

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри АНС
д-р техн. наук, проф.

_____ Ларін В.Ю.

«_____» _____ 2023р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
за освітньо-професійною програмою
«ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО РУХУ»

Тема:

Мультистатичний первинний оглядовий радар

Виконавець: Кургановська Ірина Вадимівна

Керівник: Аргунов Геннадій Федорович

Керівник спеціального
розділу д.т.н. проф. Остроумов Іван
Вікторович

Нормоконтролер: Аргунов Геннадій Федорович

Київ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Обслуговування повітряного руху»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АНС

_____ В.Ю. Ларін
« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Кургановської Ірини Вадимівни

1. *Тема дипломної роботи:* **«Мультистатичний первинний оглядовий радар»** затверджена наказом ректора від "20" вересня 2023 р. № 1594/ст
2. *Термін виконання роботи:* 05.09.2023 – 30.11.2023
3. *Вихідні дані до роботи:* система спостереження за повітряним рухом.
4. *Зміст пояснювальної записки:* Розвиток систем спостереження. Спроможність систем спостереження під час обслуговування повітряного руху. Категорії спостереження. Переваги та недоліки мультистатичного первинного оглядового радару. Основи радіолокації. Принципи мультистатичного радару. Опис когерентних мультистатичних систем. Дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат ПО. Розуміння радарів точного заходження на посадку: технології, застосування та майбутні розробки. Автоматизація обробки даних.
5. *Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:* ілюстрації пояснювальних матеріалів, порівняльні таблиці, схеми.

6. Календарний план графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Підготовка та написання 1 розділу «Аналіз сучасних та перспективних систем спостереження»	05.09 – 01.11	
2.	Підготовка та написання 2 розділу «Аналіз використання та застосування мультистатичної первинної радіолокації»	20.09 – 01.11	
3.	Підготовка та написання 3 розділу «Застосування радіолокатору в аеронавігаційній системі України»	25.09 – 15.11	
4.	Підготовка та написання 4 розділу «Спеціальний розділ»	10.10 – 25.10	
5.	Підготовка та написання 5 розділу «Охорона праці та охорона навколишнього середовища»	10.10 – 15.11	
6.	Оформлення пояснювальної записки	10.10 – 20.11	
7.	Підготовка презентації та доповіді	15.11 – 25.11	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальний розділ	Проф. д.т.н Остроумов І.В.	05.09.2023	05.09.2023

8. Дата видачі завдання: «_05_» _ вересня _ 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Аргунов Геннадій Федорович
(підпис керівника) (прізвище, ім'я, по батькові)

Завдання прийняв до виконання _____ Кургановська Ірина Вадимівна
(підпис студента) (прізвище, ім'я, по батькові)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «**Мультистатичний первинний оглядовий радар**»: 108 сторінок, 36 рисунка, 4 таблиці, 31 використаних джерел.

ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО РУХУ, РАДІОЛОКАТОР, СИСТЕМА СПОСТЕРЕЖЕННЯ, МУЛЬТИЛАТЕРАЦІЯ, ВІДПОВІДАЧ, ВДОСКОНАЛЕННЯ

Мета дипломної роботи – аналіз можливості впровадження та використання мультистатичної первинної радіолокації в Україні.

Засоби досягнення – аналіз технологій мультистатичного первинного оглядового радару.

Об'єкт удосконалення – система спостереження за повітряним рухом.

Прогнозовані припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – проведений аналіз надасть змогу оцінити технології мультистатичного первинного оглядового радару в радіолокаційних системах з метою розкриття його потенціалу, переваг та можливих прикладень .

АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Терміни та визначення	10
Вступ	13

Розділ 1. АНАЛІЗ МУЛЬТИСТАТИЧНОГО ПЕРВИННОГО

ОГЛЯДОВОГО РАДАРУ

1.1. Розвиток систем спостереження	17
1.2. Спроможність систем спостереження під час обслуговування повітряного руху	19
1.3. Категорії спостереження	23
1.4. Переваги та недоліки мультистатичного первинного оглядового радару	32
Висновки до розділу 1	34

Розділ 2. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

МУЛЬТИСТАТИЧНОЇ ПЕРВИННОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ.....

2.1. Основи радіолокації.....	35
2.2. Принципи мультистатичного радару	41
2.3. Опис когерентних мультистатичних систем	50
Висновки до розділу 2	56

Розділ 3. ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРУ В

АЕРОНАВІГАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ

3.1. Дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-B привизначенні координат ПО	57
3.2. Впровадження мультистатичного радару в аеропорт «Львів».....	64
3.3. Розуміння радарів точного заходження на посадку: технології,застосування та майбутні розробки	68

Висновки до розділу 3	72
Розділ 4. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	73
4.1. Автоматизація обробки даних	73
4.2. Виявлення, ідентифікація та відстеження літаючих об'єктів у трьохвимірах за допомогою мультистатичних радарів	75
Висновки до розділу 4	86
Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	87
5.1. Вплив радіолокації на навколишнє середовище.....	87
5.2. Вплив радіолокації та електромагнітних полів на людину	93
Загальні висновки до роботи	104
Список використаних джерел	106

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АДВ – аеродромна диспетчерська вишка

АС КІР – автоматизована система керування повітряним рухом

АДО – аеродромне диспетчерське обслуговування

БІ – безпека польотів

ГАНІ – Глобальний аеронавігаційний плану

ОІ – обслуговування повітряного руху

ОІІ – організація повітряного руху

РІЦ – районний диспетчерський центр

ЕМІ – електромагнітне поле

ІАНО – постачальники аеронавігаційного обслуговування

ІВІ – правила візуальних польотів

ІС – повітряне судно

УІ – управління повітряним рухом

АДС-В (*Automatic Dependent Surveillance-broadcast*) — автоматичне залежне спостереження в режимі широкозонного мовлення

А-СМГС (*Advanced Surface Movement Guidance and Control System*) – покращена система керування наземним рухом і контролю за ним

АІР (*Aeronautical Information Publication*) – Збірник аеронавігаційної інформації

АТМ (*Air Traffic Management*) — організація повітряного руху

СІР (*Control Zone*) — диспетчерська зона

ІІІ (*Filed Flight Plan*) – наданий план польоту

ІІС (*Flight Information Service*) – польотно-інформаційне обслуговування

ГНС (*Global Navigation Satellite System*) – глобальна навігаційна супутникова система

ІСАО (*International Civil Aviation Organisation*) — Міжнародна організація цивільної авіації

ІНС (*Inertial Navigation System*) – інерціальна навігаційна система

KPA (*Key Performance Areas*) – ключові сфери ефективності

MLAT (*Multilateration System Surveillance*) — багатопозиційна система спостереження

MSPSR (*Multi Static Primary Surveillance Radar*) — Мультистатичний первинний оглядовий радар

PSR (*Primary Surveillance Radar*) — первинний оглядовий радіолокатор

SSR (*Secondary Surveillance Radar*) — вторинний оглядовий радіолокатор

SES (*Single European Sky*) – Єдиного європейського неба

PAR (*Precision Approach Radar*) – радіолокатор точного заходження на посадку

TDOA (*Time Difference Of Arrival*) – різниця часу отримання сигналу

NTZ (*No Transgression Zone*) – проміжної захисної зони

WAM (*Wide Area Multilateration*) – мультилатерація глобальної зони

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Відповідач (*Transponder*) — бортове приймально-передавальне радіолокаційне обладнання, що автоматично передає сигнал у відповідь відразу після отримання сигналу-запиту наземного радіолокатора з будь-якого напрямку.

Вторинний оглядовий радіолокатор (*Secondary Surveillance Radar*) — радіолокаційна система спостереження, яка передає сигнали-запити та приймає у відповідь сигнали бортових відповідачів.

Дані спостереження (*Surveillance data*) — будь-який елемент даних, із міткою часу чи ні, у межах система спостереження, яка стосується: положення літака 2D; вертикального положення літака; ідентифікаційних даних повітряного судна; 24-розрядної адреси літака ICAO; намірів літака; швидкості літака; прискорення літака.

Дисплей повітряної обстановки (*Situation Display*) — електронний дисплей, на який виведено інформацію з відображенням місцеперебування та руху повітряних суден та іншу необхідну інформацію.

Диспетчерська зона (*Control Zone*) — контрольований повітряний простір, що простягається вгору від земної поверхні до встановленої верхньої межі.

Ідентифікація (*Identification*) — ситуація, коли індикація місцезнаходження конкретного повітряного судна спостерігається на дисплеї повітряної обстановки та з упевненістю ідентифіковано.

Індикація місцезнаходження (*Position Indication*) візуальне відображення у несимволічній та/або символічній формі на дисплеї повітряної обстановки місцезнаходження повітряного судна, аеродромного транспортного засобу або іншого об'єкта.

Інформація про рух (*Traffic Information*) — інформація, що надається органом обслуговування повітряного руху екіпажу повітряного судна для попередження його про інші відомі повітряні судна або повітряні судна, які можуть перебувати недалеко від його місцеперебування або зазначеного

маршруту польоту, що допомагає екіпажу запобігати зіткненню.

Код SSR (*Code SSR*) — номер, присвоєний конкретному багатоімпульсному сигналу відповіді, переданий відповідачем у режимі А або режимі С.

Моніторинг траєкторії польоту (*Flight Path Monitoring*) — використання систем спостереження обслуговування повітряного руху з метою забезпечення повітряних суден інформацією та повідомленнями про значні відхилення від номінальної траєкторії польоту, включаючи відхилення від умов, виданих у складі диспетчерських дозволів.

Мультистатичний первинний оглядовий радар (*Multi Static Primary Surveillance Radar*) — система, що складається з декількох рознесених у просторі моностатичних радарів або бістатичних радарів з спільною площею покриття.

Обслуговування повітряного руху (*Air traffic service*) — загальний термін, що означає у відповідних випадках надання таких послуг: польотно-інформаційне обслуговування, аварійне обслуговування, консультативне обслуговування, диспетчерське обслуговування повітряного руху (районне диспетчерське обслуговування, диспетчерське обслуговування підходу або аеродромне диспетчерське обслуговування).

Організація повітряного руху (*Airspace Management*) — динамічний, інтегрований менеджмент повітряного руху та повітряного простору, що включає обслуговування повітряного руху, менеджмент повітряного простору та менеджмент потоків повітряного руху, що виконується безпечно, економічно та ефективно шляхом надання засобів та безперервного обслуговування у взаємодії з усіма сторонами та із залученням бортових та наземних функцій.

Повітряне судно (*Aircraft*) — це літальний апарат, що тримається в атмосфері за рахунок його взаємодії з повітрям, відмінної від взаємодії з повітрям, відбитим від земної поверхні, і здатний маневрувати у тривимірному просторі.

Радіолокатор (*Radar*) — засіб радіовиявлення, який видає інформацію

про дальність, азимут та/або кут місця об'єкта.

Радіолокаційне ешелонування (*Radar Separation*) — ешелонування, коли інформацію про місцезнаходження ПС отримано з радіолокаційних джерел.

Радіолокаційний контакт (*Radar Contact*) — ситуація, коли радіолокаційне місцезнаходження відповідного повітряного судна спостерігається та ідентифіковано на дисплеї повітряної обстановки.

Символ місцезнаходження (*Position Symbol*) — візуальне відображення у символічній формі на дисплеї повітряної обстановки відомостей про місцезнаходження повітряного судна, аеродромного транспортного засобу або іншого об'єкта, отриманих після автоматичного оброблення позиційних даних, отриманих від будь-якого джерела.

Точність вимірювання — здатність систем спостереження обслуговування повітряного руху вимірювати координати й параметри руху об'єктів із заданою похибкою.

Трек (*Track*) — проекція лінії шляху повітряного судна на земну поверхню, напрямок якої в будь-якій точці польоту виражений в градусах від північного (істинного, магнітного, компасного або умовного) меридіана;

Управління повітряним рухом (*Air Traffic Control*) — комплекс заходів з організації управління операційним повітряним рухом.

ВСТУП

Сучасна аерокосмічна і оборонна промисловість постійно збільшує вимоги до точності, надійності та ефективності систем радіоелектронної боротьби та контролю повітряного простору. Однією з важливих складових цієї індустрії є радарні системи, які змінюють ключову роль у виявленні, визначенні та відстеженні об'єктів у повітрі. У цьому контексті мультистатичні первинні оглядові радары стають єдиним з перспективних гілок розвитку радарних технологій.

Мультистатичний первинний оглядовий радар - це нова парадигма в радарній техніці, яка відрізняється від традиційних радарів за важкою будовою та принципом роботи. Вона передбачає використання розподілених датчиків та спеціальних алгоритмів обробки сигналів для отримання інформації про об'єкти у повітрі. Ця технологія дозволяє досягти великого рівня точності та стійкості до перешкод, що робить її особливо корисною для використання в умовах сучасного бойового середовища.

Україна, як суверенна країна, має власний повітряний простір та систему аеронавігації, відповідну за безпеку цивільної авіації. Підрозділ, присвячений аеронавігаційній системі України, допоможе вирішити перспективи та можливості впровадження мультистатичного первинного оглядового радару в національну систему спостереження та безпеки повітряного руху. Можна визначити, які виклики та переваги можуть виникнути в процесі впровадження та як мультистатичний первинний оглядовий радар може покращити створення більш безпечної та ефективною системи аеронавігації в Україні.

Повітряний простір України - це великий та різнобарвний об'єкт, який має велике значення для цивільної авіації, оборони, торгівлі та транспорту.[3]

Повітряний простір України та повітряний простір над відкритим морем, за обслуговування повітряного руху в якому Україна відповідає згідно з міжнародними договорами, визначається та встановлюється відповідно до стандартів та рекомендованої практики Міжнародної організації цивільної

авіації (International Civil Aviation Organisation – ICAO), документів ЄВРОКОНТРОЛЮ, Повітряного кодексу України та Положення про використання повітряного простору України, які складаються з таких структурних елементів[3]:

- Верхній район аеронавігаційної інформації (Upper Flight Information - region UIR KYIV) - це верхній рівень повітряного простору, що охоплює Київ та прилеглі райони для інформаційного та аеронавігаційного обслуговування повітряного руху в регіоні.
- Регіони польотної інформації (РПІ Дніпропетровськ, РПІ Київ, РПІ Львів, РПІ Одеса та РПІ Сімферополь) – це більші регіони, що охоплюють певні регіони України, які забезпечують управління повітряним рухом та обслуговування повітряного руху в цих регіонах.
- Зони та райони управління (Верхній диспетчерський район (Upper Control Area – UTA), Диспетчерський район (Control Area – СТА), Термінальний диспетчерський район (Terminal Area – ТМА) та Диспетчерська зона (Control Zone - СТР)) – це підрайони в межах FIR, де органи управління повітряним рухом надають послуги з обслуговування повітряного руху.
- Військові ТМА і СТР - це диспетчерські райони і зони, в яких управління повітряним рухом здійснюється військовими органами.
- Зони польотної інформації на аеродромах (Aerodrome Flight Information Zone - AFIZ) – це райони, в яких надається польотна інформація та аварійне обслуговування на аеродромах.
- Зони аеродромного руху (Aerodrome Traffic Zone - ATZ) встановлюються для кожного аеродрому і є зонами, де потрібне особливе управління повітряним рухом.
- Маршрути ОПР - включають маршрути між державних переходів та інші маршрути польотів, що вимагають особливого управління повітряним рухом.

- Вільний повітряний простір (Free Route Airspace - FRA) -зони, в яких польоти можуть виконуватися без обмежень.
- Заборонені (З), обмежені (О) та небезпечні (Н) зони - зони, де польоти заборонені або обмежені з міркувань безпеки.
- Навчально-тренувальні зони (Т) – це зони, що використовуються з метою навчання, які можуть бути тимчасово відокремленими або зарезервованими зонами.
- Райони з особливим режимом використання повітряного простору – це райони вздовж державних кордонів або поблизу зон обмеженого польоту, де встановлені особливі правила польотів.

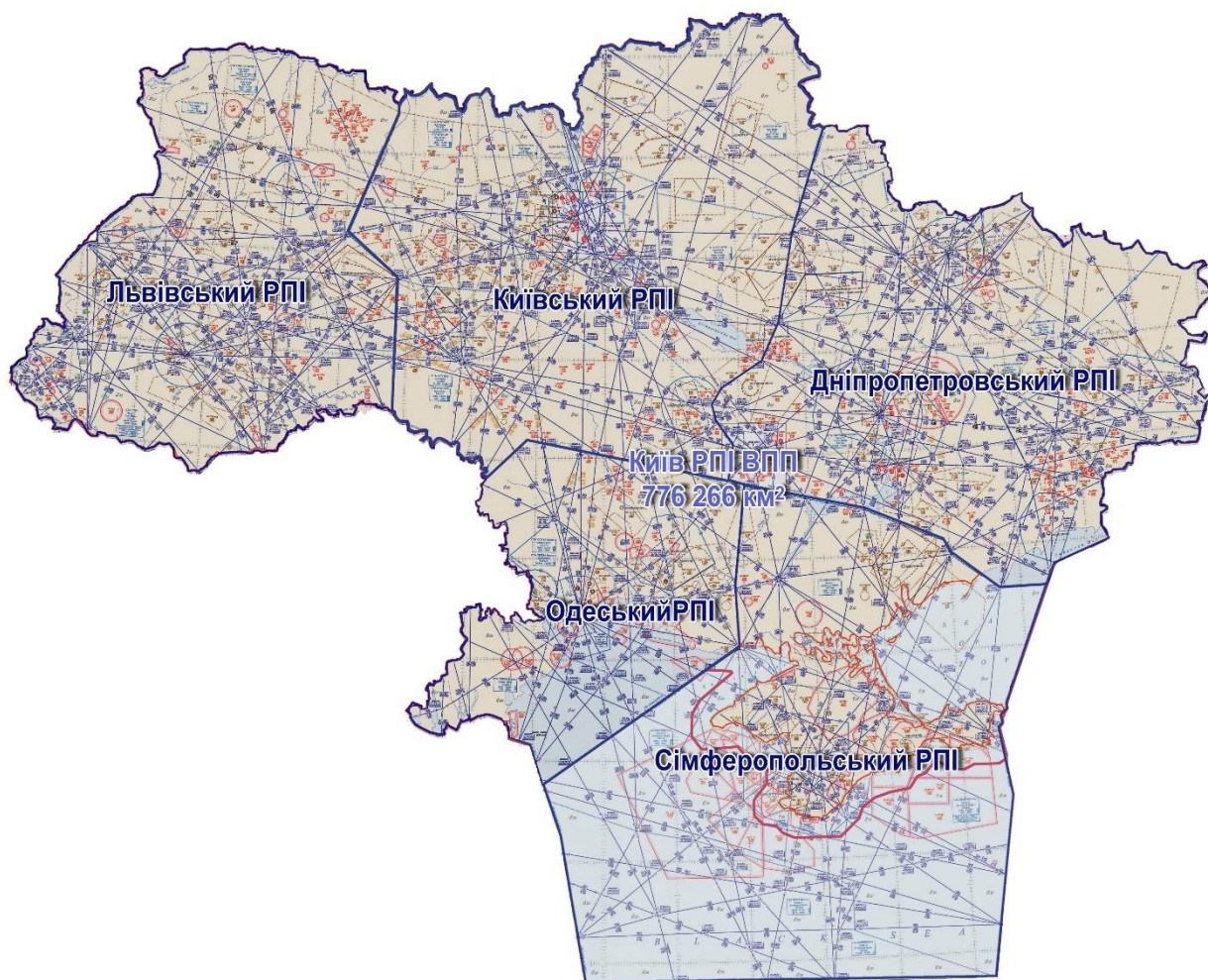


Рисунок 1. – Повітряний простір України[3]

Метою дипломної роботи є дослідження можливості та доцільності застосування мультистатичної первинної радіолокації в Україні.

Для досягнення мети роботи, необхідно виконати наступні завдання:

1. Проаналізувати системи спостереження які існують на даний момент та їх розвиток.
2. Оцінити технології мультистатичного первинного оглядового радару в радіолокаційних системах з метою розкриття його потенціалу, переваг та можливих прикладень.
3. Розглянути етапи впровадження нової мультистатичної первинної радіолокації.
4. Запропонувати можливі варіанти використання мультистатичного первинного оглядового радару в Україні.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

1.1. Розвиток системи спостереження

Системи спостереження передбачені для отримання своєчасної достовірної інформації про місце знаходження повітряних суден, їх положення, швидкості і напрямку руху.

Сучасні засоби спостереження розподіляються на кооперативні та некооперативні. Кооперативні системи такі, як вторинні оглядові радіолокатори (Secondary surveillance radar – SSR) потребують отримання інформації від бортових систем. Некооперативні системи, такі як радар первинного спостереження (Primary Surveillance Radar – PSR) в змозі визначити місцезнаходження повітряного судна шляхом передачі та отримання імпульсів радіохвиль, які відбиваються від корпусу ПС.[20]

Подальший розвиток систем спостереження передбачає розвиток інфраструктури концепції автоматичного залежного спостереження (Automatic Dependent Surveillance-broadcast - ADS-B), функціонування якої у цілому залежить від певних умов[5]:

- наявності на борту кожного ПС необхідного обладнання ATRSB Mode S або приймально передавальне бортове обладнання ADS-B (Universal Access Transceiver- UAT);
- поширення станцій диференціальних поправок системи глобальної супутникової навігації (Global Navigation Satellite System – GNSS) для підвищення точності визначення місцеположення ПС;
- побудови розгалуженої мережі наземних приймальних станцій.

Інформація, отримувана від систем ADS-B, дозволяє відмовитись від використання вторинних радіолокаційних станцій та забезпечити інформацією про повітряний рух над океанічною поверхнею та у віддалених гірських регіонах.

Перехідною ланкою до систем ADS-B є мультилатераційні системи (Multilateration System – MLAT) аеропортів (рис. 1.1).



