надати першу допомогу хворому з зупинкою серця до приїзду бригади медиків. Цими приладами планується оснащуватися екстрені служби (міліція, охорона, персонал авіакомпанії на борту літака і т.д.) або великі підприємства. Таким чином, «загальнодоступний дефібрилятор» повинен стати

чимось на зразок вогнегасника, який кожен може зняти зі стінки і використовувати для гасіння пожежі. Необхідною умовою для цього є позиціонування найближчого дефібрилятора. Передбачається, що дефібрилятор обладнаний модулем позиціонування 5G і періодично сповіщує службу екстреного виклику медичної допомоги про своє місце положення; служба, в свою чергу, підтримує актуальну базу даних (БД) місцеположень дефібриляторів. Волонтер прилеглої служби екстреного виклику може, таким чином, отримати доступ до найближчого дефібрилятора. Реалізація даного сценарію пред'являє наступні вимоги до точності ВМР дефібрилятора: горизонтальна точність позиціонування не більше 10 м, вертикальна точність не більше 3 м (з точністю до поверху).

Позиціонування в керуванні дорожнім рухом [13].

Моніторинг та керування дорожнім рухом. Даний сценарій має відношення до так званих інтелектуальних транспортних систем (ІТС). ІТС використовують моделювання транспортних систем і регулювання транспортних потоків, надаючи учасникам дорожнього руху велику інформативність і безпеку. ІТС призначена для автоматизованого пошуку та прийняття до реалізації максимально ефективних сценаріїв керування транспортно-дорожнім комплексом регіону, конкретним транспортним засобом або групою транспортних засобів з метою забезпечення заданої мобільності, максимізації показників використання дорожньої мережі, підвищення безпеки та ефективності транспортного процесу, комфортності для водіїв і користувачів транспорту. В даний час моніторинг в ІТС заснований, переважно, на засобах відеоспостереження. Для підвищення ефективності роботи систем ІТС доцільно використовувати дані позиціонування в мережах 5G. Передбачається, що моніторингом дорожнього руху в реальному часі буде займатися так званий сервер керування рухом TMS (Traffic Management Server). Залежно від поточного завантаження доріг сервер TMS зможе здійснювати розсилку повідомлень по мережі 5G учасникам дорожнього руху для підвищення ефективності процесу керування транспортно-дорожнім комплексом. Передбачається, що транспортний засіб обладнано модулем позиціонування 5G. Для позиціонування ставляться такі вимоги: горизонтальна точність

позиціонування не більше 1 м поперек (дороги) напрямку руху та порядку 3 м вздовж (дороги) напрямку руху при дозволеній швидкості руху транспортного засобу близько 130 - 160 км / ч. Вимога точності не більше 1 м поперек напрямку руху транспортного засобу зв'язано з необхідністю визначення смуги руху і ймовірною подальшою сигналізацією про перестроюванні на сусідню смугу; ширина смуги руху зазвичай становить від 3 до 4 м. Вертикальна точність повинна бути не більше 2,5 м для розрізнення рівнів руху багаторівневих транспортних розв'язок; доступність 95%, TTFF не більше 10 с, частота оновлення даних про місцезнаходження близько 10 Гц, затримка не більше 30 мс. Також дані позиціонування повинні бути конфіденційні і належним чином захищені.

Справляння плати за проїзд транспортних засобів. Система справляння плати за проїзд транспортних засобів RUC (Road-User Charging) в процесі свого функціонування вирішує завдання позиціонування транспортних засобів для виділення розміру плати за проїзд по платній дорозі. Зазвичай оплата проїзду проводиться на фіксованих пунктах справляння плати. Розвиток технологій позиціонування дозволяє реалізувати більш гнучку систему оплати проїзду по платній ділянці дороги. Передбачається, що транспортний засіб обладнано спеціальним модулем позиціонування 5G, дані місця розташування передаються на сервер RUC, де проводиться тарифікація плати за проїзд з урахуванням все можливих контекстуальних чинників геолокації. Для реалізації даного сценарію ставляться такі вимоги при дозволеній швидкості руху транспортного засобу близько 130 км / ч і щільності транспортних засобів до 1000 на 1 км²: горизонтальна точність позиціонування від 1 до 3 м, частота оновлення даних про МЗ близько 1 Гц, доступність 99 %, точність визначення швидкості порядку 2 м / с, TTFF не більше 10 с.

Позиціонування для залізничних і морських вантажоперевезень [13].

Відстеження майна (контейнерів). Морські і ж / д перевезення контейнерів є важливою складовою сучасної логістики. При перевезенні вантажів морським транспортом використовується так зване фрахтування. Можливості позиціонування і відстеження контейнерів дозволяють оптимізувати логістику. Передбачається, що контейнер (цистерна, вагон) обладнаний модулем

позиціонування 5G з можливістю тривалої (до 15 років) автономної роботи. Зонами позиціонування є склади і порти, а також борт судна або платформа товарного вагона. Зони позиціонування з підвищеною точністю на складі, розгорнуті зовні і всередині приміщень, можуть мати площу до 10 км² і щільність об'єктів позиціонування вище 100.000 на км². Позиціонуванням і відстеженням контейнерів займається так звана підсистема керування майном ASM (Asset Management System). До позиціонування контейнерів пред'являються вимоги по точності визначення їх місцеположення в просторі, так вони можуть розташовуватися один на одному при транспортуванні і збереженні на складі. Для ВМР стаціонарного контейнера на складі зовні або всередині приміщень в зоні позиціонування з підвищеною точністю пред'являються наступні вимоги: горизонтальна і вертикальна точність позиціонування 1 м, частота оновлення даних про місцезнаходження не більше 1 Гц, доступність 99%, затримки не більше 1 с, TTFF не більше 10 с. Також дані позиціонування повинні бути конфіденційні і захищені від спуфинга і фальсифікації.

Для ВМР рухомого контейнера зі швидкістю транспортування до 180 км / год зовні приміщень в широкій зоні позиціонування пред'являються вимоги: горизонтальна точність від 10 м до 30 м, доступність 99%, точність оцінки швидкості близько 5 м / с, інтервал оновлення даних про місцезнаходження і швидкості може становити від 300 с до 24 годин. Також висуваються вимоги щодо обмежень енергоспоживання в 20 мДж на сеанс позиціонування.

Позиціонування з використанням БПЛА [15].

БПЛА (аналіз даних). Безпілотні авіаційні системи БАС (UAS, Un-manned Aerial System) стрімко стають інструментами отримання цінних даних для проектів з інспектування, спостереження, картування і 3D-моделювання. Останнім часом проведення наземних точкових і маршрутних досліджень доповнюється роботами, пов'язаними з запуском безпілотних літаючих апаратів (БПЛА). Інформація про зйомку за допомогою БПЛА в даний час розглядаються як більш дешева і оперативна альтернатива використанню супутникових даних. Проміжне становище між наземної і аерокосмічною зйомкою в цілях локального моніторингу територій за критерієм «ефективність - вартість» займає зйомка на базі дистанційно-керованого БПЛА, що забезпечує проведення робіт на малих

висотах і істотно більш економічно в порівнянні з традиційними носіями. БПЛА сприяють найбільшому рівню деталізації досліджуваної поверхні і, в першу чергу, ефективні для застосування в важкодоступних районах і для оглядових рекогносцирувальних робіт. Зазвичай геоприв'язку знімків до місцевості проводиться методом синхронізації зйомки з GPS-системою БПЛА. Для ефективної автоматизації аналізу геоінформаційних даних засобами БАС, в тому числі для отримання зображень з високою роздільною здатністю для побудови точних тривимірних моделей земної поверхні і об'єктів, необхідно точне позиціонування БПЛА. При посадці БПЛА на етапі зближення до точності позиціонування БПЛА пред'являють підвищені вимоги. Середовищем є, як правило, протяжні території зовні приміщень, в тому числі, в умовах міської забудови. При обробці одержуваних з БПЛА зображень в режимі офлайн вкрай низька затримка не потрібна; в процесі посадки БПЛА, якщо зображення з географічною прив'язкою використовуються при так званому зближенні, затримка передачі даних про місцезнаходження повинна бути співмірна швидкості БПЛА для забезпечення можливості здійснення дистанційно керованої посадки. Для реалізації сценарію ставляться такі вимоги при швидкості польоту БПЛА близько 150 км / ч: горизонтальна і вертикальна точність позиціонування близько 10 см з доступністю 99%, точність оцінки швидкості не більше 50 см / с по горизонталі і по вертикалі, точність оцінки кута / напрямки не більше 2°, TTFF не більше 10 с. Енергоспоживання не повинно перевищувати 200 мВт.

БПЛА (віддалене керування). Дрони можуть використовуватися, наприклад, для доставки медикаментів або критично важливого медичного обладнання (дефібриляторів) з аптеки до місця призначення пацієнта як на значні відстані, так і між двома різними блоками в межах території одного мед закладу. Іноді потрібно, щоб БПЛА мав можливість зависнути над місцем спостереження і транслював відео в реальному часі в службу екстреної медичної допомоги. Для віддаленого керування при польоті на невеликій висоті БПЛА повинен бути обладнаний модулем позиціонування 5G і підтримувати безперервний сеанс зв'язку / позиціонування засобами мережі 5G зі слідуючими характеристиками: затримка RTT не більше 150 мс; зважаючи на можливі критичні наслідки

надійність повинна бути на рівні вимог служб керування повітряним рухом АТС (Air Traffic Control) близькою до 100%. Для реалізації даного сценарію при польоті БПЛА за маршрутом зі швидкістю до 50 км / год і зависанні над місцем спостереження зовні приміщень без істотних перешкод ставляться такі вимоги: точність горизонтального позиціонування повинна бути не більше 50 см, вертикальна точність не більше 30 см, доступність 99%. При посадці і зльоті БПЛА пред'являються вимоги: точність горизонтального позиціонування повинна бути не більше 50 см, вертикальна точність не більше 10 см, доступність 99,9% на площі близько 10 м².

Таблиця 2.1 систематизує сценарії / послуги позиціонування і вимоги до них в мережах 5G згідно специфікації [2]. Таблиця 2.1 наведена у додатку К.

Незважаючи на широке розмаїття сценаріїв позиціонування в мережах 5G (таблиця 2.1) для зручності аналізу можливе групування сценаріїв і вимог до них за укрупненими категоріями [3].

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв і вимог до них за показником часу спрацьовування TTFF. Багато з представлених сценаріїв пред'являють вимогу до показника часу спрацьовування TTFF не більше 10 с. Служби екстреного виклику висувають вимогу до TTFF не більше 30 с. Менший час спрацьовування, безумовно, підвищує якість послуги позиціонування; з іншого боку, за рахунок збільшення часу спрацьовування при заданих обчислювальних витратах можна поліпшити інші показники позиціонування, такі як, точність і доступність. Цільовий показник TTFF в 10 з може рахуватися розумною узагальненою вимогою, якщо не перешкоджає виконанню інших вимог, особливо вимог регулятора. Система позиціонування 5G також повинна передбачити можливість адаптації TTFF в інтервалі від 10 до 30 з для підвищення інших показників позиціонування.

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв і вимог до них по показнику часу затримки. У більшості розглянутих сценаріїв позиціонування показник затримки можна порівняти по порядку величини з часом спрацьовування, інтервалом поновлення, який становить 1 с і вище. Затримка менше 500 мс необхідна в першу чергу для вирішення наступних завдань: а) підтримка віддаленого керування, наприклад, БПЛА, де потрібно затримка близько 100 -

200 мс; б) запобігання зіткнень, де потрібно затримка не більше 20 - 30 мс (величина визначається часом, необхідним для подолання відстані невизначеності в точності позиціонування на максимальній швидкості). Вимоги вкрай низькою затримки позиціонування тягне за собою складність технічної реалізації, в тому числі за рахунок комбінації різних технологій BWP.

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв і вимог до них по показнику точності оцінки швидкості і координат в просторі 3D. У деяких сценаріїв потрібно позиціонування в просторі 3D, де до оцінки горизонтальних координат 2D додається вимога оцінки висоти з двома класами точності. Вертикальна точність від 2 до 3 м потрібно для сценаріїв як зовні, так і всередині приміщень, в тому числі для визначення поверху всередині багатопверхового будинку. Вертикальна точність від 0,1 до 0,3 м потрібна для сценаріїв керування рухом пристроїв в просторі 3D, особливо поблизу перешкод, наприклад, для завдань посадки БПЛА; в таких завданнях йдеться про точність відносного позиціонування (щодо перешкод); передбачаються сценарії позиціонування зовні приміщень з помірним числом перешкод, або зони позиціонування з підвищеною точністю в кілька десятків метрів; сценарії позиціонування всередині приміщень можуть бути з невеликою зоною обслуговування. Точна оцінка швидкості руху пристрою потрібен для сценаріїв зовні приміщень; при роботі в умовах помірних перешкод потрібна оцінка швидкості з точністю до 1 м / с. Як для точності оцінки місце положення по вертикалі, так і для точності оцінки швидкості, комбінація різних технологій BWP буде сприяти досягненню обох показників позиціонування.

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв і вимог до них по показнику точності позиціонування по горизонталі на площині 2D. Точність позиціонування по горизонталі на площині 2D разом з доступністю є двома основними показниками для розглянутих послуг (таблиця 2.1) і визначаються складністю технології позиціонування або їх комбінації, причому справедливі наступні залежності: а) підвищення точності та доступності послуги BWP вимагає ускладнення системи позиціонування; б) при заданій складності системи позиціонування підвищення доступності послуги BWP може бути досягнуто за рахунок зниження точності BWP, і навпаки. Згідно рекомендації 3GPP TR 22.872

[8] за показником горизонтальної точності позиціонування в 2D можна виділити три укрупнені групи сценаріїв:

- сценарії позиціонування з дуже високою точністю і доступністю (до 99%) в сприятливому середовищі використання, зонах позиціонування з підвищеною точністю, або зовні приміщень з помірним числом перешкод, наприклад завдання ВМР для БПЛА, візків, велопроката;

- сценарії позиціонування з високою точністю і меншою (до 90%) доступністю, наприклад більшість послуг геолокації LBS;

- сценарії позиціонування, в яких вимоги до точності ВМР можна знизити за рахунок підвищення інших показників, таких як доступність і енергоспоживання, наприклад, служби екстреного виклику, позиціонування пацієнт зовні лікарні, відстеження та керування майном вимагають підвищеної доступності при знижених вимогах до горизонтальної точності.

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв і вимог до них по показнику відносної точності позиціонування. Деякі додатки вимагають точності позиціонування не більше 0,2 м. Подібна точність потрібна не в абсолютних, а відносних координатах в невеликих зонах обслуговування, наприклад, при зближенні в задачах посадки БПЛА. Вимога дециметрової точності відносного позиціонування пристрою в 2D і 3D в процесі самого зближення виправдані для подібних сценаріїв, однак, як правило передує етапом входження пристрою в цю так звану зону зближення; на попередньому етапі допустимими виявляються менш суворі вимоги до точності ВМР. Для уточнення простору зони зближення, в якій пред'являються вимоги дециметровому точності позиціонування не більше 0,2 м, враховуються такі чинники. По-перше, перед входженням в зону зближення пристрій позиціонується в абсолютних координатах; при входженні в так звану зону зближення відбувається перемикання системи позиціонування в режим зближення з вимогою відносної точності. По-друге, процес відносного ВМР в режимі зближення здійснюється в зоні позиціонування з підвищеною точністю, переважно зовні приміщень, де досягається точність в 0,5 м з доступністю не менше 95%. Беручи до уваги перші два фактори, розумно припустити, що очікувана зона зближення має порядок 2м в області безпосереднього зближення, наприклад, місця посадки БПЛА.

Слід також звернути увагу на показник конфіденційності / приватності користувачів. У деяких додатках ВМР, поряд з реалізацією послуг позиціонування, потрібно забезпечити приватність. Зокрема, система повинна вирішувати завдання позиціонування за запитом без необхідності постійного спостереження за пристроєм / абонентом.

Слід також звернути увагу на необхідність адаптації показників системи позиціонування оператора і третіх сторін до конкретних сценаріїв, в тому числі, повинна бути передбачена можливість динамічної реконфігурації системи позиціонування для керування пріоритету для заданого сценарію КРІ, наприклад, точністю, доступністю, частотою оновлення, енергоспоживанням.

Розглянемо підхід до угруповання сценаріїв позиціонування і вимог до них по категорії пристрою, який бере участь в сеансі ВМР. Зручним представляється підрозділ пристроїв UE на наступні категорії: а) пристрої які носять абоненти, переважно підтримують послуги позиціонування LBS і сценарії додатків охорони здоров'я; б) пристрої між машинної взаємодії, використовувані в керуванні рухом (візки, БПЛА, автомобілі); в) пристрої з наднизьким енергоспоживанням, здатні працювати до 15 років на одній батареї. Таблиця 2.2 містить укрупнені категорії вимог по горизонтальній точності ВМР в залежності від ступеня покриття.

Таблиця 2.2 – Укрупнені категорії вимог залежно від покриття

Сценарій досягнення	Широке покриття	Висока точність	Дуже висока точність	Межа точності
Консервативний	50 м	3 м	0,5 м	Верхня межа
Проміжний	10 м	1 м	0,3 м	Проміжна межа
Амбіційний	3 м	1м	0,1 м	Нижня межа

Таблиця 2.3 систематизує сценарії позиціонування і вимоги до них за категоріями пристроїв. Таблиця 2.3 наведена у додатку Л. Виконаємо далі оцінку застосовності існуючих технологій позиціонування для цілей ВМР в частині задоволення сформульованих вище вимог у вигляді показників КРІ. В результаті

аналізу можна буде зробити висновок про те, які технології позиціонування і в яких сценаріях використання вже задовольняють сформульованим вимогам, а які вимоги зажадають вдосконалення існуючих підходів позиціонування в перспективних мережах п'ятого і наступних поколінь.

Для оцінки застосування технологій позиціонування вимогам [8], використовується градація за п'ятьма категоріями (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 – Категорії досягнення вимог позиціонування

Вимоги задоволені повністю (не менше ніж на 95%)	Вимоги в основному задоволені (не менше ніж на 68%)	Вимоги задоволені за певних Умовах	Вимоги в основному не задоволені	Вимоги не задоволені повністю
--	---	------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------

Для аналізу застосовності розглядаються технології позиціонування, передбачені специфікацією 3GPP TS 38.305 [14, 15], які можуть бути класифіковані на три категорії: а) технології 3GPP, вже включені або плануються до включення в 3GPP TS 38.305: позиціонування по каналу «вниз» OTDOA, покращене позиціонування на основі ідентифікатора стільника (E-CellID); б) технології, відмінні від 3GPP, вже включені або плануються до включення в 3GPP TS 38.305: A-GNSS, HA-GNSS (RTK), TBS, WLAN, FTM, Bluetooth; всі сенсори для позиціонування, вже включені або плануються до включення в 3GPP TS 38.305: датчики тиску, інерціальні вимірювальні модулі IMU.

Аналіз застосовності технологій позиціонування проводиться для наступних узагальнених показників ефективності: а) класи точності по горизонталі: 50 м, 3 м, 0,1 - 0,5 м; б) точність по вертикалі: 2 - 3 м; в) відносна точність: 0,1 - 0,2 м; г) точність оцінки швидкості: 1 - 5 м / с. Аналіз застосовності технологій позиціонування проводиться для наступних узагальнених сценаріїв на місцевості: а) сільська місцевість зовні приміщень (перешкоди відсутні); б) передмістя і місто зовні приміщень (перешкоди незначні); в) щільна міська забудова зовні приміщень (перешкоди значні); г) всередині приміщень; д) зони позиціонування підвищеної точності.

Показники позиціонування супутникових систем GNSS специфіковані в [16], показники систем 3GPP в [17]. Далі систематизовані можливості технологій BMR по досягненню вимог точності в 50 м (таблиця 2.5), 3 м (таблиця 2.6) і 0,3 м (таблиця 2.7) по горизонталі. Знак * означає, що досягнення вимог залежить від конфігурації мережі радіодоступу і щільності опорних пристроїв, що беруть участь в сеансі позиціонування.

Таблиця 2.5 – Досягнення вимог точності BMR 50 м по горизонталі [12].

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)	*		*		
TBS		*			
WLAN			*	*	
Bluetooth			*	*	
GNSS					
HA-GNSS					
IMU	Підвищує доступність та надійність				

Таблиця 2.6 – Досягнення вимог точності BMR 3 м по горизонталі [13].

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)					
TBS		*			*
WLAN				*	*
Bluetooth					*
GNSS					
HA-GNSS					
IMU	Підвищує доступність та надійність				

Таблиця 2.7 – Досягнення вимог точності BWP 0,3 м по горизонталі [13].

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)					
TBS					
WLAN					
Bluetooth					
GNSS					
HA-GNSS					
IMU	Підвищує доступність та надійність				

Таблиця 2.5 показує, що точність позиціонування по горизонталі в 50 м задовольняється переважно вже існуючими технологіями 3GPP, включаючи TBS і GNSS. При певній геометричній конфігурації пристроїв WLAN точність позиціонування по горизонталі в 50 м також виявляється досяжною. Таблиця 2.6 показує, що точність позиціонування по горизонталі в 3 м задовольняється виключно системами супутникового позиціонування GNSS. Таблиця 2.7 показує, що точність позиціонування по горизонталі в 0,3 м задовольняється лише в сільській місцевості і виключно системою супутникового позиціонування з підвищеною точністю HA GNSS, включеної в протокол LPP. У місті з властивою щільною забудовою високоточне позиціонування існуючими технологіями виявляється нереалізованим. Той же висновок справедливий і для позиціонування всередині приміщень. Підвищення точності та доступності послуг BWP можливо за рахунок збільшення щільності розміщення мережевих пристроїв, а також за рахунок комплексування первинних вимірювань різних технологій позиціонування гетерогенної МРД. Для підвищення точності BWP в мережах 5G слід належним чином обґрунтувати вибір топології територіального і / або просторового розміщення мережевих пристроїв, що беруть участь в сеансі позиціонування.

Далі систематизовані можливості технологій по досягненню вимог точності в 3 м по вертикалі (таблиця 2.8), відносного позиціонування з точністю 0,2 м (таблиця 2.9), оцінки швидкості з точністю 1 м / с (таблиця 2.10).

Таблиця 2.8 – Досягнення вимог точності ВМР 3 м по вертикалі [13].

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)				*	*
TBS					
WLAN					*
Bluetooth					*
GNSS					
HA-GNSS					
Барометр	Калібрування не завжди можливо	Вимагає калібрування у середовищі функціонування. Вимірювання можуть збиватися при переміщенні зовні всередину приміщення і навпаки.			
IMU	Підвищує доступність та надійність				

Таблиця 2.9 – Досягнення вимог точності 0,2 м відносного ВМР [8].

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)					
TBS					
WLAN					
Bluetooth					
GNSS					
HA-GNSS					
IMU	Підвищує доступність та надійність				

Таблиця 2.10 – Досягнення вимог щодо оцінки швидкості з точністю 1 м/с

Технологія позиціонування	Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
	Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
3GPP (LTE)					
TBS					
WLAN					
Bluetooth					
GNSS					
HA-GNSS					
IMU	Вимагає регулярного калібрування разом, наприклад, з одометром, GNSS, HA-GNSS.			Калібрування не завжди можливе	

Представлений вище аналіз задоволення вимог точності позиціонування в залежності зони показав, що жодна з технологій BMR по окремоті не вирішує з необхідною точністю міру завдання геолокації. Таблиця 2.11 систематизує сценарії досягнення вимог при комбінації технологій позиціонування для обраних показників точності.

Таблиця 2.11 – Досягнення точності при комбінації технологій BMR [8]

Вимоги до точності BMR		Зона позиціонування 5G				Зона позиціонування з підвищеною точністю
		Сільська місцевість, зовні приміщень	Передмістя/ місто, зовні приміщень	Щільна міська забудова, зовні приміщень	Усередині приміщень	
Точність по горизонталі	50 м	так	так	так	так	так
	3 м	так	так	так	ні	так
	0,3 м	так	так	ні	ні	ні
Відносна точність	0,2 м	так	так	ні	ні	ні
Точність по вертикалі	3 м	так	так	так	так	так

Таким чином, існуючі технології позиціонування, як входять до специфікації 3 GPP, так і сторонні, такі як GNSS, TBS, IMU, МРД WiFi / Bluetooth задовольняють досить широкий спектр вимог до точності в різних сценаріях, особливо при їх спільному використанні. Однак остаються і такі сценарії, в яких існуючі технології ВМР не забезпечують необхідної точності, тому залишається актуальною задача вдосконалення технологій позиціонування в МРД 5G: сценарії ВМР всередині приміщень і умов щільної міської забудови, в тому числі в зонах підвищеної точності позиціонування, а також для відносного ВМР з точністю до 0,2 м.

2.4 Вимоги до технологій позиціонування в мережах 5G

До перспективних технологій ВМР 5G пред'являються такі загальні вимоги позиціонування. Мережі 5G повинні забезпечувати [18]: а) різні послуги абсолютного і відносного ВМР з використанням як окремих технологій позиціонування, так і комбінацій 3GPP і інших технологій, таких як GNSS, TBS, IMU, WiFi / Bluetooth, в тому числі, для підвищення KPI; б) різні послуги ВМР з конфігуруючими параметрами, такими як точність, доступність, енергоспоживання, частота оновлення та ін. відповідно до потреб абонентів, операторів і третіх сторін; в) позиціонування відповідно до вимог регулятора; прикладом вимог регулятора є ВМР при екстреному виклику 112; г) надійність позиціонування і довірчий інтервал показників; д) позиціонування в умовах роумінгу; е) позиціонування пристроїв UE в періоди, коли UE знаходиться поза зоною радіо покриття мережі 3GPP; ж) занесення в журнал даних про МЗ пристрою для відстеження та ін.

Вимоги показників позиціонування. Мережі 5G повинні забезпечувати [8]: а) позиціонування з точністю по горизонталі і доступністю (таблиця 2.12). б) позиціонування з точністю 3 м по вертикалі і доступністю 95% по всій зоні обслуговування 5G з рухливістю UE до 160 км / год; точність позиціонування по вертикалі повинна забезпечувати ВМР з дозволом ДУ поверху будівлі всередині приміщень; в) визначення зміни висоти UE відносно початкового опорного стану з точністю до 0,2 м і доступністю 95% для деяких сценаріїв позиціонування; г)

точність відносного позиціонування до 0,2 м з доступністю 99% для сценарію двох пристроїв UE в межах 10 м один від одного, а також для сценарію одного пристрою UE і пункту позиціонування 5G в межах 10 м один від одного; під пунктом позиціонування 5G розуміється інфраструктурне опорне обладнання мережі 5G, розгорнуте в зоні обслуговування мережі 5G для підвищення показників, наприклад, маяки, розподілені по периметру району ВМР товарного складу; відносно позиціонування пристроїв реалізується як на площині в 2D, так і в просторі 3D в декартовій або полярній системах координат (СК), в тому числі, з використанням далекомірних і кутомірних вимірювань; д) позиціонування з показником TTFF не більше 30 с; для деяких сценаріїв 5G TTFF не повинен перевищувати 10 с за рахунок ослаблення вимог до інших показників; е) позиціонування з затримки не більше 1 с; в деяких додатках може використовуватися екстраполяція даних про місцезнаходження, а також комбінація різних технологій ВМР з метою скорочення затримки позиціонування до 20 мс; ж) визначення швидкості руху пристроїв UE зовні приміщень з точністю до 0,5 м / с, дозволом по напрямлення не більше 5° і доступністю 99%; для досягнення даних КРІ доцільно використовувати комбінацію технологій позиціонування; з) позиціонування з енергоспоживанням пристроїв UE не більше 20 мДж на сеанс позиціонування і максимальної піковою потужністю не більше 200 мВт; для реалізації сеансу позиціонування витрата ресурсу акумуляторної батареї (АКБ) пристрою не повинен перевищувати 5%, або ж призводити до зниження часу автономної роботи більш ніж на 10 місяців при загальному часі роботи 15 років; сеанси позиціонування в мережах 5G повинні бути реалізовані на пристроях з обмеженим форм-фактором і обчислювальним ресурсом.

Експлуатаційні вимоги. Мережі 5G повинні забезпечувати [13]: а) можливість опитування пристрою UE для надання даних про його місцезнаходження (МЗ) на запит епізодично, або періодично, а також можливість зупиняти надання пристроєм UE даних про своє МЗ; ця вимога не накладає обмежень на об'єкт здійснення обчислень ВМР: обчислювальні процедури можуть здійснюватися як пристроєм UE, так і мережею; б) можливість зміни частоти оновлення даних про МЗ пристрою UE залежно від швидкості його руху;

в) механізм динамічної конфігурації частоти оновлення даних про МЗ пристрою UE для досягнення деяких показників позиціонування, таких як, наприклад, затримка та енергоспоживання та інші; як приклад можна навести наступний сценарій: мережа 5G може запитувати дані про місцезнаходження пристрою UE періодично з інтервалом оновлення кожні 1 – 10 с у нормальному режимі та з інтервалом оновлення 30 – 300 с у режимі енергозбереження; можливі сценарії, коли UE має перебувати в режимі енергозбереження кілька днів; г) позиціонування із заданою частотою оновлення даних про МЗ для інтервалів від 0,1 до одного місяця; д) доступність даних про МЗ на сервері додатків;

Таблиця 2.12 – Вимоги точності та доступності ВМР на площині [15]

Послуги позиціонування 5G	Точність по горизонталі	Доступність	Зона обслуговування та середовище використання		Рухливість UE	Щільність UE
			Зона позиціонування 5G	Зона позиціонування з підвищеною точністю		
Позиціонування з широкою зоною охоплення	< 10 м	> 95%	всередині та зовні приміщень	–	всередині приміщень: UE стаціонарно; зовні приміщень: 0 – 180 км/год	> 10000 UE на км ²
Позиціонування з високою точністю	< 3 м	> 99%	Зовні приміщень	всередині та зовні приміщень	до 160 км/ч	> 10000 UE на км ²
Позиціонування з дуже високою точністю	< 0,3 м	> 99%	зовні приміщень (без перешкод)	всередині та зовні приміщень	до 160 км/ч	> 100000 UE на км ²
Зона ВМР з підвищеною точністю: 500 м завдовжки, 500 м завширшки і 30 м заввишки [19]						

затримка надходження даних про МЗ на сервер позиціонування адаптується під сценарій; е) узгодження різних методів позиціонування відповідно до політики оператора, вимог додатків ВМР, уподобань користувача, а також забезпечувати ре конфігурацію методів на вимогу пристрою або мережі; ж) доступ до методів позиціонування, які використовуються при оцінці МЗ, а також до відповідних довірчих інтервалів отриманих оцінок; з) оператору або третій стороні реалізацію механізму конфігурації та керування різними послугами ВМР за згодою між оператором та третьою стороною; і) третій стороні на запит можливість узгодження методів позиціонування; к) можливість для критичних служб використовувати позиціонування для ВМР із заданим довірчим інтервалом на запит, епізодично або періодично. Таблиця 2.13 систематизує підсумкові вимоги показників точності та доступності послуг ВМР по горизонталі та вертикалі згідно зі специфікацією 3GPP TS 22.261 [19]. Таблиця 2.13 наведена в додатку М.

2.5 Висновки до розділу 2

Проведений аналіз показав, що існуючі технології позиціонування, як входять до специфікації 3 GPP, так і сторонні, такі як GNSS, TBS, IMU, WiFi / Bluetooth задовольняють досить широкий спектр вимог до точності ВМР в різних сценаріях, особливо за умови їх спільного використання. Однак залишаються і такі сценарії, в яких існуючі технології позиціонування не забезпечують необхідної точності ВМР, тому залишається актуальною завдання досліджень і розробок в області вдосконалення технологій позиціонування в мережах радіодоступу п'ятого і наступних поколінь. Особливо це стосується сценаріїв ВМР всередині приміщень і умов щільної міської забудови, в тому числі в зонах забезпечення підвищеної точності позиціонування, а також для задач відносного позиціонування з точністю до 0,2 м. Для таких сценаріїв підвищення точності позиціонування можливо за рахунок збільшення щільності розміщення опорних мережевих пристроїв, які беруть участь в сеансі ВМР, а також за рахунок комплексування первинних вимірювань різних технологій позиціонування.

Очікується, що реалізація парадигми надщільних МРД сприятиме підвищенню точності позиціонування.

З точки зору розробки методології оцінки точності позиціонування для комплексу сценаріїв в мережах п'ятого і наступних поколінь відповідно до категорій вимог точності, географічної протяжності, рухливості і щільності позиціонуються і опорних пристроїв виділимо три укрупнених сценарії (розділ 2.4): а) позиціонування стаціонарних пристроїв в умовах LOS в надщільних МРД 5G (більш 100000 пристроїв на км²) з дуже високою точністю до 0,3 м в умовах щільної забудови зовні приміщень; б) позиціонування транспортних засобів (ТЗ) зі швидкістю до 150 км / ч в умовах LOS в щільних МРД V2X / 5G (більше 10000 пристроїв на км²) з високою точністю до 3 м в умовах щільної забудови зовні приміщень; в) позиціонування в широкій зоні охоплення з рухомим пунктом прийому на БПЛА в умовах LOS зовні приміщень при пошуково-рятувальних операціях з точністю до 10 м.

3 ЕВОЛЮЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G

3.1 Постановка задачі

Традиційно позиціонування розглядалося як додаткова можливість у процесі стандартизації, реалізації та експлуатації МРЗ. Однак велика інфраструктура МРД за своєю суттю завжди мала технічні можливості для визначення розташування абонентів. Тому в процесі еволюції МРД починаючи з першого покоління 1G із частотним поділом каналів FDMA також удосконалювалися методи та засоби мережевого позиціонування [19]. Друге покоління 2G МРД ознаменувало перехід до цифрових систем із частотно-часовим FDMA/TDMA GSM та кодовим CDMA поділом каналів. Цифрові МРД другого покоління 2G сприяли розвитку методів мережного позиціонування для служб екстреної допомоги та охорони правопорядку.

Глобалізація МРД пов'язана з появою партнерського проекту 3GPP (3rd Generation Partnership Project), утвореного для стандартизації систем 3-го покоління 3G UMTS. Починаючи з третього покоління 3G у процесі стандартизації МРД стали пред'являтися вимоги щодо вирішення завдання ВМР. Ця тенденція отримала продовження у мережах 4-го покоління LTE та подальший розвиток у мережах 5-го покоління NR. Крім МРД, завдання позиціонування традиційно вирішується глобальними навігаційними супутниковими системами ГНСС/GNSS (BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS), а також допоміжними МРД, такими як WiFi/Bluetooth, TBS та інерційними вимірювальними модулями ІМУ; можлива також комбінація всіх перерахованих технологій ВМР.

Завданням цього розділу є аналіз принципів та методів, які сприяли вдосконаленню та впровадженню технологій позиціонування в МРД, дослідження етапів розвитку методів та засобів мережевого ВМР у процесі їх еволюції, а також систематизація тенденцій удосконалення існуючих та перспективних технологій ВМР у МРД п'ятого та наступних поколінь на уточнення мережного позиціонування як предмета цього дослідження.

3.2 Еволюція інтерфейсів та архітектури позиціонування

З теорії радіолокації та радіонавігації відомо, що точність позиціонування визначається формою сигналу, який використовується для збору первинних вимірювань, тому розглянемо еволюцію радіоінтерфейсів у МРД.

МРД 1G, такі як AMPS, NMT, з'явилися у 1980-х роках і мали аналоговий вузькосмуговий радіоінтерфейс. Стандарти 1G не передбачали процедур позиціонування, однак у процесі функціонування з'ясувалося, що ВМР може підвищити експлуатаційні показники мережі за рахунок керування мобільністю; наприклад, для ідентифікації стільника, в якій на даний момент знаходиться абонент, виділення каналних ресурсів, організації хендвера та ін. Технічні можливості позиціонування реалізовувалося переважно на основі вимірювань RSSI (Received Signal Strength Indicator); Вимірювання рівня або амплітуди сигналу АТ проводилося на БС. Оскільки рівень зменшується зі збільшенням відстані, то, вимірюючи його, можна будувати висновки про видаленні АТ від БС. У місті умови РРХ далекі від прямої видимості та метод RSSI стає малоприматним, проте він успішно може бути використаний у комбінації з іншими методами.

МРД 2G стандарту GSM почали розгортатися з 1990-х років. Радіоінтерфейс GSM базується на частотно-часовому розділенні каналів TDMA/FDMA та гаусової маніпуляції з мінімальним зрушенням GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). FDMA реалізується поділом виділеного ресурсу на частотні канали завширшки по 200кГц, у кожному з яких організуються 8 каналів з тимчасовим поділом: TDMA кадр у GSM ділиться на вісім часових інтервалів (ЧІ) періодом 576,9 мкс. У радіоінтерфейсі GSM спеціальної підтримки технологій позиціонування ще не було; було реалізовано лише два механізми синхронізації для керування радіо ресурсами. У GSM фазі 1 була реалізована синхронізація передач АТ за параметром часу обороту RTT (Round Trip Time), яка дозволяла оцінити попередження передачі ТА (Timing Advance) у каналі "вгору" UL. У GSM фазі 2 було реалізовано механізм OTD (Observed Time Difference) для оцінки розсинхронізації БС. Можливості представлених механізмів у завданнях позиціонування були обмежені пакетами

GSM, що використовуються для цього: дозвіл та визначається часом передачі біта; якщо $RTT=3,69$ мкс, точність, з якою можна оцінити видалення, дорівнює $d=RTT/2 \cdot c \sim 550$ м.

МРД 3G стандарту UMTS були розроблені 3GPP і почали розгортатися з 2000-х років. Радіоінтерфейс UMTS заснований на широкосмуговому множинному доступі з кодовим поділом WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) із шириною каналу 5 МГц. Загальний пілотний канал CPICH (Common Pilot Channel) використовує унікальний для кожної БС код і служить, у тому числі, для встановлення розмірів сотень БС. Тривалість чіпа при швидкості 3,84 Мчп/с дорівнює 0,26 мкс, тому точність далекомірних вимірювань в UMTS має порядок 78 м ($3,0 \cdot 10^8$ м/с \cdot 0,26 мкс). Якщо різниця багатопроменевих компонентів (БПК) становить 0,26 мкс, то приймач WCDMA зможе розділити і скласти їх когерентно.

МРД 4G стандарту LTE розроблено 3GPP і почали розгортатися з 2010-х років. радіоінтерфейс LTE заснований на доступі з ортогональним частотним мультиплексуванням OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access) в DL. У UL, де випромінювана потужність значно нижча, працює одно-частотна технологія SC-FDMA (Single-carrier FDMA), яка забезпечує енергоефективність АТ. Сигнали в DL та UL можуть займати смуги від 1,4 до 20 МГц залежно від кількості ресурсних блоків (РБ). Передача даних організована кадрах, тривалість яких дорівнює 10 мс. Кадри поділяються на 20 слотів тривалістю $T=15360 \cdot T_s=0,5$ мс, де T_s – елементарний часовий інтервал. Для далекомірних вимірювань у LTE специфіковано параметр різниці часів опорних сигналів RSTD (Reference Signal Time Difference) [14], який визначається як найменша різниця моментів початку прийому під кадрів від двох eNB, розташованих у різних сотах. У межах кадру розрізняють під кадри двох суміжних слотів [15]; інтервал вимірювань RSTD визначається двома слотами в межах одного під кадра з роздільною здатністю T_s . Вимірювання RSTD в МРД 4G LTE виконуються UE в режимі встановленого з'єднання з обслуговуючої БС eNB і можуть приймати значення з роздільною здатністю $1T_s$ при $|RSTD| \leq 4096 \cdot T_s$ [16]. Елементарний часовий інтервал $T_s = 1/(15000 \cdot 2048) = 32,552$ нс, що дає 9,7656 м.

Докладний аналіз еволюції радіоінтерфейсів для реалізації завдань позиціонування виконано в [17–19] і дозволяє зробити наступні висновки: 1) з 2-го по 4-е покоління вдосконалювалися параметри радіосигналу, за якими виробляються первинні далекомірні вимірювання, а саме, зменшувалась тривалість елементарного часового інтервалу, яка дозволяла оцінити дальність: тривалість біта GSM 3,69 мкс давала порядок точності 550 м; тривалість чіпа UMTS 0,26 мкс давала порядок точності 78 м; тривалість інтервалу LTE 32,552 нс давала порядок точності 9,7656 м; 2) у 4-му поколінні LTE було введено спеціальні виділені опорні сигнали позиціонування PRS (Positioning Reference Signals); для підвищення перешкодостійкості їх прийому в умовах перешкод від різних БС були передбачені спеціальні механізми формування, повторного використання та відключення сигналів PRS у різних стільниках; 3) для збору та обробки вимірювань RSTD від територіально-розподілених БС було обґрунтовано необхідність їх синхронізації; 4) у МРД 5G механізми повторного використання спеціальних сигналів позиціонування повинні враховувати сценарій надщільного територіального розподілу радіостанцій.

Розглянемо еволюцію мережевої організації процедур позиціонування. Рисунок 3.1 ілюструє метод E-OTD (Enhanced-OTD) у МРД 2G GSM [10].

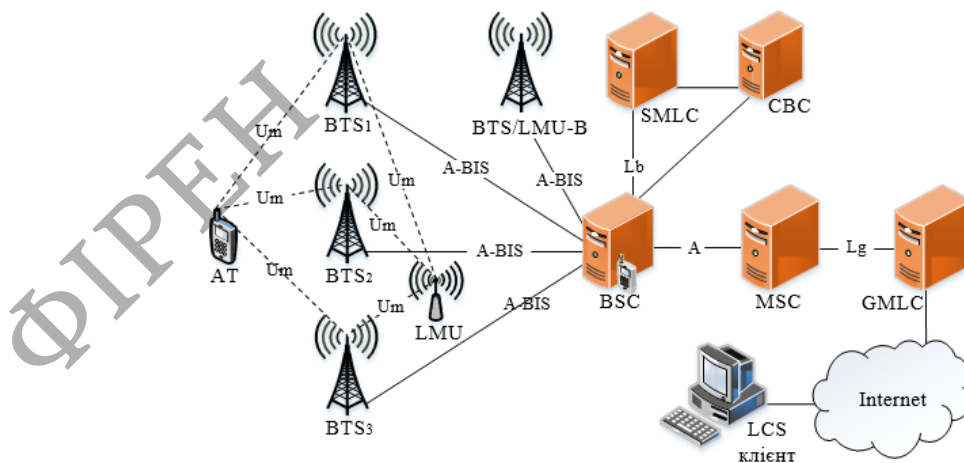


Рисунок 3.1 – Мережева організація позиціонування в МРД 2G GSM

Для підтримки послуг LCS (location services) у МРД GERAN було додано два нові модулі: сервісний центр позиціонування SLMC (Serving Mobile Location Center) та модуль вимірювання розташування LMU (Location Measurement Unit). У ядро мережі GSM було додано третій елемент – шлюзовий центр позиціонування GMLC (Gateway Mobile Location Center).

SLMC є частиною підсистеми БС BSS (Base Station Subsystem), може бути окремим модулем, або складовою BTS і виконує наступні функції: а) приймає та транслює запит на позиціонування до АТ, коли ініціатором ВМР є мережа; приймає запит на позиціонування від АТ, коли ініціатором ВМР є АТ; б) здійснює збір вимірювань, зроблених АТ та модулями LMU, а також вимірювань ГНСС для позиціонування А-GNSS; в) вибирає метод обробки вимірів з урахуванням вимог клієнта LCS; г) надсилає дані супроводу позиціонування до центру ширококомовного розсилання CBC (Cell Broadcast Center) для підтримки позиціонування MS-based.

LCS клієнт є ПЗ, яке може функціонувати як в АТ, так і в SMLC; якщо клієнт LCS працює поза інфраструктурою мережі, GMLC служить для встановлення зв'язку з МРД. LMU бувають двох типів: а) окремо-стоячий модуль LMU-A обладнаний приймачем GNSS і веде прямий обмін з BTS по радіоінтерфейсу Um; б) інтегрований у BTS модуль LMU-B веде обмін із BSC за інтерфейсом A-BIS. GMLC служить для встановлення зв'язку з GERAN, якщо клієнт LCS працює поза МРД. Рисунок 3.2 представляє мережеву організацію процедур позиціонування А-GPS у мережі 2G GSM із підтримкою від МРД [10].

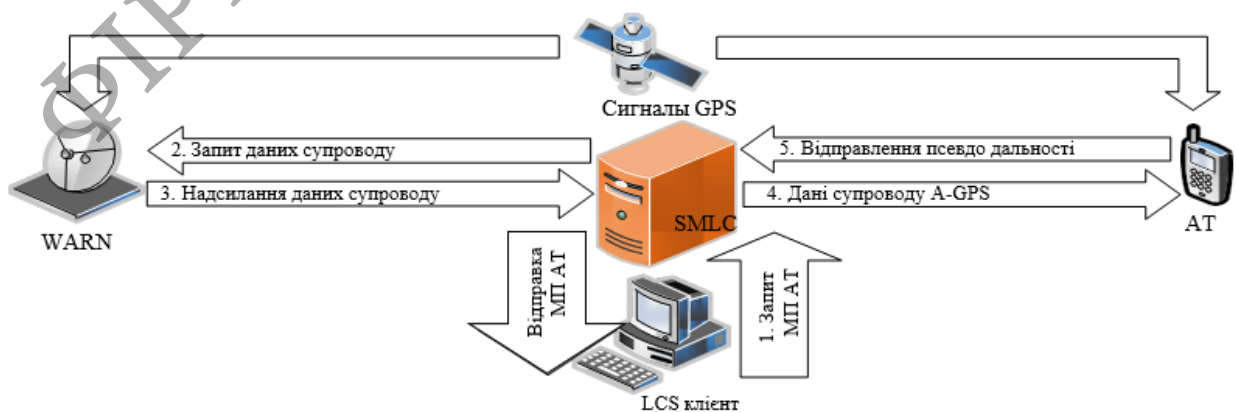


Рисунок 3.2 – Мережева організація позиціонування GSM методом А-GPS

Позиціонування АТ із приймачем GPS може здійснюватися як в автономному режимі виключно за сигналами GPS, так і в режимі супроводу А-GPS (Assisted GPS), коли АТ крім сигналів GPS приймає дані супроводу від МРД (список доступних супутників для початкової грубої) оцінки МЗ АТ, корекція доплерівських зрушень для кожного супутника, диференціальні виправлення DGPS (Differential GPS), а також вікна пошуку кодових послідовностей супутників). Із даними супроводу ініціалізація GPS приймача АТ відбувається швидше. Системи диференціальної корекції ГНСС DGPS служать для підвищення точності ВМР за рахунок виправлення вимірних GPS приймачем псевдодальностей до супутників поправками до них, отриманими ззовні від достовірного вимірювача (опорної станції). Мережа стаціонарних наземних опорних станцій WARN (Wide Area Reference Network) служить для визначення похибки/різниці між точно відомими та певними системами GPS координатами. Опорна станція WARN формує коригуюче повідомлення, за яким обчислюються диференціальні виправлення. Рисунок 3.3 представляє мережеву організацію позиціонування методом А-GPS категорії MS-assisted. Процес обміну починається з надсилання запиту на позиціонування LCS клієнтом на сервер SMLC через шлюз GMLC. Далі сервер SMLC запитує та отримує дані супроводу А-GPS та диференціальні поправки DGPS від станції WARN. Потім SMLC надсилає дані супроводу А-GPS через центр широкомовного розсилання CBC, отримавши які АТ використовує їх для обчислення псевдодальностей до видимих супутників. Потім АТ відправляє обчислені псевдодальності на SMLC, де проводиться обчислення МЗ АТ з використанням диференціальної корекції, отриманої від WARN. Обчислені координати надсилаються сервером SMLC LCS клієнту. Протокол RRLP визначено у 3GPP TS 04.31 [12] є частиною 3-го рівня стеку протоколів GSM і служить для організації обміну повідомленнями LCS між SMLC та АТ.

Мережева організація процедур позиціонування в МРД 3G UMTS, незважаючи на те, що радіоінтерфейси GSM та UMTS відрізняються принципово, залишилася схожою: мережеві модулі, що беруть участь у сеансі позиціонування для мереж UTRAN залишаються тими самими, що й у GERAN: LMU, SMLC і GMLC; новим елементом є модуль позиціонування PE (Positioning

Entity), доданий до UTRAN для підвищення точності гіперболічного методу OTDOA-PE.

Мережева організація процедур позиціонування в МРД 4G LTE з 9-го релізу специфікувалася в 3GPP TS 36.305 [13] і відрізнялася від 2G/3G тим, що сервер став називатися E-SMLC (Evolved SMLC) і міг підтримувати комбіновані методи. Для LTE було розроблено спеціальний протокол підтримки процедур позиціонування LPP (LTE Positioning Protocol). На відміну від попередніх протоколів позиціонування (RRLP у GSM та RRC у UMTS), де підтримувався обмін повідомленнями позиціонування виключно в площині керування CP (Control Plane), у протоколі LPP підтримувався обмін також і в площині користувача UP (User Plane). Обмін даними супроводу та вимірюваннями/оцінками розташування в CP задіює виділені канали керування, вважається більш оперативним/надійним, використовується у випадках екстреного виклику та може відбуватися віз відома абонента. Обмін у площині користувача UP здійснюється за допомогою TCP/IP з'єднання протоколу SUPL (Secure User Plane Location), який функціонує лише на рівні додатків поверх LPP, RRC, RRLP. LPP є протоколом типу точка-точка та функціонує між UE та E-SMLC. Розширенням LPP є протокол LPPa (LPP Annex), який визначає обмін повідомленнями позиціонування між eNB та SMLC у CP. З погляду моделі OSI LPP є протоколом рівня додатків, а LPPa – протоколом мережного рівня. Рисунок 3.3 показує організацію процедур обміну між UE та E-SMLC у CP, або між модулем SET (SUPL Enable Terminal) та SLP (SUPL Location Platform) у площині UP [1].

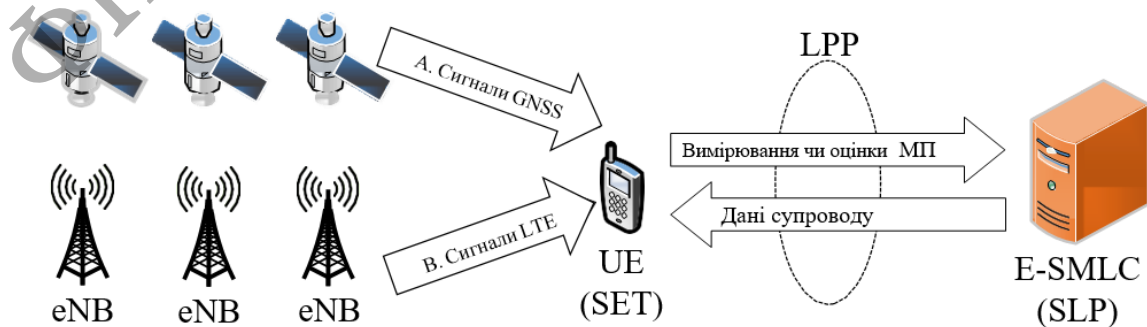


Рисунок 3.3 – Організація процедур позиціонування за допомогою LPP

Докладний аналіз еволюції процедур та архітектури мережевого позиціонування виконано в [8, 9] і дозволяє зробити висновок про ускладнення мережевої організації та процедур позиціонування в МРД внаслідок збільшення числа використовуваних методів та операцій обробки первинних вимірювань.

Рисунок 3.4 представляє еволюцію архітектури системи мережевого позиціонування в гетерогенній МРД 2G – 5G [11]. Рисунок 3.4 наведено в додатку Є.

Архітектура системи позиціонування включає мережу радіодоступу RAN (Radio Access Network) та ядро мережі CN (Core Network). Ключовими елементами системи мережевого позиціонування є об'єкт, клієнт та сервер; об'єктом позиціонування є АТ; сервер виконує збір та обробку вимірювань для позиціонування об'єкта; Клієнт є мережевий елемент, який відправляє запит на позиціонування в мережу для отримання оцінки МЗ об'єкта і може бути представлений як самим об'єктом, так і суб'єктом третьої сторони.

У МРД 2G, RAN включає базову станцію BTS (Base Transceiver Station) та контролер BSC (Base Station Controller). Сервісний центр позиціонування SMLC виконує збір та обробку вимірювань для оцінки МЗ і може бути як окремим пристроєм, так і у складі BSC. На початку сеансу позиціонування клієнт надсилає запит на позиціонування до шлюзового центру позиціонування GMLC у ядрі мережі CN; GMLC отримує дані про поточний МЗ об'єкта домашньому реєстрі МЗ HLR (Home Location Register). Потім GMLC надсилає запит на позиціонування до центру мобільної комутації MSC (Mobile Switching Center), який переправляє його до контролера БС BSC та сервісного центру SMLC. Після отримання запиту на позиціонування SMLC виконує збір первинних вимірювань від БС та їх вторинну обробку для оцінки МЗ об'єкта. У результаті дані про МЗ надсилаються клієнту.

У МРД 3G архітектура системи позиціонування схожа на 2G. Контролер радіомережі RNC (Radio Network Controller) виконує ті ж функції, що й BSC. Відмінність полягає в тому, що GMLC переправляє запит на позиціонування в MSC та вузол обслуговування SGSN (Serving GPRS Support Node). Модуль LMU, що з'явився WCDMA, за запитом RNC здійснює збір вимірювань.

У МРД 4G архітектура системи позиціонування істотно відрізняється від такої в 2G та 3G. Контролер БС з мережі радіодоступу виключено, його функціональність інтегрована в БС eNodeB. Якщо в МРД 2G і 3G позиціонування здійснюється з використанням обміну повідомленнями тільки в площині керування CP, то в МРД 4G підтримується позиціонування з використанням обміну повідомленнями як у площині керування CP, так і в площині користувача UP. У CP обмін здійснюється поверх каналів керування з використанням протоколу LPP та протоколу обміну між сервером та БС eNodeB LPPa. Клієнт ініціює сеанс позиціонування надсиланням запиту до GMLC. Потім вузол керування мобільністю MME (Mobility Management Entity) отримує запит від GMLC і передає його в E-SMLC, де вибирається відповідний метод позиціонування, виконується обробка вимірювань та оцінка МЗ об'єкта. У площині користувача обмін повідомленнями позиціонування каналами передачі даних здійснюється з використанням протоколу SUPL; UE та eNB надсилають дані вимірювання на платформу SLP (SUPL Location Platform) через шлюзи S-GW та P-GW. Після збору даних SLP обчислює МЗ об'єкта та відправляє його клієнту.

Рисунок 3.5 представляє варіант архітектури системи мережевого позиціонування в МРД 5G [11], яка включає множинні технології радіодоступу RAT (Radio Access Technology), граничну хмару та хмару керування. Гетерогенна мережа радіодоступу RAT може включати БС з різними зонами обслуговування різноманітних стандартів (LTE, 5G NR, WiFi), що впливає на вибір методу позиціонування: усередині приміщень ймовірний сценарій позиціонування WiFi; зовні приміщень БС макро, мікро, піко та фемто сот з massive MIMO дозволяють оцінювати кути приходу; кооперативне позиціонування підвищує точність відносного BPP; надщільний розподіл UDN БС підвищує ймовірність LOS і, таким чином, покращує точність BPP. Рисунок 3.5 наведено в додатку Ж.

Гранична хмара (Edge Cloud) розташовується на кордоні МРД для підтримки позиціонування в площині користувача UP і включає віртуальний конвергентний шлюз VCGW (Virtual Converged Gateway) та мобільний граничний обчислювальний сервер MEC. Шлюз VCGW працює в UP та реалізує

функції керування якістю обслуговування QoS у різномірних МРД. Концепція мобільних граничних обчислень МЕС покликана впоратися зі зростаючими вимогами щодо обчислювальної обробки від UE. Порівняно з концепцією хмарних обчислень Cloud Computing, підхід МЕС дозволяє знизити затримки на передачу в ЦОД та сприяє ВМР у режимі реального часу.

Хмара керування (Control Cloud) реалізує функції у СР. На відміну від 2G-4G, мережеві елементи позиціонування (ММЕ, НСС, Е-SMLC в LTE) у МРД 5G виключені з ядра мережі CN; їх функції реалізуються віртуальними машинами VM (Virtual Machine) (рисунок 3.4). Процедури позиціонування в СР виконуються так: клієнт надсилає запит на позиціонування на віртуальний шлюз МЗ VLGW (Virtual Location Gateway), який здійснює збір первинних відомостей про об'єкт (рисунок 3.5). Дані про об'єкт UE надходять через модуль VMM (Virtual Manage Module); далі вибирається підходяща технологія RAT, проводиться збір вимірів від різних опорних БС та АТ, після чого виконується їх обробка; результуюча оцінка МЗ повертається клієнту.

Тенденціями розвитку архітектури технологій мережевого позиціонування у МРД 5G є такі [9]. По-перше, множинні технології радіодоступу RAT у гетерогенній мережі можна використовувати спільно. По-друге, хмарні та граничні обчислення, засновані на концепції SDN та віртуалізації мережевих функцій NFV (Network Function Virtualization), привносять гнучкість в архітектуру МРД; необхідність окремих елементів мережевого позиціонування при цьому відпадає, їх функціонал може бути реалізований програмно. По-третє, розділені функції площини керування СР та площини користувача UP. Позиціонування може бути реалізовано як в СР, так і в UP, залежно від вимог КРІ, що пред'являються, і доповнюють один одного; в режимі реального часу ВМР може бути реалізовано в UP для зниження затримки.

3.3 Еволюція стандартів та методів позиціонування

Стимулом розвитку стандартів позиціонування в МРД було ВМР у разі екстреного виклику E911/E112, що не тарифікується оператором та є обов'язковим до реалізації національним регулятором. Крім регулятора можливості ВМР цікаві як для самих операторів при оптимізації МРД, так і для третіх сторін з метою комерціалізації різних послуг геолокації. У першому випадку говорять про організацію радіозв'язку, засновану на місцезнаходження LAC (Location Aware Communication), що дозволяє підвищити ефективність функціонування МРД. Незважаючи на перспективність LAC, серед операторів раніше не спостерігалось ентузіазму щодо інвестицій у мережеву інфраструктуру для позиціонування [3], оскільки очікуваний вигрaш міг бути нівельований витратами; додатковою перешкодою була вимога конфіденційності МЗ АТ. Початок стандартизації вимог до позиціонування в МРД було покладено в 1996 році, коли Федеральна комісія з електрозв'язку FCC (Federal Communications Commission) у FCC 96-264 [9] визначила фази впровадження служб ВМР у МРД для випадків екстреного виклику. В результаті апробації можливостей ВМР на функціонуючих мережах у 1999 році в FCC 99-245 [7] було вирішено диференціювати вимоги залежно від того, де здійснюється обробка вимірювань. При позиціонуванні у пристрої була потрібна точність 50 м для 67% і 150 м для 95% викликів. При позиціонуванні мережею була потрібна точність 100 м для 67% та 300 м для 95% викликів. Точність у першому випадку виявлялася вищим за рахунок можливості комбінування різних вимірювань. У 2010-му вимоги ВМР у МРД були актуалізовані у FCC 10-176 [8]: при позиціонуванні в пристрої була потрібна точність 50 м для 67% та 100 м для 90% викликів; при позиціонуванні мережею – 100 м для 67% та 300 м для 90% викликів. У 2014-му FCC 14-13 [9] встановлені вимоги ВМР всередині приміщень з точністю 50 м по горизонталі і 3 м по вертикалі для 67% викликів. У 2015-му FCC 15-9 [11] встановлено обмеження на затримку ВМР не більше 30 с; також з'явилися вимоги до 3D ВМР всередині приміщень з точністю до квартири.

У МРД 2G GSM спочатку стандартів для позиціонування не було. Для радіозв'язку було специфіковано два способи синхронізації передач. У GSM фазі 1 для поліпшення хендовера було запропоновано процедуру синхронізації за метрикою подвійного обороту RTT UL. На основі RTT АТ міг встановити тимчасове попередження ТА передачі в UL. У GSM фазі 2 було визначено процедуру синхронізації OTD, засновану на вимірюванні в DL різниці часів приходу сигналів від двох БС. Таким чином, можливості позиціонування мереж 2G GSM були обмежені використанням далекомірних вимірювань. Досвід ВМР у GSM показав необхідність синхронізації БС як опорних ПП для трилатерації.

У 1998 році було створено консорціум 3GPP (3rd Generation Partnership Project), який розробляє специфікації для УПС. Функціональний опис сервісів геолокації LCS (Location Service) в МРД 2G GSM було розроблено в 1999 в 3GPP TS 03.71 [11]. Для GSM було визначено такі методи позиціонування: Cell ID, ТА, uplink TOA, E-OTD (enhanced OTD); також у 2000-х було запропоновано метод А-GPS, у якому МРД доповнювали можливості ГНСС. Повний опис сервісів LCS для GSM містилося в 3GPP TS 22.071 [12].

У МРД 3G UMTS функціональний опис сервісів геолокації було розроблено у 1999 році у 3GPP TS 25.305 [13]. Для UMTS були визначені методи: Cell ID, OTDOA (Observed TDOA) з періодами idle periods у каналі вниз DL (IPDL) та А-GPS. Вимірювання затримок приходу сигналу здійснювалися DL каналом CPICH. У 2005 році в 7-му релізі 3GPP TS 25.305 була додана підтримка методу UTDOA (Uplink TDOA). У 2010-му році в 10-му релізі 3GPP TS 25.305 була додана підтримка методу зіставлення образів розташування по радіо карті RFPM (RF Pattern Matching) для підвищення точності методом Cell ID.

У МРД 3.9G LTE підтримка технологій позиціонування в релізах 8 і 9 була специфікована в 2008 році в RP-080995 [14], завданням якої була специфікація протоколу та методу позиціонування АТ в DL, а також розробка систем А-GNSS місцях слабкого прийому супутникового сигналу Метод позиціонування в DL був схожий на вже реалізовані методи E-OTD у GSM та OTDOA у UMTS. Для еволюційного розвитку мереж UMTS можливості позиціонування розглядалися не тільки з метою ВМР у разі екстреного виклику, але також і з метою оптимізації роботи радіомережі, що самоорганізується SON (Self-organizing network).

Об'єктом подальшого вдосконалення в мережах LTE був метод OTDOA з IPDL з UMTS, еволюція якого виявилася у використанні виділених опорних сигналів позиціонування PRS та тимчасове відключення сигналу обслуговуючих стільників. Сигнал PRS міг розташовуватись у різних під кадрах для вимірювання RSTD. У 2009 році в 9-му релізі 3GPP TS 36.305 [13] як рішення для LTE були специфіковані методи enhanced Cell ID (E-CID), OTDOA з виділеним сигналом позиціонування PRS, а також A-GNSS. У 9-му релізі 3GPP TS 36.355 [15] була специфікована підтримка протоколу позиціонування LPP; в 9-му релізі 3GPP TS 22.071 [12] були актуалізовані сервіси BMP. У 4-му релізі 3GPP TR 25.847 [17] запропоновані OTDOA-PE та DGPS-A.