Рисунок 1.1. – Принцип функціонування MLAT[5]

Система складається з певної кількості станцій приймання даних від ATRSB Mode S, розмішених у зоні аеропорту. За рахунок приймання сигналів від одного джерела даних багатьма приймачами визначаються різниці часу проходження сигналів від бортового обладнання до наземної частини. Цієї інформації достатньо MLAT для визначення точного місцеположення повітряного судна.

Система авіаційного спостереження складається з декількох елементів, використання яких визначається вимогами до конкретних видів застосування. Ні види застосування, ні кінцеві користувачі не є частиною системи авіаційного спостереження. Межею системи спостереження є прикладний інтерфейс, тобто точка, у якій система спостереження надає інформацію спостереження для використання та в якій оцінюється робота системи (рис.1.2).



Рисунок 1.2. – Типова функціональна система спостереження[5]

1.2. Спроможність систем спостереження під час обслуговування повітряного руху

Система спостереження ОПР - ATS surveillance system - загальний термін, який означає у відповідних випадках ADS-B, PSR, SSR, MLAT або будь-яку іншу порівняну з ними систему наземного базування, що дає змогу ідентифікувати ПС (порівняна система наземного базування - це система, яка за результатами порівняльної оцінки або іншої застосованої методології демонструє рівень безпеки та характеристики, що еквівалентні або кращі, ніж у моноімпульсного вторинного радіолокатора).[1]

На дисплеї повітряної обстановки, на якому диспетчеру УПР надається інформація спостереження, обов'язково відображаються дані про місцезнаходження ПС, картографічна інформація, необхідна для ОПР з використанням систем спостереження ОПР, і наявності інформація, що стосується ідентифікації та рівня польоту ПС з урахуванням прийнятих в Україні систем вимірів.

Система спостереження ОПР забезпечує надання інформації, що постійно оновлюється, у тому числі про місцезнаходження ПС.

Індикація місцезнаходження ПС надається у вигляді окремих символів місцезнаходження ПС, наприклад символів, що генеруються системами PSR, SSR, ADS-B, MLAT, або поєднання символів, також індикація місцезнаходження ПС може надаватися у вигляді міток, що генеруються PSR, або відповідей, що генеруються SSR.

У відповідних випадках використовуються певні символи з позначкою для відображення прогнозованих місць неоновленого треку, даних відмітки цілі та треку, або ненавмисно дубльованих кодів SSR, та/або ненавмисно дубльованих ідентифікованих розпізнавальних індексів ПС.

У разі погіршення якості даних спостереження до стану, що вимагає обмеження такого обслуговування, інформація про такі обставини повинна надаватися диспетчеру УПР із застосуванням умовних позначень або іншими засобами.

Зарезервовані коди SSR, у тому числі 7500, 7600, 7700, режим "IDENT", аварійний ADS-B та/або терміновий режим, пов'язані з безпекою польотів сповіщення та попередження, а також інформація, що стосується автоматизованої координації, повинні надаватися у чіткій та однозначній формі, яка забезпечує легкість її сприйняття.[1,2]

Формуляри супроводження цілей слід подавати у літерно-цифровій формі, яка має відповідати інформації, отриманій від систем спостереження ОПР та за потреби від системи оброблення польотних даних.

Інформація у формулярі супроводження повинна мати щонайменше дані

про ідентифікацію ПС, а саме: код SSR або розпізнавальний індекс ПС, а також за наявності інформацію про барометричний рівень польоту ПС. Таку інформацію можна отримати від SSR, що працює в режимах А, С та S, та/або від ADS-B.

Формуляри супроводження пов'язуються з відповідним символом місцезнаходження таким чином, щоб унеможливити їх помилкову ідентифікацію диспетчером УПР. Уся інформація у формулярах супроводження надається у чіткій та стислій формі.

Інформація, отримана від систем спостереження ОПР, у тому числі пов'язаних з безпекою сповіщень та попереджень, таких як попередження про конфлікти STCA та попередження про мінімальну безпечну висоту MSAW, повинна використовуватися якомога частіше при наданні ОПР з метою підвищення пропускної спроможності та ефективності, а також з метою підвищення безпеки польотів.

Кількість ПС, що одночасно забезпечуються обслуговуванням з використанням систем спостереження ОПР, не повинна перевищувати встановленої для кожного сектору органу ОПР максимальної пропускної спроможності з урахуванням[1]:

- складності структури відповідного диспетчерського району або сектору ОПР;
- функцій, які мають виконуватися у відповідному диспетчерському районі або секторі ОПР;
- оцінки робочої завантаженості диспетчерів УПР, характеристик різних ПС та пропускної спроможності сектору/органу ОПР;
- ступеня технічної надійності та наявності як бортових, так і наземних основних і резервних систем зв'язку, навігації та спостереження;
- за наявності щоденних або періодичних суттєвих змін щільності повітряного руху застосовуються процедури суміщення/розділення секторів органів ОПР для задоволення потреб диспетчерського ОПР.

Для забезпечення безпечного та ефективного використання SSR, ADS-B та MLAT пілоти та диспетчери УПП повинні суворо дотримуватися опублікованих експлуатаційних правил і використовувати стандартну радіотелефонну фразеологію. Завжди повинно забезпечуватися правильне встановлення кодів відповідача та/або розпізнавальних індексів ПС.

Коди 7700, 7600, 7500 резервуються на міжнародній основі для використання екіпажами ПС у випадках виникнення аварійної ситуації, відмови зв'язку та незаконного втручання в діяльність екіпажу ПС.

Розподіл та призначення кодів SSR мають здійснюватися за такими принципами:

а) коди SSR повинні розподілятися відповідно до регіональних аеронавігаційних угод з урахуванням радіолокаційного перекриття над сусіднім повітряним простором;

б) розподіл кодів SSR органами ОПП здійснюється відповідно до плану та процедур, визначених Європейським аеронавігаційним планом (Doc 7754) та Європейським планом менеджменту кодів вторинної радіолокації (EUR Doc 023);

в) план та процедури мають узгоджуватися з планами та процедурами, що застосовуються в сусідніх державах;

г) під час розподілу кодів SSR слід уникати використання одного й того самого коду SSR для інших функцій протягом установленого періоду часу в межах зони дії одного SSR;

г) для зниження робочого навантаження на пілота та диспетчера УПП, а також для зменшення потреб у зв'язку "повітря - земля" слід звести до мінімуму число змін кодів, які має здійснювати пілот;

д) дискретні коди присвоюються ПС відповідно до плану та процедур, визначених в Європейському аеронавігаційному плані (Doc 7754);

е) за потреби індивідуальної ідентифікації ПС кожному ПС присвоюється дискретний код, який слід по можливості зберігати впродовж усього польоту.

1.3. Категорії спостереження

Мультилатераційні системи

Мультилатерація, також відома як гіперболічне позиціонування, — це процес визначення місцезнаходження об'єкта шляхом точного обчислення різниці в часі надходження (Time Difference of Arrival - TDOA) сигналу, що надходить від об'єкта до трьох або більше приймачів.

Мультилатерація є перевіреною технологією, яка використовується протягом багатьох десятиліть у програмах навігації та спостереження. Він заснований на методології, відомій як різниця в часі прибуття TDOA, яку можна використовувати одним із двох способів[21]:

- Сигнал від мобільного пристрою вимірюється в ряді відомих фіксованих місць;
- Сигнали з ряду фіксованих точок вимірюються мобільним приймачем.

TDOA сигналів на приймачі(ах) дозволяє визначити положення мобільного об'єкта.

Як інструмент навігації мультилатерація використовує єдиний мобільний приймач для вимірювання сигналів, що передаються з кількох сайтів у фіксованих відомих положеннях. Процес відомий як гіперболічна навігація, оскільки з двома вузлами передачі існує гіперболічна крива, на якій приймач може лежати для будь-якої конкретної різниці в часі надходження пар. Додавання третього місця передачі зводить всю гіперболічну криву до двох конкретних можливих точок розташування, одну з яких зазвичай можна відкинути як неймовірну. Додавання четвертого місця передачі призведе до єдиної обчисленої позиції для приймача.

Мультилатерація використовує низку наземних станцій, які розміщуються в стратегічних місцях навколо аеропорту, його місцевої термінальної зони або більш широкої території, яка охоплює більший навколишній повітряний простір.

Ці пристрої прослуховують «відповіді», як правило, запитувальні сигнали, що передаються від місцевого SSR або станції мультилатерації. Оскільки окремі літальні апарати будуть знаходитися на різних відстанях від кожної з наземних станцій, їхні відповіді будуть отримані кожною станцією в частково різний час. Використовуючи вдосконалені методи комп'ютерної обробки, ці індивідуальні різниці в часі дозволяють точно розрахувати положення літака(рис.1.3).

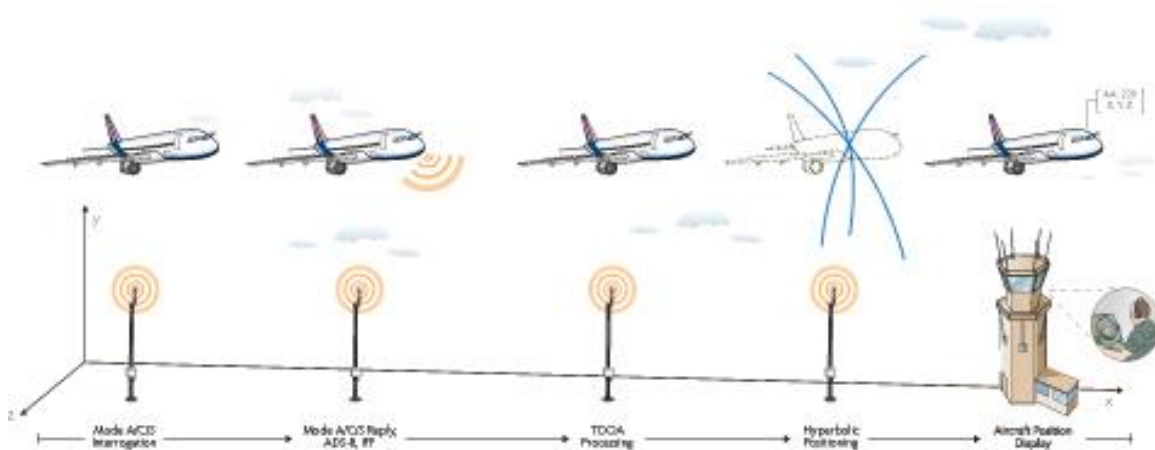


Рисунок 1.3. – Принцип роботи MLAT[22]

MLAT в дії

1. Запит у режимі A/C/S
2. Режим A/C/S Відповідь, ADS-B, IFF
3. Обробка різниці в часі прибуття (TDOA)
4. Гіперболічне позиціонування
5. Відображення положення літака

Теоретично всі стаціонарні вузли випромінюють імпульсний сигнал точно в один і той же час, але на різних частотах, щоб уникнути взаємних перешкод. Тоді вимірний TDOA на приймачі дозволить розрахувати положення приймача. Однак на практиці реалізація мультилатерації в операційних системах вимагала дещо складніших стратегій передачі.

Історичне використання технології мультилатерації для навігації включає такі системи, як Gee, DECCA, LORAN і Omega. Сучасні системи, такі

як глобальна система позиціонування (GPS) і глобальна мультилатерація, також використовують принципи мультилатерації.[23]

Мультилатерацію також можна використовувати як для наземного (аеродромного), так і для спостереження за повітряним рухом (рис.1.4). Датчики MLAT (передавачі/приймачі) можна розташувати в межах аеропорту для наземного спостереження, в аеропорту та поблизу нього для моніторингу трафіку прибуття та відльоту або на великій території, де звичайний радар непрактичний або неможливий, для моніторингу руху по маршруту.

У відповідь на запитувальний сигнал від одного з датчиків MLAT транспондер транспортного засобу або літака передасть відповідь, яка буде отримана та оброблена всіма сайтами MLAT. Розбіжність TDOA на різних наземних майданчиках дозволить точно визначити положення транспортного засобу або літака. Датчики MLAT також можуть отримувати та обробляти позицію GPS літака за допомогою передач автоматичного залежного спостереження (ADS-B).

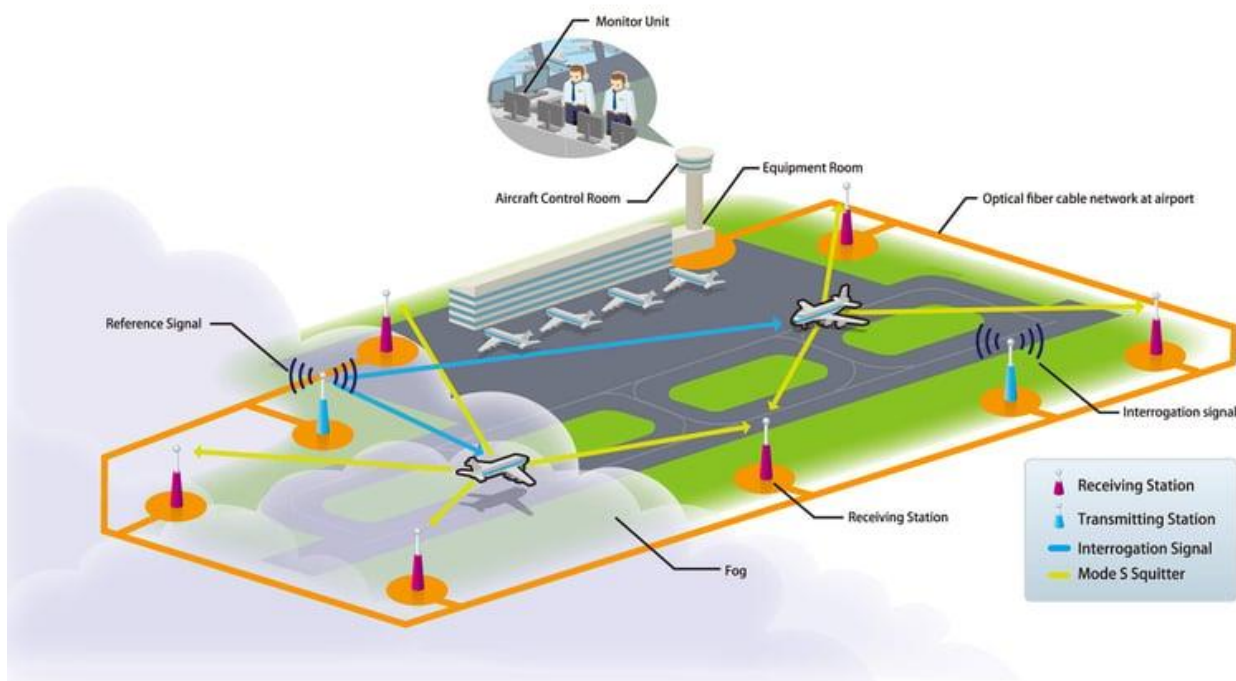


Рис 1.4. - система мультилатерації[23]

Таблиця 1.1. – Технічні характеристики

Міжнародний стандарт ED – 117		
ASTERIX 10, відповідність SNMP		
Точність позиціонування (злітно-посадкова смуга, руліжна доріжка, перон)		Діапазон похибок в межах 7,5 м. при 95% інформації про місцезнаходження в межах 12 м. при 99% інформації про місцезнаходження
Частота		1090 МГц (сигнал відповіді), 1030 МГц (сигнал запиту)
Стан середовища	Відкритий	-30 °С ~ +60 °С
	Закритий	0 °С ~ 40 °С
Джерело живлення		АС100 ~ 230В

До технічних характеристик відносять (табл. 1.1):

- Точне вимірювання позиції методом оптичного підключення
- За літаком можна спостерігати на відстані до 30 морських миль навколо аеропорту
- Інтерфейс міжнародного стандарту

Переваги та недоліки технології MLAT

Особливості:

- Спостереження, спеціально розроблене для роботи на наземні та підхідні операції;
- Використовує всю наявну авіоніку: режим A/C, режим S і ES;
- Найточніша система на поверхні спостереження;
- Переверений на практиці пакет моделювання;
- Розроблено для високої надійності та доступності;
- Найменший форм-фактор;
- Низьке енергоспоживання та гнучкість джерел живлення;
- Гнучке розміщення приймача;
- Розширені методи забезпечення цілісності даних;
- Масштабоване та гнучке оновлення платформи;
- Легкий локальний і дистанційний пошук несправностей і діагностика.

Переваги:

- Додаткова авіоніка не потрібна;
- Дуже висока надмірність;
- Низька вартість життєвого циклу та швидке розгортання;
- Вища доступність і надійність;
- Гарантована продуктивність;
- Простота монтажу;
- Зниження системних витрат і простота розміщення;
- Найбільше покриття, точність і найкраще ціна-продуктивність;
- Просте розширення покриття;
- Впевненість у охопленні, продуктивності та розміщення перед встановленням;
- Правильний перший підхід допомагає уникнути ескалація витрат;
- Простота і низька вартість монтажу та експлуатації;
- Повна інтеграція ADS-B.

Недоліки:

- Вимагає кількох каналів зв'язку;
- Іноді повідомляє про помилкові цілі (відображення, багатопроменевість);
- Немає виявлення помилок у 4-значному коді та висоті, що передаються з транспондерів режиму C;
- Встановлення та обслуговування систем може бути помірно дорогим через витрати, пов'язані з наданням та обслуговуванням кількох баз, особливо якщо існуюча інфраструктура недоступна;
- Системи вимагають кількох місць з безперешкодним оглядом літака. У деяких середовищах це може бути серйозною проблемою;
- Потрібен передавач, щоб передати дані, необхідних для УПР;
- Вимагає кількох передавачів для великого покриття через низький коефіцієнт підсилення антени висхідної лінії зв'язку, коли використовується omni-антена порівняно з радарною антеною з високим коефіцієнтом посилення).

Вторинний оглядовий радар (Secondary surveillance radar – SSR)

Вторинний оглядовий радар (SSR) — це радіолокаційна система, що використовується в управлінні повітряним рухом (Air Traffic Control - ATC), яка, на відміну від первинних радіолокаційних систем, які вимірюють пеленг і відстань до цілей за допомогою виявлених відбитків радіосигналів, покладається на цілі, обладнані радаром(рис.1.5). Транспондер, який відповідає на кожен сигнал запиту, передаючи закодовані дані, такі як ідентифікаційний код, висота літака та іншу інформацію залежно від вибраного режиму. SSR базується на технології військової ідентифікації «другий чи ворог» (IFF), спочатку розробленій під час Другої світової війни, тому ці дві системи все ще сумісні. Моноімпульсний вторинний оглядовий радар (MSSR), Mode S, Система запобігання зіткненням (Traffic Collision Avoidance System – TCAS) і ADS-B є аналогічними сучасними методами вторинного спостереження.[24]

Антенна радара обертається (зазвичай зі швидкістю 5-12 обертів на хвилину) і передає імпульс, який приймається бортовим обладнанням (транспондером). Транспондер надсилає відповідь, що містить принаймні код (якщо працює в режимі А), але частіше він поєднується з рівнем (режим С) або іншою інформацією, наприклад ідентифікацією літака, вибраним рівнем тощо (Режим S). Отримана інформація залежить від режиму опитування (А, С або S) і можливостей транспондера. Наприклад, запит у режимі А отримає відповідь у режимі А, навіть якщо транспондер може мати можливості режиму С або Mode S, а запит у режимі С не ініціює відповідь від транспондера режиму А. Як правило, за двома опитуваннями в режимі А слідує опитування в режимі С. Причина для більш частого використання режиму А полягає в тому, що ідентичність повітряного судна (код SSR) є більш важливою для диспетчера.

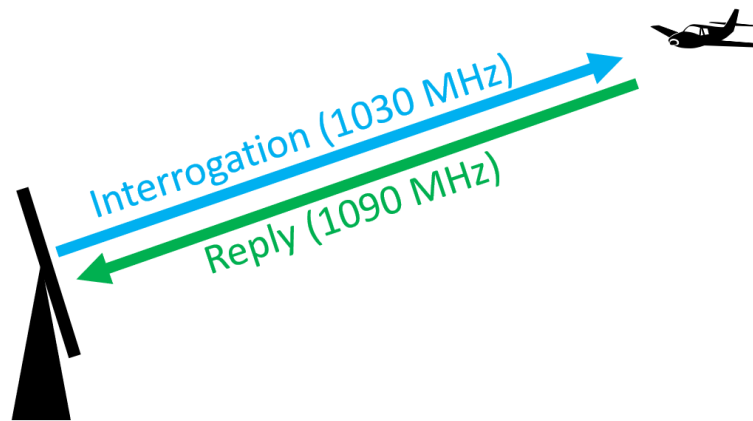


Рисунок 1.5. - Принцип дії вторинного оглядового радару[24]

Зауважемо, що рівень, отриманий від транспондера, завжди відповідає стандартному тиску (1013,25 гПа, 29,92 дюйма рт.ст.) незалежно від налаштування висотоміра, вибраного пілотом. Це є пом'якшенням людської помилки. У результаті, коли диспетчер помічає, що два літаки розділені на 1000 футів, це означає, що ця відстань існує незалежно від налаштувань висотомірів двох літаків.

Після отримання відповіді визначається положення літака (дальність і пеленг). Діапазон розраховується, знаючи різницю в часі між запитом і відповіддю (швидкість поширення дорівнює швидкості світла). Азимут береться від положення антени. Зазвичай антена обертається зі швидкістю 5-12 об/хв. SSR можна використовувати як запитувачі для пасивних масивів MLAT / WAM.

Переваги та обмеження технології SSR

Переваги:

- Потрібна набагато менша потужність для досягнення бажаного діапазону в порівнянні з PSR . Це пов'язано з тим, що переданий сигнал має досягти лише літака, тоді як PSR має випромінювати сигнал, достатньо потужний, щоб досягти літака та повернутися до антени;
- Надана інформація не обмежується діапазоном і пеленгом від антени, але також містить додаткові дані на основі режиму роботи транспондера (A, C або S);

- Цілі легше розрізнити завдяки різним кодам SSR. SSR стійкий до перешкод, оскільки використовує різні частоти для запитів (1030 МГц) і відповідей (1090 МГц). Отже, навіть якщо отримано ехо на частоті 1030 МГц, воно не обробляється системою. Таким чином, місцевість, будівлі та погодні явища (хмари та опади) не створюють перешкод, як у випадку з PSR. Однак вони можуть заважати сигналу, іноді ускладнюючи виявлення справжніх цілей.