МРД 4G LTE-Advanced стандартизовані в 10-му релізі 3GPP і покликані задовольнити вимоги 4G: пікова швидкість до 1 Гбіт/с для малорухливих та до 100 Мбіт/с для високорухомих абонентів. Еволюція МРД з LTE-A внесла поняття гетерогенних мереж з макро та мікро сотами та такими технічними рішеннями як агрегація смуг CA (Carrier Aggregation), координована багато точкова передача та прийом CoMP (Coordinated Multipoint) та технології MIMO; ширина частотного каналу LTE-A могла досягати до 100 МГц. У МРД 4G LTE-A для BMP розглядалися такі можливості. 1) Мережеве позиціонування (Network Based). У 2012-му році в 11-му релізі 3GPP TS 36.305 [13] було включено метод UTDOA для доповнення систем A-GNSS в умовах слабкого прийому супутникового сигналу, а також для підтримки станцій без можливості обробки сигналів у DL методом OTDOA. Вимірювання в UTDOA проводяться в LMU [16] за сигналами UL у фізичному каналі передачі трафіку користувача і сигналізації PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). 2) Метод RFPM або метод радіо карти RF fingerprinting є додатковим методом у протоколі LPP до вже існуючих методів, визначених у релізі 9. Включення методу радіо карти RFPM в LTE було специфіковано в 2013-му році в 12-му релізі 3GPP TR 36.809 [17]. 3) Поліпшене позиціонування. Об'єктом покращення для LTE-A виступали певні у 9-му релізі методи OTDOA та E-CID. Інструменти підвищення точності були специфіковані в 13-му релізі 3GPP TR 36.855 [18] і включали: а) рознесену передачу/прийом сигналів PRS; б) гетерогенну мережу з макро та мікро сотами

для покращення прийому сигналів PRS; в) множинні стільники з CA/CoMP підвищення точності позиціонування E-CID.

У МРД 4.5G, відомим з 13-го релізу як LTE-Advanced Pro, консорціумом 3GPP відводилася особлива увага позиціонування всередині приміщень, що пояснювалося вимогами точності BWP, регламентованими FCC для служб E911; доопрацювання були специфіковані у 2016-му році у 3GPP TR 37.857 [7]. Завдяки впливу FCC стандартизація технологій позиціонування одержала новий стимул; було запропоновано кілька покращень існуючих методів 3GPP: OTDOA, UTDOA, E-CID, RFPM, а також технологій позиціонування, відмінних від 3GPP, таких як A-GNSS, маяки TBS, МРД WiFi/Bluetooth, використання барометра. У МРД 4,5G LTE-A Pro для BWP розглядалися такі можливості. 1) Поліпшення методу OTDOA шляхом: а) підвищення характеристик передачі сигналу PRS у смузі частот понад 20 МГц за рахунок агрегації смуг; б) використання нових форматів PRS у діапазонах, що не ліцензуються (LTE-U); в) підвищення ймовірності радіоприймання сигналів PRS у сценаріях CoMP з великим числом піко сот. 2) Використання D2D: пристрої UE, що виконують роль опорних пунктів з відомим МЗ, могли кооперуватися з пристроями UE – об'єктами позиціонування, для підвищення точності BWP за допомогою далекомірних та потужних вимірювань по каналу PS-DCH (Physical Sidelink Discovery Channel), специфікованому в релізі 12. 3) Використання MIMO: BWP по вертикалі може бути покращено за допомогою множинних антен і ДУ по висоті elevation beamforming або MIMO повного вимірювання full dimension EB/FD MIMO. 4) WLAN/Bluetooth: далекомірні та потужніші вимірювання МРД WLAN/Bluetooth можуть бути об'єднані з вимірюванням мережі 3GPP. 5) TBS: включення маяків TBS у межах розгорнутої інфраструктури МРД може підвищити точність BWP. 6) Барометр: включення барометра до переліку коштів дозволяє підвищити вертикальну точність BWP. Засоби підвищення точності позиціонування, такі як TBS, WLAN/Bluetooth та барометр були специфіковані в 2016 році в 13-му релізі 3GPP TS 36.305 [13]. Також були актуалізовані вимоги до вимірювання RSTD на несучій частоті своєї (intra) та сусідньої (inter) стільники. Специфікація 3GPP TS 22.071 [12] була актуалізована щодо вимог до горизонтальної та вертикальної

точності позиціонування. Рисунок 3.6 представляє хронологію розвитку стандартів мережевого ВМР 2G – 4,5G.

В англomовній літературі існують два терміни для ВМР: *positioning* – позиціонування (визначення географічних координат об'єкта; позиція може бути представлена точкою в декартових координатах розташування об'єкта) та *localization* – локалізація (відображення координат на карту; ідентифікація розташування на місці) електронній карті), які зазвичай використовуються як синоніми [3]. Позиціонування в МРД базується на відомих принципах радіолокації та радіонавігації для вимірювання координат об'єктів.

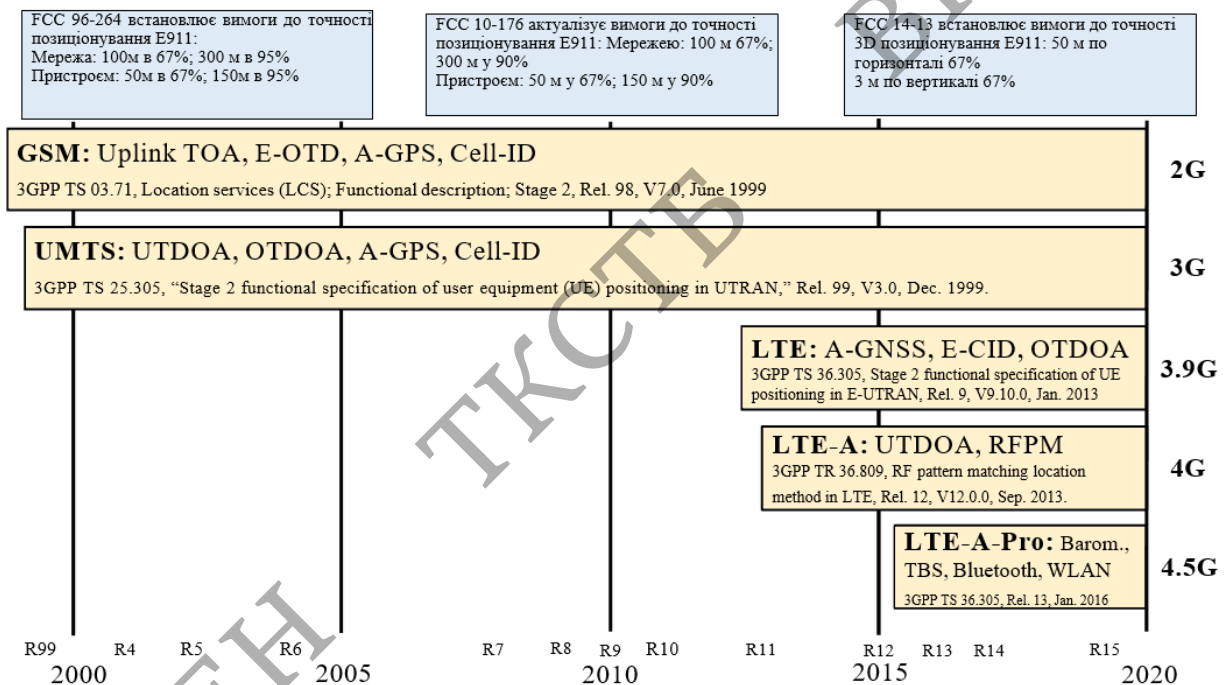


Рисунок 3.6 – Хронологія розвитку стандартів позиціонування 2G – 4,5G

При позиціонуванні абонентських терміналів (АТ) використовуються опорні станції з відомим ВМР: базові станції (БС) у МРД або супутники в ГНСС. Позиціонування в МРД використовується у випадках, коли прийом сигналу ГНСС утруднений (в умовах щільної забудови або всередині приміщень). Для збору первинних вимірів може використовуватися як канал "вниз" DL (Downlink) від БС до АТ, і канал «вгору» UL (Uplink) від АТ до БС. Після збору первинних вимірювань виконується їх обробка, внаслідок якої з використанням деякого алгоритму та знання координат опорних БС здійснюється оцінка координат АТ.

Залежно від того, де проводяться обчислення, розрізняють позиціонування з обчисленнями в терміналі та мережі. При позиціонуванні з обчисленнями в терміналі АТ здійснює оцінку координат (ОК) самостійно на основі первинних вимірювань, отриманих від передавальних опорних БС або супутників; допоміжні дані супроводу (координати опорних станцій) надходять із мережі. При позиціонуванні з обчисленнями в мережі ОК проводиться мережевий сервер геолокації; первинні вимірювання при цьому можуть формуватися двома способами: а) АТ передає сигнали, якими опорні БС виконують первинні вимірювання; б) опорні БС передають сигнали, якими АТ виконує первинні виміри і відправляє їх у мережу. При ВМР в МРД найбільшого поширення набув спосіб з обчисленнями в опорній мережі.

Залежно від ступеня залучення АТ та мережної інфраструктури – опорних БС та сервера геолокації розрізняють такі способи позиціонування: а) на основі мобільної станції (Mobile-based) без участі мережної інфраструктури: АТ вимірює рівень сигналу та визначає МЗ незалежно від мережі; б) з підтримкою мережі (Network-assisted): процес ВМР відбувається в АТ, проте АТ отримує підтримку від мережі; в) з підтримкою АТ (MS-assisted): АТ вимірює рівні сигналів, що приймаються від БС, а мережа визначає МЗ АТ; г) на базі мережі (Network-based): мережа виконує всі функції, пов'язані з ВМР. Кожен із перерахованих способів ВМР підтримується одним або декількома методами позиціонування, які розвиваються та/або доповнюються, дозволяючи усунути або мінімізувати недоліки попередніх. Незалежно від того, де виконується обробка первинних вимірювань та проводиться ОК, а також незалежно від ступеня залучення АТ та мережі до процесу ВМР розрізняють такі принципи позиціонування. Трилатерація (Trilateration) – принцип ОК на основі обчислення точки перетину геометричних фігур (рисунок 3.7, а). Для далекомірного методу TOA (Time of Arrival) виміряні часи приходу сигналу на площині утворюють кола, а в просторі – сфери. Для різницево-далекомірного методу TDOA (Time Difference of Arrival) виміряні різниці часів приходу сигналу на площині утворюють гіперболи, а у просторі – гіперболоїди. Крім часу приходу можна вимірювати також рівень сигналу RSS (Received Signal Strength) або різницю рівнів DRSS (Difference of RSS).

Триангуляція (Triangulation) – метод ОК на основі обчислення точки перетину кутів/напрямків приходу сигналу AOA/DOA (Angle/Direction of Arrival) (рисунок 3.7, б). Метод триангуляції АТ заснований на визначенні кута/напрямку приходу сигналу на кількох позиціях. Для визначення кута приходу використовуються фазовані антенні ґрати (ФАГ), що встановлюються на БС. Оскільки ДНА приймальних БС має певну ширину, то точність позиціонування погіршується у міру віддалення АТ від БС. Для пеленгації АТ на площині його сигнал повинен бути прийнятий не менш як двома БС одночасно.

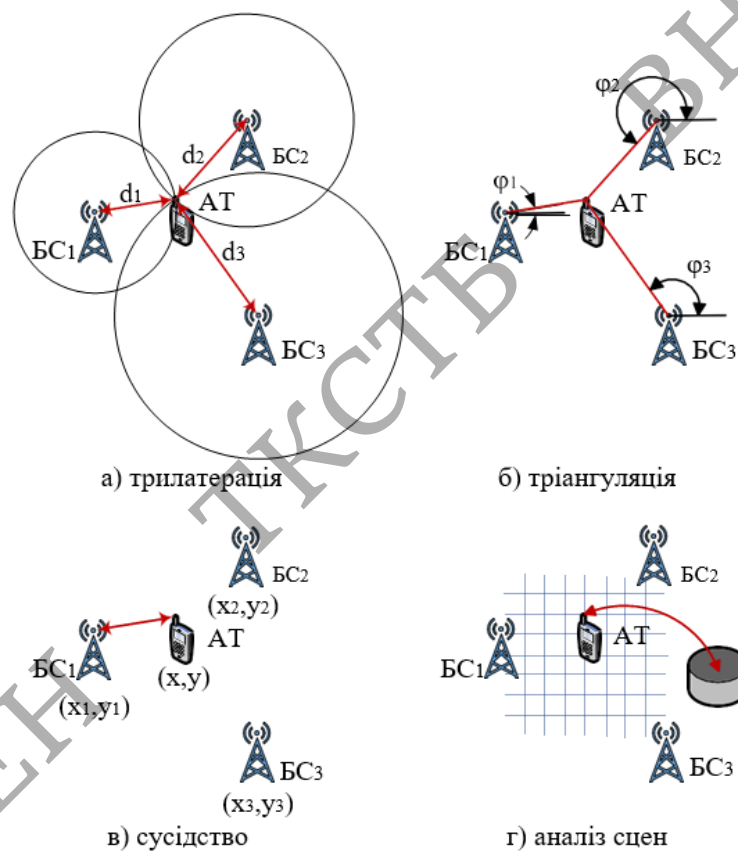


Рисунок 3.7 – Принципи позиціонування МРД

Сусідство/близькість (Proximity) – метод ОК на основі відомого МЗ найближчого опорного вузла. Прикладом є метод ідентифікатора стільника Cell ID, який визначає МЗ АТ з точністю до стільника (БС) (рисунок 3.7 в).

Аналіз сцен (Scene Analysis, Fingerprinting) – метод ОК на основі аналізу відповідності поточних первинних вимірювань (RSS, TOA) вже наявних у базі

даних (БД), коли кожному набору вимірювань у БД відповідає своє МЗ АТ (рисунок) 3.7, г). Прикладом є метод радіо карти, одержаної за вимірами рівня сигналу RSS; Метод вимагає заздалегідь побудови радіо карти для заданої ділянки, тобто. вимагає попередніх вимірювань RSS із занесенням їх у БД залежно від розташування АТ. Недоліком методу є те, що будь-яка зміна обстановки на цій ділянці, яка може вплинути на умови РРХ і, таким чином, на вимірювання RSS, потребують актуалізації радіо картки.

Гібридний/комбінація (Hybrid) – метод ОК на основі комбінації різних вимірів та методів; використовується підвищення точності позиціонування.

Метод Cell ID є найпростішим і використовує унікальний ідентифікатор стільника Cell ID та географічні координати її центру БС. МЗ АТ визначається з точністю до зони обслуговування тієї БС, в якій цей АТ зареєстровано. Значення Cell ID постійно перебуває у пам'яті АТ; при зміні стільника значення Cell ID оновлюється. Похибка ВМР АТ в Cell ID можна порівняти з розмірами стільника: у великих містах розмір стільника мінімальний і точність методу може бути близько сотень метрів; у передмісті щільність БС нижча, тому точність може становити десятки кілометрів. Підвищити точність можна за рахунок методу ТА в GSM [11] і RTT в UMTS [13], а також за рахунок вимірювань рівня сигналу RXLEV, що приймається, в GSM і RSCP (Received Signal Code Power) в UMTS.

Метод Cell ID ТА заснований на визначенні затримки поширення сигналу ТА від БС до АТ в межах стільника. Для визначення ТА система ВМР ініціює пейджинг АТ, в результаті мережа отримує ідентифікатор обслуговуючої БС та значення тимчасової затримки ТА, за допомогою якої розраховується видалення АТ від БС, при цьому виходить коло, на якому може бути АТ. В результаті виміру затримки в секторі виділяється дуга шириною близько 550 м.

Для GSM роздільна здатність ТА по ширині дуги визначається часом передачі одного біта; якщо $RTT=3,69$ мкс, то $d=RTT/2 \cdot c \sim 550$ м. Метод Cell ID може бути реалізований у будь-якій МРД без додаткової апаратної або програмної модернізації. Недоліком методу Cell ID є низька точність ВМР, яка обмежена розміром стільника, а також роздільною здатністю ТА та RTT. Рисунок 3.8 а ілюструє приклад ВМР АТ для трисекторної БС з шириною сектора 120° .

Метод Cell ID RTT передбачає вимірювання часу між відправкою запиту та отриманням відповіді, на основі якої розраховується відстань від БС до АТ з використанням моделі $d = RTT/2 \cdot c + e$, де $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с, $e = \delta \cdot c$ – похибка вимірів відстані, δ – похибка виміру часу (рисунок 3.8,б). Для більш точної оцінки МЗ АТ методом РТТ слід використовувати в обчисленнях вимірювання РТТ від сусідніх БС. Тоді АТ перебуватиме у точці перетину трьох кіл сусідніх БС, розташованих у центрах цих кіл.

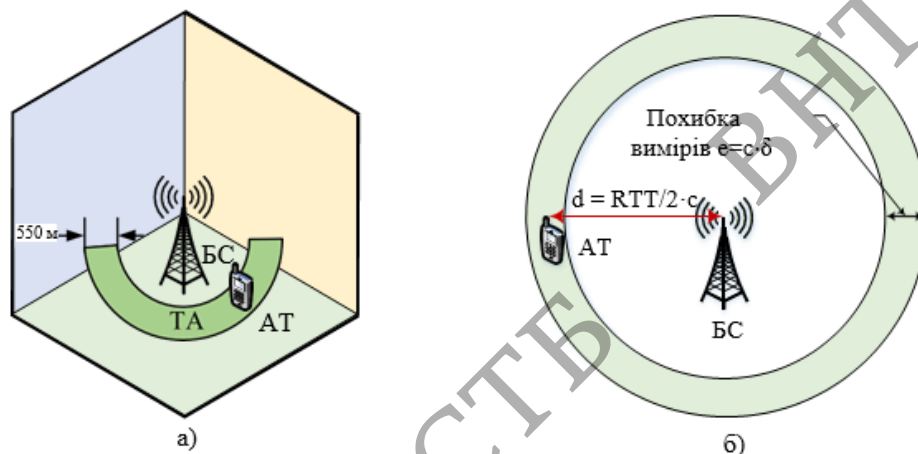


Рисунок 3.8 – Метод позиціонування а) Cell ID+TA та б) Cell ID+RTT

Метод E-CID (Enhanced Cell ID) з'явився в 10-му релізі UMTS [13] та 9-му релізі LTE [17] і поєднував BWP з радіо покриттям БС з AOA, TA, RTT, RSS.

Метод RFPM відноситься до категорії аналізу сцен та зіставленням образів і вимагає попереднього складання БД вимірювань, зіставляючи які з поточними вимірами можна оцінити МЗ АТ. Позиціонування методом RFPM у гетерогенних МРД в умовах міста та передмістя досліджувалось у 3GPP TR 36.809 [17]. Для LTE-A-Pro починаючи з 13-го релізу TS 36.305 [13] RFPM базувався на вимірюваннях в МРД WLAN і Bluetooth всередині приміщень. Принцип дії RFPM заснований на вимірюванні фазових, часових та амплітудних параметрів радіосигналу, прийнятого в умовах прямої видимості, або відображеного від природних та/або штучних перешкод при РРХ. Виміряні параметри радіосигналу формують так званий відбиток радіо/fingerprint; сукупність радіо відбитків утворює радіо картку для заданої ділянки. У процесі роботи передавача АТ на

БС надходить кілька сигналів, як «прямих», і відбитих. Сукупність радіо відбитків характерна для певного розташування АТ. Для кожної БС попередньо створюється бібліотека образів чи БД радіо карт. При VMP прийнятий образ порівнюється з образами з БД і, визначивши найближчий до прийнятого, одержують координати АТ (рисунок 3.9). У методі RFPM, як правило, вимірами є рівні сигналу RSS, що приймається. Точність методу визначається попередньо складеною БД радіо карт. Недоліком методу є необхідність завчасного створення БД радіо карт для всіх БС мережі, а також їх актуалізація при просторових змінах, які можуть вплинути на умови РРХ, і таким чином на рівні сигналів, що приймаються.



Рисунок 3.9 – Метод позиціонування RFPM

Метод UL-TOA (Uplink TOA) був специфікований в 1999 році для мереж GSM [1] і заснований на вимірюванні затримки часів приходу сигналів у каналі «вгору» від АТ до декількох БС за пакетами доступу, або іншими пакетами, що періодично випромінюються АТ. UL-TOA відноситься до категорії Network-based з обчисленнями в мережі та забезпечує точність, яка залежить від числа БС, що беруть участь у вимірах. Для реалізації методу потрібні: а) наявність модуля вимірювання розташування LMU на кожній БС; б) синхронізація годинника на кожній БС, наприклад, за допомогою GPS; в) організація зв'язку АТ з БС, що у вимірах. Первинні далекомірні вимірювання збираються в модулях LMU і відправляються до сервісного центру позиціонування SMLC, де вирішується система:

$$\begin{cases} d_1 = c(t_0 + t_1); \\ d_2 = c(t_0 + t_2); \\ d_3 = c(t_0 + t_3); \end{cases} \quad (3.1)$$

де t_0 – час випромінювання сигналу АТ, t_i – час прийому сигналу БС $_i$, $i = 1, \dots, N$, N – число БС. Час t_0 вузлу SMLC невідомо і (3.1) можна перетворити на вигляд:

$$\begin{cases} d_{21} = c(t_2 - t_1) \\ d_{31} = c(t_3 - t_1) \end{cases} \quad (3.2)$$

де $\Delta d_{ij} = d_i - d_j$ – лінії постійної різниці відстаней – гіперболи (рисунок 3.10, а), перетин яких визначає МЗ АТ; Δd_{ij} можна виразити через відомі координати БС (x_i, y_i) , отже рішення (3.2) із двома невідомими координатами АТ (x, y) стає тривіальним.

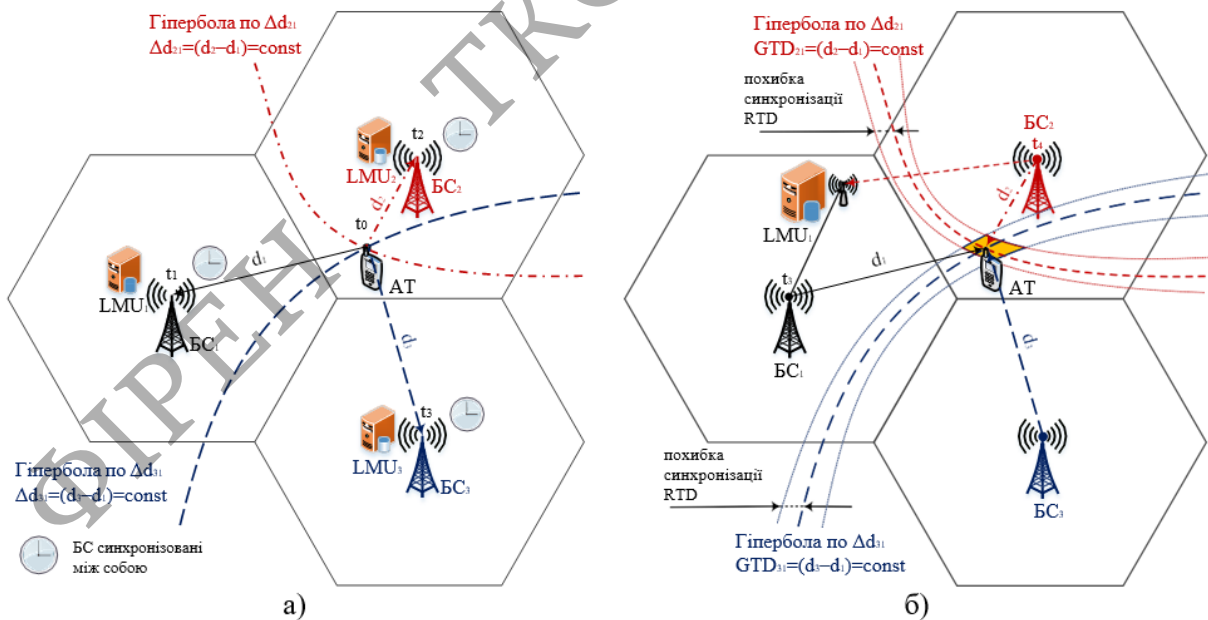


Рисунок 3.10 – Метод позиціонування а) UL-TOA та б) hyperbolic E-OTD

Метод Uplink TDOA був специфікований в 2005 році для мереж UMTS в 7-му релізі [3] і в 2012-му році для мереж LTE-A в 11-му релізі [4]. Даний метод

є аналогом методу UL-TOA у GSM з тією відмінністю, що модулі LMU можуть обмінюватися прийнятими від АТ сигналами і обчислювати їх крос кореляцію, тобто. отримувати вимірювання різницево-далекомірним методом. РДМ вимірювання потім надходять у SMLC для обчислення координат АТ.

Метод OTD (Observed Time Difference) заснований на синхронізації OTD вимірювання та порівняння моментів приходу сигналів від різних БС на АТ. Е-OTD (Enhanced OTD) специфікований для GSM у 1999 році [5] і є розвитком механізму OTD. Розрізняють гіперболічний (РДМ) TDOA/Hyperbolic та круговий (далекомірний) TOA/TDOA/Circular методи позиціонування Е-OTD.

Для Е-OTD введемо поняття. OTD (Observed Time Difference) – різниця часів приходу сигналу, що спостерігається: спостерігається АТ тимчасовий інтервал між прийомом сигналів в DL від двох територіально-розподілених БС; якщо сигнал від БС₁ прийнятий на момент t_1 , а сигнал від БС₂ на момент t_2 , $OTD = t_2 - t_1$; якщо сигнали прийняті одночасно, $OTD = 0$. RTD (Real Time Difference) – неточність тимчасової синхронізації між двома БС; якщо БС₁ передає сигнал на момент t_3 , а БС₂ – на момент t_4 , то $RTD = t_4 - t_3$; якщо БС₁ і БС₂ синхронізовані точно і здійснюють передачу одночасно, то $RTD = 0$; GTD (Geometric Time Difference) – геометрична різниця часів приходу сигналів; якщо відстань між БС₁ та АТ d_1 , а між БС₂ та АТ – d_2 , то різниця часів приходу сигналів від БС₁ та БС₂ на АТ визначається як $GTD = (d_2 - d_1)/c$. Різниця часів приходу OTD, що спостерігається, пов'язана з геометричною різницею GTD і неточністю синхронізації RTD між двома БС співвідношенням $GTD = OTD - RTD$ (рисунок 3.10, б).

Метод Hyperbolic Е-OTD: OTD вимірюється АТ, а RTD вимірюється LMU1 і GTD може бути обчислений: GTD_{21} визначає $\Delta d_{21} = d_2 - d_1$, а $GTD_{31} - \Delta d_{31} = d_3 - d_1$; перетин GTD_{21} і GTD_{31} визначає МЗ АТ. Вимірювання для Е-OTD в DL здійснюється за ширококомовним каналом керування BCCH (Broadcast Control Channel) або каналом синхронізації SCH (Synchronization Channel). Мережі GSM спочатку не передбачали синхронізацію БС, тому для функціонування Е-OTD необхідна наявність як мінімум одного LMU з відомим МЗ для вимірювання параметра RTD розсинхронізації БС. Параметр GTD, що характеризує час поширення сигналу від БС до АТ, виходив відніманням RTD з OTD. При ОК

пристроєм, АТ обчислює свої координати з використанням супутніх даних, що приймаються з мережі: параметра RTD і відомих координат БС. При ОК мережею АТ відправляє параметр OTD, з якого ОК виробляється в SMLC з використанням RTD і відомих координат БС.

Метод Circular E-OTD (рисунок 3.11 а) заснований на вимірюванні часу приходу сигналу в DL від БС до АТ і модуля вимірювання LMU, координати якого точно відомі. Для ВМР на площині необхідно як мінімум три БС; годинник БС не синхронізований; годинник АТ та модуля LMU також не синхронізовано.

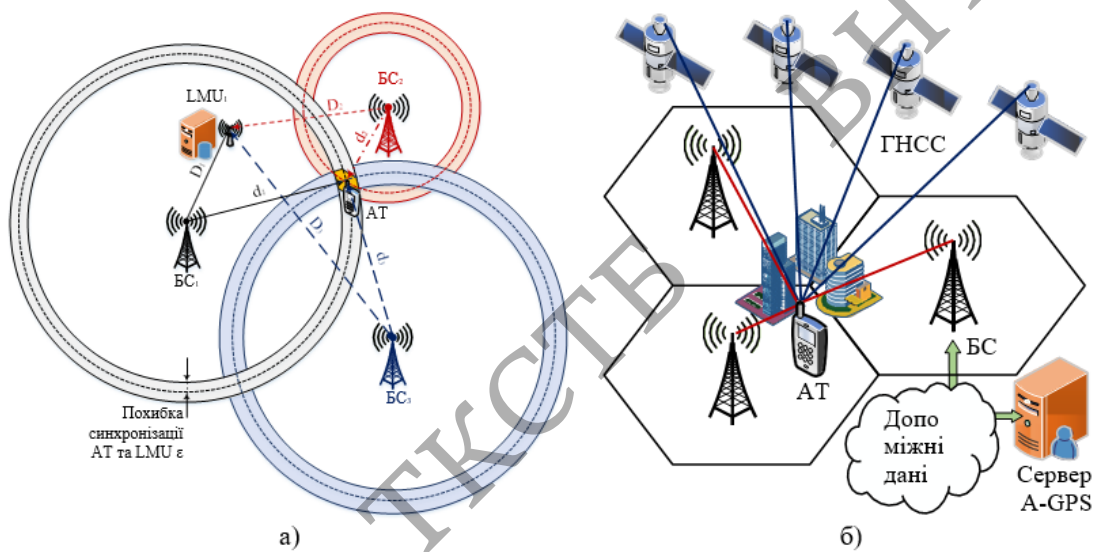


Рисунок 3.11 – Метод позиціонування а) circular E-OTD та б) A-GPS

Допустимо, БС_{*i*} випромінює сигнал у каналі BCCH/SCH. На АТ та LMU реєструється час приходу сигналу від БС_{*i*}: t_i – час приходу сигналу на АТ, T_i – час приходу сигналу на LMU. Нехай ε – розсинхронізація АТ та LMU, d_i – відстань від БС_{*i*} до АТ, D_i – відома мережа відстань від БС_{*i*} до модуля LMU, тоді:

$$d_i - D_i = c(t_i - T_i + \varepsilon) \quad (3.3)$$

При ОК мережею значення t_i , зареєстроване АТ, відправляється LMU. Для позиціонування в 2D ця операція (3.3) повторюється щонайменше тричі:

$$\begin{aligned} d_1 - D_1 &= c(t_1 - T_1 + \varepsilon) \\ \{d_2 - D_2 &= c(t_2 - T_2 + \varepsilon) \\ d_3 - D_3 &= c(t_3 - T_3 + \varepsilon) \end{aligned} \quad (3.4)$$

У системі (3.4) беруть участь три різні БС; відстані d_i можна виразити через шукані координати АТ (x, y) , тому для ВМР АТ необхідно вирішити систему (3.4) з трьома невідомими: координати АТ (x, y) та розсинхронізація ε .

Метод GPS (Global Positioning System) заснований на оцінці часу розповсюдження радіосигналів із супутників. Перевагою GPS є висока точність та глобальне радіо покриття. Недоліки включають: а) необхідність додавання до АТ GPS приймача; б) ВМР з використанням GPS можливе на відкритих просторах в умовах впевненого прийому супутникового сигналу; у будівлях та центрах міст GPS приймачі можуть не працювати; в) повільна ініціалізація GPS приймача. Задіявши МРД, можна підвищити швидкість ініціалізації GPS приймача (рисунок 3.11, б); Метод називається А-GPS (assisted-GPS).

Метод А-GPS передбачає передачу допоміжних даних (ефемериди та часові параметри супутників) на АТ не із супутників, а через канали МРД GSM, UMTS та LTE для підвищення швидкості ініціалізації GPS приймачів. МРД виступає транспортом передачі у АТ допоміжної інформації.

GPS та А-GPS використовують супутникову систему США GPS. В даний час експлуатується і російська система ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система). Принцип ВМР в ГЛОНАСС такий же, як і в GPS. Системи GPS та ГЛОНАСС незалежні, але сумісні, що дозволяє використовувати їх як єдину Глобальну навігаційну супутникову систему (ГНСС).

Метод А-GNSS (Assisted Global Navigation Satellite System) передбачає позиціонування в МРД з використанням ГНСС та специфікований для GSM [9], UMTS [7] та LTE [8]. Суть А-GNSS зводиться до того, позиціонування GNSS прискорюється / уточняється за рахунок попереднього завантаження в ГНСС приймач необхідної супроводжуючої інформації через МРД, завдяки чому при включенні навігації АТ, оснащений супутниковим приймачем, може суттєво скоротити час ВМР за критерієм TTFF. Вимоги до функціонування систем А-GNSS в LTE були специфіковані в 2010 році в 9-му релізі 3GPP TS 36.171 [9].

Крім виграшу у швидкості первинного BMP, A-GNSS надає можливість ОК навіть у разі слабкого прийому супутникового сигналу.

Метод OTDOA-IDPL (Observed TDOA IDPL), як аналог методу E-OTD для GSM, був специфікований для мереж UMTS 1999 [13]. МЗ АТ обчислюється з використанням вимірювань, отриманих за сигналами DL каналу CPICH або мережею SMLC, або самим АТ. Для зниження інтерференції при прийомі первинних вимірювань каналом CPICH у мережах UMTS були організовані інтервали мовчання IDPL (Idle Period Downlink). Відомою проблемою, що обмежує точність позиціонування в мережах UMTS, є так звана проблема ближньої – дальньої зони near-far, яка є наслідком роботи пристроїв МРД з кодовим поділом каналів на одній частоті. Для функціонування гіперболічного методу позиціонування на площині потрібен надійний радіоприйом трьох та більше сигналів від БС. У мережах UMTS, якщо АТ знаходиться в зоні обслуговування даної БС NodeB і розташовується значно ближче до неї, ніж до інших БС, рівень радіосигналу, що обслуговує БС, набагато перевищить рівень сигналів інших БС і, таким чином, ускладнить збір первинних далекомірних (ДМ) вимірів. Функціонування гіперболічного методу для радіомереж UMTS стане можливим тоді, коли АТ, перебуваючи в зоні обслуговування даної БС, зможе з порівняною завадостійкістю (п/в) вести радіоприйом сигналів CPICH не менше ніж від трьох інших БС. Для компенсації проблеми ближньої – далекої зони при BMP у UMTS було запропоновано механізм OTDOA-IDPL, який адаптував гіперболічний метод E-OTD у GSM для мереж WCDMA. Суть OTDOA-IDPL зводиться до додавання періодів мовчання Idle Periods БС у каналі DL, коли при передачі сигналів CPICH даної БС у певні інтервали часу передачі інших БС мають бути припинені; періоди мовчання БС мережі можуть бути організовані синхронно чи випадково. АТ протягом періоду мовчання обслуговуючої БС зможе прийняти сигнали інших БС і, таким чином, зібрати первинні вимірювання. Моделювання показує, що OTDOA-IDPL дозволяє підвищити п/в збору вимірів з 30% (без періодів мовчання) до 70% [10].

Метод OTDOA-PE був запропонований у 4-му релізі [15] і став подальшим удосконаленням гіперболічного методу позиціонування в мережах UMTS за рахунок додавання мережевих модулів/елементів позиціонування PE (Positioning

Element). Модулі PE розташовуються в відмінних від БС NodeB, що обслуговує їх, місцях з відомим мережі МЗ, синхронізовані з нею і обмінюються з нею за допомогою радіоінтерфейсу. Модулі PE випромінюють короткі повідомлення в DL протягом періоду мовчання БЗ. Приймаючи сигнали від PE, АТ здійснюють збирання первинних ДМ вимірювань TOA. Перевагою OTDOA-PE в UMTS в порівнянні з методом E-OTD в мережах GSM є те, що модулі PE синхронізовані з БС NodeB, що їх обслуговує, що звільняє систему позиціонування в МРД від необхідності вимірювання RTD з використанням LMU. Рисунок 3.12 ілюструє сценарій позиціонування E-OTD у GSM чотирма БС та одним LMU; БС не синхронізовані, МЗ БС та окремого модуля LMU-A точно відомі.

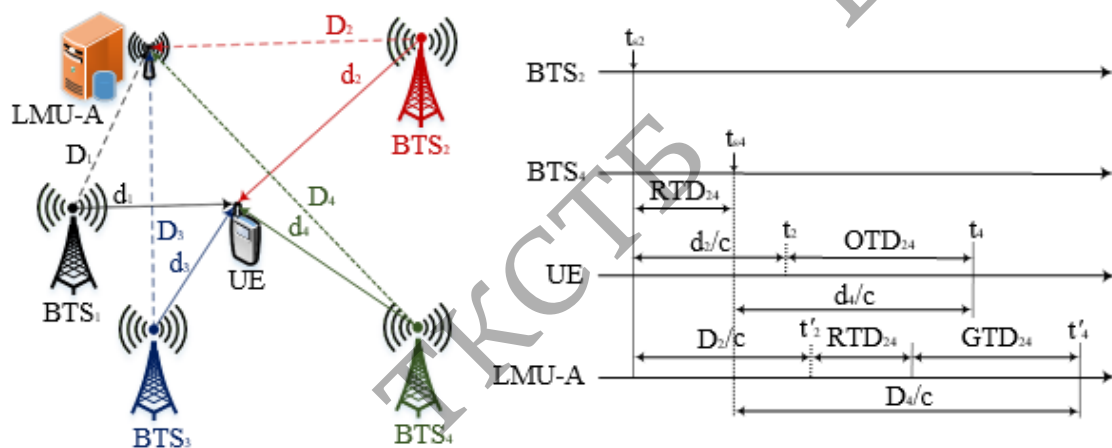


Рисунок 3.12 – Сценарій позиціонування E-OTD

На часовій діаграмі (рисунок 3.12) проілюстровано вимірювання різниці часів приходу сигналів для BTS₂ та BTS₄. Моменти початку передач BTS₂ та BTS₄ не синхронізовані: BTS₂ починає передачу в момент часу t_{s2} , а BTS₄ – у момент часу t_{s4} . Параметр RTD між BTS₂ та BTS₄ дорівнює $RTD_{24} = (t_{s4} - t_{s2})$. Сигнал від BTS₂ приходить на UE в момент t_2 через час d_2/c , де d_2 – відстань між BTS₂ та UE, а c – швидкість світла. Сигнал від BTS₄ приходить на UE в момент t_1 через час d_4/c де d_4 - відстань між BTS₄ і UE; при цьому момент $t_1 = RTD_{24} + d_4 / c$. Далі АТ може оцінити параметр різниці часів приходу сигналів від BTS₂ і BTS₄, що спостерігається, рівний $OTD_{24} = (t_1 - t_2)$. У модулі вимірювання розташування LMU сигнали, передані BTS₂ та BTS₄, будуть прийняті в моменти

часу $t'_2 = D_2/c$, і $t'_4 = \text{RTD}_{24} + D_4/c$ відповідно, де D_2 – відстань між BTS_2 та LMU , D_4 – відстань між BTS_4 та LMU . Таким чином, LMU може оцінити розсинхронізацію BTS_2 та BTS_4 як $\text{RTD}_{24} = (t'_4 - t'_2) - \text{GTD}_{24}$, де $\text{GTD}_{24} = (D_4 - D_2)/c$. Відстані D_4 та D_2 відомі, так як відомі координати БС та LMU-A ; параметр OTD_{24} , виміряний АТ, відправляється в SMLC ; параметр RTD_{24} , виміряний LMU-A , також відправляється в SMLC . Різниця часів приходу сигналу OTD , що спостерігається, пов'язана з геометричною різницею часів приходу сигналу GTD і неточністю синхронізації RTD між двома БС співвідношенням $\text{GTD} = \text{OTD} - \text{RTD}$.

Рисунок 3.13 ілюструє сценарій позиціонування OTDOA-PE у UMTS з однією обслуговуючою БС NodeB та трьома модулями PE .

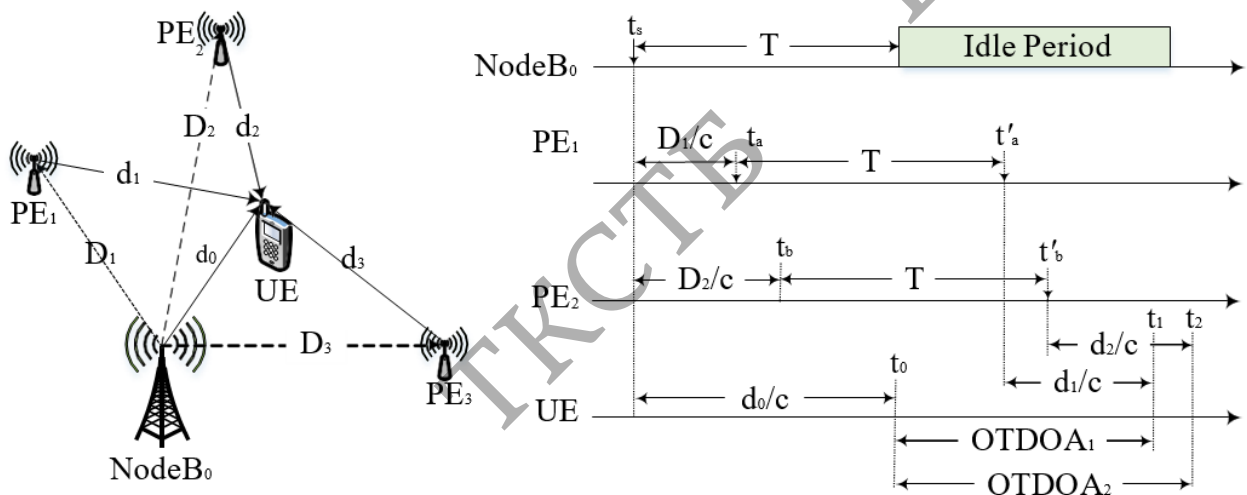


Рисунок 3.13 – Сценарій позиціонування OTDOA-PE

Координати БС NodeB_0 та модулів PE відомі. На часовій діаграмі (рисунок 3.13) проілюстровано вимірювання різниці часів приходу сигналів для БС NodeB_0 та модулів PE_1 та PE_2 . БС NodeB_0 починає передачу сигналу в момент часу t_s ; у моменти часу $t_a = D_1/c$ та $t_b = D_2/c$ переданий NodeB_0 сигнал приймається модулями PE_1 та PE_2 відповідно, де D_1 – відстань між PE_1 та NodeB_0 , D_2 – відстань між PE_2 та NodeB_0 . Через інтервал T після початку передачі БС NodeB_0 модулі PE починають передачу своїх коротких повідомлень: PE_1 – на момент часу t'_a , PE_2 – на момент часу t'_b . Повідомлення від БС NodeB_0 приймається АТ UE у момент часу t_0 , а повідомлення модулів PE_1 та PE_2 у моменти часу t_1 та t_2 відповідно:

$t_0=d_0/c$, де d_0 – відстань між БС NodeB₀ та АТ UE; $t_1=D_1/c+T+d_1/c$, де d_1 – відстань між PE₁ та АТ UE, D_1 – відстань між PE₁ та БС NodeB₀; $t_2=D_2/c+T+d_2/c$, де d_2 – відстань між PE₂ та АТ UE, D_2 – відстань між PE₂ та БС NodeB₀. Таким чином, UE може оцінити параметр $OTDOA_1=(t_1-t_0)$ та $OTDOA_2=(t_2-t_0)$. Оскільки модулі PE синхронізовані з обслуговуючої БС NodeB₀, необхідність обчислення RTD відпадає, а модулі LMU стають зайвими. Передачі модулів PE у розглянутому прикладі здійснюються у момент мовчання Idle Period обслуговуючої базової станції NodeB₀.

Метод OTDOA PRS був специфікований для мереж LTE у 9-му релізі [13]. РДМ вимірювання проводилися в АТ з використанням спеціальних сигналів позиціонування PRS. Дані сигнали мали гнучкість регулювання параметрів потужності передачі, розносу за часом і частотою, а також включали набір шаблонів мовчання для зниження інтерференції. Обчислення координат АТ проводилося в E-SMLC з використанням даних про МЗ БС та їх синхронізацію. Різниця часів приходу сигналу OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival), що спостерігається, пов'язана з геометричною різницею часів приходу сигналу GTD і неточністю синхронізації між БС RTD співвідношенням $OTDOA=RTD+GTD$. Величина OTDOA визначалася як UE, що спостерігається, інтервал між прийомом сигналів в DL від двох eNB, що знаходяться в різних сотах через параметр RSTD:

$$RSTD_{i,1} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}{c} + RTD_{i,1} + \delta_{i,1} \quad (3.5)$$

де $RSTD_{i,1}$ – різниця часів приходу опорних сигналів PRS, виміряних на UE, від БС eNB_i та опорної БС eNB₁; $RTD = T_i - T_1$ – неточність синхронізації між eNB_i та eNB₁; $\delta_{i,1}=\delta_i-\delta_1$ – помилки вимірювання TOA с eNB_i та eNB₁; c – швидкість світла; (x_i, y_i) - Відомі координати eNB_i; (x, y) – невідомі координати UE. Для позиціонування UE на площині потрібно три БС: одна опорна та дві сусідні. Якщо АТ знає МЗ опорної БС eNB₁, МЗ двох сусідніх БС, а також неточності синхронізації між двома БС $RTD=T_i-T_1$, тоді отримуємо два рівняння (3.5) із двома невідомими (x,y) , яке можна вирішити. Для отримання більш точної ОК

бажано мати вимірювання від двох БС. Якби БС LTE були точно синхронізовані, то неточності синхронізації дорівнювали б нулю, а OTDOA звівся б до TDOA. Геометрично кожна різниця TDOA визначає гіперболу, при цьому «ширина» гіперболи визначається помилками вимірювань TDOA δ_i, δ_l .

Метод TBS (Terrestrial Beacon Systems) наземного позиціонування з використанням маяка був специфікований у 13-му релізі 3GPP TS 36.305 [3] і заснований на мережі наземних станцій – маяків, що передають GPS-подібні сигнали позиціонування для доповнення системи ГНСС усередині приміщень. Система TBS, що працює з сигналами PRS та доповнює метод OTDOA, специфікована для LTE у 14-му релізі. Системи маяків іноді називають псевдо супутниками або псевдо літами (pseudolites) і досягають точності кількох сантиметрів.

Використання барометричного висотоміра з'явилося в 13-му релізі LTE 3GPP TS 36.305 [19] для визначення поверху всередині приміщень. Його принцип дії ґрунтується на вимірі тиску атмосфери: зі збільшенням висоти зменшується поточний атмосферний тиск. Для коректного визначення висоти необхідне калібрування приладу. Крім барометра для позиціонування всередині приміщень можуть використовуватися інерційні навігаційні системи (ІНС) та мікро електромеханічні системи (MEMS), включаючи сенсори, що фіксують швидкість та напрямок руху, які дозволяють відстежувати переміщення АТ по відношенню до відомих фіксованих точок.

Гібридний метод позиціонування заснований на комбінації різних технологій ВМР. Найбільш поширеними технологіями для комбінації є методи ГНСС, та ДМ, РДМ та КМ у МРД. В умовах слабкого прийому супутникового сигналу методи ГНСС доповнюються методами ВМР у МРД.

Аналіз еволюції технологій позиціонування [17–20] дозволяє зробити такі висновки: 1) Класифікуючи методи, можна виділити такі групи: а) за принципом сусідства функціонують методи CID+TA/CID+RTT, E-CID; б) за принципом трилатерації функціонують ДМ та РДМ методи Uplink TOA, UTDOA, E-OTD, OTDOA, TBS; в) за принципом аналізу сцен функціонує метод радіо картки RFPM. В окрему групу можна виділити методи: г) супутникової навігації GNSS/GPS та A-GNSS/A-GPS; д) інерційної навігації/барометра; 2) Найбільш

простими для реалізації є методи сусідства; 3) ДМ та РДМ методи вимагають синхронізації мережевої інфраструктури МРД, а також організації додаткових процедур для позиціонування АТ.

3.4 Аналіз точності технологій позиціонування

В [3] представлені досяжні в 67% випадків точності існуючих технологій позиціонування в МРД (таблиця 3.1, рисунок 3.14).

Таблиця 3.1 – Аналіз точності технологій позиціонування в МРД [8]

Метод	МРД	Принцип	Категорія	Точність позиціонування з ймовірністю 67%	
				Горизонтальна, м	Вертикальна, поверх
CID+TA/CID+RTT	2G, 3G, 4G	Сусідство	Мережа	> 100	–
E-CID	3G, 4G	Сусідство	Мережа	~ 50	1 – 3
RFPM	2G, 3G, 4G, WLAN, Bluetooth	Аналіз сцен	Мережа	> 50	1 – 2
Uplink TOA	2G	Трилатерація	Мережа	> 100	–
UTDOA	3G, 4G	Трилатерація	Мережа	< 50	–
E-OTD	2G	Трилатерація	Мережа/пристрій	> 100	–
OTDOA	3G, 4G	Трилатерація	Мережа	< 50	≥ 3
A-GNSS	2G, 3G, 4G	Алітерація	Мережа/пристрій	~ 10	≥ 3
TBS	4G	Трилатерація	Мережа/пристрій	< 50	1 – 2
Барометр	4G	Сенсор	Мережа/пристрій	–	~ 1
Гібридний	2G, 3G, 4G	Гібридний	Мережа/пристрій	< 10	1 – 2

Внаслідок різних масштабів функціонування виділимо фактори, що обмежують точність трилатерації і всередині приміщень. Серед факторів, що обмежують точність трилатерації, виділяють топологію БС як опорних ПП, внутрішньо системні перешкоди, багатопроменеве РРХ (БПРХ), синхронізацію БС.

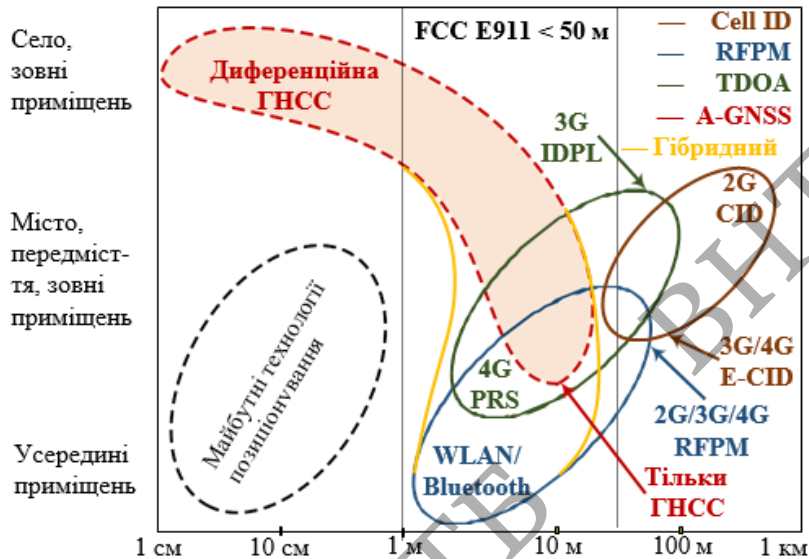


Рисунок 3.14 – Горизонтальна точність позионування у МРД [14]

Топологія опорних пунктів визначається числом БС, необхідних для радіо покриття заданої території. Радіо покриття визначається умовами РРХ, які можуть відрізнитись від умов прямої видимості, що ускладнює точне позионування. Умови РРХ разом з топологією розташування БС та АТ визначають геометричний фактор зниження точності GDOP (Geometric Dilution of Precision). В оптимістичному випадку АТ оточений БС; у моделі квадратних ґрат найбільша точність позионування АТ буде у випадку, якщо АТ розташовується в центрі квадрата, у вершинах якого встановлені БС.

Внутрішньо системні перешкоди є результатом повторного використання частот МРД. Для позионування з високою точністю бажано, щоб АТ знаходився на межі стільника обслуговуючої БС та приймав сигнали кількох сусідніх БС. Однак на межі стільника відношення сигнал/перешкода SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) набагато нижче, ніж якби АТ був би в центрі стільника. Для зниження перешкод у LTE під час передачі PRS

передбачені інтервали тиші. Багатопроменеве поширення радіохвиль (БПРХ) є наслідком функціонування МРД у місті в умовах відсутності прямої видимості NLOS (Non-Line Of Sight) між БС та АТ. Сигнали при БПРХ піддаються відображенню, дифракції та розсіювання. Цей ефект має, як правило, деструктивний вплив на якість радіоприймання, проте ще більш деструктивний вплив багатопроменевої проявляється при вимірі первинних параметрів часу або різниці часів поширення сигналів внаслідок тимчасової дисперсії багатопроменевого радіоканалу (рисунок 3.15).

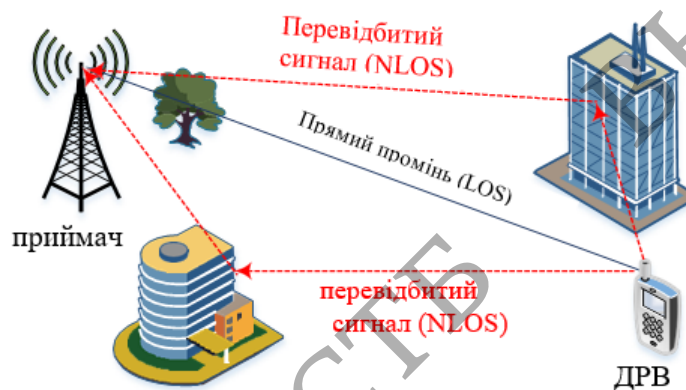


Рисунок 3.15 – Багатопроменеве поширення радіохвиль за умов міста

При БПРХ сигнал, випромінюваний передавачем, внаслідок перевідбиття від перешкод, може приходити приймач з інших, протилежних, напрямків. Крім того, рівень перевідбитих сигналів NLOS може перевищувати прямий сигнал LOS (Line Of Sight), ослаблений проходженням через перешкоди. При обмеженій ширині смуги частот сигналу здатності системи розділяти багатопроменеві компоненти обмежені. Так, при ширині каналу 10 МГц тривалість елементарного символу обмежена 0,1 мкс, що відповідає різниці променів 30 м. В умовах БПРХ слід ідентифікувати та виключати NLOS сигнали, а для обробки залишати лише LOS вимірювання.

Синхронізація опорних пунктів необхідно позиціонування АТ за принципом трилатерації. Далекомірні та різницево-далекомірні методи вимагають синхронізації БС як опорних пунктів, наприклад, для передачі первинних вимірювань на АТ у каналі «вниз» DL для методу OTDOA, або ж для

прийому первинних вимірювань від АТ у каналі «вгору» UL для методу UTDOA. Помилки синхронізації вносять, крім інших, додаткові похибки позиціонування. Зазвичай БС синхронізуються сигналом приймача ГНСС; для різницево-далекомірних систем потрібна синхронізація БС з точністю до 100 нс [4].

Чинники позиціонування всередині приміщень. Основним методом позиціонування всередині приміщень є метод радіо карти з категорії аналізу сцен та зіставлення образів для МРД WLAN, точки доступу яких розгорнуті набагато щільніше порівняно з БС МРД. Точність позиціонування по горизонталі визначається точністю попередньо складеної радіо карти та знаходиться в межах від 1 до 5 м [14]. Вища точність може бути досягнута за рахунок спеціально розставлених радіомаяків із над широкосмуговими сигналами UWB, що потребує додаткової інфраструктури. Вимога FCC 15-9 [10] стимулювали розвиток технологій позиціонування всередині приміщень. Засобами підвищення точності є гетерогенні мережі WLAN, Bluetooth, D2D, TBS, а також засоби ІНС та барометри. Обмеженням технологій позиціонування всередині приміщень є відсутність синхронізації у опорних пунктів прийому – точок доступу WLAN, а також багатопроменевість.

3.5 Висновки до розділу 3

Аналіз еволюції технологій позиціонування в мережах 5G показує вдосконалення методів визначення місцезнаходження з використанням інфраструктури МРД, ускладнення архітектури гетерогенної мережі, процедур збору та обробки первинних вимірювань і дозволяє зробити такі висновки [20].

1) GNSS та A-GNSS. Технології ГНСС будуть відігравати ключову роль у забезпеченні синхронізації опорних пунктів та позиціонуванні, особливо зовні приміщень, де досягається висока точність та повсюдна доступність.

2) Позиціонування усередині приміщень. З еволюцією поколінь масштаб змістився з позиціонування зовні приміщень до ВМР всередині приміщень. Для ВМР всередині приміщень поширення набули методи радіо карти.

3) Гетерогенність. МРД п'ятого та наступних поколінь є гетерогенними за своєю структурою та мають підтримувати різні принципи позиціонування

залежно від сценарію функціонування АТ. Поряд із далекомірними методами трилатерації в МРД 5G поширення отримують кутомірні методи триангуляції за рахунок використання міліметрового діапазону mmWave та систем massive MIMO. Функціонування даних систем планується на додаток до систем А-GNSS у деяких виділених областях позиціонування з підвищеними вимогами до точності. Методи близькості/сусідства відіграватимуть резервну роль для грубого ВМР при непрацездатності інших технологій.

4) Синхронізація. Для ефективного функціонування далекомірних та різницево-далекомірних методів потрібна синхронізація опорних пунктів прийому/передачі сигналів первинних вимірювань. Для цього передбачається використовувати приймачі ГНСС, які забезпечують точність синхронізації до десятків наносекунд. Для синхронізації опорних пунктів усередині приміщень можуть використовуватись методи RTT та інші мережеві протоколи синхронізації.

5) Внутрішньо системні перешкоди. Для підвищення точності ВМР слід знижувати внутрішньо системні перешкоди при передачі та прийомі спеціальних сигналів позиціонування. Спеціальні сигнали PRS були запропоновані у стандарті LTE для методу OTDOA Також був запропонований механізм періодичного мовчання для підвищення відношення SINR при прийомі сигналів PRS, однак із збільшенням щільності опорних мережевих пристроїв гетерогенної мережі можливостей цього механізму може вистачити. Тому в мережах 5G слід передбачити новий механізм планування передачі сигналів PRS і періодів мовчання.

6) Енергоспоживання. Для пристроїв IoT розроблено приймачі ГНСС із відносно низьким енергоспоживанням. Однак деякі пристрої масового між машинного зв'язку mMTC можуть висунути ще більш високі вимоги енергозбереження з менш суворими вимогами до точності позиціонування. Тому доцільно передбачити взаємодоповнюючі методи ВМР.

7) Кооперативне позиціонування пристроїв у гетерогенних мережах повинно мати можливість вирішувати завдання ВМР з використанням як синхронізованих опорних пристроїв, так і з використанням асинхронних мережевих пристроїв, що використовують різні технології позиціонування.

Прикладами кооперативного позиціонування є сценарії обміну даними позиціонування при прямому зв'язку між пристроями D2D, V2V.

8) Позиціонування з обробкою у пристрої та мережі. Більшість технологій позиціонування в МРД засновані на обробці первинних вимірювань та обчисленні координат з використанням виділеного мережевого пристрою, наприклад, SMLC. Цей підхід пояснюється тим, що оператор не хоче розкривати МЗ своїх БС. Однак це обмежує можливості ВМР при обчисленнях у пристрої, коли вони могли б комплексуватися з іншими вимірами D2D.

9) Планування радіомережі у частині місць розміщення опорних мережевих пристроїв – БС – слід проводити, зокрема, з урахуванням вимог ВМР

10) Фактор комерціалізації послуг позиціонування є привабливим для операторів, проте необхідність доповнення мережевої інфраструктури була перешкодою для операторів при впровадженні технологій ВМР. Очікується, що в мережах 5G додаткової інфраструктури для ВМР не потрібно.

Далі розглянемо тенденції використання технологій позиціонування під час побудови та функціонування МРД п'ятого та наступних поколінь.

4 ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5G

4.1 Постановка задачі

Аналіз еволюції технологій визначення місцезнаходження в МРД попередніх поколінь показав, що мережне позиціонування було додатковою послугою, яка розвивалася, в тому числі завдяки вимогам регулятора. Для цифрової екосистеми п'ятого та наступних поколінь мережне позиціонування є науковою проблемою, що має важливе господарське значення для потреб цифрової економіки та галузі зв'язок, що підтверджується вимогами та сценаріями позиціонування з точністю до одного метра, а також широким спектром відповідних геоінформаційних послуг.

З одного боку, стрімкий розвиток мереж 5G, особливо, нова архітектура побудови та функціонування МРД 5G, у тому числі, безпосередній радіозв'язок один з одним D2D у надщільних мережах радіодоступу UDN [4], що планується до використання діапазон МДХ з більш широкими смугами частот [5], а також новий радіоінтерфейс з антенними системами mMIMO [9] та можливістю адаптивного ДУ [7] відкривають як нові можливості для визначення місця розташування, так і нові виклики при вирішенні задач мережевого позиціонування; все це дає підстави переглянути сценарії використання відомих моделей та методів визначення місцезнаходження для підвищення точності оцінки координат мережевих пристроїв у додатках геолокації [12] та позначити технології мережевого позиціонування 5G як новий науковий напрямок досліджень. З іншого боку, використання позиціонування сприяє практичній реалізації нових механізмів встановлення та ведення радіозв'язку на основі даних про місцезнаходження мережевих пристроїв; у зарубіжній літературі цей підхід отримав назву LAC (Location-Aware Communication) [12-17].

Завданням цього розділу є аналіз шляхів підвищення ефективності побудови та функціонування МРД п'ятого та наступних поколінь на основі використання позиціонування мережевих пристроїв.

4.2 Діаграмоутворення на основі позиціонування в мережах 5G

ДУ на основі позиціонування LAB (Location-Aware Beamforming) дозволяє передавальним та приймаючим пристроям компенсувати витрати їх надцільового розподілу в просторі за рахунок формування максимумів ДСА у напрямку передачі/прийому корисного сигналу SOI (Signal of Interest) та мінімуму ДСА у напрямку внутрішньо системних SNOI (Signal of No Interest) для інших пристроїв. Спрямований радіозв'язок дозволяє підвищити коефіцієнти підсилення (КП) у радіолінії, компенсувати згасання ММХ [6, 16] та реалізувати просторове ущільнення одночасних передач SDMA [12, 13]. Просторова обробка сигналів (ПОС) дозволяє адаптивно формувати максимум ДСА передачі/прийому в потрібному напрямку, наприклад, у напрямку обслуговуваного даної БС АТ, і мінімум напрямку інших АТ (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Перехід від ненаправленого до спрямованого радіозв'язку в МРД

Реалізація ДУ в режимі спрямованого радіозв'язку вимагає попереднього визначення кутів/напрямків приходу сигналу AOA/DOA (Angle/ Direction of Arrival) [14]. На сьогоднішній день існують апаратні обмеження, пов'язані з неможливістю підключення високошвидкісного АЦП/ЦАП до кожного елемента АР, кількість яких у БС та АТ може досягати кількох сотень; тому фізично для організації спрямованого радіозв'язку використовуються гібридні схеми адаптивного ДУ, що включають спільну аналогову та цифрову обробку сигналів в ААС [12]. Додатковим варіантом спрямованого радіозв'язку є відомий принцип секторизації, який з точки зору складності реалізації є набагато простішим порівняно з ДУ [16].

Антенні системи (АС) з променями, що перемикаються, є розвитком секторизованих антен і представляють альтернативу спрямованому радіозв'язку з секторами, що перекриваються [7], де передача/прийом здійснюються з використанням попередньо заданих ДСА з кінцевого набору (рисунок 4.2, а) [9].