Обмеження та проблеми:

- SSR покладається на бортове обладнання для виявлення літаків. У разі несправності транспондера SSR не отримає відповіді і, отже, не виявить ціль. Це пом'якшується шляхом поєднання SSR з PSR. Якщо використовується належна обробка сигналу, можна продовжувати стежити за літаком (і зберегти кореляцію), навіть якщо транспондер повністю вийшов з ладу, за умови отримання надійних первинних даних. Зауважте, що в цьому випадку інформація про рівень буде менш надійною, і будуть потрібні більш часті пілотні звіти;
- Іноді дві відповіді надходять одночасно (якщо дальність нахилу та пеленг літака однакові). Це явище називається «спотворенням» і може призвести або до «виявлення» фальшивого (неіснуючого) літака, або до не виявлення цілі (радар вважає, що хибна ціль є);
- Іншим явищем, яке може спричинити хибну індикацію, є FRUIT (помилкові відповіді, несинхронізовані в часі, або хибні відповіді, несинхронізовані з передачами запитувача). Це відбувається, коли радар отримує відповідь від транспондера, який був опитаний іншим радаром. Оскільки всі SSR працюють на однакових частотах, неможливо виявити, що відповідь пов'язана з передачею іншого радара. Крім того, оскільки час допиту невідомий, розрахунок діапазону, швидше за все, буде неправильним. В результаті на ситуаційному дисплеї може з'явитися помилкова ціль. Крім того, якщо в той же час отримано іншу (дійсну)

відповідь транспондера, може виникнути спотворення. Спотворення та FRUIT посилюються потребою «класичних» SSR використовувати декілька запитань для правильного визначення азимута та можуть бути пом'якшені:

- Використання MSSR (моноімпульсного SSR). Це вдосконалений радар, який використовує іншу діаграму спрямованості, що забезпечує більш точне визначення азимута. В результаті потрібно менше опитувань для визначення азимута;
- Режим S вибіркового опитування. Це функція режиму S SSR, яка дозволяє їм запитувати певний літак (інші літаки можуть отримати запит, але проігнорують його).
- SSR вразливі до затінення антени (тобто бортова антена затіняється фюзеляжем літака, наприклад, через кут крену). Це можна пом'якшити, якщо розмістити більше однієї антени (зазвичай дві – одна зверху літака, а друга – внизу).[24]

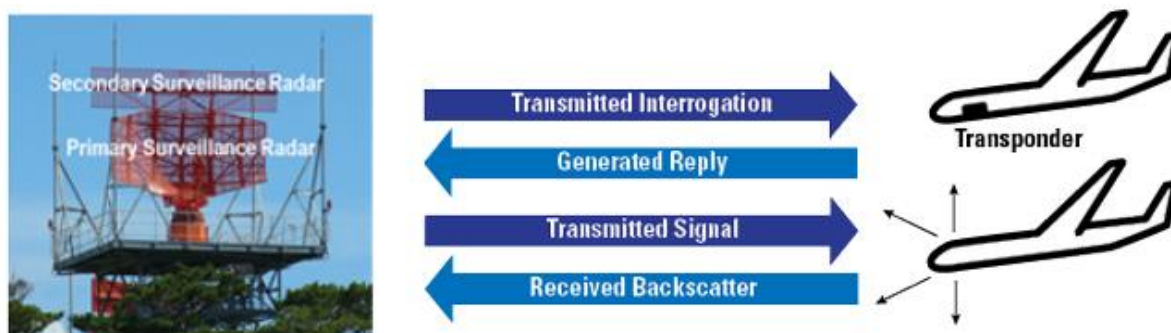


Рис 1.6. - Первинна та вторинна оглядові радіолокаційні системи[25]

SSR використовується в управлінні повітряним рухом як доповнення до основної радіолокаційної системи (Рис.1.6.). Основний радар вимірює пеленг і відстань до літаків або інших цілей, використовуючи відображення переданих радіолокаційних сигналів. SSR надає додаткову інформацію, наприклад ідентифікаційний код літака або його висоту. На відміну від основного радара, який залежить лише від відбиття сигналу, системи SSR вимагають, щоб літак мав транспондери – передавач-відповідач, який приймає сигнал, а потім передає відповідь. SSR надсилає сигнал запиту на літак із

запитом конкретної інформації.

Сигнал запиту приймає транспондер літака, який відповідає закодованим сигналом, що містить запитувану інформацію. Відповідно, система SSR має два передавача для перевірки: запитувач і транспондер.

Мультистатичний радар (або мультилокатор) – це радіолокаційна система, яка використовує кілька приймачів (статики) для вимірювання характеристик цілі та положення об'єкта на основі відбитих радіосигналів. У порівнянні зі звичайним моностатичним радаром, який вибирає один і той же приймач і передавач, мультистатичний радар має кілька приймачів, які можуть бути розташовані в різних місцях.[25]

1.4. Переваги та недоліки мультистатичного первинного оглядового радару

Основними перевагами мультистатичного радару є:

- Покращений імунітет до перешкод: мультистатичний радар менш чутливий до електронних перешкод, оскільки приймачі розташовані далі від передавача;
- Покращена скритність: завдяки знищенню централізованого передавача, мультистатичний радар з меншою ймовірністю буде виявлений і атакований противником;
- Виявлення змін в радіоелектронній видимості: багатопозиційні РЛС можуть працювати в режимі "пасивного прийому", не випромінюючи радіосигналів, що зменшує ймовірність їх виявлення противником;
- Покращена роздільна здатність: розмістивши різні приймачі у віддалених місцях, мультирадар може досягти вищої роздільної здатності і точності при вимірюванні положення і характеристик цілей;
- Мультистатична РЛС може використовуватися для багатьох інших цілей, таких як військові місії, повітряне спостереження і кримінальний

нагляд. Технологія продовжує розвиватися і вдосконалюватися для забезпечення більшої ефективності та безпеки.

Недоліки мультистатичної РЛС первинного спостереження:

- Складність координації: координація між клієнтами і обробка даних є складною і вимагає спеціалізованого програмного і апаратного забезпечення;
- Потреба в додаткових ресурсах: мультистатичні РЛС потребують додаткових ресурсів для підтримки розгортання приймачів;
- Обмежене покриття: приймачі повинні бути розташовані відносно близько до об'єкта, щоб забезпечити задовільне покриття огляду;
- Потреба в синхронізації і синхронізації: точна синхронізація між приймачами важлива для забезпечення точної роботи мультистатичного радара;
- Потенціал обману: як і у випадку з будь-яким радаром, існує ризик обману і перехоплення.

Загалом, мультистатичні радари мають переваги, особливо з точки зору підвищеної стійкості і малопомітності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Аналіз сучасних і майбутніх систем спостереження підкреслює важливість вдосконалення і розвитку систем спостереження в різних сферах, таких як оборона, цивільна безпека і наукові дослідження.

В першому розділі дипломної роботи проаналізовані системи спостереження обслуговування повітряного руху (первинний та вторинний радіолокатори, мультилатераційна система та мультистатичний первинний оглядовий радар).

Використання та розвиток сучасних систем спостереження дає нам змогу проаналізувати декілька переваг для забезпечення ОПР з точки зору безпеки і ефективності. Найбільш помітні з них:

- Дозволяє авіадиспетчерам перевіряти, чи виконуються інструкції.
- Зменшення мінімальної кількості ешелонів.
- Більше варіантів вирішення конфліктів.
- Системи спостереження дозволяють диспетчерам вирішувати конфлікти шляхом перенаправлення або організації прямих маршрутів.
- Зменшення частоти затримок.
- Зменшення навантаження на диспетчерів.

Окремо було розглянуто розглянуті переваги та недоліки кожної з систем спостереження.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИСТАТИЧНОЇ ПЕРВИННОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ

2.1. Основи радіолокації

Мультистатичні радарні системи викликають дедалі більший інтерес, оскільки вони можуть використовувати просторове різноманіття, дозволяючи покращити продуктивність і нові програми. Їхній розвиток підживлюється прогресом у передових технологіях у таких галузях, як зв'язок і цифрова обробка сигналів. Такі системи відрізняються від типових сучасних активних радіолокаційних систем, що складаються з кількох просторово різноманітних передавачів і приймачів. Через таку просторову різноманітність ці системи представляють проблеми в управлінні їх функціонуванням а також у корисному поєднанні багатьох джерел інформації, щоб надати результат оператору радара.

Мультистатичні радіолокаційні системи відрізняються від типових сучасних активних радіолокаційних систем тим, що складаються з кількох просторово різноманітні місця передавача та приймача. Це просторове розмаїття може надати кілька переваг над звичайним моностатичним радаром. Технології в таких сферах, як комунікації, продовжують розвиватися дозволяють розвивати багато аспектів багатостатичних операцій, таких як передача даних і злиття, і таким чином продовжує зростати інтерес до досяжної продуктивності таких систем.[26]

Радарні системи використовують відбиття електромагнітних хвиль від цілі. Основне застосування РЛС – це виявлення та визначення місцезнаходження цікавих цілей, хоча сучасні системи здатні це зробити інші корисні функції, такі як відстеження цілі, ідентифікація та зображення. Зазвичай система містить а одна пара передавача та приймача - часто розташована моностатично (передавач і приймач розташовані разом) або бістатичний (передавач і приймач просторово розділені) розташування.

Визначення «мультистатичного радару» не є повністю послідовним у літературі з цього питання. Загалом, передбачається, що мультистатичний радар матиме справу з зонами спостереження, які є охоплюються кількома парами передавач-приймач, і ця інформація з цих пар буде об'єднана забезпечують виявлення цілей і інші функції. Це відрізняє те, що можна назвати мультистатичним радіолокаційна система з простої мережі радарів, які мають різні зони просторового покриття та просто обмінюватися інформацією про шлях або графік, щоб охопити більшу територію.

«Основні переваги» мультистатичного радару походять від збільшення доступної інформації для спостереження за цілями з кількох різних пар передавач-приймач у системі. Ці пари можуть переглядати різні аспекти цілі та можуть мати різне покриття через геометрію. Це дозволяє для виявлення цілей, які інакше могли б бути пропущені моностатичними радарями - або через ефект «усереднення» використання кількох відданих сигналів, або завдяки перевагам від інтелектуального зважування комбінації повернення.

Мультистатичний радар можна використовувати для покращення роздільної здатності та оцінки параметрів, які є зазвичай поганим розмір перехресної дальності для моностатичних радарів(рис.2.1). Більший обсяг інформації отримані на цілі також можуть бути використані для вдосконалення схем ідентифікації цілей.

Мультистатичний радар є новою сферою, чому сприяє постійний розвиток цифрових технологій, і, отже, ще багато чого потрібно прояснити щодо того, як його найкраще використовувати. Експериментальні вимірювання для демонстрації здійсненності та ефективності таких систем представляють великий інтерес.[26]

Такі вимірювання були б першим кроком до визначення, в яких ситуаціях спостереження ця багатостатична найкраще можна застосувати радар. Важливо також показати проблеми розгортання системи та таким чином, який потенціал така система може мати врешті-решт як комерційний продукт.

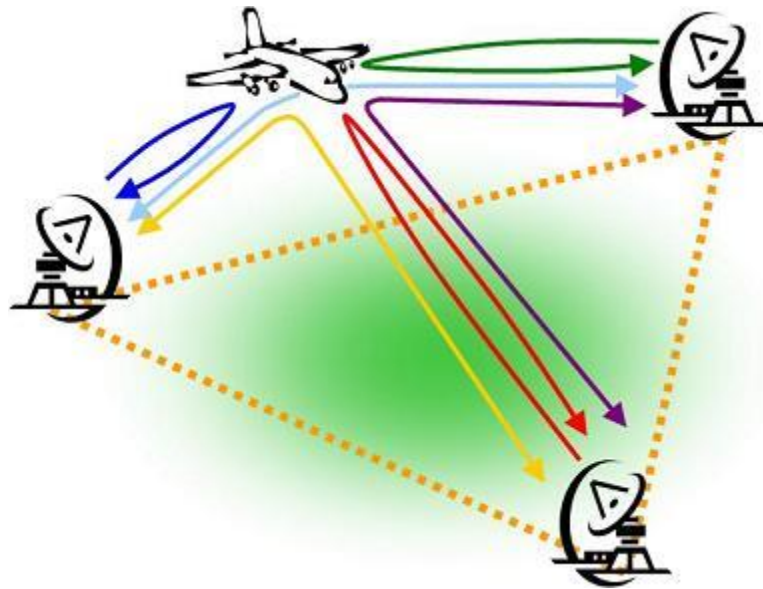


Рисунок 2.1. – Принцип роботи мультистатичного оглядового радару[26]

• **Виявлення**

Фундаментальною роботою будь-якої радіолокаційної системи є підтвердження того, що відображення сигналу від цілі відбувається. Коли це підтвердження буде отримано, можна досліджувати додаткові параметри.

Наявність шумів і перешкод на приймачі радару означає, що це часто не є тривіальним завданням.[26]

Наприклад, отримані сигнали можуть бути порівнянними за потужністю з шумом приймача або характеристиками перешкод, подібними до бажаних цілей, таким чином приймаючи рішення про те, чи був сигнал відбитий від цілі важко. Іншим питанням, яке слід розглянути, є оцінка параметрів, властива сам процес виявлення. Узгоджена фільтрація (стиснення імпульсів) часто застосовується перед виготовленням остаточне рішення щодо наявності цілі. По суті цей процес параметризує радар дані приймача з точки зору цільової дальності та швидкості. Мультистатичний радар може надати кілька цікавих переваг з точки зору виявлення завдяки інтелектуальній комбінації (або злиття даних) відповідей, отриманих за допомогою кількох передавачів і приймачів.

• **Роздільна здатність**

Роздільна здатність з точки зору роботи радару - це мінімальна відстань, яку можуть мати дві цілі, які все ще можуть бути помітні одна від одної. Для

імпульсного радара це розділення може бути часовим, затримка повернення сигналу за частотою (через доплерівський зсув) або на основі ширини променя антени. Кілька цілей і перешкоди їхніх сигналів, що розглядаються як одна ціль, можуть спричинити досить непередбачуваний вплив на такі процеси, як оцінка параметрів, відстеження та ідентифікація.

Мультистатичний радар має потенціал для визначення цілей, які були б нерозрізними для моностатичної системи за тим самим сценарієм. Простим прикладом цього може бути розгляд добре відомого випадку цілі, що рухається по дотичній до променя моностатичної радіолокаційної антени, неможливо розрізнити з навколишніх стаціонарних перешкод. Навпаки, з мультистатичним радаром притаманне просторове рознесення загалом робить малоймовірним, якщо не неможливим, те, що рухомі цілі будуть нероздільні від нерухомих перешкод у всіх парах передавач-приймач.

• **Оцінка параметрів**

Якщо виявлення цілі виконано, бажано якомога точніше виміряти такі параметри, як дво-чи тривимірне положення та швидкість. Інформація, що міститься в відбитих сигналах, може бути використана для оцінки дальності цілі. Знання орієнтації та ширини променя антен також можна використовувати. Верхні межі ступеня точності будуть пов'язані з потужністю сигналу та шуму. Використана обробка, наприклад ступінь інтерполяції в системі дискретного часу, також буде фактором визначення точності інформації, представленої на роботу радара. Важливо розглянути, як поєднується вся відповідна інформація створити корисний результат для оператора радара.

Наприклад, незнання положення радара в перше місце, у свою чергу, забезпечить межі оцінки положення цілі відносно інших заходів, навіть якщо відомо, що вимірювання дальності, зроблені цим радаром, дуже точні.

Одна з переваг мультистатичного радара, яка часто пропонується, полягає в тому, що зазвичай інформація на нижньому діапазоні буде набагато точнішою, ніж інформація на поперечному діапазоні, отримана з оцінок

азимута антени та ширини променя, через практичні обмеження розміру антени. Через це точність у мультистатичній системі можна підвищити за рахунок використання інформації нижнього діапазону від кількох просторово розділених радарів для визначення дедалі точнішого місцезнаходження цілі.

• **Спостереження**

Система спостереження постійно контролює місцезнаходження та швидкість рухомої цілі, щоб визначити історію її траєкторії та напрямок. Можна очікувати, що система спостереження буде поводитись досить передбачувано за умови, що його можна досить послідовно виявляти, тоді як помилкові сигнали тривоги, як правило, можуть виникати випадково, а отже, недостатньо послідовно, щоб виглядати як розпізнавана траєкторія цілі та, таким чином, ініціювати новий трек. Перелічені переваги для виявлення, роздільної здатності та оцінки параметрів за допомогою використання мультистатичного радара також застосовуватимуться для покращення продуктивності відстеження.

• **Ідентифікація**

Після виявлення інформація, отримана радаром, наприклад результати оцінки параметрів з часом можна використовувати для спроб ідентифікації цілей. Це може досить сильно відрізнятися за ступенем складності - простим прикладом є класифікація наземних, повітряних або морських цілей на основі положення їхніх шляхів, пов'язане з даними карти навколишньої території. Ідентифікація цілі також може базуватися на рівні радіолокаційного сигналу - можливо, шляхом дослідження профілю діапазону з високою роздільною здатністю, або дивлячись на тонкі відмінності в «мікродопплерівському сигнатурі». Такі методи можуть отримати користь від додаткової інформації, доступної з різних точок зору в мультистатичній системі. Проте дослідження точної обробки вищого рівня, пов'язаної з повною класифікацією цілі та

збільшення продуктивності від переходу до використання мультистатичний радар вийшов за рамки цієї роботи.

• Візуалізація

Постобробку радіолокаційних відбитків також можна використовувати для створення зображень цілей. Мабуть, найвідомішими з цих процесів формування зображень є SAR (радар із синтетичною апертурою) і радар із зворотною синтетичною апертурою (ISAR).

В SAR рух радара над нерухомою метою (наприклад, землею) використовується для синтезу апертури з набагато більшим розміром; за допомогою цієї постобробки можна створювати зображення з дуже високою роздільною здатністю між діапазонами. Навпаки, ISAR використовує стаціонарний радар і руху ціль, щоб знову створювати зображення з високою роздільною здатністю на перехресній відстані. Існують паралелі з цими процесами та мультистатичним радаром, оскільки обидва розглядають численні просторово розділені вимірювання.

Типи цілей, параметри радарів, кількість радарів і стаціонарний характер радара, які, ймовірно, навряд чи піддадуться обробці SAR, окрім концепції покращення роздільної здатності, як уже згадувалося. Зображення ISAR і RCS (радіолокаційний поперечний переріз) можуть бути потенційними застосуваннями для мультистатичного радара.

• Керівництво

Добре відоме використання радіолокаційного наведення в самонаведених ракетах. У цьому випадку процес виявлення та відстеження виконується радаром, прикріпленим до ракети, що дозволяє дізнатися про ракету оточення та цільову позицію, а отже, інформацію для дій з певним ступенем автономності. Стосовно мультистатичного радара можна передбачити такі застосування, як напівактивні системи самонаведення, які використовуються в системі протиповітряної та протиракетної оборони Patriot, розробленій Raytheon. У цій системі цілі можуть супроводжуватися як окремою радіолокаційною системою, так і ракетами самі, які мають власний

бортовий приймач-передавач і комп'ютер наведення. Використання цих кількох пар передавач-приймач і той факт, що ракети будуть спілкуватися з радара.

Система Patriot під час польоту демонструє певну схожість із роботою мультистатичної радіолокаційної системи. Однак система цього типу досить спеціалізована для основної мети доставки ракетного корисного навантаження з додатковим ускладненням системи керування наведенням, яка діє на будь-які багатостатичні вимірювання.

Помітно, що багато з цих функцій радара взаємопов'язані. Визначивши основні способи використання радарів, специфіка деяких із цих процесів може бути досліджена більш детально; починаючи з базової теорії, яка лежить в основі загальних моностатичних і бістатичних випадків. Потім можна дослідити, як це можна перекласти на мультистатичну систему.

2.2. Принципи мультистатичного радару

Мультистатичний радар часто називають «багатосайтовим» або «мережевим» радаром. У сукупності вони діють на той самий принцип кількох, просторово різноманітних передавачів та/або приймачів. Ці кілька пар передавач-приймач можуть мати форму будь-якої з двох геометрій, розглянутих у попередніх розділах, а саме моностатичний і бістатичний. Таким чином, відповідна теорія буде актуальною для кожної з цих пар в мультистатичній системі.

Розглянуті міркування бістатичної геометрії ближчі за своєю природою до мультистатичної, оскільки обидва завжди потребуватимуть певного роду просторово-часової синхронізації вузлів. Власне існування спільної зони спостереження між парами передавач-приймач в мультистатичній системі передбачає деяке злиття інформації від залучених пар передавач-приймач.

Цей процес синтезу може варіюватися від простого випадку вибору графіків із приймача, найближчого до цілі (ігноруючи інші), збільшення

складності до ефективного формування променя за допомогою синтезу радіосигналу.[27]

Потенційний приріст інформації, отриманий завдяки просторовому різноманіттю пар передавач-приймач у мультистатичній системі, може призвести до ряду переваг як над окремими моностатичними, так і бістатичні випадки в типових радіолокаційних функціях, отже мотивація для дослідження таких систем.

Під час впровадження такої системи необхідно враховувати роботу окремих моностатичних і бістатичних елементів, управління системою, що їх включає, і, нарешті, метод, за допомогою якого інформація поєднується, щоб дати оператору корисний результат.