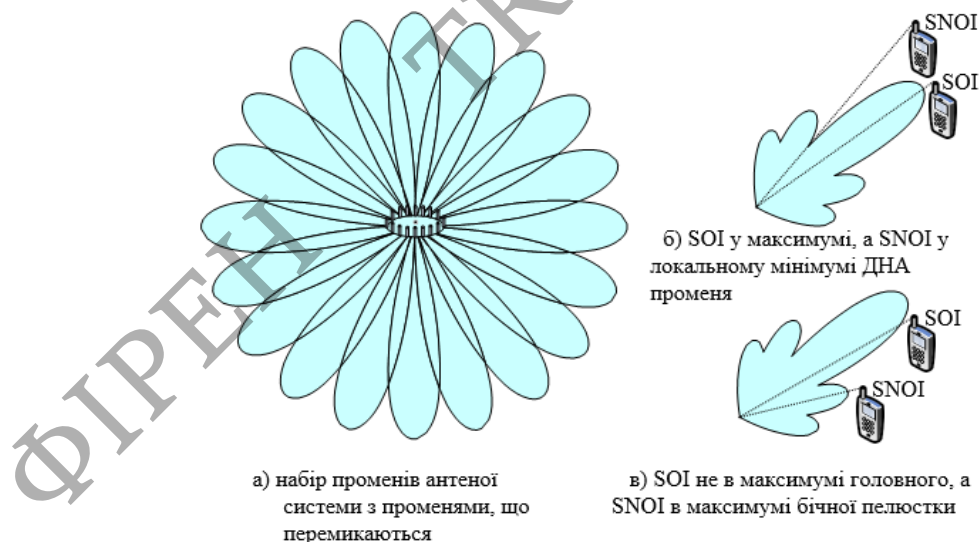


Рисунок 4.2 – Направлений радіозв'язок в антені з променями, що перемикаються

На відміну від адаптивних АС (ААС) з можливостями ситуаційного ДО на основі даних про поточну обстановку в радіоканалі CSI (Channel State Information) і параметрів SOI/SNOI, в АС з променями, що перемикаються, можливі як оптимістичні, так і песимістичні сценарії: в оптимістичному сценарії (рисунок 4.2, б) АТ, що є приймачем корисного сигналу SOI, розташований у максимумі ДСА променя, а інші АТ, що є SNOI, розташовані в деяких локальних мінімумах променя, що перемикається; в песимістичному сценарії (рисунок 4.2, в) АТ, що є приймачем корисного сигналу SOI, зміщений по азимуту від максимуму ДСА променя, що перемикається, а інші АТ, що є SNOI, виявляються в локальних максимумах бічних пелюстків, що перемикається. внутрішньо системні перешкоди. У порівнянні з ААС та ДУ перевагою перемикавання променів є менші накладні витрати на встановлення радіозв'язку на основі CSI, SOI та SNOI [17].

Адаптивне ДУ у МРД 5G дозволяє підвищити дальність за рахунок КП [16-19]; вузько направлені передачі з ДУ дозволяють знизити перешкоди при SDMA [7]; обмежуючим фактором реалізації багатоелементних АР залишається масо габаритний [17–20]. Адаптивне ДУ включає процедури формування та керування променем, протоколи навчання ААС та методи визначення кута/напрямку приходу сигналу АОА/DOA. Формування та керування променем використовує різні конфігурації адаптивних АР, алгоритми вагової обробки може бути реалізовано в аналоговому, цифровому та гібридному вигляді [8]. Особливістю схемотехніки прийом передаючих ААС є наявність поряд з приймальним сегментом аналогічної за складом передавальної підсистеми, а також загальної АР; цифровий передавальний сегмент ААС ідентичний прийомному з точністю до заміни в ньому аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та характеризується інверсією алгоритмів обробки сигналів (рисунок 4.3) [20].

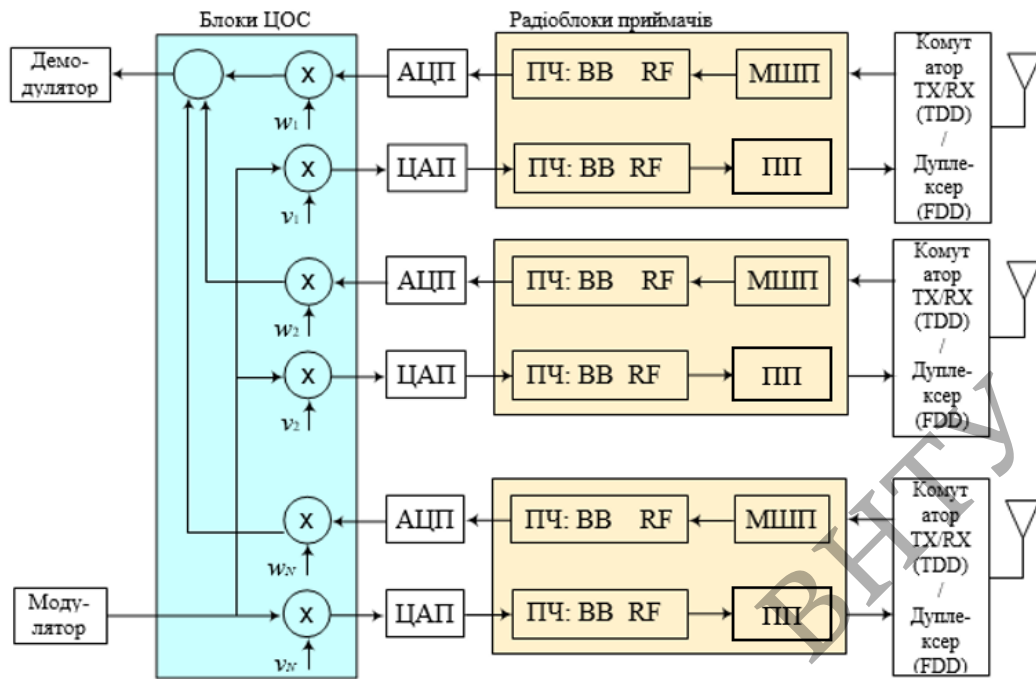


Рисунок 4.3 – Структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням

Приймач ААС включає мало шумливий підсилювач (МШП) разом з вхідним смуговим фільтром і АЦП, після якого сигнал надходить до блоку цифрової обробки сигналів (ЦОС), де проводиться просторова обробка сигналу (ПОС): вагова обробка з коефіцієнтами w_i при прийомі та v_i при передачі, де $i=1, \dots, N$ – індекс елемента АР. Передавач ААС включає ЦАП, підсилювач потужності (ПП) разом з вихідним фільтром сигналу, що посилюється. У приймачеві використовують одноразове апаратне перетворення частоти: при прийомі з радіочастоти RF (Radio Frequency) в основну смугу інформаційних частот BB (Baseband); при передачі з RF до BB. ПОС у структурі радіостанції з ДУ здійснюється в основній смузі частот BB у цифровому вигляді із застосуванням множення на коефіцієнти w_i та v_i . При аналоговому ДУ коефіцієнти застосовуються до аналогового сигналу на радіочастоті RF. Цифрове ДУ є ефективнішим, проте складніше з погляду апаратної реалізації; аналогове ДУ простіше в апаратній реалізації, проте має меншу гнучкість у формуванні та керуванні променем. Гібридний підхід поєднує переваги формування вузьких

променів з використанням аналогових фазообертачів на радіочастоті RF з гнучкістю цифрового ДУ [9].

Для навчання ААС доцільно використовувати широку ДСА для обміну сигналами керування та вузьку ДСА для обміну даними [13]. Протоколи навчання ААС покликані вирішити завдання попереднього вирівнювання променів передавальної та приймальної радіостанцій при спрямованому радіозв'язку [14] (рисунок 4.4).

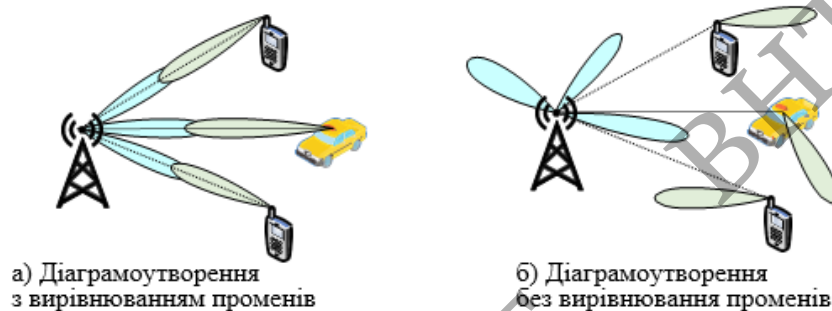


Рисунок 4.4 – Попереднє вирівнювання променів під час діаграмоутворення

Для вирівнювання променів протоколи навчання можуть використовувати періодичний аналіз навчальних послідовностей, наприклад, вузькосмугових пілотних сигналів [19], які передаються та приймаються ненаправлено; у результаті передавач та приймач визначають кутове розташування АОА один одного.

Обробка сигналів виконується в блоці ЦОС просторової обробки AP і включає дві процедури [9–11]: а) визначення кута/направлення приходу (АОА/DOA) сигналу/сигналів; б) формування ДСА. Процедура АОА здійснюється на основі математичної обробки комплексного вектора просторово-часових відліків сигналу с АЦП $x(k)=[x_1(k), \dots, x_N(k)]^T$ та вихідного сигналу $y(k)=w^H(k-1)x(k)$, де $w(k)=[w_1(k), \dots, w_N(k)]^T$ – вектор комплексних вагових коефіцієнтів, k – індекс дискретного часу (рисунок 4.5).

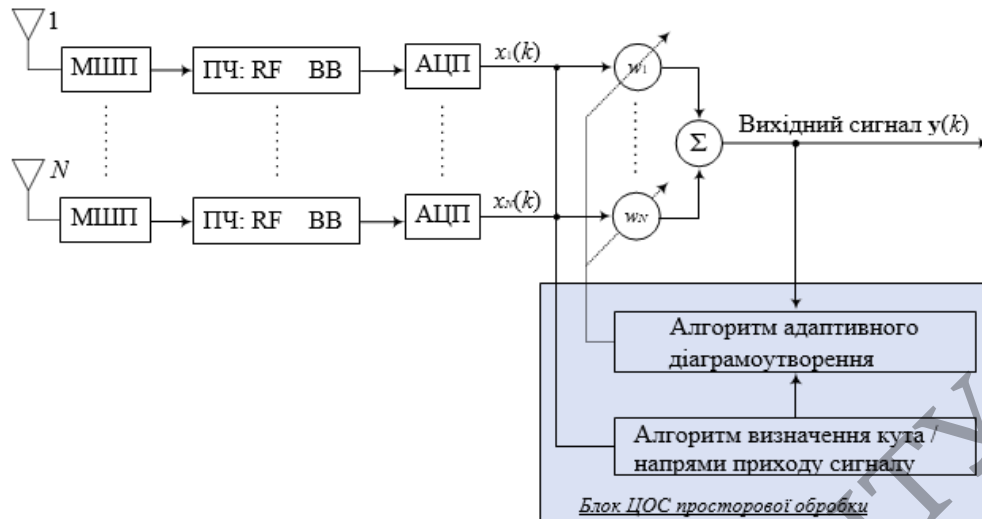


Рисунок 4.5 – Структура приймальної станції із цифровим ДУ

Після визначення АОА, коли передачу та приймачеві відомі відносні кутові розташування один одного, вони можуть сформувати ДСА з максимальним КП у напрямку прийому та передачі корисного сигналу SOI і ДУ здійснюється з вирівнюванням променів. Інформованість про обстановку в радіоканалі CSI може включати також поточні передачі джерел перешкод, на основі яких можна визначити кути приходу сигналів SNOI, що заважають, і сформувати у відповідних напрямках провали ДСА як при роботі на передачу, так і при роботі на прийом. ДУ з провалами у напрямках SNOI та максимумами у напрямку SOI підвищують ймовірність радіоприймання. Далі ефект діаграмоутворення на основі позиціонування у надцільних МРД 5G досліджено для моделей пуассонівського розподілу та гексагональної решітки.

4.3 Організація зв'язку на основі позиціонування у мережах 5G

Розглянемо особливості використання позиціонування при організації радіозв'язку в МРД 5G на основі даних про місцезнаходження (МЗ) LAC (Location Aware Communication) через стек протоколів моделі OSI, у тому числі, для вирішення нових завдань, пов'язаних зі зростанням трафіку та числа пристроїв, підвищення надійності в критично важливих додатках та зниження енергоспоживання та затримки [12]. АТ 5G зможуть визначити своє МЗ на основі технологій ГНСС і наземних систем мережевого позиціонування з точністю до 1 м. RFID, Bluetooth; комбінування різних технологій дозволить підвищити точність ВМР до десятків сантиметрів. Рисунок 4.6 ілюструє сценарії використання позиціонування при організації радіозв'язку.

Введемо такі позначення (рисунок 4.6): x_{AT} – вектор координат абонентського терміналу (АТ); x_{BC} – вектор координат базової станції (БС); n – статистичний показник втрат при розповсюдженні радіохвиль (РРХ); x_i – вектор координат АТ_i, x_j – вектор координат АТ_j, d_c – відстань просторової кореляції; ϕ – кут приходу сигналу від БС до АТ (або АТ до БС); h – канальна матриця МІМО; c – швидкість світла; τ – затримка розповсюдження сигналу; f_d – доплерівський зсув частоти; $x(t)$ – швидкість руху АТ; λ – довжина хвилі; R – радіус зони обслуговування; R_{int} – радіус зони перешкод; x_d – вектор координат станції одержувача; $p(x(t))$ – функція розподілу розташування АТ у час t . По-перше, відношення сигнал шум SNR (Signal to Noise Ratio) зменшується зі збільшенням відстані $d = |x - x_s| - n$ між БС та АТ внаслідок втрат при РРХ, тому БС, знаючи МЗ АТ, може оцінити рівень АТ, що приймається сигналу i , таким чином, спрогнозувати внутрішньо системні перешкоди. Якщо не брати до уваги ефект завмирань, вибір ретранслятора при організації маршрутизації в МРД може бути заснований на відстані до найближчої АТ. По-друге, внаслідок завмирань при РРХ може спостерігатися істотний розкид сигналу, що приймається при переміщенні АТ відносно невелику відстань, тому БС, знаючи МЗ АТ, може

оцінити відстань просторової кореляції за коефіцієнтом $\exp(-|x_i - x_j|/d_c)$. По-третє, мобільність АТ 5G можна спрогнозувати за деякою ознакою МЗ.

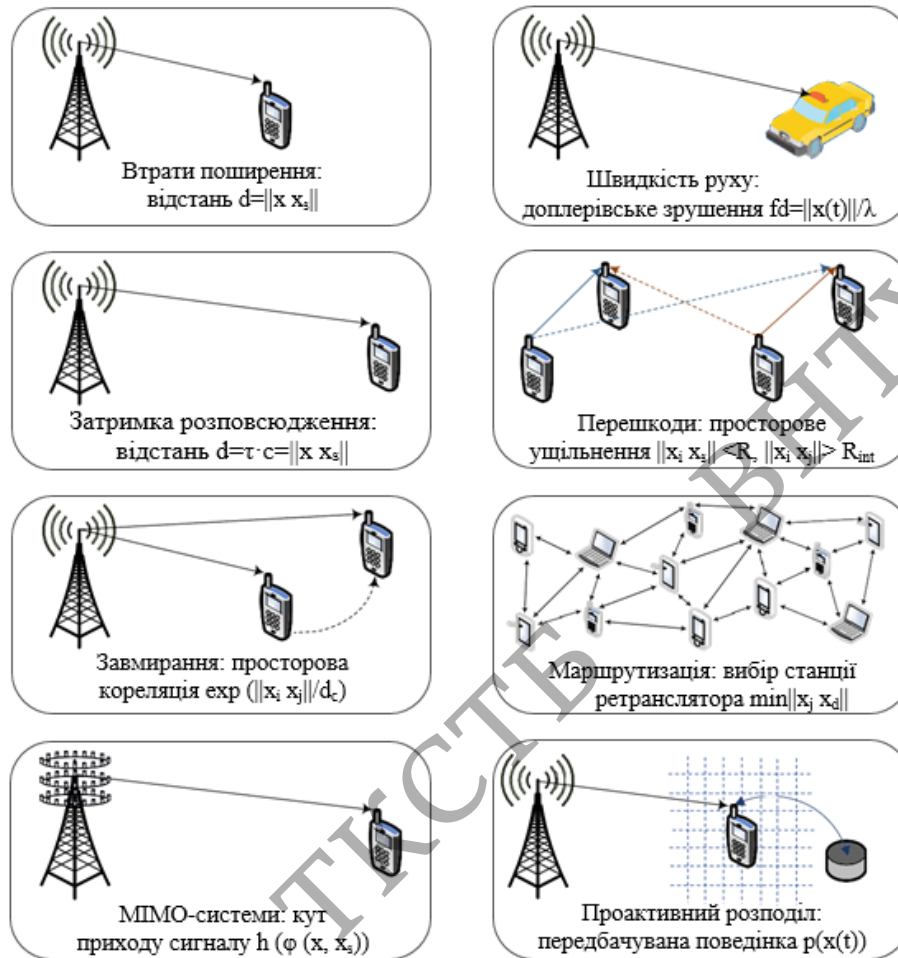


Рисунок 4.6 – Використання позиціонування під час організації радіозв'язку

Традиційно керування радіо ресурсами здійснюється на основі інформації про поточний стан каналу CSI; організація радіозв'язку на основі комбінованих даних LAC/CSI з урахуванням розташування АТ може вдосконалити процедури керування радіо ресурсами та знизити накладні витрати при обміні сигнальними повідомленнями (рисунок 4.7) [1].

Нарешті, дані про МЗ потрібні в багатьох кіберфізичних системах, таких як інтелектуальні транспортні системи (ІТС) та системи керування робото технічними комплексами. Інтерес до організації радіозв'язку на основі

позиціонування інших радіостанцій пов'язаний також із когнітивними радіомережами, у тому числі при використанні ділянок спектру ТБ мовлення, що не використовуються. Використання даних про МЗ потребує не тільки в когнітивних радіомережах, а й у МРД, а також радіомережах, що самоорганізується.

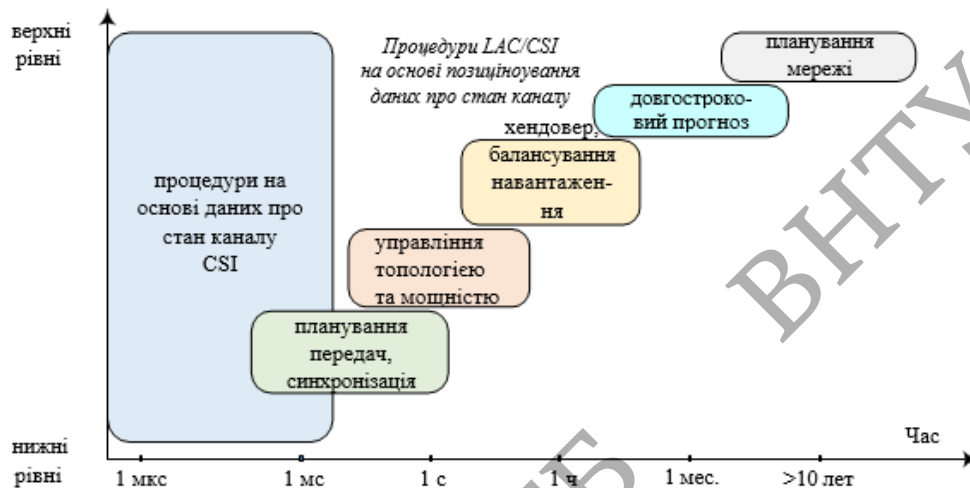


Рисунок 4.7 – Місце процедур LAC/CSI у масштабі часу та стека протоколів

База даних вимірів радіоканалу. Для прогнозування якості радіоканалу в місцях, де виміри раніше не проводилися, використовується механізм передбачення. Для різних середовищ РРХ використовуються різні моделі та параметри, тому передбачення ґрунтується на механізмах машинного навчання, наприклад, Гаусівського процесу GP (Gaussian Process) [2]. Принцип роботи GP зводиться до наступного: АТ, перебуваючи в певному місці (МЗ), відправляє метрику якості каналу CQM (Channel Quality Metric) до бази даних (БД) разом із тимчасовою міткою [t] та географічною прив'язкою [pos] даного МЗ ; після етапу навчання GP може сформулювати оцінку метрики CQM із заданим довірчим інтервалом для інших АТ. Таким чином, результатом роботи GP є апіорний розподіл метрики якості каналу.

Рисунок 4.8 ілюструє принцип збирання вимірювань механізмом GP. Як CQM можуть виступати вимірювання потужності RSS, середньоквадратичне розширення затримки, розкид кутів приходу, ранг каналної матриці МІМО.

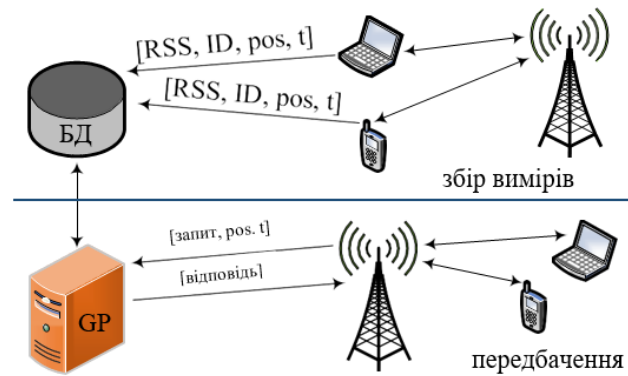


Рисунок 4.8 – Збір вимірювань у БД під час машинного навчання з передбаченням

При РРХ потужність вимірюваного сигналу представлена параметром RSS, який визначається: втратами РРХ у вільному просторі залежно від відстані, повільними (великомасштабними) замираннями внаслідок затінення перешкодами та швидкими (дрібномасштабними) замираннями, викликаними багатопроменевим РРХ. Дрібномасштабні замирання викликають декореляцію потужності сигналу, що приймається, при незначних просторових рознесеннях, тому навіть при досить точній мітці географічної прив'язки поточного МЗ, де зроблено вимірювання миттєвої потужності прийнятого сигналу, достовірно передбачити швидкі замирання в новому місцезнаходженні не представляється. Можливим виявляється прогноз усередненого рівня потужності сигналу $P_{RX}(x_s, x_i)$, де x_s – вектор координат радіостанції відправника; x_i – вектор координат радіостанції одержувача [12]

$$P_{RX}(x_s, x_i) = L_0 - n \cdot \lg(\|x_s - x_i\|) + \Psi(x_s, x_i) \quad (4.1)$$

де n – статистичний показник втрат РРХ; $\Psi(x_s, x_i)$ – складова замирань (в дБ), що визначається місцем розташування станції одержувача щодо станції відправника; L_0 - постійна складова втрат. Зазвичай для повільних замирань

(4.1) робиться припущення про логнормальному розподілу, тобто $\Psi(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i) \sim N(0, \sigma_\Psi^2)$, де σ_Ψ^2 – дисперсія замирань. Залежність МЗ станції одержувача щодо станції відправника від втрат РРХ визначається доданим $n \lg(\|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_i\|)$ в (4.1), а залежність від повільних замирань моделюється просторовою кореляцією; просторова автокореляційна функція між двома розташуваннями i та j визначається як [13]

$$C(x_i, x_j) = E\{\Psi(x_s, x_i)\Psi(x_s, x_j)\} = \sigma_\Psi^2 \cdot \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_i\|}{d_c}\right), \quad (4.2)$$

де d_c – відстань просторової кореляції. У випадку загального передавача, як, наприклад, базової станції в МРД, механізм навчання з передбаченням GP функціонує наступним чином: потужність прийнятого сигналу $P_{RX}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i)$ як функція \mathbf{x}_i із середнім $\mu(\mathbf{x}_i)$ і коваріацією $C(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i)$ гауссівським випадковим процесом. Якщо визначити середнє як $\mu(\mathbf{x}_i) = L_0 - n \lg(\|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_i\|)$, тоді коваріація, буде рівна (4.2). Для навчання GP, припустимо, що $y_i = P_{RX}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i) + n_i$ – зашумлена навчальна вибірка вимірювання потужності сигналу, що приймається радіостанцій i , n_i - гаусовська адитивна випадкова величина з нульовим середнім та дисперсією σ_n^2 . Введемо вектора $\mathbf{X} = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_N^T]^T$, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$, та базу даних (БД) $D = \{\mathbf{X}, \mathbf{y}\}$, тоді спільний розподіл N навчальних вимірів [14]

$$y|\mathbf{X}; \theta \sim N(\mu(\mathbf{X}), \mathbf{K}), \quad (4.3)$$

де $\mu(\mathbf{X}) = [\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_N)]^T$ – вектор середніх значень, а \mathbf{K} – коваріаційна матриця з елементами $[\mathbf{K}]_{ij} = C(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_i) + \sigma_n^2 \delta_{ij}$, де $\delta_{ij} = 1$ при $i=j$ і $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$. Гауссівський розподіл (4.3) залежить від набору сукупності параметрів $\theta = [\sigma_n^2, d_c, L_0, n\sigma_\Psi^2]$, які можуть бути отримані в результаті процесу навчання з використанням БД D шляхом мінімізації негативної логарифмічної функції правдоподібності – $\log(p(\mathbf{y}|\mathbf{X}; \theta))$ за набором параметрів θ ; процес навчання у цьому завершується. Передбачений на основі БД D розподіл потужності

прийнятого сигналу $P_{RX}(x_s, x_*)$ у новому місці x_* підпорядковується гауссівському розподіленню із середнім значенням $\bar{P}_{RX}(x_s, x_*)$ та дисперсією $\Sigma_{RX}(x_s, x_*)$ [15]

$$\begin{aligned}\bar{P}_{RX}(x_s, x_*) &= \mu(x_*) + k_*^T K^{-1}(y - \mu(X)); \\ \Sigma_{RX}(x_s, x_*) &= C(x_s, x_*) + k_*^T K^{-1} k_*,\end{aligned}\quad (4.4)$$

де k_* – вектор крос-коваріацій $C(x_s, x_*)$ між x_* та навчальними вимірами вхідними x_i . Таким чином, GP (4.4) дозволяє передбачати CQM у будь-якому МЗ у будь-який момент часу, що можна використовувати при поточному розподілі радіо ресурсів мережі радіодоступу.

На фізичному рівні дані позиціонування про місцезнаходження можуть бути використані для зниження внутрішньо системних перешкод і накладних витрат сигналізації, а також для синхронізації. Відомим прикладом використання даних про МЗ при організації радіозв'язку є просторовий аналіз спектра в когнітивних радіомережах, де оцінюється потужність передачі в заданій смузі частот первинних ДРВ потенційними вторинними користувачами цієї смуги частот. Радіо карта зайнятості спектру, отримана засобами кооперативної обробки вторинними ДРВ, дозволяє реалізувати просторове ущільнення одночасних передач SDMA, а також сприяє адаптації потужності для зниження рівня внутрішньо системних перешкод первинним ДРВ. У мережах радіодоступу 5G цей механізм може бути використаний для спільної координації рівня внутрішньо системних перешкод у надщільних МРД, а також для організації спрямованого радіозв'язку вузькими променями з використанням просторової обробки сигналів у системах massive MIMO. База даних розташування може бути також використана при адаптації сигнально-кодових конструкцій в радіолініях на основі кооперації даних LAC/CSI. Технічна можливість передбачення розташування $x(t)$, $x(t+1)$, $x(t+2)$,... і занесення їх у БД дозволяє прогнозувати

середню потужність сигналу $\bar{P}_{RX}(t)$, $\bar{P}_{RX}(t+1)$, $\bar{P}_{RX}(t+2)$, ..., на основі якої можна оцінювати в наступні моменти часу пропускну спроможність (ПС) $C(t) = W \log_2(1 + \bar{P}_{RX}(t)/(N_0W))$ де W – ширина смуги, N_0 – спектральна густина потужності шуму. Прогноз пропускну спроможності на основі даних МЗ дозволяє адаптувати швидкість передачі більш ефективно, ніж тільки на основі вибору СКК. Більше того, дані про МЗ дозволяють зменшити затримку адаптації ПС.

Значні можливості LAC відкриває в розрахованих на багато користувачів MU-MIMO (Multi-user MIMO) системах, у яких збільшення ПС можливе за наявності точної та своєчасної інформації про стан каналу на передавальній стороні CSIT (Channel Side Information at the Transmitter). Для сценарію з однією сотою каналу вниз DL дані про МЗ абонента можуть бути використані наступним [16]: БС з антеною системою з M елементів може обслуговувати одночасно не більше ніж M АТ; однак абонентський термінал з антеною системою N елементів може за рахунок просторової обробки сигналів (ПОС) придушити $N-1$ багатопроменевих компонент; таким чином, якщо в результаті РРХ виявляється один компонент прямої видимості LOS і $N-1$ компонент з відсутністю прямої видимості NLOS, АТ при роботі на прийом може використовувати діаграмоутворення BF (Beamforming) для просторової фільтрації каналу з прийомом тільки компоненти LOS, а БС може працювати на передачу в режимі ZF (Zero-Forcing) з даними МЗ. Для сценарію з кількома стільниками та властивими внутрішньосистемними перешкодами дані про МЗ абонента можуть бути використані наступним чином [17]: спільне використання режиму ZF при прийомі та передачі представляє інтерес при зниженому ранзі матриці MIMO каналу (граничним випадком зниження рангу матриці MIMO каналу є сценарій прямої видимості (LOS)). Дані про МЗ АТ можуть бути використані не тільки опосередковано для оцінки метрики CQM, але також і безпосередньо для оцінки величини доплерівського зсуву, пропорційного швидкості руху АТ, кутів приходу сигналу для просторового ущільнення SDMA (Space Division Multiple

Access), затримок приходу сигналу безпосередньо пов'язаних з відстанню між БС та АТ. При кооперативній передачі CoMP (Coordinated MultiPoint) сигналів у МРД дані про МЗ можуть бути використані для уточнення вікна пошуку синхронізації різних територіально-розподілених БС, задіяних у кооперативній передачі; порядок точності синхронізації можна порівняти з точністю оцінки ПМ: похибка ВМР в 30 см відповідає похибки синхронізації в 1 нс.

На каналному рівні дані про МЗ можуть бути використані для ширококомовного розсилання, планування передач та ін. Розглянемо приклад використання даних про МЗ при плануванні передач на каналному рівні в умовах внутрішньо системних перешкод [18]. Допустимо, координати (первинного) передавача корисного сигналу задані вектором x_s , приймача – вектором x_i , іншого (вторинного) передавача, що є джерелом перешкод – вектором x_j ; тоді сеанс радіозв'язку між передавачем з МЗ x_s і приймачем з МЗ x_i може бути запланований одночасно з роботою іншого передавача з МЗ x_j при виконанні:

$$\frac{P_{RX}(x_s, x_i)}{N_0 W + P_{RX}(x_j, x_i)} \gamma \quad (4.5)$$

де γ – порогове відношення сигнал/(шум + перешкоди) SINR. Планування передач відповідно до умови (4.5) можливе на основі даних МЗ x_s , x_i , x_j , за якими можна спрогнозувати параметри $P_{RX}(x_s, x_i)$ і $P_{RX}(x_j, x_i)$. Дані про МЗ також дозволяють прогнозувати рівень внутрішньо системних перешкод, у тому числі в когнітивних радіомережах з первинними та вторинними ДРВ. Використання даних про МЗ на рівні керування доступом у протоколах з роздільним середовищем передачі дозволяє частково вирішити відому проблему «прихованого терміналу» і, таким чином, підвищити показники ПС та затримки передачі. При організації ширококомовної розсилки [19] дані МЗ сприяють формуванню набору радіостанцій одержувачів за ознакою географічного МЗ.

На мережевому рівні дані позиціонування про МЗ можуть бути використані в когнітивних радіомережах для динамічного керування спектром та організації хендовера [20]. Особлива увага приділяється маршрутизації на основі геолокації: дані про МЗ вузла-отримувача d дозволяють станції i вибирати як ретранслятор станцію j із загальної кількості сусідніх вузлів N_i за критерієм мінімальної відстані м/д МЗ x_j та МЗ x_d :

$$j = \arg \min_{j \in N_i} \|x_i - x_d\|. \quad (4.6)$$

На верхніх рівнях дані позиціонування про МЗ можуть бути використані в так званих додатках та послугах геолокації LBS, керуванні траєкторіями БПЛА, запобіганні зіткненням в ІТС [20] (рисунок 4.9).

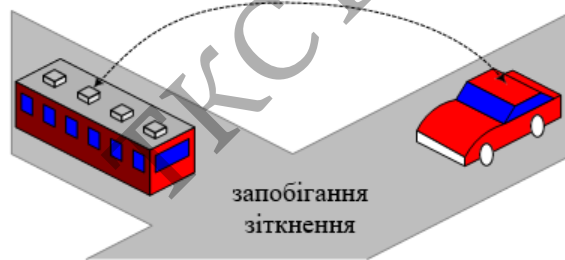


Рисунок 4.9 – Приклад використання даних про МЗ в ІТС

4.4 Тенденції розвитку технологій позиціонування у мережах 5G

Серед основних тенденцій розвитку технологій позиціонування у мережах 5G можна назвати такі. З одного боку, поінформованість про місцезнаходження (location awareness) є засобом підвищення показників функціонування мережі радіодоступу 5G. Огляд переваг організації радіозв'язку з використанням даних про місцезнаходження розглянуто у [18] з погляду кожного рівня моделі OSI. З іншого боку, нові технологічні можливості мереж радіодоступу 5G сприяють

підвищенню показників позиціонування пристроїв і є стимулом до вдосконалення технологій BWP. Серед основних факторів радіоінтерфейсу 5G, які визначають нові можливості для технологій позиціонування, є такі [16, 18].

Міліметровий діапазон хвиль (МДХ) mmWave з частотами від 30 ГГц і вище характеризується високими втратами РРХ, компенсація яких можлива за рахунок організації спрямованого радіозв'язку з вузькими променями під час передачі та прийому. Внаслідок високих втрат при відбиття і слабкої проникаючої здатності радіоканал МДХ з високою ймовірністю буде характеризуватись компонентом прямої видимості LOS, невеликою кількістю дискретних відбитих компонентів NLOS і сильною залежністю від просторової орієнтації передавача і приймача [17]. Дані обставини дозволяють говорити про можливість використання нового фактора позиціонування в МРД – просторово-часової фільтрації багатопроменевих компонентів (БПК) MPC (Multipath Components); на частотах до 3 ГГц в МРЗ попередніх поколінь число відбитих дифузних компонентів набагато вище і їх просторово-тимчасова фільтрація утруднена.

Широкі смуги частот у високочастотному діапазоні МДХ для МРД 5G можуть значно перевищувати 20 МГц (LTE) і 100 МГц (LTE-A) і з агрегацією смуг досягати декількох сотень МГц. Ефект широкої смуги частот для позиціонування полягає в наступному: а) зменшення затримки передачі внаслідок коротших елементарних часових інтервалів; б) збільшення роздільної здатності далекомірних методів, заснованих на вимірі TOA/TDOA. Смуги частот в 100 МГц дозволяють досягти роздільної здатності в кілька см, а також сприяють розрізненню дискретних БПК, якщо різниця їх часів приходу більша за величину, зворотну ширину смуги частот; так, при ширині смуги 300 МГц можуть бути розділені БПК з різницею ходу променів в 1 м. Відстань між транспортними засобами та іншими об'єктами дорожнього руху зазвичай перевищують 1 м, тому мережне позиціонування 5G може бути реалізовано в ІТС, у тому числі для запобігання зіткненням.

Рисунок 4.10 ілюструє сценарії позиціонування з використанням massive MIMO, обробки багатопробеневиких компонентів (БПК), надщільних МРД та кооперативної обробки при прямому зв'язку між пристроями D2D [11].

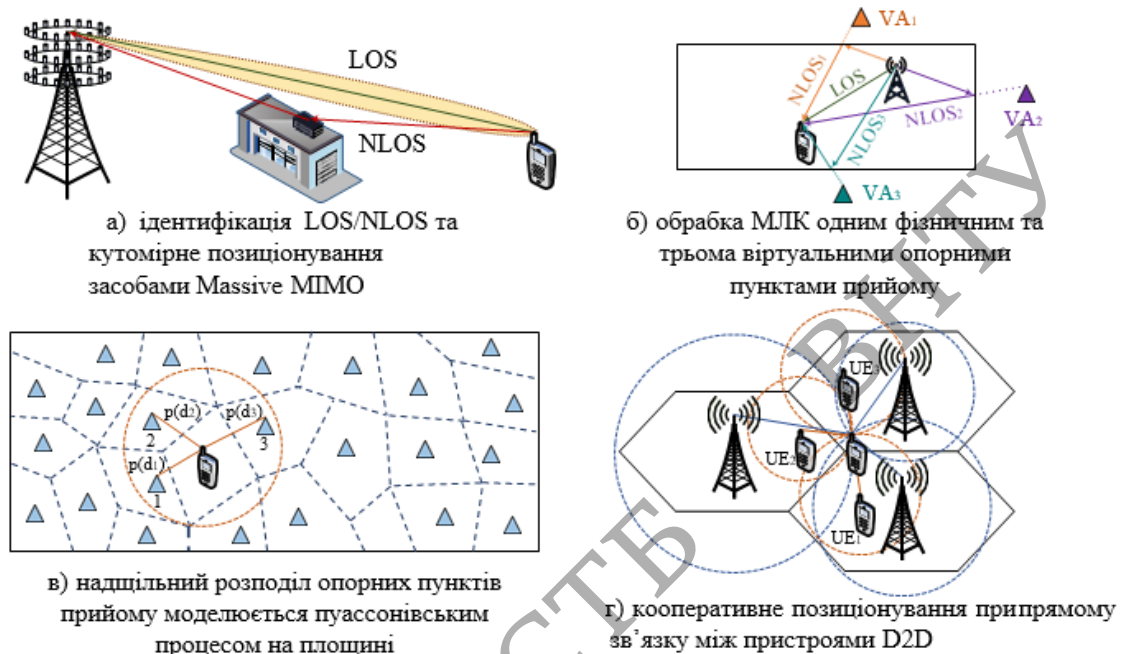


Рисунок 4.10 – Структури методів позиціонування у МРД 5G

Системи Massive MIMO є основою вдосконалення радіоінтерфейсу 5G. Використання діапазону МДХ з безліччю антенних елементів, що утворюють систему Massive MIMO у пристроях, дозволяють вести передачу та прийом в умовах прямої видимості LOS з використанням вузько направлених променів ДСА. Дослідження меж точності позиціонування та орієнтації з використанням систем Massive MIMO представлено в [13–17], де доводиться можливість досягнення точності ВМР не більше одного метра. Вузькі промені адаптивно формованих ДСА підвищують енергетику радіолінії і, таким чином, точність оцінки затримки в далекомірних та різницево-далекомірних методах за рахунок збільшення SNR. Для практичної реалізації адаптивного ДУ потрібне попереднє вирівнювання променів. Також ДУ дозволяє використовувати кутомірні методи (КМ) при мережевому позиціонуванні в МРД 5G при вимірюванні сигналів від

АТ у висхідному пілотному каналі. При вимірі напрямків/кутів приходу сигналів БС вузькі промені ДСА можуть бути використані також для фільтрації сигналів прямої видимості LOS і придушення відбитих сигналів, отриманих в умовах відсутності прямої видимості NLOS (рисунок 4.10 а). Для визначення напрямків/кутів приходу сигналів можуть використовуватися відомі алгоритми MUSIC (Multiple Signal Classification) та ESPRIT (Estimating Signal Parameters via Rotational Invariance Technique). Важливим завданням при позиціонуванні КМ в умовах NLOS є ідентифікація джерела радіовипромінювання (ДРВ), що позиціонується, та його асоціація з прийнятим обробленим багатопроменевим перевідбитим сигналом.

Багатопроменеві компоненти (БПК), ідентифіковані за імпульсною характеристикою радіоканалу, сприяють підвищенню точності ВМР при ретельному відстежуванні та прогнозуванні розташування відбивачів [14–18]. Для реалізації просторової фільтрації БПК повинні використовуватись широкопasmові сигнали. При позиціонуванні всередині приміщень АТ може приймати як сигнал за умов LOS від фізичної опорної БС, і відбиті від стін копії переданого БС сигналу за умов NLOS; за відображеними сигналами та місцезнаходженням опорної БС можна відновити МЗ віртуальних опорних станцій VA (Virtual Anchor): VA1, VA2, VA3, що є джерелами відбитих сигналів NLOS1, NLOS2, NLOS3; спільна далекомірно-кутомірна обробка компонентів LOS та NLOS дозволяє оцінити МЗ АТ (рисунок 4.10, б). Ситуаційна обробка БПК може використовуватися також для одночасної локалізації та побудови карти SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Важливим завданням при позиціонуванні з використанням БПК в умовах NLOS є класифікація прийнятих сигналів за кількістю відбитків та переображення.

Надщільні радіомережі (UDN) є відмінною рисою гетерогенних МРД 5G. У надщільних МРД пристрої можуть підключатися до кількох опорних БС за критеріями підвищення ПС, зменшення енергоспоживання, зниження внутрішньо системних перешкод та ін. По-перше, крім первинних вимірів, на

точність збору яких впливає ширина смуги сигналу, точність оцінки МЗ визначається також і геометричним фактором розподілу опорних БС, що беруть участь у сеансі ВМР; при більш щільному розподілі опорних станцій для сеансу позиціонування можна вибрати БС з найбільш вдалим розташуванням за критерієм GDOP; більше, сценарій UDN підвищує точність ВМР відомими методами сусідства, типу CID. По-друге, надщільний територіальний та просторовий розподіл БС підвищує ймовірність умов прямої видимості LOS між опорними станціями та об'єктом ВМР; пряма видимість, у свою чергу, крім далекомірних вимірів сприяють використанню кутимірних вимірювань з використанням вузько спрямованих променів адаптивних ДСА [15]. По-третє, для сценарію UDN територіальний розподіл опорних БС на площині може бути змодельований Пуассонівським процесом PPP (Poisson Point Process), на основі якого при заданій щільності БС можна спрогнозувати функції щільності ймовірності відстаней $p(d_1)$, $p(d_2)$, $p(d_3)$ між АТ та найближчими k -сусідами БС i , таким чином, на їх основі методом трилатерації оцінити МЗ АТ (рисунок 4.10, в). Цей підхід не вимагає безпосереднього збору та обробки далекомірних вимірювань; точність зазвичай вища, ніж у методів сусідства типу CID [11]. Важливим завданням при далекомірному та різницево-далекомірному позиціонуванні в UDN є синхронізація опорних БС, а також необхідність координації безлічі БС при організації періодів мовчання (як IPDL) для зниження внутрішньо системних перешкод при зборі первинних вимірювань.

Прямий зв'язок між пристроями D2D підтримується в МРД стандарті IEEE 802.11p та в 14-му релізі LTE. У МРД 5G D2D дозволяє забезпечити безпосередній високошвидкісний обмін із наднизькою затримкою між рухомими пристроями за умов їх надщільного розподілу. Режим D2D покращує радіо покриття та просторове ущільнення одночасних передач, а також дозволяє реалізувати кооперативне позиціонування [14, 19] за рахунок спільного збору, обміну та обробки вимірювань для обчислення МЗ: різні пристрої виробляють збір різних первинних вимірювань (далекомірних, у доплерівських зрушень) не

тільки щодо опорних пунктів з відомим місцезнаходженням, але також і щодо рухомих пристроїв UE1, UE2, UE3 (рисунок 4.10, г). Комплексування різнорідних вимірів від різних джерел підвищує як зону, так і точність позиціонування. Також кооперативне позиціонування дозволяє вирішувати завдання відносного ВМР за відсутності опорних ПП; відносно позиціонування запитання у завданнях керування рухом, у тому числі, для запобігання зіткненням. Важливим завданням при кооперативному позиціонуванні є облік неточності та/або невідомості розташування самих рухомих пристроїв у режимі D2D. Комбінування різнорідних вимірювань з використанням технологій позиціонування 3GPP, і сторонніх, таких як ГНСС, або інерційні сенсори, дозволяє підвищити точність ВМР. Далі розглянемо фактори точності позиціонування МРД 5G.

Модель радіоканалу має важливе значення для досліджень та розробок моделей та методів позиціонування в МРД 5G і має включати просторовий (геометричний) вимір. Моделей, які використовують виключно статистичний опис процесів РРХ, виявляється недостатньо. Існує дві категорії моделей радіоканалу, що включають просторовий вимір: а) моделі трасування променів; б) просторово-статистичні моделі, що враховують геометрію радіолінії GSCM (Geometry-based Stochastic Channel Model). Моделі трасування променів використовуються тоді, коли заздалегідь відома 3D-сторінкова цифрова модель місцевості (ЦММ). Недоліком мережевого позиціонування з використанням трасування променів є залежність точності ВМР від просторового дозволу ЦММ, яка може виявитися недостатньою для визначення місцезнаходження. Моделі GSCM можна розглядати як спрощену версію моделей трасування променів з використанням віртуальної ЦММ/карти, де перешкоди розподілені випадково. Подібний підхід дозволяє розглядати завдання позиціонування з урахуванням геометричного розташування перешкод та їх впливу на точність ВМР. Наприклад, для сценарію V2V (vehicle-to-vehicle) віртуальна карта може являти собою геометричну модель перехресть, будівель та інших типових об'єктів

міського дорожнього середовища, які дозволяють моделювати умови відображення. У [16] представлена модель GSCM для сценарію автомагістралі, в якій відображені БПК поділяються на: а) статичні/стаціонарні дискретні; б) динамічні/рухливі дискретні; в) дифузні. Стаціонарні дискретні БПК є основними для абсолютного позиціонування; компоненти LOS між рухомими пристроями разом із динамічними дискретними БПК використовуються для відносного позиціонування; дифузні БПК є перешкодами для позиціонування [14]. Результати вимірів в [19] показують, що в умовах міста радіоканал V2V при досить широкій смузі може дозволяти близько 10 - 20 БПК, які можуть бути використані при позиціонуванні; час спостереження даних БПК варіюється на інтервалі від кількох одиниць до кількох сотень метрів; на автомагістралях при зближенні двох пристроїв половина БПК спостерігалася на інтервалі більше 50 м. У порівнянні з моделями на частотах до 3 ГГц, моделі радіоканалу МДХ повинні враховувати антенні решітки (АР) на передавальній та приймальній сторонах, які на практиці можуть бути реалізовані за гібридною аналого-цифровою схемою керування амплітудами та фазами в АР [17].

Метрики та межі точності. Для заданої моделі радіоканалу, структури прийом передаючого пристрою та форми радіосигналу, що використовується, в радіозв'язку та позиціонуванні використовуються різні метрики. У позиціонуванні загальноприйнятої метрикою оцінки меж точності залежно від похибки первинних далекомірних та/або кутомірних вимірювань є інформаційна матриця Фішера FIM (Fisher Information Matrix) та пов'язана з нею нижня межа Крамер-Рао (НКГР) CRLB (Cramer-Rao Lower Bound).

При позиціонуванні на основі сигналів з широкою смугою частот, кутомірні вимірювання АОА, зібрані антеною решіткою, можуть не дати більшого порівняно з далекомірними вимірюваннями ТОА на кожному елементі АР за окремим виграшом у точності ВМР, хоча роздільний збір вимірювань ТОА та АОА залишається найбільш прагматичним підходом, що практично реалізується. У динамічних сценаріях позиціонування рухомих пристроїв

додаткові вимірювання доплерівського зсуву частоти при належній обробці можуть підвищити точність ВМР за метрикою інформаційної матриці Фішера FIM [17]. Для МРД 5G аналіз метрик та меж точності позиціонування був виконаний у [13–14] і довів можливість однопозиційного кутомірно-далекомірного позиціонування: сценарій кооперативного позиціонування у надщільному МРД був досліджений у [11]; ВМР та орієнтація пристрою за рахунок спрямованих променів від однієї опорної БС було розглянуто в [18–14]; аналіз можливостей позиціонування з використанням діаграмоутворення та просторової обробки сигналів МІМО виконаний у [11] – [14]. У [16] обґрунтовано необхідність стеження за променем при позиціонуванні КМ, зокрема, показано, що збільшення числа елементів лінійної АР та відповідне зменшення ширини променя ДСА підвищує точність позиціонування тоді, коли промені передавача та приймача зорієнтовані один в одного (4.4 а); однак без попереднього вирівнювання променів (рисунок 4.5 б) точність ВМР швидко знижується. [14] був запропонований метод позиціонування всередині приміщень на основі одного опорного вузла з використанням БПК. В [14] була виконана оцінка точності позиціонування при обробці як LOS, так і NLOS вимірювань, яка показала практичну реалізованість ВМР при обмеженій кількості опорних вузлів. Позиціонування з використанням фільтра Калмана, а також питання синхронізації у надщільних МРД 5G досліджувалися у [15–18].

4.5 Висновки до розділу 4

Аналіз еволюції технологій позиціонування [17–20] показав, що: з одного боку, разом із удосконаленням радіоінтерфейсу 5G відкриваються нові можливості для підвищення точності позиціонування; з іншого боку, можливості ВМР стають потрібними для ефективної побудови та функціонування МРД. Удосконалення методів мережного позиціонування тягне за собою ускладнення архітектури гетерогенної мережі, а також процедур обміну даними для збирання

та обробки первинних вимірів. Використання даних про МЗ сприяє реалізації не тільки нових геоінформаційних послуг, але також нових механізмів встановлення та ведення радіозв'язку на основі позиціонування LAC. У завданнях керування радіо ресурсами використання даних про МЗ дозволяє актуалізувати стан каналу CSI. Організація радіозв'язку на основі комбінованих даних LAC/CSI з урахуванням МЗ дозволяє вдосконалити процедури керування радіо ресурсами та знизити накладні витрати під час обміну сигнальними повідомленнями. На верхніх рівнях дані МЗ можуть бути використані в додатках і послугах геолокації LBS.

На фізичному рівні дані про МЗ можуть бути використані для зниження внутрішньо системних перешкод і накладних витрат сигналізації, а також для синхронізації. У МРД механізм LAC можна використовувати для координації внутрішньо системних перешкод в умовах UDN, а також для організації спрямованого радіозв'язку вузькими променями з використанням ПОС у системах massive MIMO.

На каналному рівні дані МЗ можуть бути використані для широкомовної розсилки, планування передач як засіб оцінки радіоканалу, так і безпосередньо, у тому числі при плануванні передач на каналному рівні в умовах перешкод. У протоколах з середовищем використання даних про МЗ дозволяє частково вирішити відому проблему «прихованого терміналу».

На мережевому рівні дані МЗ можуть бути використані в когнітивних радіомережах для динамічного керування спектром, організації хендовера, маршрутизації на основі геолокації. Серед основних стимулів удосконалення технологій мережевого позиціонування 5G можна виділити такі фактори: а) ширші смуги частот у більш високочастотному діапазоні МДХ; б) високоточні кутомірні вимірювання системами Massive MIMO; в) просторово-тимчасова фільтрація багатопроменевих компонентів (БПК); г) прямий зв'язок між пристроями D2D; е) надщільні мережі UDN; ж) комбінування різнорідних вимірів.

Ефект широкої смуги частот для позиціонування полягає у зменшенні затримки передачі внаслідок більш коротких елементарних часових інтервалів та збільшенні роздільної здатності далекомірних методів TOA/TDOA; смуги частот в 100 МГц дозволяють досягти роздільної здатності в кілька см, а також сприяють розрізненню дискретних БПК, якщо різниця їх часу приходу більша за величину, зворотної ширини смуги частот. Системи Massive MIMO дозволяють вести передачу/прийом в умовах прямої видимості LOS з використанням вузько направлених променів та використовувати кутомірні методи. При вимірюванні напрямків/кутів приходу вузькі промені ДСА можуть бути використані для просторової фільтрації сигналів LOS та тиску відбитих сигналів, отриманих в умовах NLOS.

Багатопробеневі компоненти (БПК), ідентифіковані за імпульсною характеристикою радіоканалу, сприяють підвищенню точності ВМР при ретельному відстежуванні та прогнозуванні МЗ відбивачів. Надщільні радіомережі (UDN) при більш щільному розподілі опорних станцій для позиціонування дозволяють вибирати БС з найбільш вдалим розташуванням за критерієм геометричного фактора зниження точності GDOP. Також надщільний територіальний та просторовий розподіл підвищує ймовірність умов LOS між опорними станціями та об'єктом ВМР; пряма видимість, у свою чергу, сприяє використанню КМ. Прямий зв'язок між пристроями D2D дозволяє реалізувати кооперативне позиціонування за рахунок спільного збору, обміну та обробки вимірювань для обчислення МЗ. Комплексування різнорідних вимірювань від різних джерел підвищує зону охоплення та точність ВМР.

Таким чином, позиціонування в 5G можливе за допомогою меншого числа опорних пунктів, у тому числі однопозиційного підходу. Також дані позиціонування можна використовувати для ініціалізації, орієнтації та калібрування інерційних підсистем та сенсорів рухомих пристроїв 5G [16].

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в таблиці 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	57	55	60
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		57,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти,

закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ШБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	65	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	62,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [30]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 57,3, k_{\text{теор}} = 62,3$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 57,3 + 0,4 \cdot 62,33 = 59,33 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G», даний рівень становить 59,33 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [30]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 12756,00 \cdot 42 / 21 = 25512,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
1. Керівник проекту	12756,00	607,43	42	25512,00
2. Ст. науковий співробітник	11055,00	526,43	34	17898,57
3. Науковий співробітник	10700,00	509,52	21	10700,00
4. Інженер-конструктор радіоелектронних систем	10570,00	503,33	32	16106,67

5. Інженер-програміст програмно-конфігурованої мережі	11800,00	561,90	15	8428,57
6. Технік	6850,00	326,19	21	6850,00
Всього				85495,81

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=2379,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (таблиці Б.2, додаток Б) [30];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2379,00 \cdot 1,10 \cdot 1,5 / (21 \cdot 8) = 23,37 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 23,37 \cdot 10,00 = 233,65 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
1. Встановлення допоміжного обладнання	10,00	2	1,10	23,37	233,65
2. Інсталяція програмного забезпечення	6,50	4	1,50	31,86	207,10
3. Встановлення модулів	15,00	5	1,70	36,11	541,65
4. Монтаж імітаторів мереж	11,00	4	1,50	31,86	350,48
5. Формування бази даних результатів вимірювань	7,50	3	1,35	28,68	215,07
6. Підготовка приміщення	8,00	2	1,10	23,37	186,92
Всього					1734,86

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$З_{\text{дод}} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$З_{\text{дод}} = (85495,81 + 1734,86) \cdot 10 / 100\% = 8723,07 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (85495,81 + 1734,86 + 8723,07) \cdot 22 / 100\% = 21109,82 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$M_1 = 4,00 \cdot 96,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 422,40$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, Грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4	96,00	4,00	0,000	0,00	422,40
Папір для записів А5	56,00	4,00	0,000	0,00	246,40
Диск оптичний (CD-R)	13,40	4,00	0,000	0,00	58,96
Органайзер офісний EGO-100BIC	146,00	4,00	0,000	0,00	642,40
Канцелярське приладдя	211,00	4,00	0,000	0,00	928,40
Картридж змінний Canon 216AF	802,00	2,00	0,000	0,00	1764,40
FLASH-пам'ять Best Gold 64G	465,00	1,00	0,000	0,00	511,50
Всього					4574,46

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_6 = 1 \cdot 3120,00 \cdot 1,1 = 3432,00$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Програмно-конфігуруєма мережа SDN segment	1	3120,00	3432,00
Контроллер Controller HD16qj	1	2620,00	2882,00
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	1	2680,00	2948,00
Маршрутизатор XA16	1	1860,00	2046,00
Імітатор магістральної мережі FIREN2	1	4690,00	5159,00
Всього			16467,00

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{снец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{np.i}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;
 $C_{np.i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$V_{спец} = 18000,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 19980,00$ грн.

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Термінал (імітатор навантаження)	1	18000,00	19980,00
Термінал (імітатор приймача)	1	18000,00	19980,00
Генератор завод BASF53-12ZI	1	8120,00	9013,20
Всього			48973,20

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$V_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{npг.i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{инрг}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{прз.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{прз} = 8120,00 \cdot 1 \cdot 1,2 = 9744,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Windows	1	8120,00	9744,00
Microsoft Office	1	5430,00	6516,00
Пакет обробки даних	1	17450,00	20940,00
Програмне забезпечення підтримки мереж	1	14730,00	17676,00
Всього			54876,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (25400,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1411,11 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	25400,00	3	2	1411,11
Метрологічний комплекс МСХ13-А54	8760,00	5	2	292,00
Програмне забезпечення сервера	9200,00	2	2	766,67
Місце оператора спеціалізоване	8600,00	7	2	204,76
Офісна оргтехніка	10560,00	4	2	440,00
Дослідницька лабораторія	260000,00	25	2	1733,33
Всього				4847,87

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot \zeta_e \cdot K_{внi}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 4,10$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,65 \cdot 320,0 \cdot 4,10 \cdot 0,95 / 0,97 = 852,80 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	0,65	320,0	852,80
Метрологічний комплекс МСХ13-А54	0,15	110,0	67,65
Місце оператора спеціалізоване	0,15	320,0	196,80
Офісна оргтехніка	0,84	100,0	344,40
Генератор завод BASF53-12ZI	0,03	50,0	6,56
Програмно-конфігуруєма мережа SDN 5G segment	0,01	50,0	2,05
Контроллер Controller HD16qj	0,02	100,0	8,20
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	0,04	100,0	14,35
Маршрутизатор ХА16	0,01	50,0	2,05
Термінали навантаження	0,82	100,0	336,20
Всього			1831,06

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cv} = 20\%$.

$$V_{cv} = (85495,81 + 1734,86) \cdot 20 / 100\% = 17446,13 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 30\%$.

$$V_{cn} = (85495,81 + 1734,86) \cdot 30 / 100\% = 26169,20 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийнемо $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (85495,81 + 1734,86) \cdot 50 / 100\% = 43615,34 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з керуванням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийнемо $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (85495,81 + 1734,86) \cdot 100 / 100\% = 87230,67 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}} + Z_n + M + K_e + B_{\text{спец}} + B_{\text{прз}} + A_{\text{обл}} + B_e + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_e + B_{\text{нзв}}. \quad (5.17)$$

$$B_{\text{заг}} = 85495,81 + 1734,86 + 8723,07 + 21109,82312 + 4574,46 + 16467,00 + 48973,20 + 54876,00 + 4847,87 + 1831,06 + 17446,13 + 26169,20 + 43615,34 + 87230,67 = 423094,51 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 423094,51 / 0,9 = 470105,01 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 5$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 470105,01$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_c , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [30].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = 9,57$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» складають 470105,01 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Дослідження на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» відбуватиметься в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На дослідника можливий вплив таких небезпечні та шкідливі виробничі факторів (згідно ГОСТ 12.0.003-74 [22]):

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до визначених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Під час аналізу умов праці на робочому місці необхідно оцінити відповідність параметрів приміщення НПАОП 0.00-7.15-18 [28] та відповідність параметрів мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [27].

Згідно із НПАОП 0.00-7.15-18 [28] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа – не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Згідно з ГОСТ 12.2.032-78 [23] конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати гігієнічним, антропометричним, фізіологічним і психологічним вимогам.

Гігієнічні вимоги визначають умови життєдіяльності і працездатності людини у процесі взаємодії з технікою і середовищем; показниками є рівень освітлення, температура, вологість, шум, вібрація, токсичність, загазованість тощо.

Антропометричні вимоги визначають відповідність конструкцій техніки антропометричним характеристикам людини (зріст, розміри тіла та окремі рухові ланки). Показниками є раціональна робоча поза, оптимальні зони досягнення, раціональні трудові рухи.

Фізіологічні та психофізіологічні вимоги визначають відповідність техніки і середовища можливостям працівника щодо сприйняття, переробки інформації, прийняття і реалізації рішень.

Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця дослідника повинні бути дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення;
- достатня вентиляція робочого місця.

Характеристики робочого місця під час написання роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» наступні:

- висота робочої поверхні столу 750 мм;
- висота простору для ніг 650 мм;
- висота сидіння над рівнем підлоги 450 мм;
- поверхня сидіння м'яка з закругленим переднім краєм;
- передбачена можливість розміщення документів праворуч і ліворуч;
- відстань від ока до екрана 700 мм;
- відстань від ока до клавіатури 400 мм;

- відстань від ока до документів 500 мм;
- можливе регулювання екрана по висоті, по нахилу, у лівому і в правому напрямках.

6.1.2 Електробезпека приміщення

Основне завдання електробезпеки – мінімізувати можливість негативного впливу електричного струму на людину. Досягти цієї мети можна за допомогою таких заходів і засобів:

- безпечною і надійною конструкцією електроустановок;
- організаційними та технічними заходами щодо безпечної експлуатації електроустановок та використання електричної енергії;
- технічними засобами захисту.

За ступенем небезпеки враження електричним струмом приміщення можна класифікувати як таке, що має категорію «без підвищеної небезпеки», оскільки вся зазначена офісна техніка має захисне заземлення, передбачене її конструкцією, і повністю виключає можливість випадкового контакту із частинами, що перебувають під небезпечною для людини напругою [29].

Лінія електромережі для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ в досліджуваному приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;
- 3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Стан навколишнього виробничого середовища характеризується такими метеорологічними умовами: температурою, відносною вологістю, барометричним тиском і швидкістю руху повітря. Вищеназвані параметри, які ще називають параметрами мікроклімату, визначають умови теплообміну організму працівника із довкіллям.

Дослідження на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» згідно гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [21] за енерговитратами відноситься до категорії I б. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [27] наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату передбачено система опалювання, теплоізоляція приміщення та припливно-витяжна вентиляція.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини, що потрапили в організм людини, спричиняють порушення здоров'я лише в тому випадку, коли їхня кількість у повітрі перевищує граничну для кожної речовини величину. Під гранично допустимою концентрацією (ГДК) шкідливої речовини у повітрі робочої зони розуміють таку

максимальну концентрацію даної речовини, яка при щоденній (крім вихідних днів) роботі протягом 8 год чи іншої тривалості (але не більше 40 год на тиждень) не призводить до зниження працездатності й захворювання в період трудової діяльності та у наступний період життя, а також не чинить несприятливого впливу на здоров'я нащадків.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Формальдегід	0,035	0,03	2
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,01	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (таблиці 6.3).

Таблиця 6.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено використання механічної вентиляції та систематичне вологе прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

У приміщенні, де відбувалося дослідження на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» використовується природне однобічне освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 [24]) при природному та сумісному освітленні для розробника зазначені у таблиці 6.4:

Таблиця 6.4 – Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимально можливе бічне природне освітлення.
- 2) Штучне освітлення в приміщеннях з робочим місцем, обладнаним ВДТ, має здійснюватись системою загального рівномірного освітлення. Як джерело штучного освітлення мають застосовуватись люмінесцентні лампи ЛБ.
- 3) Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК і клавіатури повинні бути передбачені сонцезахисні пристрої, вікна повинні мати жалюзі або штори.

6.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму під час роботи є жорсткий диск ПК, вентилятор блока живлення мережі, вентилятор, розташований на процесорі, швидкісні приводи дисків, механічні сканери, пересувні механічні частини принтера. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [26]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Наукова і творча діяльність	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Джерелами змінних електричних і магнітних полів у ПК є вузли, у яких присутня висока змінна напруга, і вузли, що працюють з великими струмами. Рівні напруженості електромагнітних полів за електричними складовими та густиною магнітних потоків (індукції) у цих піддіапазонах регламентуються чинним в Україні нормативним актом ДСанПіН 3.3.2.007-98 [25] та загальноєвропейським стандартом MPR II, відомим під назвою «шведський стандарт». Ці ж діапазони розглядаються в універсальному рекомендаційному стандарті ТСО'99.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від комп'ютера наведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320. ..400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. .70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 вВ/м

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань передбачаються наступні способи і засоби: зменшення параметрів випромінювання безпосередньо в самому джерелі випромінювання; екранування робочого місця; обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні; встановлення раціональних режимів експлуатації установок і роботи працюючого персоналу.