Мультистатичний радар може приймати різні форми, і тут визначено два ключові атрибути, які використовуються для класифікації кількох типів мультистатичної системи. Цими двома ключовими атрибутами є ступінь просторової когерентності та інформація рівень інтеграції (злиття даних).

Основні переваги та недоліки

Мультистатичну роздільну здатність, точність і продуктивність виявити складніше ніж описати у моно/бістатичному випадку. Це, безумовно, залежатиме від методу об'єднання даних, який використовується для виявлення, і вони будуть оцінені, коли ці методи будуть повністю деталізовані.

Однак огляд пропонованих переваг використання мультистатичного радара наводиться тут, а також згадуються деякі технічні проблеми та недоліки роботи такої системи. Щоб проілюструвати деякі з цих ідей, на Рис.2.2. розглянуто просту діаграму мультистатичної системи.

Збільшення зони покриття в мультистатичному радарі можна отримати декількома способами, по-перше, шляхом поширення геометрії радара в зоні спостереження - таким чином, щоб цілі з більшою ймовірністю були фізично ближче до пар передавач-приймач і таким чином досягали вищого SNR.

Отримане охоплення в стилі «стіленикового зв'язку», що перекривається, може мати переваги в охопленні перед типовою альтернативою «грубої сили» збільшення потужності передавача для однієї пари.

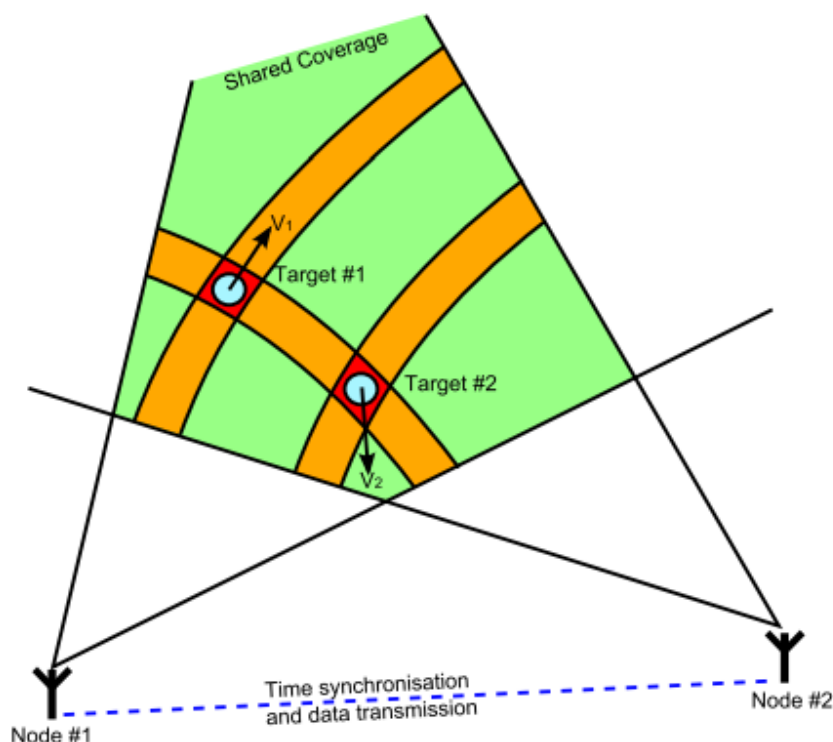


Рисунок.2.2. - Можливості мультистатичної радіолокаційної системи[27]

Це може бути особливо корисно, якщо існують обмеження на ефективну потужність випромінювання одного передавача. По-друге, просторове розмаїття може зменшити ефект затінення, який інакше міг би затемнити великі кутові ділянки покриття. Це може бути корисним у міських або аналогічних закритих середовищах, де типовий радар може мати досить обмежене «поле зору». Нарешті, подібно до обговорюваної ідеї імпульсної інтеграції, кілька пар передавач-приймач із спільним охопленням цілі можуть поєднувати інформацію з кількох отриманих сигналів для покращення продуктивності виявлення.

Роздільна здатність може підвищитися завдяки просторовому рознесенню та завдяки наявності кількох просторово-різноманітних профілів нижнього діапазону. Як правило, моно/бістатичні радари мають набагато нижчу роздільну здатність у поперечному діапазоні порівняно з цими

профілями нижнього діапазону. На Рис.2.2. показано, як перетин профілів нижнього діапазону в межах області, освітленої декількома ширинами променя (отже нерозв'язного за кутом), може дозволити нам розрізнити цілі 1 і 2 – порівнюємо тільки вузол 1, де обидві цілі мають однакову роздільну здатність. Часто можна визначити місцезнаходження об'єкта шляхом точного обчислення часу прибуття (Time of arrival - TOA).

Це називають процесом мультилатерації, який зазвичай включає принаймні три просторово окремі вимірювання TOA для наземної системи для отримання тривимірного положення цілі. [27]

Мультилатерація часто використовується у вторинному оглядовому радарі, однак основна додаткова складність мультистатичного радара полягає в тому, що цілі не взаємодіють - отримані сигнали не містять інформації, що ідентифікує з якої цілі вони походять у сценарії з кількома цілями. Через це незнання існує потенційна неоднозначність під час роботи з кількома цілями, приклад чого показано на Рис.2.3. із появою «примарних цілей».

Подібною до проблеми «примарних цілей» є проблема, спричинена багатопрореневістю або глушінням через повторну передачу отриманих сигналів, хоча це не є конкретною мультистатичною проблемою. Загальна відповідь на такі проблеми полягає в тому, щоб надати більше інформації, наприклад, за допомогою додаткових пар передавач-приймач, використання доплерівської інформації або відстеження в часі.

Раніше було показано, що обмежена шумом точність оцінки параметрів для моностатичного та бістатичного радарів пропорційна як роздільній здатності, так і SNR. Описані потенційні покращення покриття та роздільної здатності, можна очікувати кращих оцінок положення цілі та швидкості.

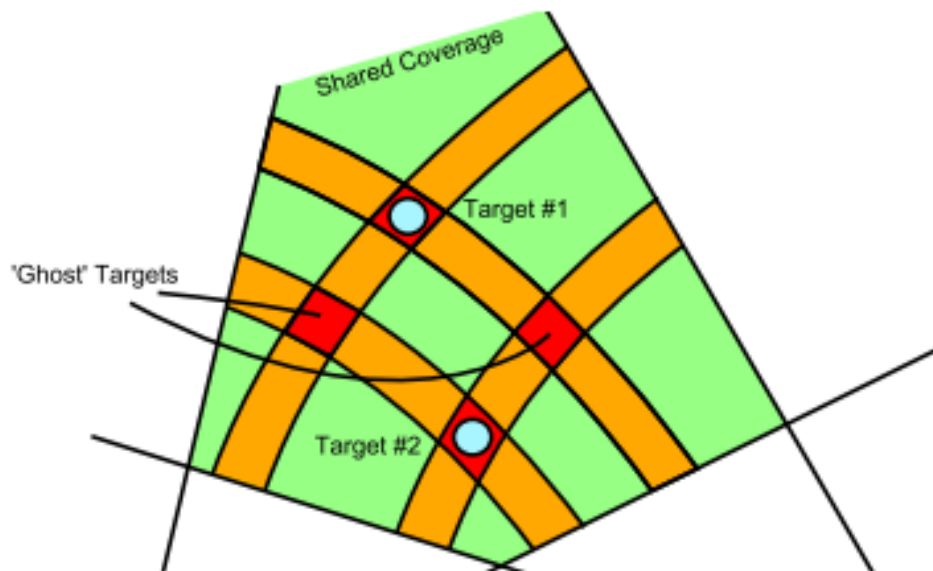


Рисунок 2.3. - Проблема «Примарна ціль».[27]

Просторове рознесення системи дозволить радару бачити ціль з кількох різних сторін. Цільова швидкість сприятиме доплерівському зсуву повернених сигналів уздовж кількох різних одиничних векторів. Таким чином, можна уникнути ігнорування радіальної швидкості цілі, виявленої в моностатичному або бістатичному випадку, і з достатньою кількістю просторово різноманітних пар передавач-приймач, швидкість цілі повністю визначена як дво- або тривимірний вектор.

Швидкість є лише одним із прикладів збільшення інформації, яка може бути надана оператору радара про ціль, розглядаючи її з різних сторін. Інші приклади включають цільову RCS (Радіолокаційний поперечний переріз) або мікродоплерівські ефекти і як вони змінюються - обидва з яких були б цікаві для методів ідентифікації цілей або візуалізації, подібно до ISAR.

Зовнішній вигляд перешкод також буде змінено через просторове рознесення багатостатичного радара.

Прикладом можуть бути морські перешкоди, де зазвичай можна побачити більшу відбивну здатність від ненульових доплерівських перешкод за використання моностатичного радара, спрямованого на зустрічні морські хвилі. Були варіанти використання іншого передавач-приймач у мультистатичній системі, тоді доступну віддачу від цієї перешкоди можна

зменшити.[27] Зменшення таких перешкод може сприяти покращенню виявлення цілей.

Підвищена живучість і «витончена деградація» можуть бути результатом розподіленої природи системи. Несправність передавача або приймача для моностатичної або бістатичної системи призведе до повної несправності втрат функціональності радара. З тактичної точки зору, один великий передавач буде легше знайти та знищити порівняно з кількома розподіленими передавачами. Так само буде все важче успішно зосередити перешкоди на кількох приймачах порівняно з одним сайтом. Це особливо вірно, якщо місце приймача не розташовано разом із передавачем (тобто використовуються бістатичні пари), оскільки це буде неможливо для глушників, щоб точно визначити розташування приймача, просто дивлячись на те, звідки походить передача, як у моностатичному випадку.

Використання кількох недорогих радарів, потенційно з компонентами COTS (Комерційний готовий товар), може призвести до економії коштів порівняно з будівництвом одного високопотужного радара завдяки економії масштабу. Очевидно, додаткові витрати повинні піти в комунікації та управління системою. Однак багато компонентів для цих функцій не будуть особливо специфічними для радарів, і можуть широко використовуватися, і тому, ймовірно, будуть порівняно дешевші. Це протиставляється потужним передавачам і антенам, які зазвичай використовуються в сучасних військових радарях, які, навпаки, можуть мати досить вузький ринок. Багато труднощів пов'язано з роботою бістатичного радара, це також застосовуватиметься в мультистатичній системі.

Зокрема, просторово-часова синхронізація між усіма вузлами визначатиме максимальний ступінь просторової кореляції в системі, а також сприяє точності будь-якої оцінки параметра. Інші проблеми, такі як прийом прямої передачі, також залишаться актуальними. Збільшення обсягу інформації, отриманої на кожному приймачі, вимагає передачі певної кількості даних між вузлами.

З цим пов'язана кількість необхідної потужності обробки сигналу, яка також буде збільшена. Де відбуватиметься ця обробка, залежатиме від рівня інтеграції інформації.

Аналогія імпульсного інтегрування

Корисним вступом до ідеї побудови алгоритмів, які використовуються для об'єднання даних із кількох пар передавач-приймач для забезпечення оптимального виявлення, є аналогія з предметом, який досить більше висвітлення в радіолокаційній літературі. У зв'язному випадку це процес підсумовування також може бути узгоджений із заданою зміною фази між імпульсами - імпульсна доплерівська обробка. Простіше кажучи, те ж саме робиться для мультистатичного радара - тільки там просторовий поділ між імпульсами, а не часовий.

Випадки **Swerling** розглядають коливання цільового значення RCS (Радіолокаційний поперечний переріз) між часовими розділеннями - будь то від сканування до сканування або від імпульсу до імпульсу. Однією з головних причин цих коливань є зміна кута огляду цілі. Такі флуктуації також будуть існувати для пар передавач-приймач, які утворюють мультистатичну систему, де ціль розглядається з безлічі різних ракурсів.

Геометрія мультистатичної системи визначатиме, чи є ці флуктуації RCS незалежними, чи вони зберігають певну кореляцію. Якщо кілька пар передавач-приймач розташовані разом, тоді вони побачать точно той самий цільовий аспект, тому будь-які коливання будуть ідентичними.

Можливо, перше велике відхилення від типових методів інтеграції імпульсів походить від того факту, що середнє SNR (Співвідношення сигнал/шум), про те, які можуть відбуватися коливання, можуть бути дуже різними. Це може бути викликано втратами при розповсюдженні, різною потужністю передавача, різними рівнями шуму або значеннями RCS, які є особливо спрямованими. Розподіл цих коливань також може бути різним залежно від бістатичного кута для пари передавача-приймача.

Щоб отримати оптимальну ефективність виявлення, до сильнішого сигналу, коли отримані сигнали підсумовуються, збільшуючи частку виходу через ці сильні сигнали. Крайнім прикладом того, чому це необхідно, може бути те, що приймач у мультистатичній системі отримує лише шум і не отримує сигнальну інформацію. У цьому випадку інформація може бути втрачена лише на виході мультистатичного детектора шляхом включення деякого внеску цього приймача. Одна складність полягає в тому, скільки апріорних знань про середнє SNR для кожної пари передавач-приймач доступне на момент злиття даних.

Ефективність мультистатичної локалізації

Термін «локалізація» використовується в контексті для загального опису ступеня, з яким цілі можна знайти. Це охоплює як помилку, притаманну вимірній позиції, так і швидкості системою радіолокації, а також концепція роздільної здатності кількох цілей. Причина згрупувати їх під одним заголовком полягає в тому, що вони певною мірою пов'язані – наприклад, якщо дві цілі нерозв'язані тоді результуюче (одноразове) виявлення матиме певну похибку щодо обох фактичних позицій цілі (а також явно помилкове виявлення лише однієї цілі). Можливості локалізації мультистатичного радару буде важливим показником продуктивності в багатьох ситуаціях.

Для початку розгляду локалізації слід розглянути засоби, за допомогою яких виробляються оцінки цільових параметрів. У випадку централізованого детектора це досить просто, шляхом пошуку пікових значень (максимальної ймовірності) приблизно так само, як це може відбуватися для моностатичного або бістатичного радара. У децентралізованому виявленні це, можливо, не так очевидно відразу, як на те, яка інформація передається до «центру синтезу».

Можна сказати що це кожна затримка часу, яка перетинає поріг, має бути передана в центр злиття.

Однак більш імовірно (і, звичайно, щоб зменшити пропускну здатність даних і краще відповідати терміну «злиття рівня сюжету») знову буде якийсь

процес виявлення піків, який вироблятиме окремі окремі виявлення при одній часовій затримці та доплерівському зсуві для кожної цілі, а не в діапазоні значень. Додаткове міркування щодо децентралізованого виявлення полягає в тому, як інтерпретується сам вихідний сигнал центру синтезу виробляти дискретні оцінки цільових параметрів.

Бістатичні та мультистатичні радіолокаційні системи

Пасивні радіолокаційні системи, що використовуються для виявлення цілей, позиціонування та відстеження з використанням бортових імпульсних випромінювачів у діапазоні від 0,8 до 18 ГГц. В останні роки розширена зростання діяльності в області радіолокаційних систем, на основі про концепцію бістатичного радара повідомляють багато дослідницькі центри та університети. У бістатичному радарі на відміну від моностатичного радара, передавач і приймач розділені відстанню, порівнянною від цілі до приймача. Бістатичний радар має багаторічне традиці.; повідомляється про перші заявки з передвоєнний (Друга світова війна) період. Після війни концепція моностатичного радара переважала завдяки легшій синхронізації, меншим проблемам із когерентністю передавача/приймача та кращому використанню переданої потужності.

Тим не менш, час від часу повідомлялося про деякі застосування концепції бістатичного радара. Останнє відродження цієї ідеї, безумовно, була викликана легкодоступними потужними цифровими технологіями і щільним покриттям Землі, а саме широкий вибір електромагнітних джерел.

Пасивна система когерентної локації (PCL) заснована на використанні різних передавачів «можливостей», таких як FM радіо, аналогове або цифрове телемовлення, база станцій тощо. Передавачі охоплюють зону спостереження із сигналами, а приймач системи PCL збирає прямі сигнали та сигнали, розсіяні навколишніми предметами. Порівнюючи прямий і розсіяний сигнали можна знайти положення та швидкості цих розсіювальних об'єктів.

Для реалізації такого радара є лише простий приймач і все навантаження переноситься на цифровий сигнал обробки.

Тим не менш, слід визнати, що концепція «передавачів можливостей» має обмеження в якості, надійності і цілісності. Також його застосування в охороні систем є спірним. Але ця концепція легко може бути модифікованою, додавши власний передавач(и) з необхідними характеристиками.

2.3. Опис когерентних мультистатичних систем

Узгоджена мультистатична система загалом складається з кілька передавачів і кілька приймачів, розташованих окремо на великих відстанях. Передавачі повинні покривати всю контрольовану територію з передаваними ними сигналами. Не потрібна синхронізація між окремими передавачами або передавачами та приймачами, але потрібні точні позиції передавачів і приймачів. Можна припускати, що кожен приймач отримує прямий сигнал від передавача та сигнали, розсіяні статичними наземними об'єктами (перешкоди) і рухомими об'єктами, такими як літак або транспортний засіб. Кожна пара передавача і приймача діє як бістатичний радар. Бістатична геометрія показана на Рис.2.4.[31]

Бістатична геометрія радара: L_B — довжина бістатичної бази РЛС, P_T , P_R передавач - об'єкт і об'єкт - діапазони приймача, Θ_R - кут DOA прийнятого сигналу, розсіяний об'єктом.

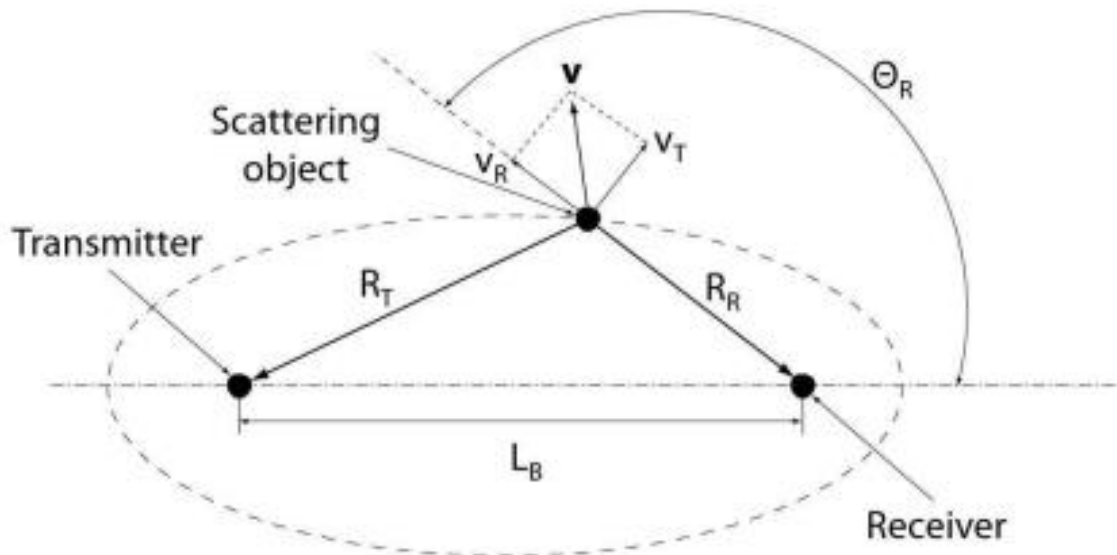


Рисунок 2.4. - Бістатична геометрія радара[31]

Обробка сигналів

Обробку сигналу в когерентних мультістатичних системах можна описати за допомогою блок-схеми на Рис. 2.5. У вхідній частині отриманий сигнал у кожному елементі антени перетворюється з пониженням частоти, розділяється відповідно до діапазонів передавача та перетворюється на цифровий. Потім створюються адаптивні системи формування променя на кожному діапазоні передавача мінімум два промені для кожного передавача: перший із глибоким нулем у напрямку до передавача для придушення прямого сигналу (цільовий канал) і другий з його максимумом у напрямку передавача (довідковий канал). У попередніх реалізаціях часто використовувалися тільки дві спрямовані антени - одна з яких прямує до передавача, а інша – до спостережуваного об'єкта.[27]

Рівень прямого придушення сигналу в цілі каналу на виході цього каскаду приблизно дорівнює потужності прямого перекриття сигналу над спільною потужністю перешкод, шуму і корисного сигналу.