6.2.6 Напруженість праці

У процесі роботи з комп'ютером необхідно дотримуватися правильного режиму праці та відпочинку. Інакше у працівників спостерігається незадоволеність роботою, головний біль, роздратування, порушення сну, в тому і больові відчуття в очах, попереку, у ділянці шиї та рук. Для збереження здоров'я працівників, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності слід передбачати внутрішньо змінні регламентовані перерви для відпочинку: для розробників програм — 15 хв. через кожну годину роботи за комп'ютером; для операторів ЕОМ — 15 хв. через кожні 2 год.; для операторів комп'ютерного набору — 10 хв. після кожної години роботи. Для профілактики напруженості органів зору важливими є: дотримання режимів праці та відпочинку; характеристики та налаштування монітору ПК: яскравість екрана, зернистість, відсутність близькості тощо, наприклад, неясні кольори менше втомлюють очі, ніж яскраві. Для зниження нервово-емоційного напруження і втоми очей, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ, наведених у додатку 7 до ДСанПіН 3.3.2.007-98 (див. с.70,71). Отже, за умови дотримання Правил № 65 та ДСанПіН 3.3.2.007-98 робота з ПК не належить до категорії із шкідливими умовами праці.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

До телекомунікаційних мереж 5G вимагається особлива стійкість в роботі, навіть при впливах різних видів випромінювань, серед яких іонізуючі та електромагнітні. Необхідно при цьому враховувати як можливі апаратні збої, так і програмні, що можуть мати різний кінцевий вигляд. В радіоелектронній апаратурі використовуються елементи, до складу яких входять матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки

(діелектрики, смоли та ін.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв [24]. Дія радіації на матеріали і деталі апаратури залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи випромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

В апаратних засобах радіація викликає оборотні і необоротні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що приведе до пошкодження апаратури.

Найбільш чутливі до дії радіації напівпровідники, оптичні прилади і фотоматеріали. Але практика експлуатації РЕА в умовах дії радіоактивних випромінювань дає можливість зробити висновки, що РЕА може раптово втратити працездатність при критичних рівнях радіації та в елементах схем РЕА можуть початись оборотні і необоротні процеси через деякий час при рівнях радіації значно нижчих критичних. [21]

Одним із вражаючих факторів також є електромагнітний імпульс (ЕМІ) – потужний короткий імпульс, що вражає головним чином електронну апаратуру. Виникає ЕМІ в основному в результаті взаємодії гамма-випромінювання, що утворюються під час вибуху, чи штучної генерації.

Основні параметри ЕМІ, що визначають вражаючу дію, є характер зміни напруженості електричного та магнітного полів в часі – форма імпульсу і максимальна напруженість поля – амплітуда імпульсу. Діапазон частот електромагнітних імпульсів (ЕМІ) в основному розподілений в межах 10 – 15 кГц.

6.3.1 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії іонізуючого випромінювання.

Початковими даними для оцінки стійкості є: $p_{1,max}$, Р/год – початковий рівень радіації після 1 год. після радіації ($P_{гр}$, Р/год) або дози опромінення

елементної бази ($D_{гр}, P$) при яких в елементній базі РЕС можуть виникнути зворотні зміни, але РЕС буде ще працювати.

Оцінка стійкості ведеться в послідовності:

1. Радіоелектронна система аналізується і визначається елементна база, від якої залежить її функціонування з потрібною якістю. Елементи схеми РЕА, від яких залежить її функціонування: транзистори, діоди, фотоелементи, інтегральні схеми.

2. По таблиці 6.7 для кожного елемента визначимо $D_{гр.i}$ і дані занесемо до таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 - Максимально допустимі експозиційні дози телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги

Блоки мережі	Елементи РЕА	$D_{гр.i}, P$	$D_{грБ}, P$	$D_{гр.к}, P$
Мікропроцесорний контролер	Фотоелементи	10^5	10^5	10^5
	Транзистори серії КП	10^6		
	Мікросхеми серії К155	10^5		
Блок живлення	Діоди КС168-КС222	10^5	10^5	
	Конденсатори КЭ-1 КЭ-2	10^6		
Блок управління	Мікросхеми К140	10^9	10^5	
	Діоди серії КС	10^5		

Границя стійкості апаратури згідно таблиці становить $D_{гр} = 100000 P$.

3. Допустимий час роботи телекомунікаційної мережі 5G в цих умовах:

$$t_{\theta} = t_k = \left(\frac{(D_{гр} * K_{нос.вн.} + 1,33 \cdot p_{1max} \cdot \sqrt[4]{t_n^3})}{1,33 \cdot p_{1max}} \right)^{4/3} = \left(\frac{(10000 \cdot 2 + 1,33 \cdot 1,97 \cdot 1)}{1,33 \cdot 1,97} \right) = 7634 \text{ (год.)}$$

4. Визначимо можливу дозу опромінення радіоелементів і мереж за чотири роки експлуатації:

5. Можлива доза опромінення елементної бази становить $D_m = 3355 (P)$.

$$D_{гр} = 100000 \text{ Р.}$$

$D_{гр} > D_{м}$, отже апаратура буде стійка в роботі.

6.3.2 Дослідження стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початковими даними є:

- 1) Вертикальна складова напруженості електричного поля: $E_{в}=12,23 \text{ кВ/м}$
- 2) $U_{жі}=48 \text{ В}$

1. Визначимо горизонтальну складову напруженості електричного поля
 $E_{г}=10^{-3} \cdot E_{в}=12,23 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}=12,23 \text{ В/м}$

2. РЕС розподіляється на окремі функціональні дільниці. На кожній дільниці визначається максимальна довжина струмопровідних частин. Максимальна довжина струмопровідної частини

- 1) $l_{в} = 0,6(\text{м}); \quad l_{г} = 1,3(\text{м});$
- 2) $l_{в} = 0,6(\text{м}); \quad l_{г} = 0,9(\text{м});$
- 3) $l_{в} = 0,8(\text{м}); \quad l_{г} = 0,7(\text{м}).$

3. Визначимо напругу наведення у вертикальній (горизонтальній) струмопровідній частині:

- 1) $U_{в} = E_{г}l_{в} = 12,23 \cdot 0,6 = 7,2 \text{ (В)}; \quad U_{г} = E_{в}l_{г} = 12,23 \cdot 10^3 \cdot 1,3 = 15,6 \cdot 10^3(\text{В});$
- 2) $U_{в} = E_{г}l_{в} = 12,23 \cdot 0,6 = 7,2 \text{ (В)}; \quad U_{г} = E_{в}l_{г} = 12,23 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 10,8 \cdot 10^3(\text{В});$
- 3) $U_{в} = E_{г}l_{в} = 12,23 \cdot 0,8 = 9,6 \text{ (В)}; \quad U_{г} = E_{в}l_{г} = 12,23 \cdot 10^3 \cdot 0,7 = 8,4 \cdot 10^3(\text{В}).$

4. Визначимо допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{д} = U_{ж} + (U_{ж}/100) \cdot 5 = 48 + 2,4 = 50,4 \text{ (В)}.$$

5. Визначимо коефіцієнти безпеки:

- 1) $K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_{д}/U_{в}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9 \text{ (дБ)};$
 $K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_{д}/U_{г}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 15,6 \cdot 10^3) = -49,8 \text{ (дБ)};$
- 2) $K_{бв} = 20 \cdot \lg(U_{д}/U_{в}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 7,2) = 16,9 \text{ (дБ)};$
 $K_{бг} = 20 \cdot \lg(U_{д}/U_{г}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 10,8 \cdot 10^3) = -46,6 \text{ (дБ)};$

$$3) K_{\text{бв}} = 20 \cdot \lg(U_{\text{д}}/U_{\text{в}}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 9,6) = 14,4 \text{ (дБ)};$$

$$K_{\text{бг}} = 20 \cdot \lg(U_{\text{д}}/U_{\text{г}}) = 20 \cdot \lg(50,4 / 8,4 \cdot 10^3) = -44,4 \text{ (дБ)}.$$

Зведемо всі розрахункові дані до таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Коефіцієнти безпеки елементів телекомунікаційних мережах 5G

Елементи МПП	$I_{\text{в}}, \text{м}$	$I_{\text{г}}, \text{м}$	$U_{\text{в}}, \text{В}$	$U_{\text{г}}, \text{В}$	$K_{\text{бв}}, \text{Д}$ б	$K_{\text{бг}}, \text{Д}$ б	Результат дії
Блок живлення	0,6	1,3	7,2	15600	16,9	-49,8	Нестійкий
Блок МПК	0,6	0,9	7,2	10800	16,9	-46,6	Нестійкий
Блок управління	0,8	0,7	9,6	8400	14,4	-44,4	Нестійкий

6. Звідси можна побачити, що апаратура буде нестійка в роботі, тому що і $K_{\text{бв}}$ і $K_{\text{бг}}$ менше 40 дБ. Для захисту можна застосувати такі заходи по підвищенню стійкості: екранування апаратури сталевим або алюмінієвим екраном.

6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах надзвичайних ситуацій.

Головне завдання захисних пристроїв від ЕМІ - виключити доступ наведених струмів до чутливих вузлів і елементів обладнання. У кожному конкретному випадку повинні бути знайдені найбільш ефективні і економічно доцільні методи захисту електронної апаратури і великих розгалужених електротехнічних систем. Розглянемо основні методи захисту:

1. Екрани й захисні пристрої.

Металеві екрани відбивають електромагнітні хвилі і гасять високочастотну енергію. Через систему заземлення струм, наведений ЕМІ, стікає в землю, не завдаючи шкоди електронної апаратури, що знаходиться усередині металевих шаф або коробів.

2. Захист кабелів.

Сполучні кабелі для захисту прокладають в земляних траншеях під цементною або бетонною підлогою будівель або укладають в сталеві коробки, які заземляють.

Надійність підвищується, якщо кабель розгалужується і підводиться до декількох шаф. У цьому випадку ізольовані ділянки володіють великим опором ізоляції і малої ємністю проводів відносно землі. Також доцільно застосовувати фільтри від високочастотних перешкод.

3. Захисні розрядники і плавкі запобіжники.

Основні функції захисного розрядника - розімкнути лінію або відвести енергію для запобігання пошкодження в обладнанні. Для захисту апаратури можуть бути рекомендовані плавкі запобіжники і захисні вхідні пристосування, які являють собою різні релейні або електронні пристрої, що реагують на перевищення струму або напруги в ланцюзі.

4. Грозозахисні пристрої. Забезпечують «стікання» великого розряду в землю без пошкодження ізоляційних елементів ліній.

5. Використання симетричних двопровідних ліній.

6. Захист периферійних пристроїв.

7. Програмна надлишковість для забезпечення стабільної роботи МПК.

Зазначені способи і засоби захисту повинні впроваджуватися в усі види електротехнічної та радіоелектронної апаратури з урахуванням характеру вражаючої дії електромагнітного імпульсу для забезпечення надійності роботи апаратури підприємств в умовах НС мирного і військового часу.

Для розрахунку екранів захисту від дії електромагнітного імпульсу знаходимо перехідне гасіння енергії електричного поля екраном для сталі:

$$A=40+ K_{\text{бв}} \quad (6.1)$$

Для БЖ:

$$A_1=16,9+40=56,9 \text{ (дБ);}$$

Для МПК:

$$A_2 = 16,9 + 40 = 56,9 \text{ (дБ);}$$

Для БУ:

$$A_3 = 14,4 + 40 = 54,4 \text{ (дБ).}$$

Розрахуємо товщину захисних екранів:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (6.2)$$

де f - найбільш характерна частота, ($f = 15$ кГц).

Для всіх блоків буде один екран: $t_1 = \frac{56,9}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,124 \text{ (см);}$

Отже, захист буде надійним при екрануванні телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги з використанням екрану товщиною 0,124 см зі сталі.

Отже, в даному підрозділі було досліджено стійкість роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії загрозливих чинників НС. В умовах дії іонізуючого випромінювання апаратура буде працювати стійко, так як граничне значення експозиційної дози випромінювання $D_{гр} = 100000 \text{ Р}$ значно більше ніж можливе значення дози $D_m = 3355 \text{ Р}$. Отже підвищувати стійкість роботи мережі до впливу іонізуючого випромінювання непотрібно.

Вплив електромагнітного імпульсу на телекомунікаційні мережі 5G для стабілізації напруги призвів до порушення стійкості його роботи. Застосування екранування суттєво підвищило стійкість роботи блоків мережі в умовах впливу на них електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

Для перспективної цифрової екосистеми п'ятого та наступних поколінь позиціонування є вже не просто однією з додаткових послуг, а фактором ефективності побудови та функціонування пристроїв у складі надщільних МРД та підтверджується сценаріями ВМР з точністю до 1 м, що на порядок менше, ніж у мережах попередніх поколінь. Мережеве позиціонування як предмет дослідження розглядається з двох сторін: по-перше, як цільове завдання географічного ВМР пристроїв у МРД 5G; по-друге, як інструмент підвищення ефективності встановлення та ведення радіозв'язку на основі даних про МЗ пристроїв МРД 5G. Існуючі технології задовольняють досить широкий спектр вимог до точності в різних сценаріях, проте залишаються й такі, у яких вони не забезпечують необхідної точності. Сценарії підвищення точності (рисунок 7.1) служать для постановки завдань дослідження у розділі 6. Рисунок 7.1 наведено в додатку И.

Використовуючи категорії вимог (таблиця 2.12, а також проведений аналіз існуючих технологій у розділі 3.4 (таблиця 3.1, рисунок 3.14), можна виділити сценарії, в яких необхідна точність не забезпечується: сценарії досягнення точності до 0,3–3 м при позиціонуванні у надщільних МРД в умовах щільної міської забудови зовні та всередині приміщень, а також до 10 м при позиціонуванні зовні приміщень у зоні широкого охоплення при NLOS.

Науковою проблемою, що має важливе господарське значення для зв'язку, є розробка комплексу моделей і методів позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж 5G для реалізації нових послуг мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь.

Таблиця 7.1 містить положення, внесок претендента та технічне рішення порівняно з прототипами за результатами розділів 1-4. Таблиця 7.1 наведена в додатку Н.

Науковим результатом магістерської кваліфікаційної роботи є комплекс методів та сценаріїв позиціонування пристроїв у мережах п'ятого та наступних поколінь, вимог до кількісних показників та технічних рішень для їх досягнення в інтересах галузі зв'язку, а також обґрунтування мережевого позиціонування як

засобу підвищення ефективності використання систем телекомунікацій та радіотехнічних пристроїв при побудові, функціонуванні та керуванні мережами на основі визначення розташування пристроїв.

Пункт паспорта спеціальності. п. 12 сп. 05.12.13 – Розробка методів ефективного використання мереж, систем та пристроїв телекомунікацій у різних галузях народного господарства; п. 1 сп. 05.12.04 – Дослідження нових процесів та явищ у радіотехніці, що дозволяють підвищити ефективність радіотехнічних пристроїв.

Наукова новизна. На відміну від відомих досліджень у галузі позиціонування для мереж зв'язку загального користування в магістерській кваліфікаційній роботі розроблено метод позиціонування в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь, що забезпечує з достатньою точністю визначення розташування пристроїв Інтернету Речей та інших пристроїв мереж зв'язку п'ятого поколінь, у тому числі при забезпеченні взаємодії пристрій-пристрій.

Теоретична значимість. Комплекс моделей та методів, сценаріїв та рішень для позиціонування в мережах п'ятого та наступних поколінь встановив взаємозв'язок мережевого позиціонування як інструменту вирішення завдань визначення місця розташування при реалізації нових послуг у народному господарстві, а також як засобу підвищення ефективності використання систем та пристроїв телекомунікацій при побудові, функціонуванні та керуванні мережами п'ятого та наступних поколінь на основі розташування пристроїв.

Практична значимість. Комплекс методів та сценаріїв мережевого позиціонування дозволяє: а) ефективно використовувати мережі 5G при реалізації нових послуг у народному господарстві; б) підвищити ефективність використання систем та пристроїв телекомунікацій при побудові, функціонуванні та керуванні мережами п'ятого та наступних поколінь на основі ВМР; в) науково-обґрунтовано планувати впровадження та розвиток мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь.

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» складають 470105,01 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему

«Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

Згідно проведених досліджень з охорони праці, за дотримання особливих вимог та Правил № 65 та ДСанПіН 3.3.2.007-98 в приміщенні, робота з ПК не належить до категорії із шкідливими умовами праці.

В підрозділі з цивільним захистом було досліджено стійкість роботи телекомунікаційних мережах 5G для стабілізації напруги в умовах дії загрозливих чинників НС. В умовах дії іонізуючого випромінювання апаратура буде працювати стійко, так як граничне значення експозиційної дози випромінювання $D_{гр} = 100000 \text{ Р}$ значно більше ніж можливе значення дози $D_m = 3355 \text{ Р}$. Отже підвищувати стійкість роботи мережі до впливу іонізуючого випромінювання непотрібно.

Вплив електромагнітного імпульсу на телекомунікаційні мережі 5G для стабілізації напруги призвів до порушення стійкості його роботи. Застосування екранування суттєво підвищило стійкість роботи блоків мережі в умовах впливу на них електромагнітного імпульсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аджемов А.С. Интеграция доступа в условиях конвергенции сетей / А.С. Аджемов, А.Н. Авдеев, А.К. Леваков, В.А. Шаргаев // Электросвязь. – 2019. – № 4. – С. 76-79.
2. Андреев С.Д. Управление потоками в гетерогенных мобильных сетях радиодоступа с соединениями устройство-устройство / С.Д. Андреев, К.Е. Самуйлов, А.М. Тюрликов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. – 2018. – Т. 26. – № 4. – С. 357-370.
3. Бутенко, В. Сети 5G/IMT-2020 & IoT - основа цифровой трансформации / В. Бутенко, В. Веерпалу, Е. Девяткин, Д. Федоров // Электросвязь. – 2018. – № 12. – С. 4–9.
4. Зарипова Э.Р. Анализ производительности сетей подвижной связи / Э.Р. Зарипова, Е.В. Маркова, Ю.В. Гайдамака. – Москва: РУДН, 2019. – 111 с
5. Гольдштейн Б.С. Инфокоммуникационные сети и системы / Б.С. Гольдштейн. – Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2019. – 208 с.
6. Громаков Ю.А. Принципы построения систем когнитивного радио в приложении к сотовой сети / Ю.А. Громаков, К.А. Снопко // Электросвязь. – 2018. – № 1. – С. 42-50.
7. Лихтциндер Б.Я. Беспроводные сенсорные сети / Б.Я. Лихтциндер, Р.В. Киричек, Е.Д. Федотов, Е.Ю. Голубничая, А.А. Кочуров. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2019. – 236 с.
8. Маколкина, М.А. Классификация приложений дополненной реальности / М.А. Маколкина, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 11-21.
9. Moltchanov, D. Analytical characterization of the blockage process in 3GPP New Radio systems with trilateral mobility and multi-connectivity / D. Moltchanov, Y. Koucheryavy, A. Ometov // Computer Communications. – 2019. – V. 146. P. 110-120.

10. Парамонов А.И. Математические модели в сетях связи. Часть 1 / А.И. Парамонов, М.А. Маколкина, Р.В. Киричѐк, А.И. Выборнова, Е.Г. Богданова. – Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2019. – 111 с.
11. Самуйлов К.Е. Сети и телекоммуникации. Учебник и практикум / К.Е. Самуйлов, И.А. Шалимов, В.В. Василевский, Н.Н. Васин, Д.С. Кулябов, А.В. Королькова. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 363 с.
12. Тихвинский, В.О. Стандартизация мобильной связи 5G как процесс создания инфраструктурной основы цифровой экономики / В.О. Тихвинский // Электросвязь. – 2018. – № 12. – С. 24- 30.
13. Тихвинский, В.О. Технологии 5G - базис мобильной инфраструктуры цифровой экономики / В.О. Тихвинский // Электросвязь. – 2018. – № 3. – С. 48-55.
14. Yang H.-C. Advanced Wireless Transmission Technologies / H.-C. Yang, M.-S. Alouini. – Cambridge University Press, 2020. – 416 p.
15. Dahlman E. 5G NR. The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd Edition / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Press, 2021. – 608 p.
16. Uwaechia, A. N. A Comprehensive Survey on Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation Wireless Networks: Feasibility and Challenges / A. N. Uwaechia, N. M. Mahyuddin // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 62367-62414.
17. Фокин, Г. А. Сценарии позиционирования в сетях 5G / Г.А. Фокин // Вестник связи. – № 2. – 2020. – С. 3-9.
18. Фокин, Г. А. Сценарии позиционирования в сетях 5G / Г.А. Фокин // Вестник связи. – № 3. – 2020. – С. 13-21.
19. Фокин Г.А. Позиционирование в сетях радиодоступа 5G. Ключевые показатели эффективности KPI / Г.А. Фокин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020) сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно - методической конференции: в 4 томах. – 2020. – Т. 3. – С. 361-365.
20. Фокин Г.А. Позиционирование в сетях радиодоступа 5G. Услуги

геолокации / Г.А. Фокин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020) сборник научных статей IX Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. – 2020. – Т. 3. – С. 366-370.

21. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

22. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

23. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/31/31970.shtml>

24. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2006

25. ДСан Пін 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

26. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

27. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

28. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php

29. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

30. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

31. VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2021), 03 – 05 листопада 2021 року, ВНТУ, м. Вінниця

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

ФІРЕН

ТІСТЬ

ВНТУ

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
В.М. Кичак
“ ” _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G
08-34. МКР.015.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ
Васильківський М.В.

Виконавець: ст. гр. ТКС-20м
Юрченко Ю.Ю.

Вінниця-2021

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “24” 09 2021 року № 277 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 01.09.2021 р.

Дата закінчення: 20.12.2021 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є розробка моделей і методів, сценаріїв і рішень для позиціонування пристроїв в мережах п'ятого і наступних поколінь.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- формалізація і систематизація комплексу сценаріїв і методів позиціонування пристроїв для реалізації нових послуг мереж п'ятого і наступних поколінь;
- розробка методології оцінки і візуалізації точності позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж 5G для комплексу сценаріїв в мережах п'ятого і наступних поколінь;
- дослідження і розробка комплексу моделей і методів позиціонування при відсутності прямої видимості шляхом порівняння дисперсій проміжних оцінок координат в оброблюваних наборах пунктів прийому в мережах радіо- доступу;
- дослідження і розробка комплексу моделей і методів обробки різницево-віддалемірних і кутомірних вимірювань для різних топологій стаціонарних пунктів прийому в складі наземного сегмента і траєкторій руху пунктів прийому на борту БПЛА в складі повітряного сегмента.

Об'єктом дослідження є інфраструктура мереж п'ятого і послідуєчих поколінь.

Предметом дослідження є комплекс моделей і методів позиціонування пристроїв засобами інфраструктури мереж п'ятого і наступних поколінь і організація радіозв'язку на основі розташування.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- комплекс сценаріїв мережевого позиціонування;
- послуги та сценарії позиціонування в мережах 5G;
- еволюція технологій позиціонування в мережах 5G; використання технологій позиціонування в мережах 5G;
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблений комплекс моделей на основі позиціонування дозволяє сформулювати і обґрунтувати практичні рекомендації для функціонування та керування пристроями при їх надщільному розподілі з урахуванням точності і ширини сформованого променя.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах звіту із переддипломної практики “Позиціонування пристроїв в телекомунікаційних мережах 5G”, який виконувався у ВНТУ у 2021/2022 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали звіту із переддипломної практики.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение / Бернард Скляр; [пер. с англ]. – М.: Изд. Дом “Вильямс”, 2003. – 1104с.

3.2 Зарипова Э.Р. Анализ производительности сетей подвижной связи / Э.Р. Зарипова, Е.В. Маркова, Ю.В. Гайдамака. – Москва: РУДН, 2019. – 111 с

3.3 Гольдштейн Б.С. Инфокоммуникационные сети и системы / Б.С. Гольдштейн. – Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2019. – 208 с.

3.4 Лихтциндер Б.Я. Беспроводные сенсорные сети / Б.Я. Лихтциндер, Р.В. Киричек, Е.Д. Федотов, Е.Ю. Голубничая, А.А. Кочуров. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2019. – 236 с.

3.5 Парамонов А.И. Математические модели в сетях связи. Часть 1 / А.И. Парамонов, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек, А.И. Выборнова, Е.Г. Богданова. – Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2019. – 111 с.

3.6 Самуйлов К.Е. Сети и телекоммуникации. Учебник и практикум / К.Е. Самуйлов, И.А. Шалимов, В.В. Василевский, Н.Н. Васин, Д.С. Кулябов, А.В. Королькова. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 363 с.

3.7 Yang H.-C. Advanced Wireless Transmission Technologies / H.-C. Yang, M.-S. Alouini. – Cambridge University Press, 2020. – 416 p.

3.8 Dahlman E. 5G NR. The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd Edition / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Press, 2021. – 608 p.

3.9 Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. А. О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, Сердюк О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2021 – 60 с.

3.10 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.11 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.12 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.13 Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Под ред. Э.Т.Романьчевой.- М: Радио и связь, 1989.

3.14 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи ТКС-20м Юрченко Ю.Ю.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження моделей і методів, сценаріїв і рішень для позиціонування пристроїв в мережах п'ятого і наступних поколінь.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- сценарій використання позиціонування – мобільні пристрої;
- призначення - послуги геолокації LBS;
- зона обслуговування – позиціонування 5G зовні/всередині приміщень;
- точність позиціонування по вертикалі – 0,1-3 м;
- точність позиціонування по горизонталі – 2 м;
- доступність – 90 %; тривалість оновлення – 30-300 с;
- TTFF – 10 с; затримка - 1 с;
- сценарій використання позиціонування – медичні пристрої;
- призначення - послуги з охорони здоров'я;
- зона обслуговування – позиціонування з підвищеною точністю зовні/всередині приміщень;
- точність позиціонування по вертикалі – 2 м;
- точність позиціонування по горизонталі – 3 м;
- доступність – 99 %; затримка - 60 с;
- сценарій використання позиціонування – віддалене керування БПЛА;
- призначення - БПЛА;
- зона обслуговування – позиціонування 5G зовні приміщень;
- точність позиціонування по вертикалі – 0,3 м;
- точність позиціонування по горизонталі – 0,5 м;
- доступність – 99 %; затримка - 150 мс.

При розробці системи та сегменту мережі позиціонування слід максимально використовувати стандартні та уніфіковані деталі.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		Початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	01.09.2021р.	10.09.2021р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Комплекс сценаріїв мережевого позиціонування	11.09.2021р.	17.09.2021р.	Розроблене ТЕО	Вступ. Розділ 1.
3.	Послуги та сценарії позиціонування в мережах 5G	18.09.2021р.	01.10.2021р.	Проведений аналіз	Розділ 2
4.	Еволюція технологій позиціонування в мережах 5G	02.10.2021р.	29.10.2021р.	Розроблений метод	Розділ 3
5.	Використання технологій позиціонування в мережах 5G	30.10.2021р.	19.11.2021р.	Характеристики і параметри	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	20.11.2021р.	30.11.2021р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	01.12.2021р.	06.12.2021р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	07.12.2021р.	13.12.2021р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	14.12. 2021р.	17.12.2021р.	Позитивні відзиви	Відгуки
10.	Захист МКР ЕК		20.12.2021р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G;
- топології організації радіозв'язку в МРД 5G;

- архітектура гетерогенної мережі радіодоступу 5G;
- структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням;
- схеми позиціонування під час організації радіозв'язку;
- архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G;
- архітектура системи мережевого позиціонування у МРД 5G;
- структури методів позиціонування у МРД 5G;
- сценарії підвищення точності та уточнення наукової проблеми.
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання розробленого сегменту мережі 5G.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження широкосмугового сегменту мережі;
- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових методик контролю характеристик пристроїв мережі 5G.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення точності позиціонування пристроїв та розширення частотного діапазону радіосистем та мереж 5G.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G;
- топології організації радіозв'язку в МРД 5G;
- архітектуру гетерогенної мережі радіодоступу 5G;
- структуру приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням;
- схеми позиціонування під час організації радіозв'язку;
- архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G;
- архітектуру системи мережевого позиціонування у МРД 5G;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання приладу.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

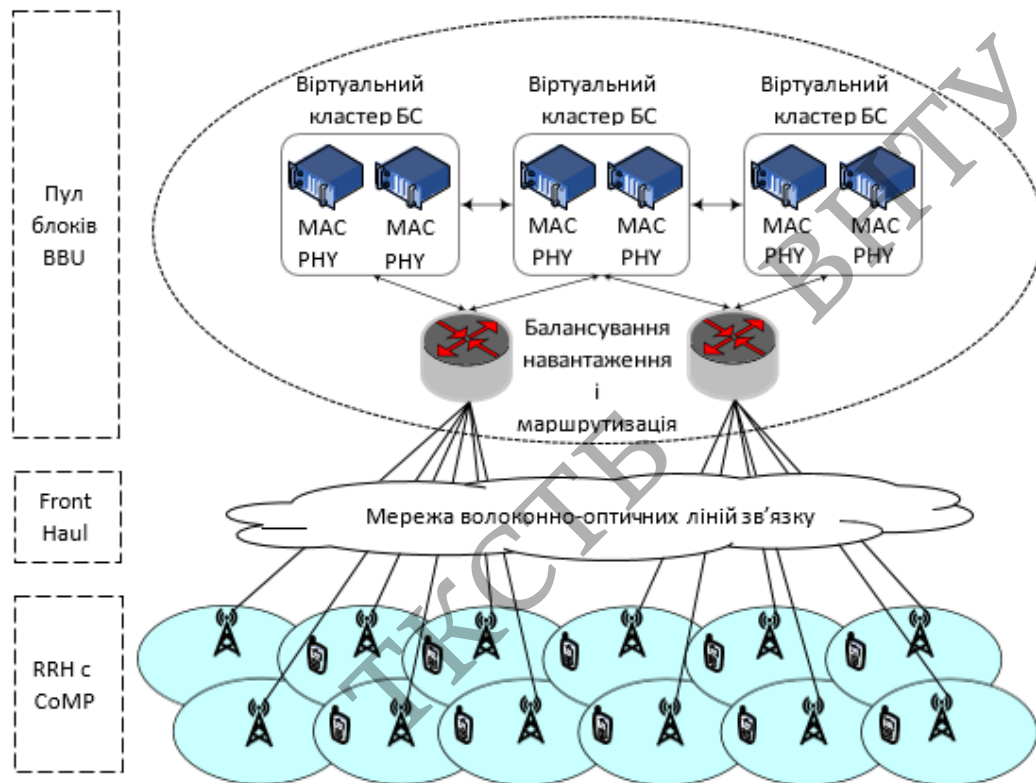
Додаток Б
(обов'язковий)

Архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G

ФІРЕН

ТКСГБ

ВНТУ



ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.			Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В.				181	1
Реценз.					ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					
					Архітектура C-RAN для мереж радіодоступу 5G		

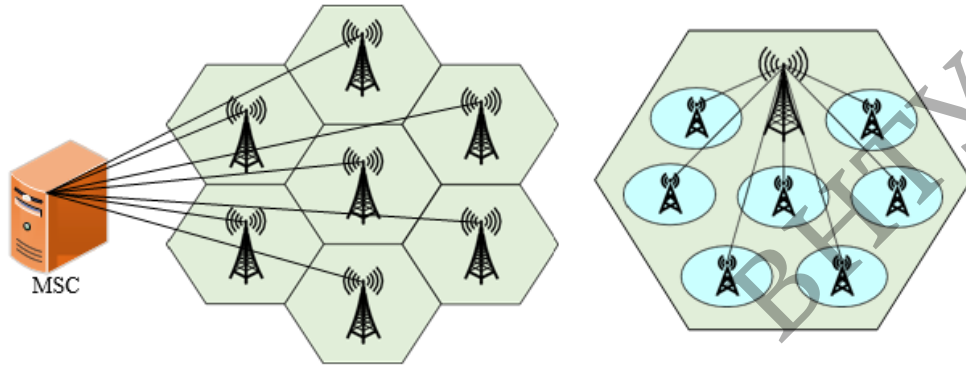
Додаток В
(обов'язковий)

Топології організації радіозв'язку в МРД 5G

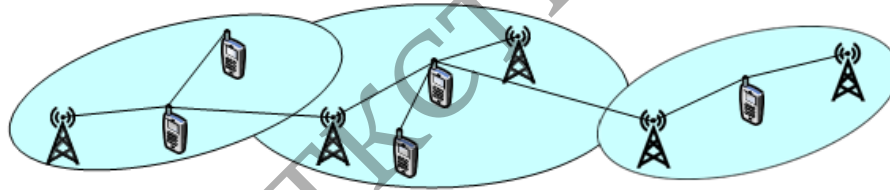
ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ



а) Централізована організація радіозв'язку через БС б) Сценарій малих надщільних сот



в) Розподілена організація радіозв'язку через АТ і БС малих надщільних сот

ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.			Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.					ВНТУ, гр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					
					Топології організації радіозв'язку в МРД 5G		

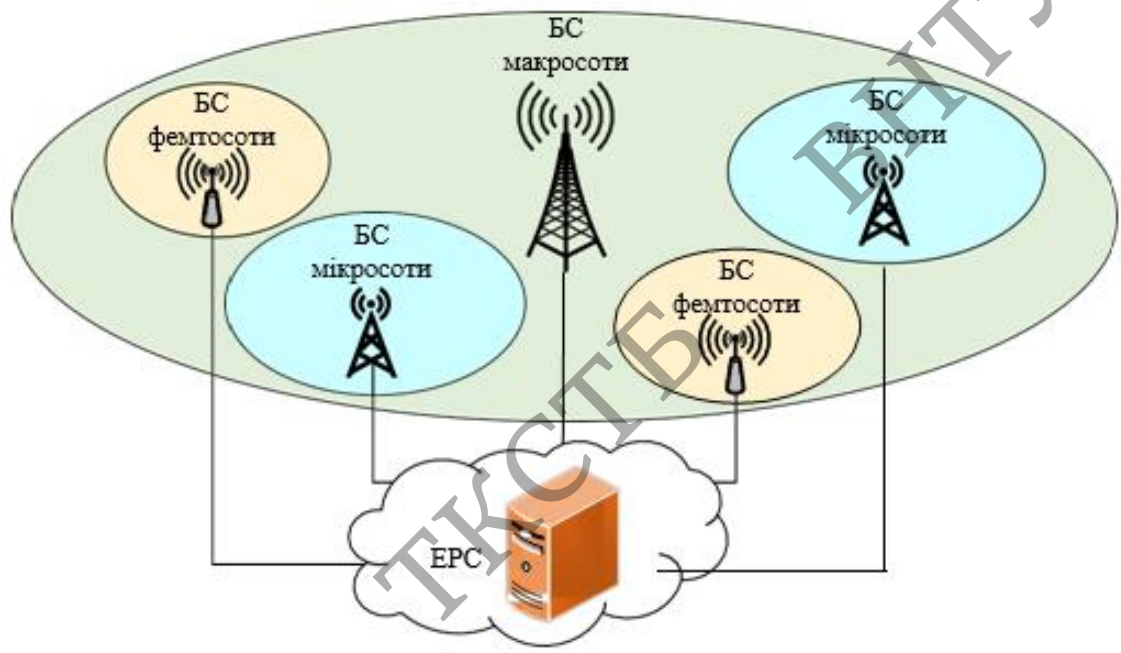
Додаток Г
(обов'язковий)

Архітектура гетерогенної мережі радіодоступу 5G

ФІРЕН

ТКСТЬ

ВНТУ



ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Архітектура гетерогенної мережі радіодоступу 5G	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В				ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В						
Затверд.		Кичак В.М.						