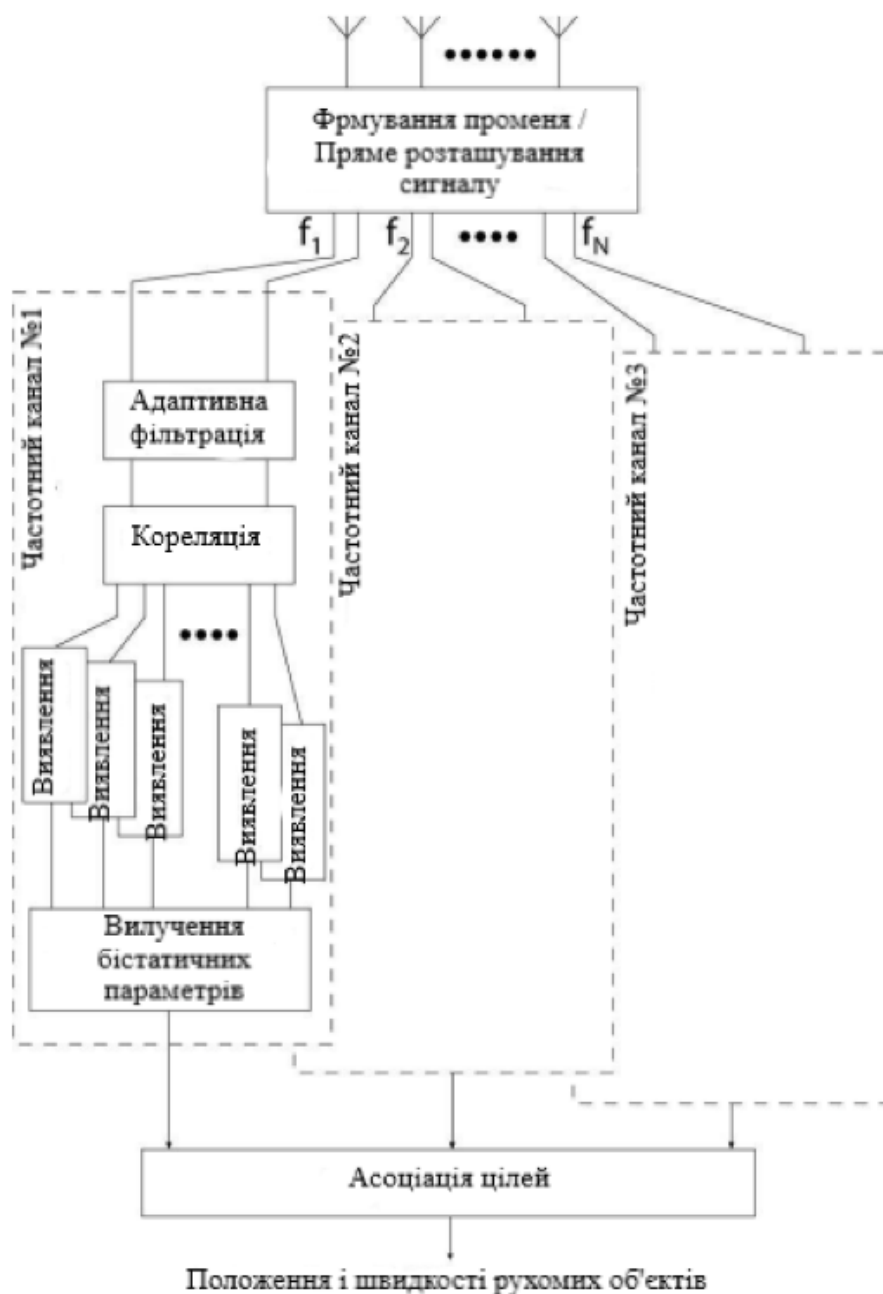


Рисунок 2.5. - Базова блок-схема обробки сигналу в CMS.[31]

Багатостатичні супутникові утворення SAR: Потенціали та виклики

Мультистатичний радар із синтетичною апертурою працює з кількома приймальними антенами, які розподілені між різними платформами.

Таке просторове розділення має кілька операційних переваг, які підвищують можливості, надійність і гнучкість майбутніх місій SAR (Радар із синтетичною апертурою).

Потенційні області застосування мультистатичних систем SAR

включають однопрохідну інтерферометрію на поперечних і уздовж доріжок, космічну томографію, широку смугу зображень, покращення роздільної здатності, придушення перешкод, індикацію рухомих цілей на землі та мультистатичну візуалізацію.

Одночасний збір даних за допомогою кількох супутників дозволяє уникнути тимчасових і атмосферних збурень, покращує продуктивність і дозволяє виявляти швидкі зміни.[28]

Мультистатичні системи SAR можна розділити на напівактивні та повністю активні конфігурації. Напівактивні конфігурації поєднують активний опромінювач з одним або кількома пасивними приймачами, як показано на Рис. 2.6. лівлруч. Це дозволяє використовувати недорогі мікросупутники, призначені лише для прийому, таким чином забезпечуючи економічно ефективно впровадження однопрохідних систем SAR з кількома базовими лініями.

У повністю активній конфігурації кожен радар має як передачу, так і прийом можливості, як показано на Рис. 2.6. праворуч. Повністю активні системи можуть працювати в багатьох різних режимах, забезпечуючи тим самим підвищену гнучкість, легку фазову синхронізацію та більшу надмірність.

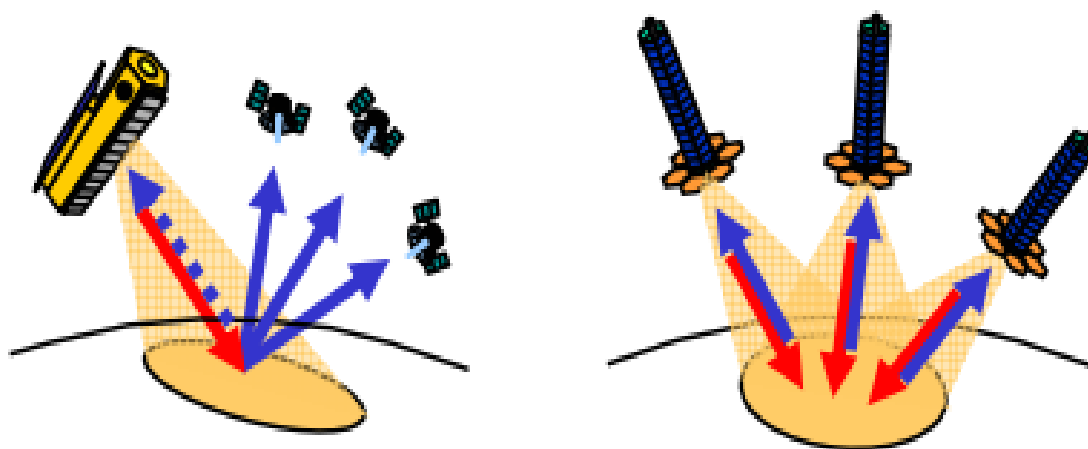


Рис. 2.6. - Напівактивна (ліворуч) і повністю активна (праворуч) мультистатичні системи SAR[28]

Мультистатичне зображення SAR

Мультистатичний SAR може одночасно надавати кілька зображень SAR з різними геометріями перегляду, таким чином значно збільшуючи простір спостереження. Це полегшує виявлення, класифікацію та розпізнавання як природних, так і штучних об'єктів. Крім того, багатостатичні спостереження становлять великий інтерес для вимірювання параметрів поверхні та рослинності. Експериментальний бістатик ONERA-DLR SAR показав, що навіть малі бістатичні кути вже можуть викликати помітну зміну поведінки розсіювання.

Спільна оцінка моно - та бістатичних SAR-зображень також може бути використана для виділення різних механізмів розсіювання, як, наприклад, відмінність між високонаправленими двограними віддачами від більш ізотропного об'ємного розсіювання. Такі бі- та мультистатичні профілі розсіювання можуть бути додатково доповнені інтерферометричною інформацією. Крім того, оцінка мультистатичних SAR-зображень може використовувати непряму інформацію, систематичні варіації тінювих пар, які бачить кожен приймач. Додаткові можливості виникають радарграмметрії. Мультистатичне SAR-зображення дозволяє також точно локалізувати та відстежувати невеликі об'єкти в 3-D просторі.

Бі- та мультистатичні дані SAR високої роздільної здатності також можуть бути отримані за допомогою приймачів, що виглядають у найнижчій точці. Це дозволяє одночасно отримувати дані з однієї області за допомогою інших приладів дистанційного зондування, таких як висотоміри, лідари або оптичні/гіперспектральні датчики. Потім дані з різних датчиків можуть бути об'єднані для таких різних цілей, як калібрування ЦМР, ортотрансформація або класифікація об'єктів і сцен із кількома датчиками.

Інтерферометрія та індикація рухомих об'єктів

Мультистатичні супутникові утворення SAR призначені для інтерферометрії великої базової лінії, яка порівнює фазу двох або більше складних зображень SAR, отриманих в ідентичній геометрії, але розділених

короткими інтервалами часу. Таким чином, ця техніка добре підходить для моніторингу динамічних процесів. Визначною програмою є вимірювання океанських і приливних течій.

Для точних вимірювань повільних рухів потрібні великі базові лінії уздовж доріжки, тоді як короткі базові лінії необхідні для уникнення неоднозначності у випадку вищих швидкостей.

Отже, придбання з декількома базовими лініями вздовж колії було б дуже корисним для вирішення неоднозначностей, таким чином дозволяючи покращити та збільшити точні вимірювання в широкому спектрі потенційних швидкостей розсіювача. Крім того, мультистатичні формування з трьома або більше приймачами дозволяють надійно виявляти, локалізувати та оцінювати швидкість навіть повільно рухомих об'єктів на землі. Завдяки великій відстані між окремими супутниками-приймачами можна досягти ефективного придушення перешкод, що дозволяє виявити та локалізувати слабкі розсіювачі з низьким рівнем відношення сигналу до перешкод.

Велика віддаленість приймачів дозволяє також оцінити високоточні швидкості та пом'якшує проблему сліпоти щодо певних напрямків руху розсіювача. Це направлення дуже важливе для майбутніх систем моніторингу космічного руху.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В другому розділі проаналізоване використання та застосування мультистатичної первинної радіолокації. Розглянуті були також міркування бістатичної геометрії, які за своєю природою ближчі до мультистатичної геометрії.

В останні роки розширена зростання діяльності в області радіолокаційних систем, на основі концепції бістатичного радара.

Останні відродження деяких ідей, було викликано легкодоступними потужними цифровими технологіями і щільним покриттям Землі.

Про пасивну систему когерентної локації (PCL) можна сказати, що вона була заснована на використанні різних передавачів «можливостей», таких як FM радіо, аналогове або цифрове телемовлення, база GSM станцій тощо.

Спільна оцінка моно - та бістатичних зображень також може бути використана для виділення різних механізмів розсіювання, як, наприклад, відмінність між високонаправленими двогранными віддачами від більш ізотропного об'ємного розсіювання.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОЛОКАТОРУ В АЕРОНАВІГАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ

3.1. Дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-В при визначенні координат ПО.

У теперішній час швидкими темпами збільшуються обсяги повітряного руху. Одночасно підвищується потреба у підвищенні ефективності використання повітряних суден та забезпечення безпеки масштабного та складного повітряного руху. Це, в свою чергу, вимагає використання більш досконалих інструментів. Одним з таких важливих інструментів в процесі організації повітряного руху є авіаційне спостереження.

Одним з основних видів спостереження, що активно використовується у теперішній час є автоматичне залежне спостереження – радіомовне (ADS- В). При такому спостереженні повітряні об'єкти (ПО) періодично передають поточні параметри польоту. Передача здійснюється відповідними транспондерами, які встановлені на борту ПО. Приймання сигналів транспондерів ADS-В здійснюється приймачами ADS-В. Особливістю приймачів ADS-В є їх відносна простота та дешевизна. Точність визначення координат ПО обумовлюється тим, що визначення місцеположення ПО проводиться з використанням супутникової навігаційної системи.[19]

Використання інформації з транспондерів ADS-В стало актуальним при веденні гібридних війн. При веденні гібридних війн польоти цивільної авіації виконуються в звичайному режимі.

Додаткове використання інформації ADS-В дозволяє[19]:

- зменшити похибки координат ПО;
- унеможливити маскування ПО – порушників повітряного простору під цивільні повітряні судна;
- підвищити ефективність ведення радіолокаційного спостереження повітряного простору.

В той же час актуальним є питання забезпечення безвідмовної роботи транспондерів ADS-B та забезпечення достовірності визначення координат повітряних об'єктів.

Основною перевагою використання ADS-B є можливість визначення координат ПО з використанням інформації супутникових навігаційних систем (наприклад, GPS/ГЛОНАСС). ПО визначає свої місцеположення з використанням супутникових навігаційних систем та за допомогою транспондерів періодично передає цю інформацію. Інформація може бути отримана наземними станціями управління повітряним рухом. Такі станції можуть розглядатися як заміна вторинного оглядового радіолокатора.

Сигнал від транспондерів ADS-B може також прийматися іншими ПО для забезпечення ситуаційної усвідомленості. В результаті більш точного позиціонування ПО можливо досягти підвищеної безпеки польотів, більш компактного та ефективного використання повітряного простору. ADS-B є елементом системи повітряного транспорту США нового покоління NextGen, авіаційної системи Індії ASBU, дослідного Європейського проекту SESAR, систем, в яких не використовуються традиційні радари (райони Гудзонова проливу, Лабрадорське море, пролив Девіса, Баффінов залив та південна частина Гренландії).[19]

Приклад використання інформації від транспондерів ADS-B наведений на Рис. 3.1. Це ПО (рейс 50816F) сполученням Херсон – Київ

Інформація (Рис. 3.1.) отримана з використанням RTL-SDR приймача (Рис. 3.2.).[19]

На Рис. 3.1. траса ПО відмічена суцільною лінією синього кольору. Збоїв в роботі транспондерів та приймачів ADS-B не зафіксовано.

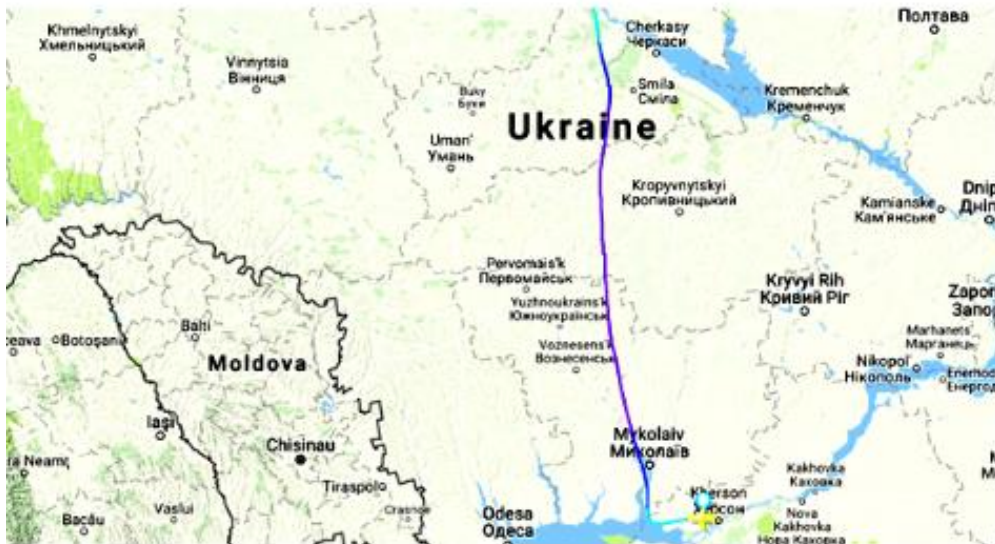


Рисунок 3.1. ПО (рейс 50816F)[19]



Рисунок 3.2. RTL-SDR приймач[19]

Передача інформації з транспондерів ADS-B проводиться у відкритому режимі. Отже, є можливість проведення різного роду атак на цю технологію ADS-B.

У всіх пакетах ADS-B присутні два обов'язкових поля:

- Aircraft Address (Адреса літака - AA), у якому вказується глобально унікальний ідентифікатор ПО. Аналогічно IMSI на SIM-карті або MAC-адресу мережевої картки;
- Parity Information (Інформація про парність - PI), яке містить інформацію для контролю бітної парності.

Хоча наявність останнього поля, на перший погляд, оберігає пакети від сторонньої, випадкової чи зловмисної маніпуляції, але це зовсім не так. Це поле може лише підказати, чи були допущені випадкові помилки під час передачі даних. З іншого боку, зловмисник, який шкідливо маніпулює даними, може просто і легко перерахувати контрольну суму PI, отримуючи в результаті здоровий і валідний ADS-B пакет. Глобальність ідентифікатора ПО та унікальність мають інший наслідок – суттєво послаблюється безпека ADS-B з погляду конфіденційності.

Очевидно, це дозволяє відстежувати дані всіх літаків як реального часу.

Другий тип вразливостей пов'язані з відсутністю механізмів для міцного криптографічного підпису. Найголовніше в цій уразливості – це можливість посилати в ефір підроблені дані або підмінювати інформацію в цих пакетах, а найнеприємніше – це той факт, що сторона, яка приймає дані пакети, не може бути впевнена ні в автентичності пакета, ні в ідентифікації того, хто посилає, ні без шкідливих змін у якомусь спочатку справжньому пакеті.[19]

Третій вид вразливості пов'язаний з відсутністю криптування на пакетному рівні. Систему для ADS-B для застосування в мирний час зробили некриптованою з низки технічних причин. По-перше, можливості обладнання для ADS-B недостатні для ресурсомістких криптографічних операцій. По-друге, існують витрати лише на рівні менеджменту криптографічних ключів. Якщо система використовуватиме один ключ по системі “shared secret”, його

буде досить легко обчислити, оскільки довжина пакета невелика і більшість даних у пакеті можна передбачити.

Сценарії атак на ADS-B можуть бути різними. Так, наприклад, атака на не конфіденційність даних та глобально-унікальні статичні ідентифікатори адрес ПО.

Перехоплюючи АА, можна стежити будь-яким ПО. А якщо все це ще інтегрувати з публічно доступними базами даних, які детально розписують особисті дані власників ПО, то природно, можна отримати інформацію, яка показує, хто з власників де знаходиться і куди пересувається.

Це певною мірою порівняно з ситуацією, коли особисті дані реєстрації автотранспорту стануть публічно доступними. Також зловмисник може зімітувати на екранах диспетчерів польотів повітряне зіткнення літаків або згенерувати на екранах диспетчерів кілька тисяч неіснуючих ПО на базі підроблених даних, але використовуючи реальні ідентифікатори інших ПО, що зробить роботу диспетчера практично нездійсненною. Це може призвести до різного роду наслідків – від паніки у штабі диспетчерів польоту до спрацювання наземних систем щодо запобігання терористичних актів та виклику термінових аварій-них служб.[19]

Проведемо експериментальні дослідження щодо виявлення можливих порушень та збоїв транспондерів ADS-B. Для проведення експериментів будемо використовувати та порушень приймач FlightAware Piaware (Рис. 3.3.) та програмне забезпечення PiAware від FlightAware.

Робоча частота приймач FlightAware Piaware 1090МГц, до складу входить смуговий фільтр. Використовується Raspberry Pi 3 B+ та приймач GPS.

Основне призначення приймача GPS – проведення синхронізації у часі та визначення координат ПО. До складу приймального комплексу входить

антена (коефіцієнт підсилення 5дБ). Формат отримання декодованих повідомлень – beast.

На Рис. 3.4., 3.5. наведені результати експерименту щодо визначення координат ПО СУР487.[19]



Рисунок 3.3. Приймач FlightAware Piaware[19]

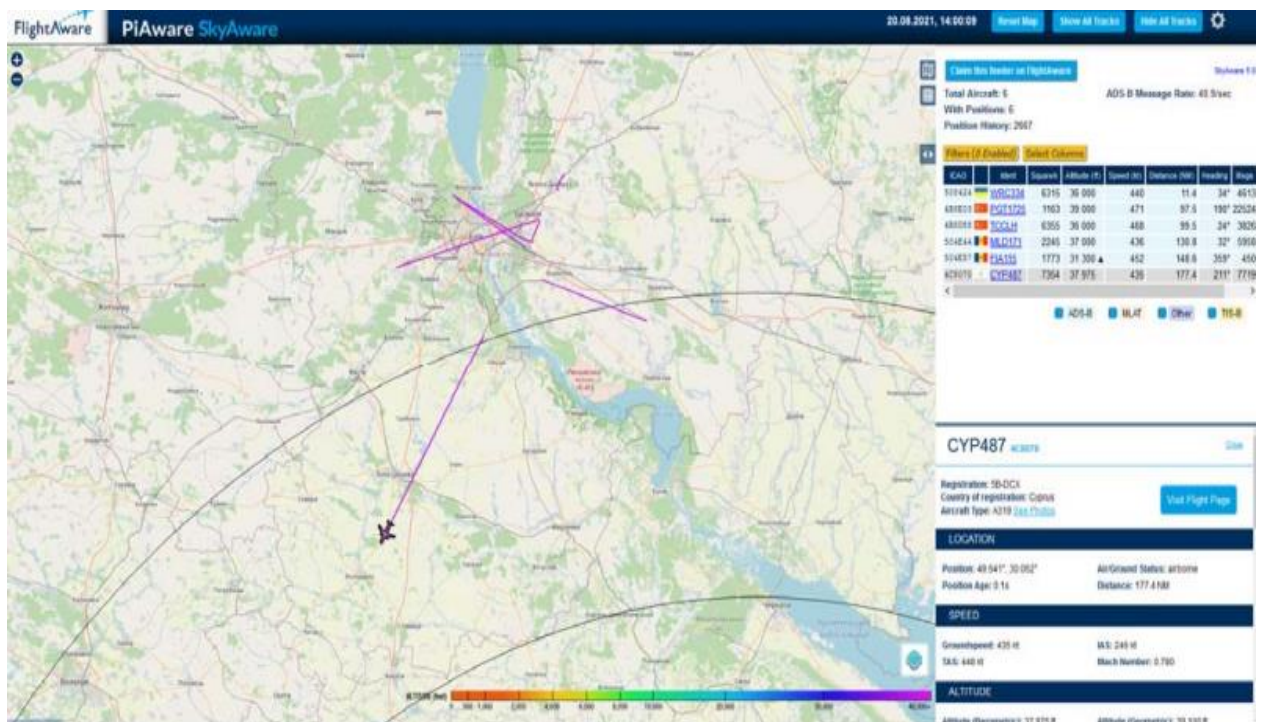


Рисунок 3.4. Експериментальні дані щодо ПО СYP487[19]

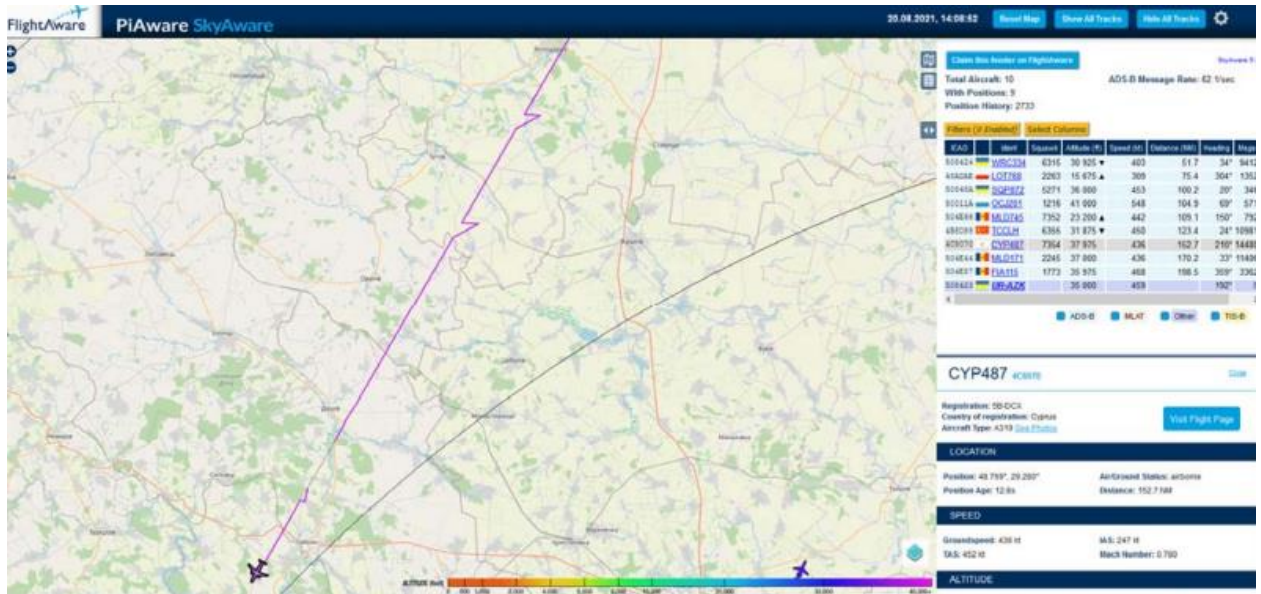


Рисунок. 3.5. Експериментальні дані щодо ПО СYP487[19]

Рис.3.4 ілюструє значні помилки у визначенні координат ПО (особливо – у Київській області). Імовірною причиною наведених помилок є нестабільність транспондерів та ADS-B приймачів.

Рис.3.5 також ілюструє помилки у визначенні координат ПО у декількох районах на протязі польоту ПО.

До транспондеру ADS-B інтегровано модуль GPS. Імовірно, що сам цей модуль і є причиною помилок у визначенні координат ПО.

При цьому у повідомленні ADS-B використовується контрольна CRC сума, яка представлена 24-ма розрядами. Враховуючи той факт, що ADS-B технологія є GPS залежною, саме атаки на такі системи і приводять до є помилок у визначенні координат ПО. Як правило, атаки проводяться частіше на програмне забезпечення навігаційних приймачів. Це може привести до розсинхронізації, помилкам у визначенні ефемерид, помилкам у визначенні поточної дати, тощо.[19]

Також може бути навмисне спотворення та підробка повідомлення ADS-B. Таке навмисне спотворення і підробка передбачає наявність іншого ПО. Але аналіз Рис. 3.4., 3.5. свідчить про відсутність іншого ПО.

Отже, при проведенні експерименту (Рис. 3.4, 3.5) основною причиною помилок у визначенні координат ПО є навігаційний модуль, який є частиною транспондери ADS-B.

Такі помилки у визначенні координат ПО, безумовно, не є припустимими та вимагають прийняття відповідних заходів.

3.2. Впровадження мультистатичного радару в аеропорт «Львів»

Цілі та завдання системи

Враховуючи дані мультистатичного первинного оглядового радару планується встановити радіолокатори по периметру на аеропорту «Львів» та біля нього (Рис.3.6.). З цього виходячи в нас є місцезнаходження та розташування кожного радіолокатора (Табл. 3.1.)

Відповідно до місцю встановлення радіолокаторів можна визначити та розрахувати місцезнаходження літака за даними мультистатичного радіолокатора, а саме вид збоку та вид зверху (Рис.3.7-3.8.)

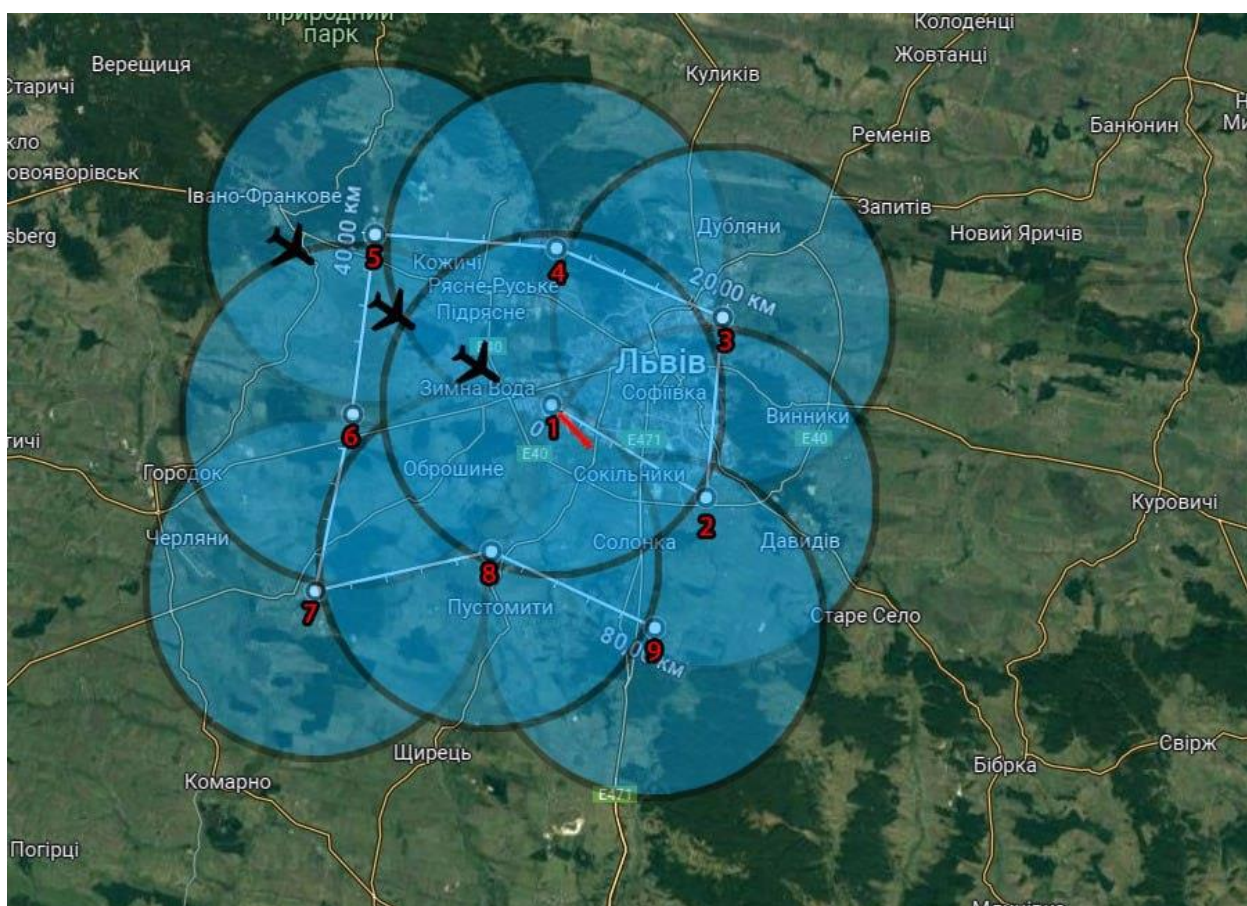


Рисунок 3.6. – Розташування Multistatic Radars

Таблиця 3.1. – Вхідні данні

№	Широта	Довгота
1	49,81741	23,94852
2	49,77090	24,06193
3	49,85958	24,07927
4	49,89826	23,94719
5	49,89912	23,81110
6	49,81225	23,79109
7	49,72607	23,76040
8	49,74332	23,90049
9	49,70882	24,02590

На Рис.3.9-3.11 можна побачити відстань, у кілометрах, від ПС(в його різних траєкторіях) до мультистатичного радару R1.Також на Рис.3.12 визначили за допомогою програмного забезпечення MATLAB точні координати ПС.

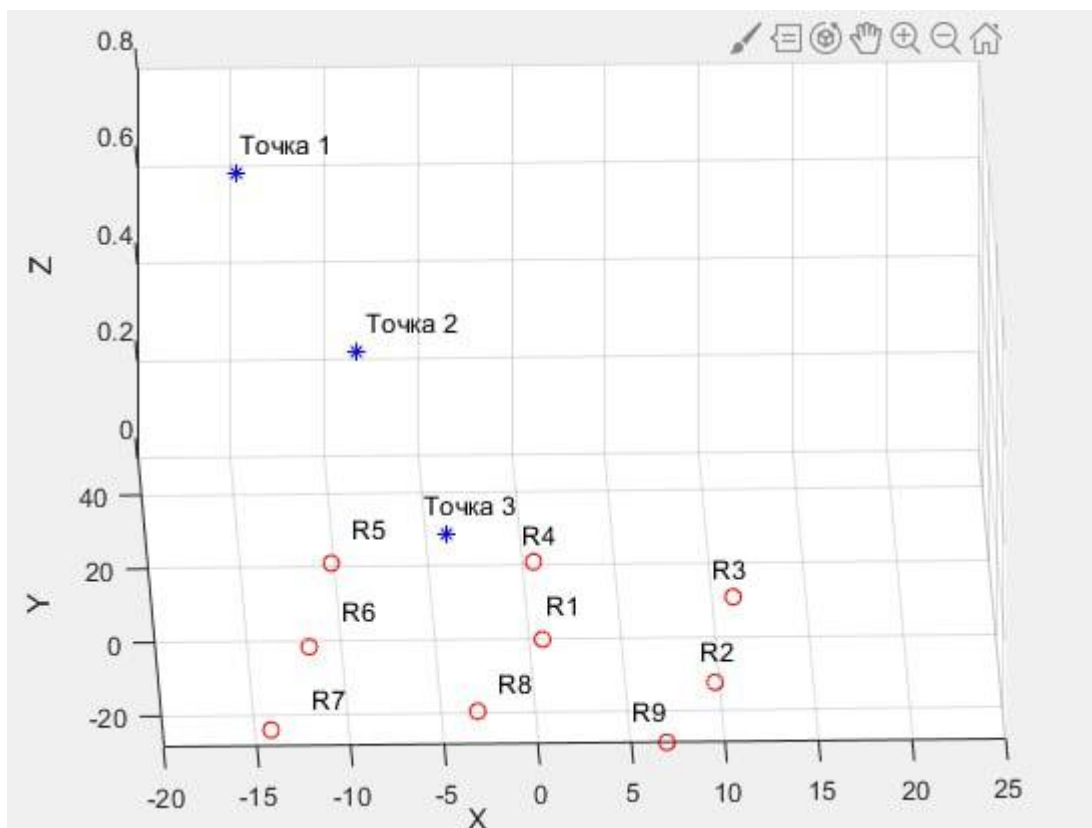


Рисунок 3.7 – Місцеположення літака за даними мультистатичного радіолокатора (вид збоку)

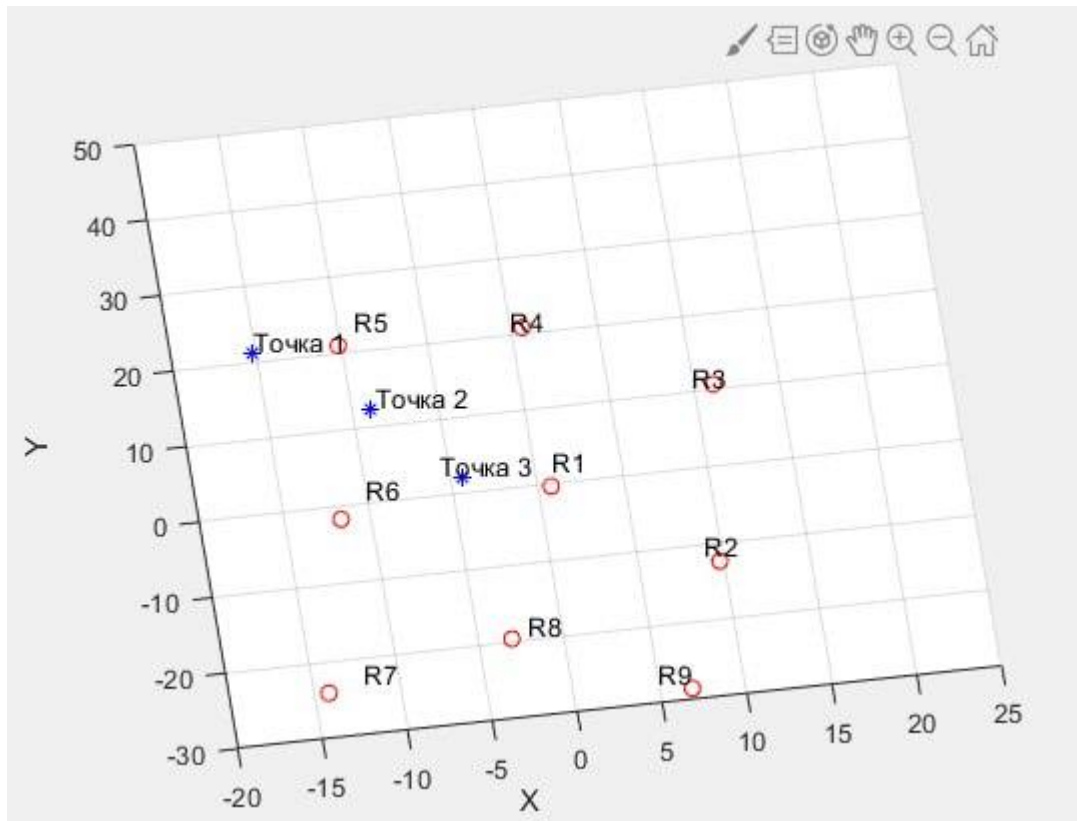


Рисунок 3.8 – Місцезнаходження літака за даними мультистатичного радіолокатора (вид зверху)

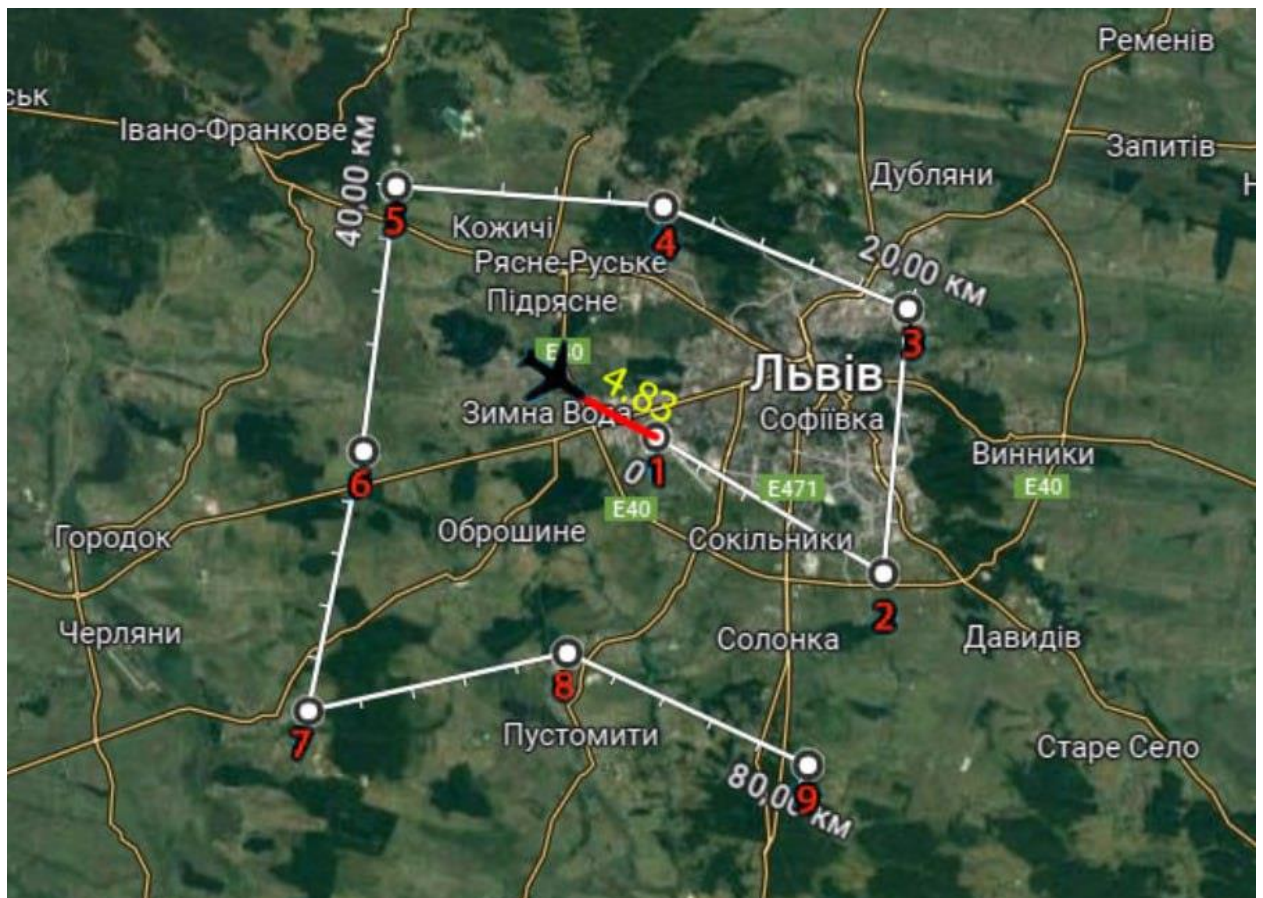


Рисунок 3.9. – Відстань між ПС до R1



Рисунок 3.10. – Відстань між ПС до R1

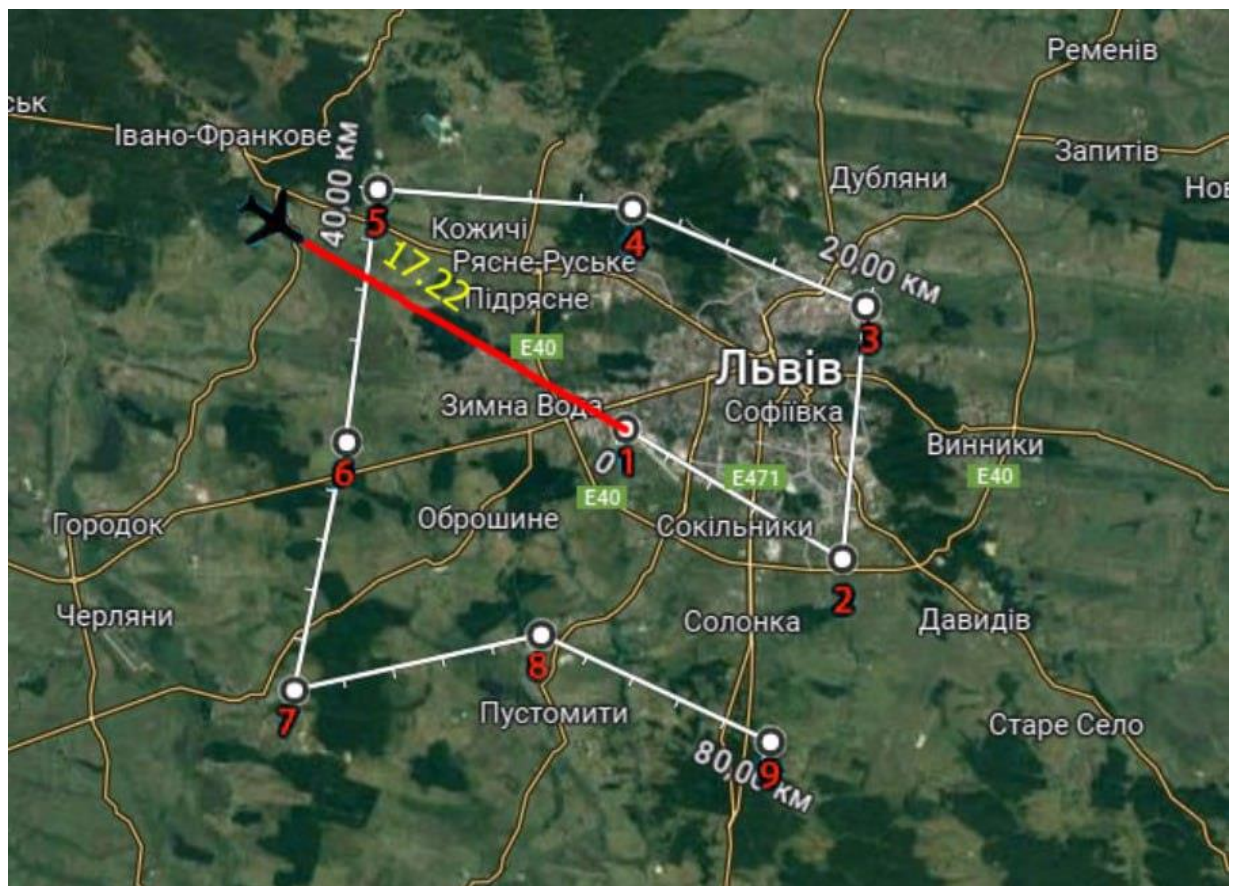


Рисунок 3.11. - Відстань між ПС до R1

```
Дистанція від точки 1 до R1 - 17.22 км  
Координати точки 1: 49.899721 пн.ш. 23.74666 сх.д.  
Дистанція від точки 2 до R1 - 10.37 км  
Координати точки 2: 49.86566 пн.ш. 23.826317 сх.д.  
Дистанція від точки 3 до R1 - 4.83 км  
Координати точки 3: 49.826859 пн.ш. 23.884401 сх.д.
```

Рисунок 3.12 – Отримані результати

3.3. Розуміння радарів точного заходження на посадку: технології, застосування та майбутні розробки.