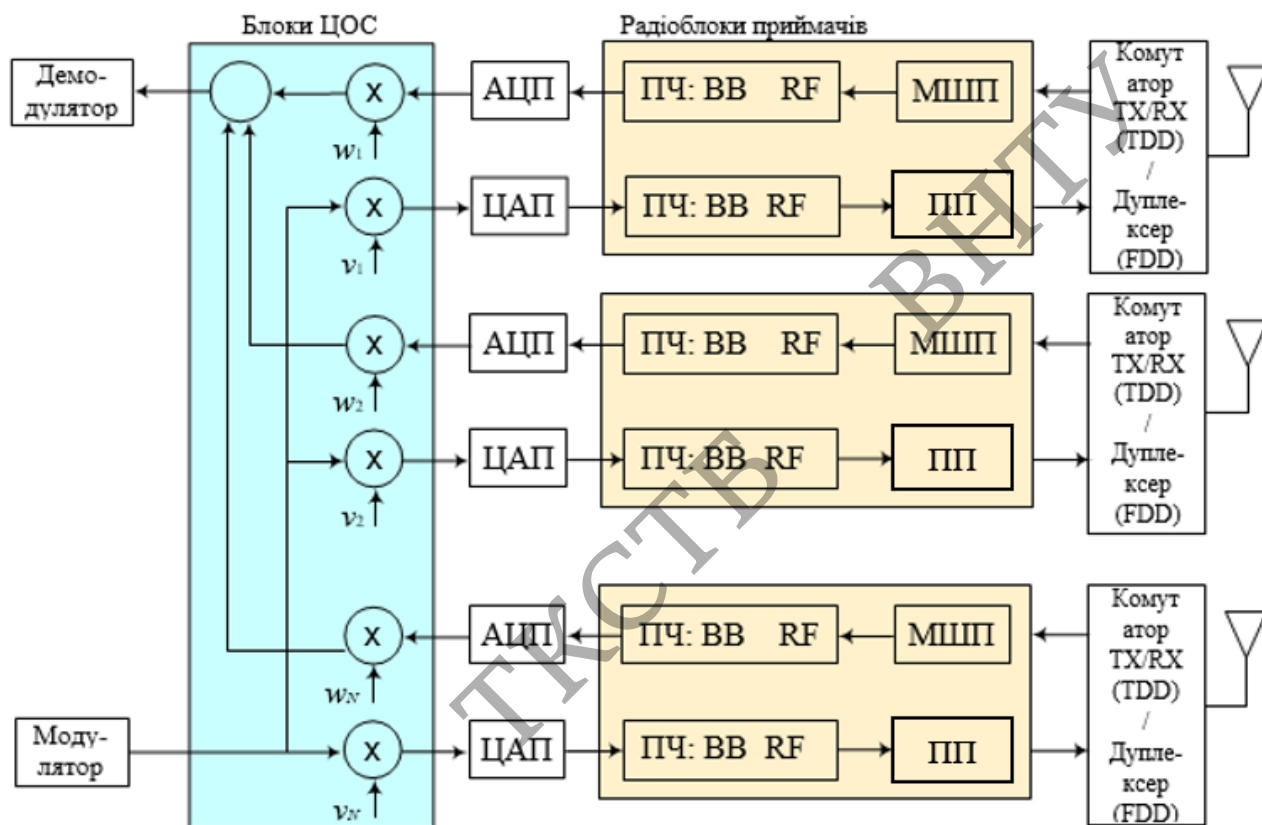
Додаток Д
(обов'язковий)

Структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ



ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Структура приймальної станції з цифровим діаграмоутворенням		
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.					
Перевір.		Васильківський М.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.			Літ.	Арк.	Акрушів
						1	1
					ВНТУ, гр.ТКС-20м		

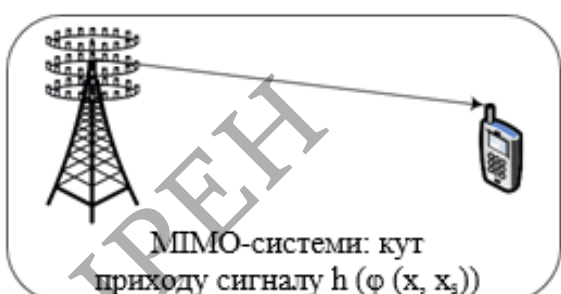
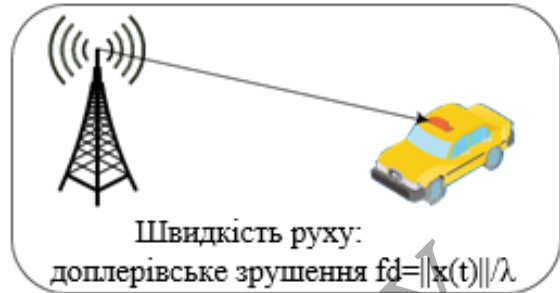
Додаток Е
(обов'язковий)

Схеми позиціонування під час організації радіозв'язку

ФІРЕН

ТКСТЬ

ВНТУ



					08-34.МКР.015.00.000 Е8			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Схеми позиціонування під час організації радіозв'язку	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр.ТКС-20м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

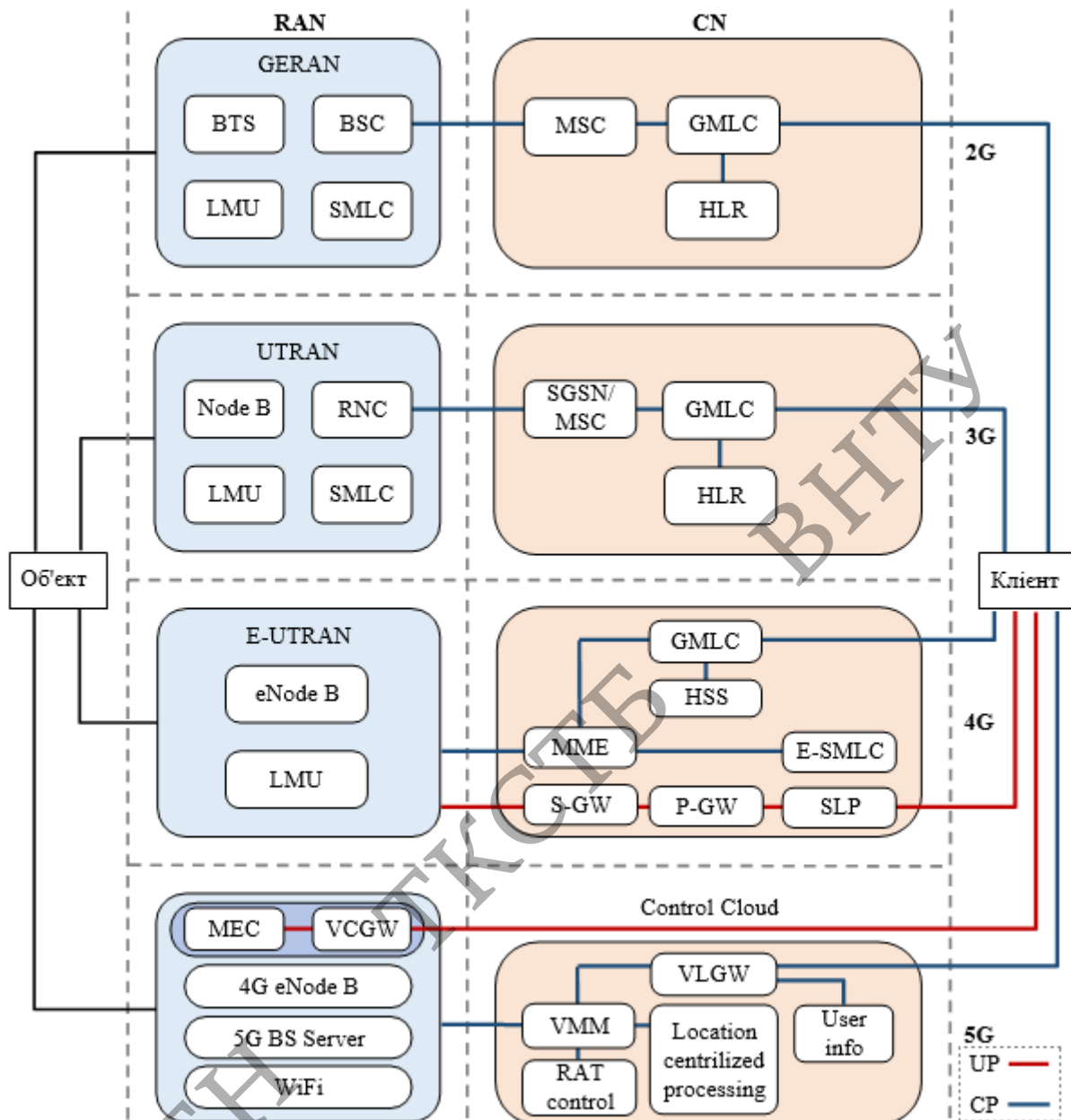
Додаток Ж
(обов'язковий)

Архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

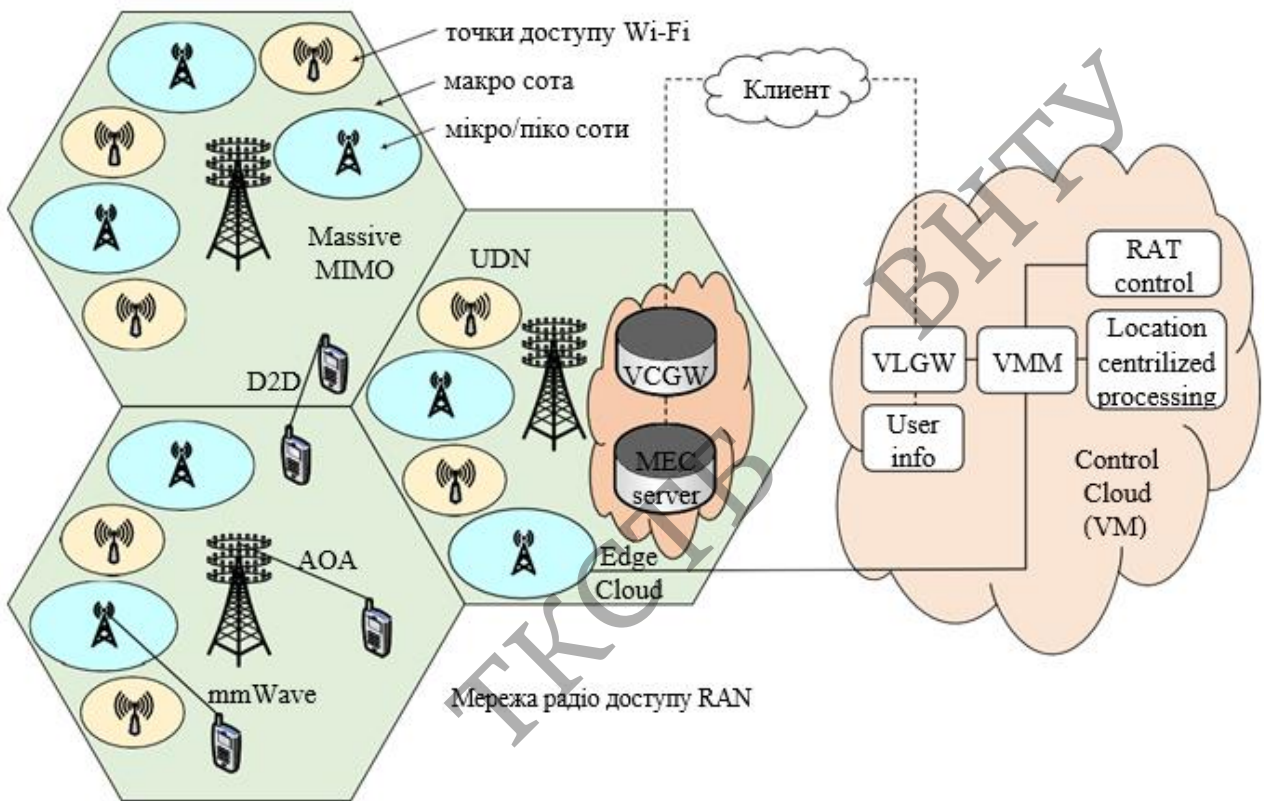


					08-34.МКР.015.00.000 Е8					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Архітектури мережевого позиціонування у мережі 5G					
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.						Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.								ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.								

Додаток И
(обов'язковий)

Архітектура системи мережевого позиціонування у МРД 5G

ФІРЕН
ТКСТЬ
ВНТУ



ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.			Архітектура системи мережевого позиціонування у МРД 5G	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В					1	1
Реценз.						ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В						
Затверд.		Кичак В.М.						

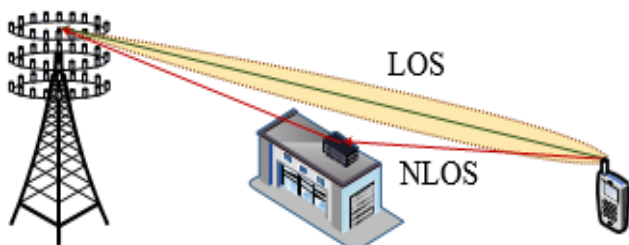
Додаток К
(обов'язковий)

Структури методів позиціонування у МРД 5G

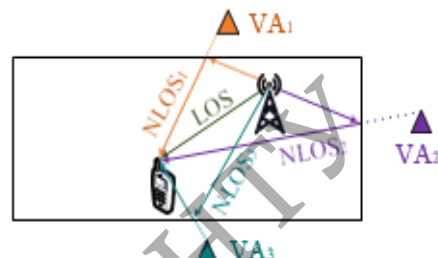
ФІРЕН

ТКСГБ

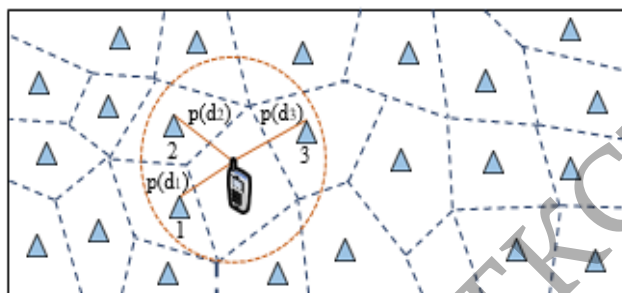
ВНТУ



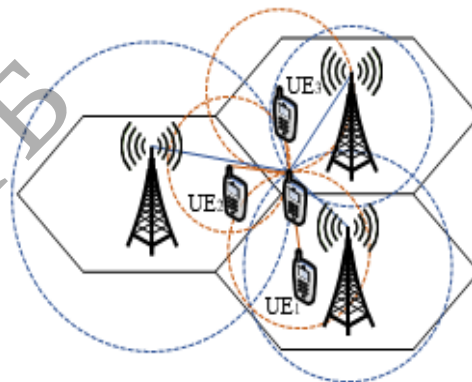
а) ідентифікація LOS/NLOS та кутомірне позионування засобами Massive MIMO



б) обробка МЛК одним фізичним та трьома віртуальними опорними пунктами прийому



в) надщільний розподіл опорних пунктів прийому моделюється пуассонівським процесом на площині



г) кооперативне позионування припрямому зв'язку між пристроями D2D

ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.			Структури методів позионування у МРД 5G	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

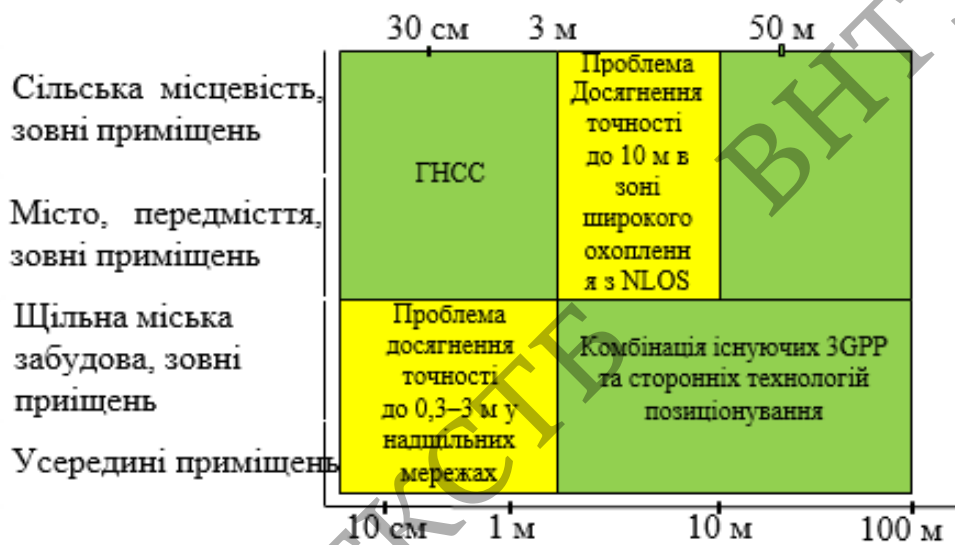
Додаток Л
(обов'язковий)

Сценарії підвищення точності та уточнення наукової проблеми

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ



ФІРЕН

					08-34.МКР.015.00.000 Е8			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Юрченко Ю.Ю.			Сценарії підвищення точності та уточнення наукової проблеми	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, зр.ТКС-20м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток М
(обов'язковий)

Позиціонування у мережах 5G та вимоги до них

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

Таблиця 2.1 – Сценарії позиціонування у мережах 5G та вимоги до них

	Сценарій використання	Вимоги							
		Зона обслуговування	Точність позиціонування	Швид-кість	Доступ-ність	Оновлен-ня	TTFB	Затрим-ка	Інші KPI
Послуги геолокації LBS	Велопрокат	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	2 м по горизонталі		90 %		10 с	1 с	
		Зона позиціонування з підвищеною точністю	0,2 м по горизонталі		99 %		10 с	1 с	
	Доповнена реальність	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	1 – 3 м по горизонталі	2 м/с 10°	80 %	1 – 10 Гц	10 с	1 с	Низьке енергоспоживання
	Пристрої, що носяться	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень	0.1 - 3 м по вертикалі 2 м по горизонталі 1 – 3 м по вертикалі		90 %	30 с – 300 с	10 с		Режим енергозбереження
					99 %	1 с – 30 с	10 с	1 с	Звичайний режим
	Рекламні повідомлення	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень			90 %			60 с	
Керування потоками	Позиціонування з підвищеною точністю зовні/	3 м по горизонталі 3 м по вертикалі		80 %	10 с	10 с			
Пром-сть – охорони здоров'я	Позиціонування мед. персоналу та обладнання у хворих	Позиціонування з підвищеною точністю зовні / усередині приміщень	3 м по горизонталі 2 м по вертикалі		99 %			60 с	
	Позиціонування візків	Позиціонування з підвищеною точністю зовні/ Усередині приміщень	0,5 м по горизонталі 1 – 3 м по вертикалі		99 %			20 мс	
	Керування відходами	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	3 м по горизонталі		99 %	2 години – 1 день		60 с	Наднизьке енергоспоживання
Екстр.	Служби екстреного виклику	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень	50 м по горизонталі 3 м по вертикалі		95 %		30 с	60 с	Надійність/ конфіденційність
	Точне позиціонування для служб першого реагування	Зовні приміщень	1 м по горизонталі 0,3 м по вертикалі		98 %		10 с	5 с	Конфіденційність
		Усередині приміщень	1 м по горизонталі 2 м по вертикалі		95 %		10 с	1 с	
Оповіщення служб екстреного виклику	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень	50 м по горизонталі 3 м по вертикалі (поверх)		99 %		10 с		Приватність, масштабованість, для всіх операторів	

Таблиця 2.1 – Сценарії позиціонування у мережах 5G та вимоги до них (продовження)

	Сценарій використання	Вимоги							
		Зона обслуговування	Точність позиціонування	Швид-кість	Доступ-ність	Оновлен-ня	TTFB	Затрим-ка	Інші KPI
Екстр.	Обладнання служб екстреного виклику зовні лікарень	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень	10 м по горизонталі 3 м по вертикалі (поверх)		95 %		10 с		Тривалі періоди режиму очікування
Автодор.	Моніторинг та керування рухом	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	1-3 м по горизонталі 2,5 м по вертикалі		95 %	10 Гц	10 с	30 мс	Захист від спуфинга, фальсифікації
	Стягнення плати за проїзд транспортних засобів	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень, позиціонування з підвищеною точністю в тунелях	<1 м (поперек колії) 3 м (вздовж колії)	2 м/с	99 %	1 Гц	10 с		Захист від спуфинга та фальсифікації
Ж/Д, мор.	Відстеження майна (контейнерів)	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	10 – 30 м по горизонталі	5 м/с	99 %	300 с – 1 день			20 мДж на спрацьовування, захист від спуфинга, фальсифікації
		Позиціонування з повною точністю зовні приміщень	1 м по горизонталі			1 с	1 с		
БПЛА	БПЛА (Аналіз даних)	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	0,1 м по горизонталі 0,1 м по вертикалі	0,5 м/с 2°	99 %		10 с		Низьке енергоспоживання, захист від спуфинга, фальсифікації
	БПЛА (віддалене керування)	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	0,5 м по горизонталі 0,3 м по вертикалі		99 %			150 мс	Захист від спуфинга, фальсифікації
		Позиціонування з повною точністю зовні приміщень	0,5 м по горизонталі 0,1 м по вертикалі		99,9 %			150 мс	
Інше	Підтримка багатьох сервісів ВМР	Зона позиціонування 5G – зовні приміщень	2 м по горизонталі		90 %		10 с	1 с	Керування додатками позиціонування
		Зона позиціонування 5G – усередині приміщень	0,1 м по горизонталі		99 %		10 с	1 с	
	Підтримка обміну даними позиціонування.	Зона позиціонування 5G – зовні/всередині приміщень							Підтримка обміну даними позиціонування

Додаток Н
(обов'язковий)

Сценарії позиціонування та вимоги щодо категорій пристроїв

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

Таблиця 2.3 – Сценарії позиціонування та вимоги щодо категорій пристроїв

Категорія пристрою	Сценарій використання позиціонування	Показник КРІ	Зона обслуговування / середовище функціонування			
			Зона позиціонування з підвищеною точністю		Зона позиціонування 5G	
			Зовні та всередині приміщень	Зовні приміщень, село, передмістя	Зовні приміщень, щільна міська забудова	Усередині приміщень
Пристрої з наднизьким енергоспоживанням	Керування відходами, відстеження та керування майном	Точність по горизонталі	1 м	3 м – 30 м	3 м – 30 м	
		Точність по вертикалі				
		Точність оцінки швидкості (напряму)		5 м/с	5 м/с	
		Доступність	99 %	99%	99%	
		TTFF	10 с			
Пристрої, що носять абоненти	Велопрокат, доповнена реальність, пристрої, що носяться, рекламні повідомлення, керування потоками, позиціонування пацієнтів, служби екстреного виклику	Точність по горизонталі	0,2 м – 1 м	1 м – 3 м	1 м – 3 м	10 м – 50 м
		Точність по вертикалі	Зовні приміщень: 1 м – 3 м Усередині приміщень: 0,1 м – 1 м	3 м	3 м	0,1 м – 3 м
		Точність оцінки швидкості (напряму)		2 м/с (10°)	2 м/с (10°)	
		Доступність	80% - 99%	80% - 99%	80% - 99%	0,95
		TTFF	10 с – 30 с	10 с – 30 с	10 с – 30 с	10 с – 30 с
Пристрої між машинної взаємодії	Візки, моніторинг та керування рухом, стягування плати за проїзд, БПЛА (аналіз даних, віддалене керування), підтримка множинних сервісів BWP	Точність по горизонталі	0,1 м – 0,5 м	0,1 м – 3 м	1 м – 3 м	
		Точність по вертикалі	0,1 м	0,1 м – 0,3 м	2,5 м	
		Точність оцінки швидкості (напряму)		0,5 м/с (2°) – 2 м/с	0,5 м/с (2°) – 2 м/с	
		Доступність	99% - 99,9%	95% - 99,9%	95% - 99,9%	
		TTFF	1 с – 10 с	1 с – 10 с	1 с – 10 с	
	Сценарії позиціонування з дуже високою точністю та доступністю (до 99%) у сприятливому середовищі використання, у зоні позиціонування з підвищеною точністю, або зовні приміщень з помірною кількістю перешкод. Ця група вимагає точності не більше 0,2 м, очікуваних для сценаріїв відносного позиціонування, в процесі зближення при видаленні пристроїв один від одного не більше ніж на 10 м					
	Сценарії позиціонування з високою точністю та меншою (до 90%) доступністю в зоні позиціонування з підвищеною точністю або зовні приміщень					
	Сценарії позиціонування, в яких вимоги до точності BWP можна знизити за рахунок підвищення інших показників, таких, наприклад, як доступність та енергоспоживання					

Додаток П
(обов'язковий)

Вимоги точності та доступності послуг позиціонування

ФІРЕН

ТКСТБ

ВНТУ

Таблиця 2.13 - Вимоги точності та доступності послуг позиціонування [19]

Рівень сервісу позиціонуван ня	Абсолютне (А) або відносне (О)	Точність 95%		Доступність послуги позиціонуван ня	Затримка послуги позиціонуван ня	Сценарій використання		
		Горизонтальн а точність	Вертикальн а точність			Зона позиціонування 5G	Зона позиціонування 5G із підвищеною точністю	
							Зовні приміщень та у тунелях	Усередині приміщень
1	А	10 м	3 м	95 %	1 с	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год; Зовні приміщень (місто та пригород), швидкість до 250 км/год	–	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
2	А	3 м	3 м	99 %	1 с	Зовні приміщень (місто та передмістя), швидкість до 500 км/год для поїздів та до 250 км/год для інших засобів	Зовні приміщень (щільна міська забудова), швидкість до 60 км/год; Уздовж доріг швидкість до 250 км/год; уздовж залізниць, швидкість до 500 км/год	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
3	А	1 м	2 м	99 %	1 с	Зовні приміщень (місто та передмістя), швидкість до 500 км/год для поїздів та до 250 км/год для інших засобів	Зовні приміщень (щільна міська забудова), швидкість до 60 км/год; Уздовж доріг швидкість до 250 км/год; уздовж залізниць, швидкість до 500 км/год	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
4	А	1 м	2 м	99,9 %	15 мс	–	–	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
5	А	0,3 м	2 м	99 %	1 с	Зовні приміщень (передмістя), швидкість до 250 км/год	Зовні приміщень (щільна міська забудова), швидкість до 60 км/год; Уздовж доріг швидкість до 250 км/год; уздовж залізниць, швидкість до 500 км/год	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
6	А	0,3 м	2 м	99,9 %	10 мс	–	Зовні приміщень (щільна міська забудова), швидкість до 60 км/год.	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год
7	О	0,2 м	0,2 м	99 %	1 с	Усередині та зовні приміщень (передмістя, місто, щільна міська забудова), швидкість до 30 км/год; Відносне позиціонування між двома UE в межах 10 м один від одного, або між UE і опорним пунктом 5G в межах 10 м один від одного (опорний пункт 5G являє собою додаткове обладнання, розгорнуте в зоні обслуговування для підвищення показників позиціонування, наприклад, маяки по периметру зони зближення пристроїв)	–	Усередині приміщень швидкість до 30 км/год

Додаток Р
(обов'язковий)

Положення, внесок та технічне рішення за результатами розділів 1 - 4.

Таблиця 7.1 – Положення, внесок та технічне рішення за результатами розділів 1-4.

Положення 1	Прототипи	Внесок	Рішення
Комплекс методів і сценаріїв позиціонування пристроїв у мережах п'ятого та наступних поколінь містить вимоги до кількісних показників та технічні рішення для їх досягнення в інтересах галузі зв'язку, а також є засобом підвищення ефективності використання систем телекомунікацій та радіотехнічних пристроїв при побудові, функціонуванні та керуванні мережами на основі визначення місцезнаходження.	Специфікації та рекомендації 3GPP [2–4], [6–8], [10-12], [14-16], FCC [16-17], огляди del PeralRosado [13], Fischer [4], Campos [1], Liu [11], Laoudias [15], Wymeersch [16], Han [17], Bartoletti [11], Pedersen [17], Wen [13], Shahmansoori [18,19, 20]	Аналіз еволюції мережевого позиціонування, вимог до кількісних показників, сценаріїв та технічних рішень для їх досягнення на користь народного господарства. Виділення приватних проблемних сценаріїв для розробки методології позиціонування з дуже високою точністю (до 0,3 м), високою точністю (до 3 м) та з широкою зоною охоплення (до 10 м)	Оформлення мережевого позиціонування як нового наукового спрямування
	LAC/LAB: Bourdoux [14], Taranto [15], Slock [16], Dammann [17, 14], Ko [18], Guerra [13, 14], Guidi [12], Witrisal [14], Lemic [14], Hakkarainen [15], Werner [14] Koivisto [15-19, 6], Rastorgueva-Foi [10-12]	Обґрунтування мережевого позиціонування як засобу підвищення ефективності побудови, функціонування та керування мережами п'ятого та наступних поколінь. Уточнення проблеми діаграмоутворення на основі позиціонування	