Радар точного заходження на посадку (PAR - Precision Approach Radar) це високоспеціалізована радіолокаційна система, яка допомагає пілотам виконувати безпечну та точну посадку, особливо під час несприятливих погодних умов або недостатньої видимості. Ця технологія використовується протягом кількох десятиліть і продовжує розвиватися разом із новими досягненнями в радіолокаційних технологіях та авіаційній безпеці.

Розуміння основ PAR, його застосування та майбутніх розробок є важливим для тих, хто працює в авіаційній промисловості, а також для тих, хто покладається на авіаперельоти для бізнесу чи відпочинку.[29]



Рисунок 3.8. – Приклад PAR антен.[30]

За своєю суттю PAR — це наземна радіолокаційна система, яка забезпечує наведення пілотів у режимі реального часу під час фінального етапу заходження на посадку та посадки польоту. Система працює шляхом передачі вузького променя радіолокаційної енергії до літака, що наближається, який потім відбиває енергію назад до антени радара.

Аналізуючи відбитий сигнал, радіолокаційна система може визначити положення літака відносно злітно-посадкової смуги, а також його висоту, швидкість і курс. Потім ця інформація передається авіадиспетчерам, які надають словесні вказівки пілоту, щоб допомогти йому вирівняти літак із злітно-посадковою смугою та знизитися з правильною швидкістю.

Контролер наближення бачить тривимірне представлення положення літака, яке складається з двох зображень – планового вигляду та вертикального розрізу (Рис. 3.9.). Диспетчер порівнює положення та висоту літака з необхідними та надає екіпажу зворотний зв'язок через короткі проміжки часу.[30]

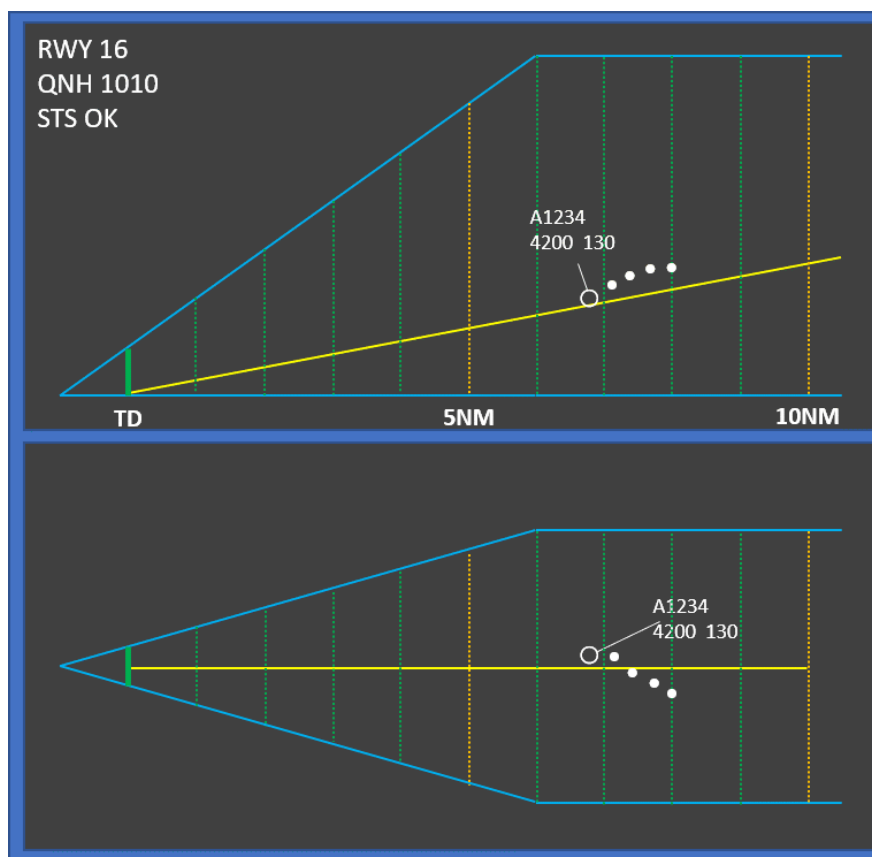


Рисунок 3.9. - Контролер наближення, що бачить диспетчер[30]

Контролер здійснює безперервний переговор і забезпечує[30]:

- інформація про положення повітряного судна відносно подовженої осьової лінії ЗПС;
- інформація про відстань до приземлення;
- інструкції заголовка;
- інформація про висоти відносно глісади;
- інструкції щодо коригувальних дій у випадку, якщо повітряне судно занадто високо або занадто низько.

Однією з ключових переваг PAR є його здатність забезпечувати точне наведення навіть в умовах поганої видимості, таких як сильний дощ, туман або сніг. Це особливо важливо в аеропортах, розташованих у регіонах із несприятливими погодними умовами, де ризик аварій під час посадки вищий. Окрім підвищення безпеки, PAR також може допомогти підвищити ефективність роботи аеропорту, дозволяючи літакам здійснювати посадку в умовах, які інакше були б надто небезпечними.

Технологія PAR широко використовується як цивільною, так і військовою авіацією. У цивільному секторі PAR використовується в аеропортах по всьому світу для підтримки комерційного повітряного руху, а також у невеликих аеропортах, які обслуговують авіацію загального призначення та бізнес-літаки. У військовому секторі PAR використовується для наведення винищувачів, транспортних літаків та інших військових засобів під час десантних операцій як у мирний час, так і під час виконання бойових завдань.[29]

Як і будь-яка технологія, PAR не позбавлена обмежень. Однією з головних проблем, пов'язаних з PAR, є потреба в висококваліфікованих авіадиспетчерах для інтерпретації радіолокаційних даних і надання вказівок пілотам. Це може бути складним завданням, особливо в умовах інтенсивного руху або під час екстремальних погодних умов.

Крім того, системи PAR можуть бути сприйнятливі до перешкод від інших радарних систем або електронних пристроїв, що може погіршити точність наданих вказівок.

Незважаючи на ці проблеми, поточні дослідження та розробки зосереджені на вдосконаленні можливостей PAR та усуненні його обмежень. Однією з сфер уваги є розробка автоматизованих систем, які можуть надавати пілотам орієнтири без втручання людини. Це може допомогти зменшити навантаження на диспетчерів повітряного руху та підвищити загальну ефективність роботи аеропорту. Ще одним напрямком досліджень є інтеграція PAR з іншими передовими навігаційними технологіями, такими як супутникові системи, щоб забезпечити ще більш точне та надійне наведення під час посадки.[29]

Підсумовуючи, радар точного заходження на посадку є важливою технологією, яка відіграє життєву важливу роль у забезпеченні безпеки та ефективності посадки літаків. Оскільки авіаційна галузь продовжує рости та розвиватися, цілком імовірно, що PAR залишатиметься важливим інструментом як для пілотів, так і для авіадиспетчерів. Розуміючи основи цієї технології, її застосування та майбутні розробки, працівники авіаційної галузі зможуть краще оцінити важливість PAR та її внесок у безпеку та надійність авіаперельотів.

ВИСНОВКИ ДО 3 РОЗДІЛУ

В третьому розділі розглянуті основні дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат ПО.

Основною перевагою використання ADS-B є можливість визначення координат ПО з використанням інформації супутникових навігаційних систем (наприклад, GPS/ГЛОНАСС). ПО визначає свої місцеположення з використанням супутникових навігаційних систем та за допомогою транспондерів періодично передає цю інформацію

Проаналізовані та визначені можливі варіанти відновлення, або покращення зони покриття систем спостереження.

Пріоритетними, порівняно з первинними та вторинними радіолокаторами, можуть бути:

- Мультистатистичний первинний оглядовий радар;
- ADS-B, або
- Радар точного заходження на посадку (PAR - Precision Approach Radar)

Перевагою можливого впровадження використання в зоні аеропорту «Львів» мультистатистичного первинного оглядового радару, є те ,що даний аеропорт може бути відкритим першим у сьогоднішні події.

РОЗДІЛ 4

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

4.1. Автоматизація обробки даних

Автоматизація обробки даних – типове завдання, яке вирішують сучасні аеронавігаційні системи. Її вирішують сучасні аеронавігаційні системи. Обробка аеронавігаційних даних здійснюється як на борту певних бортових пристроїв, так і наземними обчислювальними системами. Навігаційні параметри в сучасних системах вимірюються низкою різних датчиків. Створюються архіви даних, а для їх обробки використовуються спеціальні алгоритми статистичної обробки. Необхідно використовувати алгоритми статистичної обробки. Похибки не можливо усунути, але їх можна зменшити до прийняттого рівня. Тому спільна обробка даних в аеронавігаційних системах враховує вплив похибки кожного датчика. З цією метою вводиться довірчий інтервал. Довірчі інтервали визначаються як сукупність, які використовується для того, щоб гарантувати, що інтервал знаходиться в межах інтервалу з певною ймовірністю. Найчастіше використовується довірчий інтервал. Він дорівнює подвоєному середньоквадратичному значенню. Також він може забезпечувати 95% положення вимірюваного значення, виходячи з припущення він заснований на нормальному законі розподілу похибки.

Структура кожного блоку авіоніки подібна до архітектури персонального комп'ютера з відповідними елементами, такими як процесор, пам'ять та аналого-цифрові/цифро-аналогові перетворювачі, що дає змогу обробляти дані вимірювань на програмному рівні. Дані з датчиків перетворюються в цифрову форму шляхом дискретизації аналогових значень. Результати вимірювань зберігаються в цифровій формі у відповідних регістрах, змінних, матрицях або архівах даних. Визначення точного положення повітряного судна є одним з найважливіших завдань в цивільній авіації.

У зв'язку зі збільшенням обсягів повітряного руху стандарт ешелонування постійно переглядається.

Стандарт ешелонування повітряних суден визначає максимально допустимі межі просторового рознесення повітряних суден по вертикалі, горизонталі і висоті. Єдиним можливим способом вирішення проблеми перевантаженості повітряного простору є збільшення пропускної спроможності окремих частин повітряного простору за рахунок зменшення безпечної відстані між ПС. На практиці використовуються наступні методи. Введення більш точних вимог до визначення положення ПС у просторі. Впровадження більш точних вимог до позиціонування ПС можливе лише за наявності відповідної системи, здатної їх задовольнити. Функції системи. Позиціонування ПК цивільної авіації забезпечується полем аеронавігаційних сигналів, що генеруються в космосі різними системами. Як приклад обробки багатовимірних даних розглянемо траєкторію польоту літака і розрахуємо її за допомогою програмного забезпечення MATLAB.

4.1.1. Вхідні дані

Сучасні комерційні літаки оснащені різноманітними датчиками, які визначають положення повітряного судна в просторі. Відповідно до концепції Automatic Dependent Surveillance (ADS-B), користувачі повітряного простору повинні регулярно повідомляти про своє місцезнаходження у просторі в автоматичному режимі. Найпоширенішим обладнанням, оснащеним ADS-B, є авіаційний транспондер 1090ES. Літаковий транспондер автоматично генерує цифрове повідомлення відповідно до конфігурації системи і передає його за допомогою всеспрямованої антени системи.

Передане цифрове повідомлення містить такі дані, як ідентифікатор літака, координати місцезнаходження та барометричну висоту. Координати літака отримуються з комп'ютерної системи управління польотами після вибору найбільш підходящої системи позиціонування для конкретного повітряного простору, виходячи з точності, яку забезпечує система, і специфікаційних вимог.

Мережа програмно-керованих приймачів на землі приймає і розшифровує дані, що передаються за допомогою концепції ADS-B. Зокрема, ідентифікаційні коди літаків, координати місцезнаходження та барометричні висоти зберігаються в глобальній базі даних. Зокрема, обчислювальні кластери Flightradar24 і Flightaware одночасно обробляють дані з понад 30000 програмно-керованих приймачів ADS-B, розгорнутих по всьому світу (Рис.4.1)



Рисунок 4.1 – Мапа глобального трафіку

4.2. Виявлення, ідентифікація та відстеження літаючих об'єктів у трьох вимірах за допомогою мультистатичних радарів

Мультистатичні радіолокаційні системи можна використовувати в багатьох додатках, таких як національна безпека, протиповітряна оборона, протиракетна оборона, навігація суден і системи управління рухом. У цьому документі змодельовано багатостатичні радари, які здатні виявляти та відстежувати літаючі об'єкти в тривимірних системах координат. Шляхом розрахунків можна визначити місцезнаходження та швидкість літаючих об'єктів, а також їх радіолокаційні перерізи. Шлях об'єкта також оцінюється шляхом відстеження об'єкта.

В даний час більшість радарів є моностатичними, в яких одна антена або пара антен, розташованих в одній точці, використовуються для передачі та прийому електромагнітних хвиль. IEEE визначає бістатичний радар як «радарну систему, яка використовує антени в різних місцях для передачі та прийому».

Відстань між передавачем і приймачем може бути дуже великою. Ця відстань називається базовим діапазоном. Очевидно, якщо вони розташовані майже разом, тобто якщо базова лінія дуже мала, радарна система апроксимується як моностатична. Оскільки бістатичні радары здатні виявляти об'єкти (цілі) лише у двовимірній системі координат, мультистатичні радары можна використовувати, якщо потрібно виявити об'єкти у тривимірній (3D) системі координат.

Мультистатична радарна система має дві або більше антен передавача або приймача, які розділені великими відстанями порівняно з розміром антен. Мультистатичні радары мають ряд переваг, включаючи високу ізоляцію між антенами передавача та приймача та невразливість до зовнішніх перешкод, таких як перешкоди. Крім того, значно зменшено взаємні перешкоди між передавачем і приймачем.

У таких системах кілька приймачів можуть працювати з одним передавачем, і якщо передавач перестає працювати, приймач можна легко адаптувати для прийому хвиль від іншого передавача. Перемикачі передавач-приймач або дуплексери є дорогими, мають втрату та важкі.

Тому вони не використовуються в мультистатичних радарах. Моностатичний радар повинен поширювати більшу потужність, ніж мультистатичний; отже, останній безпечніший від нападу. Збільшення кількості приймачів призводить до збільшення зони спостереження.

Однак є і деякі мінуси. Головний недолік полягає в тому, що в мультистатичних радарях надто складна синхронізація між передавачем і приймачем і геометрія всієї системи.

Нині цікавить дослідників використання бістатичних та мультистатичних радіолокаційних систем у сфері внутрішньої безпеки. Зараз змоделюємо мультистатичну радіолокаційну систему, яка здатна обчислювати місцезнаходження, швидкість, тип об'єкта, а також шлях об'єкта. Що ще важливіше, визначемо тип об'єкта, обчислюючи радіолокаційний поперечний переріз (RCS) у 3D.

RCS є дуже важливим параметром, який вказує на тип об'єкта, наприклад реактивні літаки, винищувачі, ракети тощо. Мультистатична радарна система може складатися з одного передавача та кількох приймачів. Коли передавач посилає хвилю, вона розсіюється від об'єктів, якщо такі є, і приймачі отримують розсіяні хвилі. Двох приймачів достатньо для визначення швидкості, розташування та RCS у 3D. Ми розглядаємо лише два приймачі, однак, якщо кількість приймачів більше двох, можна вибрати перші два, які отримують максимальну потужність.

Аналіз мультистатичних радарів можна спростити до аналізу компонентів бістатичних радарів. Рис.4.2. ілюструє геометрію бістатичного радара.

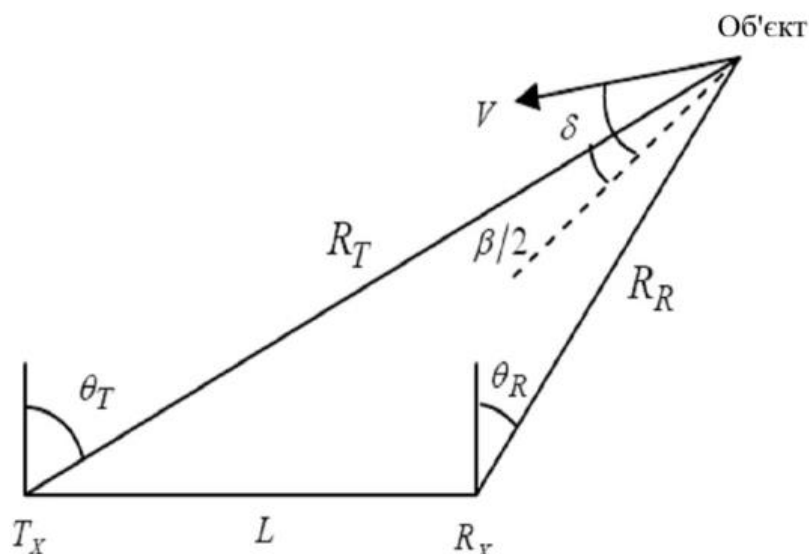


Рисунок 4.2 - Геометрія бістатичного радара.

Де $\mathbf{T_x}$ і $\mathbf{R_x}$ показує розташування передавача та приймача, а \mathbf{L} також відстань між цими двома місцями. $\mathbf{R_t}$ і $\mathbf{R_r}$ відносяться до діапазонів від передавача до цілі та від цілі до приймача відповідно.

β є бістатичним кутом, v є цільовою швидкістю та δ є кутом аспекту швидкості. Передавач, приймач і об'єкт розташовані в площині.

Рівняння потужності

P_T Якщо передавач посиляє вузьку смугу хвилі з потужністю після розсіювання від об'єкта, отриману потужність кожного приймача P_{Ri} можна визначити за допомогою формули Фріса.

$$P_{R_i} = \frac{P_T G_T G_{R_i} \lambda^2 \sigma_B}{(4\pi)^3 R_T^2 R_{R_i}^2 L_T L_{R_i} L_P}, i = 1, 2, \dots, n$$

У рівнянні (1) n , λ і L_P є кількістю приймачів, довжиною хвилі та середніми втратами при розповсюдженні відповідно. G_T і G_{R_i} відносяться до посилення передавача і посилення кожної антени приймача. L_T і L_{R_i} передають і приймають системні втрати. σ_B відноситься до RCS об'єкта.

У практичному випадку, P_T , P_R , L_P , G_T , G_R , можна виміряти, отже, RCS об'єкта, можна отримати з рівняння (1) $L_T L_R \sigma_B$.

У якості вхідних даних я використаю дані траєкторії польоту *THY271/TK271* (Turkair 271), що забезпечуються авіакомпанією *Turkish Airlines* зі сполученням *Istanbul (IST), Turkey* та *Chişinău (KIV), Moldova*. Дата вильоту 30 вересня 2022 року о 19.22 PM (за розкладом). Дата посадки 31 жовтня 2023 року о 18.26 (CET).

Політ завершився за розкладом. Політ виконувався на *Boeing 737 MAX 8 (B38M)*. Вхідні дані отримано від архіву за посиланням <https://flightaware.com/live/flight/THY271/history/20220930/1625Z/LTFM/LUKK/tracklog>.

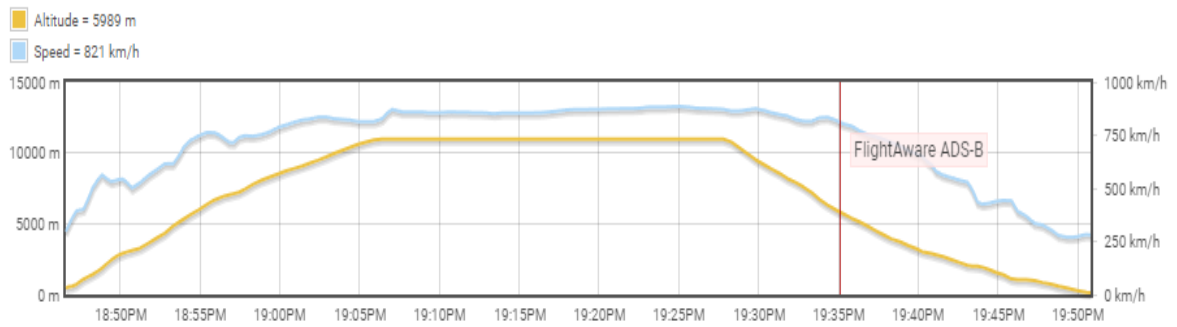
У таблиці 4.1 наведено перші та останні 15 рядків даних траєкторії використаного польоту.

Таблиця 4.1. Траєкторні дані рейсу THY271 (IST / LTFM-KIV / LUKK)

від 31 жовтня 2023 р

Час (СЕТ)	Широта	Довгота	Курс	Швидкість	Швидкість	Висота (фут)
T		7260	↓ 177°			
T	2474	7265	↓ 178°			
T	2347	7266	↓ 180°			
T	2185	7266	↓ 180°			
T	2041	7237	↓ 195°			
T	2	7121	↙ 224°			
T	1828	6926	← 251°			
T	1808	6576	← 269°			
T	1806	6319	← 270°			
T		6070	← 273°			
T	1911	5744	← 306°			
T	2083	5577	↖ 334°			
T	2315	8	↑ 0°			
T	2689	8	↑ 359°			
T	3020	8	↑ 358°			
...						
T		8	↗ 22°			5.775
T		8	↗ 22°			5.100
T		8	↗ 23°			4.550
T		8	↑ 21°			4.050
T		8	↗ 25°			3.650
T		8	↗ 52°			3.250
T		8	↗ 51°			2.950
T		8	↗ 63°			2.800
T		8	→ 89°			2.575
T		8	→ 90°			2.575
T		8	→ 88°			2.550
T		8	→ 88°			2.350
T		8	→ 88°			1.875
T		8	→ 89°			1.300
T		8	→ 88°			1.050

Візуалізація траєкторних даних у програмному забезпеченні



Виконаємо імпорту траєкторних даних рейсу ТНУ271/ТК271 від 31 жовтня 2023 р у програмне забезпечення MATLAB. Результати візуалізації даних траєкторії польоту наведені на рис.4.3., а вертикальний профіль представлено на рис. 4.3.

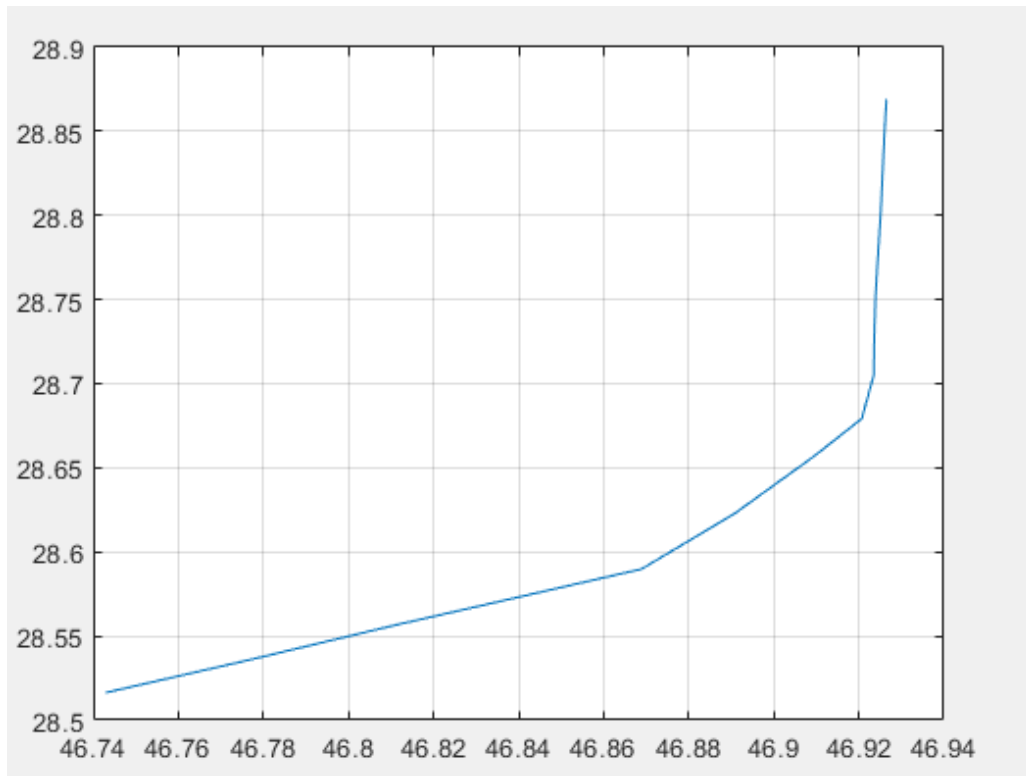


Рисунок 4.2 – Траєкторія руху рейсу ТНУ271/ТК271 від 31 жовтня 2023

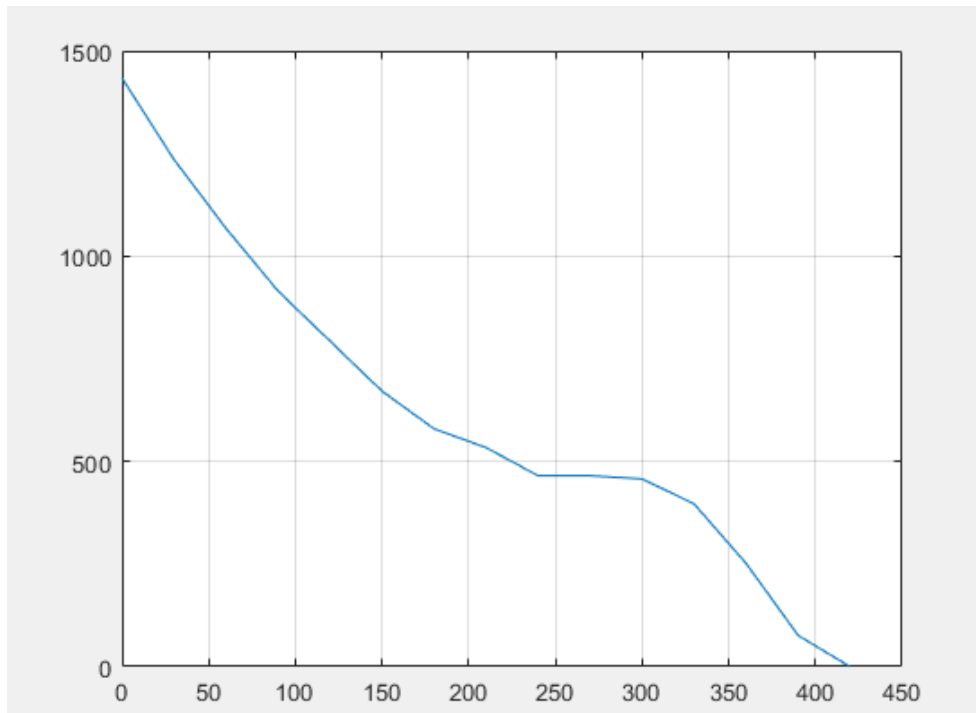


Рисунок 4.3 – Вертикальний профіль рейсу ТНУ271/ТК271 від 31.10.2023

Оцінка цільового розташування

Щоб оцінити місцезнаходження цілі в бістатичних радарах, приймачі вимірюють інтервал часу ΔT_{TT} між переданими імпульсами та прийнятими ехо-хвилями, розсіюванням від цілі. Отже, суму діапазону, $R_R + R_T$, можна обчислити за допомогою наступного рівняння.

$$(R_R + R_T) = c \Delta T_{TT}, \quad c = 2.998 \times 10^8$$

У кожній бістатичній площині, R_T і R_R можна β отримати за допомогою суми діапазону та або θ_T або θ_R (показано на Рис.4.2.). Якщо θ_T відомо, R_T і R_R може β бути обчислено за рівняннями нижче.

$$R_T = \frac{(R_T + R_{R_i})^2 - L_i^2}{2(R_T + R_{R_i} - L_i \sin(\theta_{T_i}))}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$R_{R_i} = \sqrt{(R_T^2 + L_i^2 - 2R_T L_i \sin(\theta_{T_i}))}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\beta_i = \sin^{-1} \left(\frac{L_i \cos(\theta_{T_i})}{R_{R_i}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Наявність розташування передавача та приймача

$$\left((x_T, y_T, z_T) \text{ and } (x_R, y_R, z_R)_i \right)$$

як і R_T отримане R_{Ri} з рівнянь, розташування об'єкта (x, y, z) можна обчислити в декартовій системі координат шляхом вирішення рівнянь.

$$R_T = \sqrt{\left((x - x_T)^2 + (y - y_T)^2 + (z - z_T)^2 \right)}$$

$$R_{Ri} = \sqrt{\left((x - x_{Ri})^2 + (y - y_{Ri})^2 + (z - z_{Ri})^2 \right)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Розрахунок швидкості цілі

Для оцінки швидкості цілі використовується рівняння «ефекту Доплера».

$$f_{d,bi} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{dR_T}{dt} + \frac{dR_{Ri}}{dt} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Крім того, швидкість зміни дальності передавача та приймача по відношенню до часу визначається як:

$$\frac{dR_{T_i}}{dt} = V_i \cos(\delta_i - \beta_i/2), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\frac{dR_{R_i}}{dt} = V_i \cos(\delta_i + \beta_i/2), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

поєднання цих рівнянь дає

$$f_{d,bi} = \left(\frac{2V_i}{\lambda} \right) \cos(\delta_i) \cos(\beta_i/2), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Де n кількість приймачів. У цій дослідницькій роботі n встановлено

з

н

$$\begin{aligned} \frac{dR_T}{dt} &= \frac{\partial R_T}{\partial x} \times \frac{\partial x}{\partial t} \\ &+ \frac{\partial R_T}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial R_T}{\partial z} \times \frac{\partial z}{\partial t} \end{aligned}$$

н

я

$$\frac{dR_{Ri}}{dt} = \frac{\partial R_{Ri}}{\partial x} \times \frac{dx}{dt} + \frac{\partial R_{Ri}}{\partial y} \times \frac{dy}{dt} + \frac{\partial R_{Ri}}{\partial z} \times \frac{dz}{dt}, i = 1, 2$$

Результати

Мультистатична радарна система, описана в цьому документі, складається з одного передавача та двох приймачів. Щоб визначити місцезнаходження та швидкість об'єкта, радар-передавач надсилає імпульси хвилі з певним періодом, а радари-приймачі отримують кілька імпульсів. У загальному випадку імпульси, що надходять на приймачі, можуть складатися з двох частин. Перша частина - це імпульси, отримані безпосередньо від передавача. Друга частина - це розсіяні хвилі, що надходять від об'єкта, якщо він є. Спочатку сума діапазону $P_{Ri} + R_T$ обчислюється рівнянням. Потім R_T , R_R , β , $\frac{dR_T}{dt}$, $\frac{dR_{Ri}}{dt}$ у кожній бістатичній площині розраховуються з використанням параметрів.

Далі, комбінуючи деякі рівняння, місцезнаходження об'єкта оцінюється в 3D. Нарешті, комбінуючи інші рівняння, обчислюється швидкість цілі.

На основі вищезгаданої процедури моделювання було розроблено код MATLAB. (Рис.4.4.-4.6.)

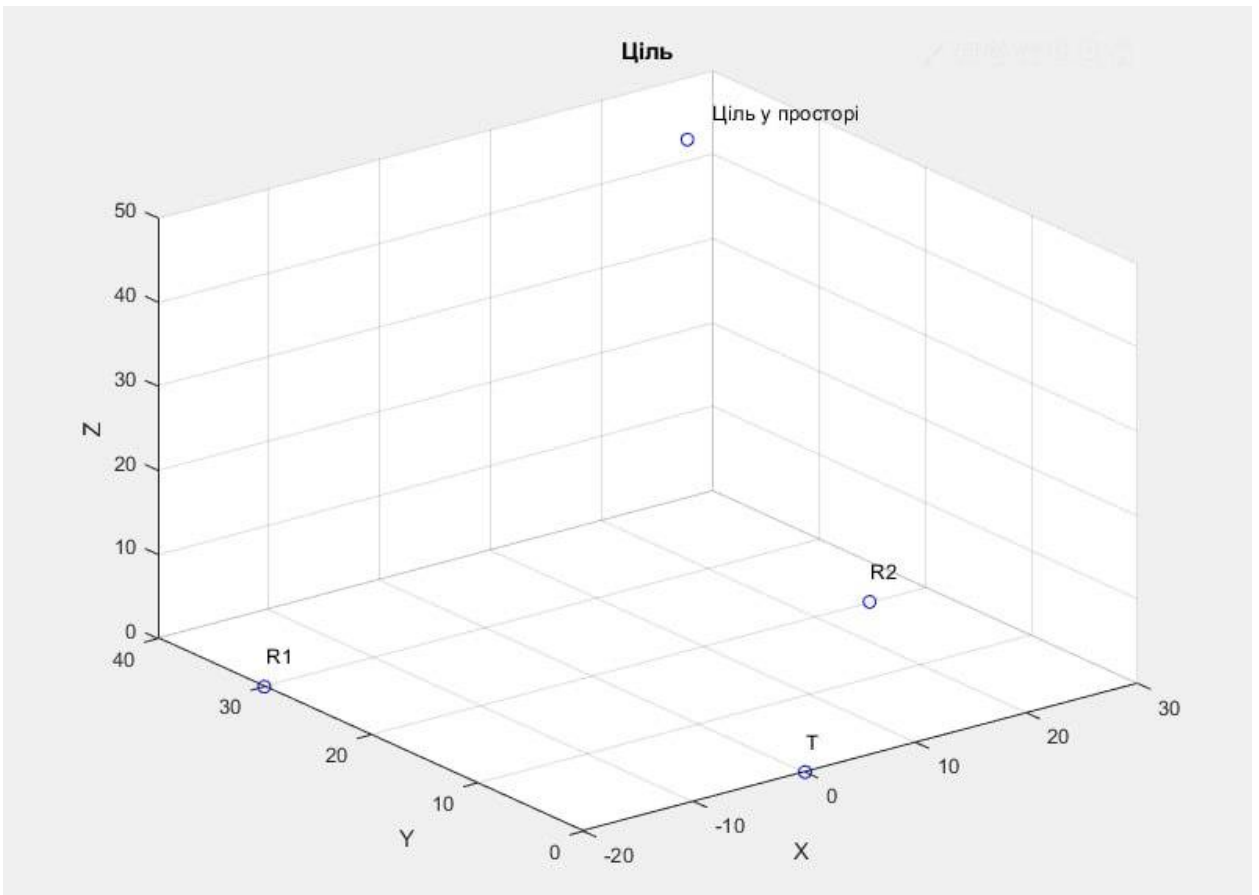


Рисунок 4.4 – Геометрія системи

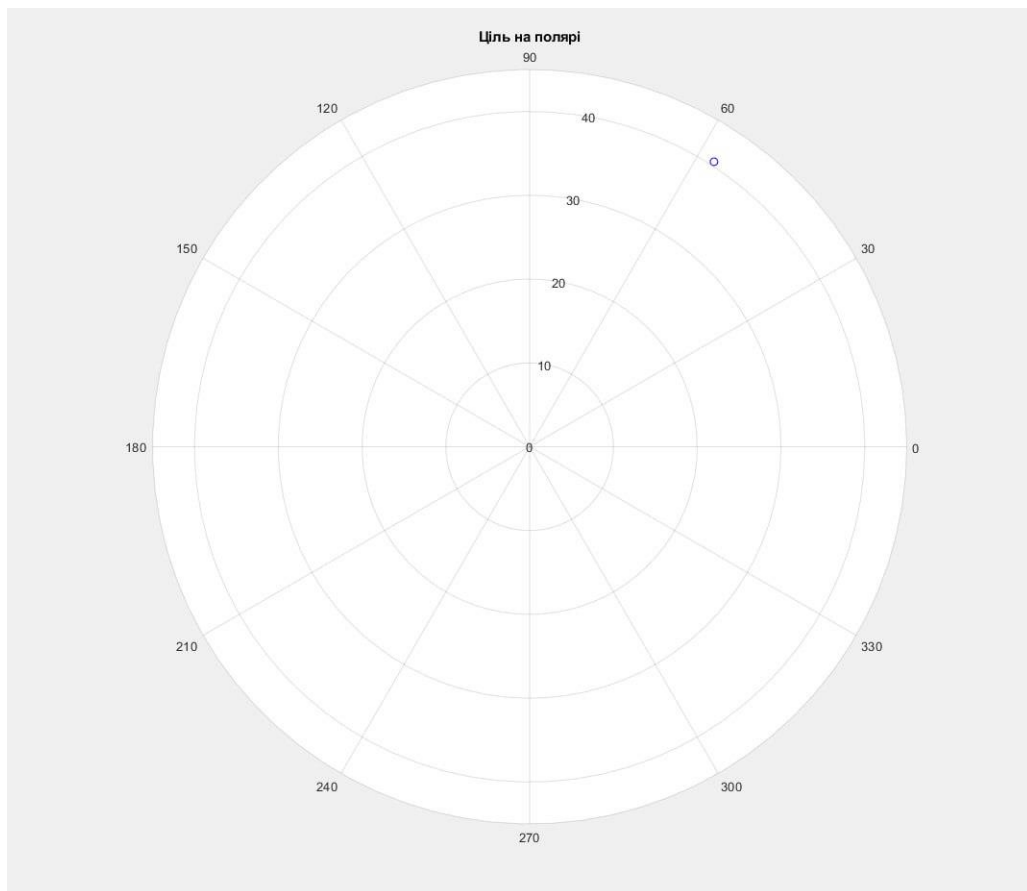


Рисунок 4.5. – Полярна ділянка розташування об'єкта

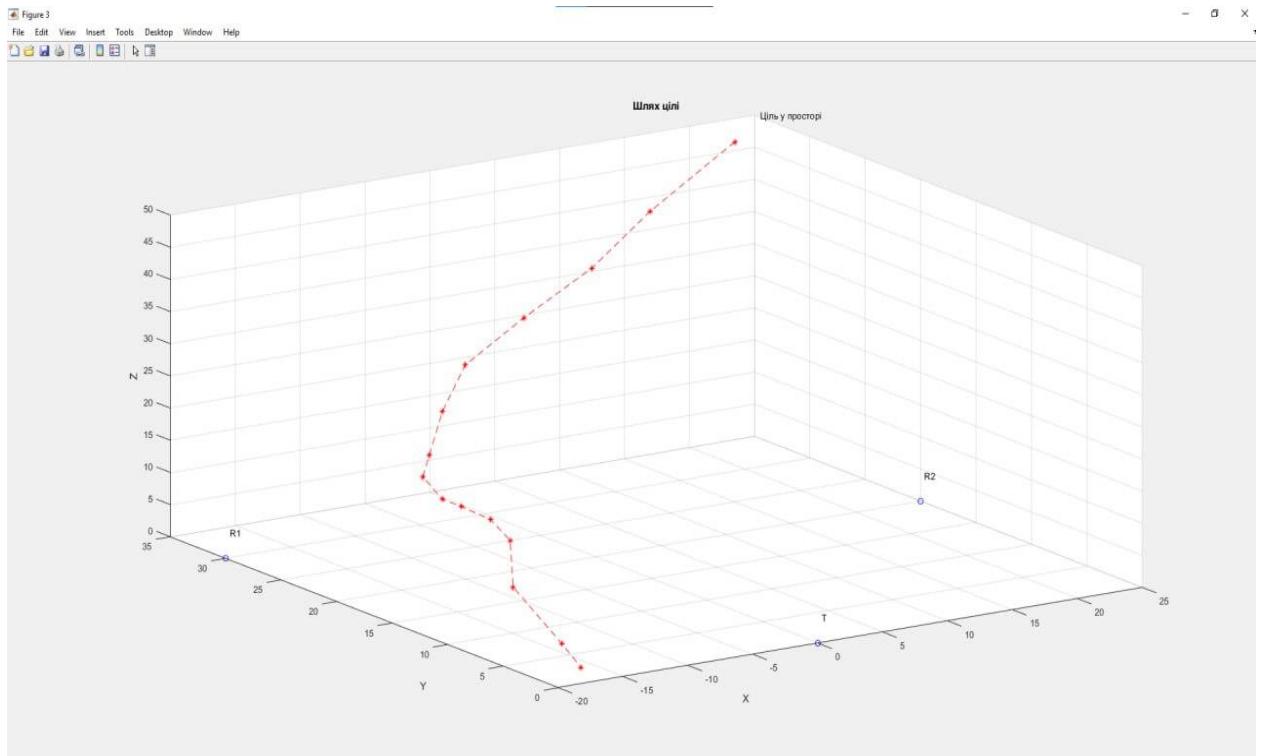


Рисунок 4.6. – Шлях літака

ВИСНОВКИ ДО 4 РОЗДІЛУ

Раціоналізація може варіюватися від простого перегляду вартості каналів передачі даних і джерел живлення до розгортання мережі датчиків моніторингу.

Замість того, щоб зосереджуватися на окремих вигодах, таких як витрати, вважається, що цілісний/плюралістичний підхід із залученням зацікавлених сторін з різними поглядами принесе найбільшу користь.

При раціоналізації необхідно враховувати широкий і різноманітний спектр факторів. Деякі з них залежать від придатності нових технологій відеоспостереження, структури і впливу законодавчого пакету, тоді як інші – від різноманітності методів оцінки/відбору програм, їхніх відносних переваг і застосовності до запропонованих заходів з раціоналізації.

Поява нових методів і вдосконалення існуючих технологій принесе поліпшення і відкриє нові можливості для портфелів провайдерів аеронавігаційних послуг.

Раціоналізація систем спостереження пов'язана зі значними, а в деяких випадках непомірними витратами. Мета полягає в тому, щоб досягти нейтрального або економічно ефективного рішення протягом певного періоду часу(можливо, кількох років). Витрати на перехідний період широко варіюються в залежності від часу проведення раціоналізаторських заходів(як правило, заходи, що проводяться наприкінці терміну експлуатації активу, є дешевшими)та географічного розташування заходів.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Вплив радіолокації на навколишнє середовище

Всі живі організми на Землі залежать від електромагнітного випромінювання Сонця та Землі для фотосинтезу рослин та біосинтезу зоопланктону, які є основними учасниками морського харчового ланцюга.

Окрім іонізуючого випромінювання, безпека якого регулюється Держатомрегулювання в рамках системи регулювання ядерної та радіаційної безпеки, існує широкий спектр випромінювань, відомих під загальною назвою "радіація", які різняться за довжиною хвилі, інтенсивністю та енергетичним впливом на навколишнє середовище та біоту.[5]

Очі людей і деяких тварин пристосовані до розпізнавання лише невеликої частини спектру електромагнітного випромінювання Сонця. Майже всі викопні види палива, що використовуються в сучасному суспільстві (газ, нафта, вугілля), є накопиченою енергією, отриманою від Сонця мільйони років тому у вигляді електромагнітного випромінювання.

Згідно з Британською енциклопедією, "Електромагнітне випромінювання – це потік енергії, який поширюється зі швидкістю світла у вільному просторі або матеріальному середовищі у вигляді електричного або магнітного поля. Згідно з квантовою теорією, електромагнітне випромінювання - це потік фотонів, що подорожують у просторі зі швидкістю світла.

Сучасна українська енциклопедія визначає електромагнітне випромінювання як "електромагнітні хвилі, що випромінюються зарядженими частинками, атомами, молекулами, антенами та іншими випромінювальними системами".

Для того, щоб зрозуміти, що таке електромагнітне випромінювання і як воно генерується, необхідно окреслити значення електромагнітних полів (ЕМП): підручник для студентів вищих навчальних закладів "Основи охорони праці" І.В. Шудренко визначає електромагнітне поле як: "фізичне поле, що взаємодіє із зарядженим тілом".

Сьогодні властивості електромагнітного випромінювання використовуються в інтернеті, бездротовому та мобільному зв'язку, телебаченні, радіолокації, радіонавігації, медицині, а також у металургійній, деревообробній, текстильній, легкій та харчовій промисловості.

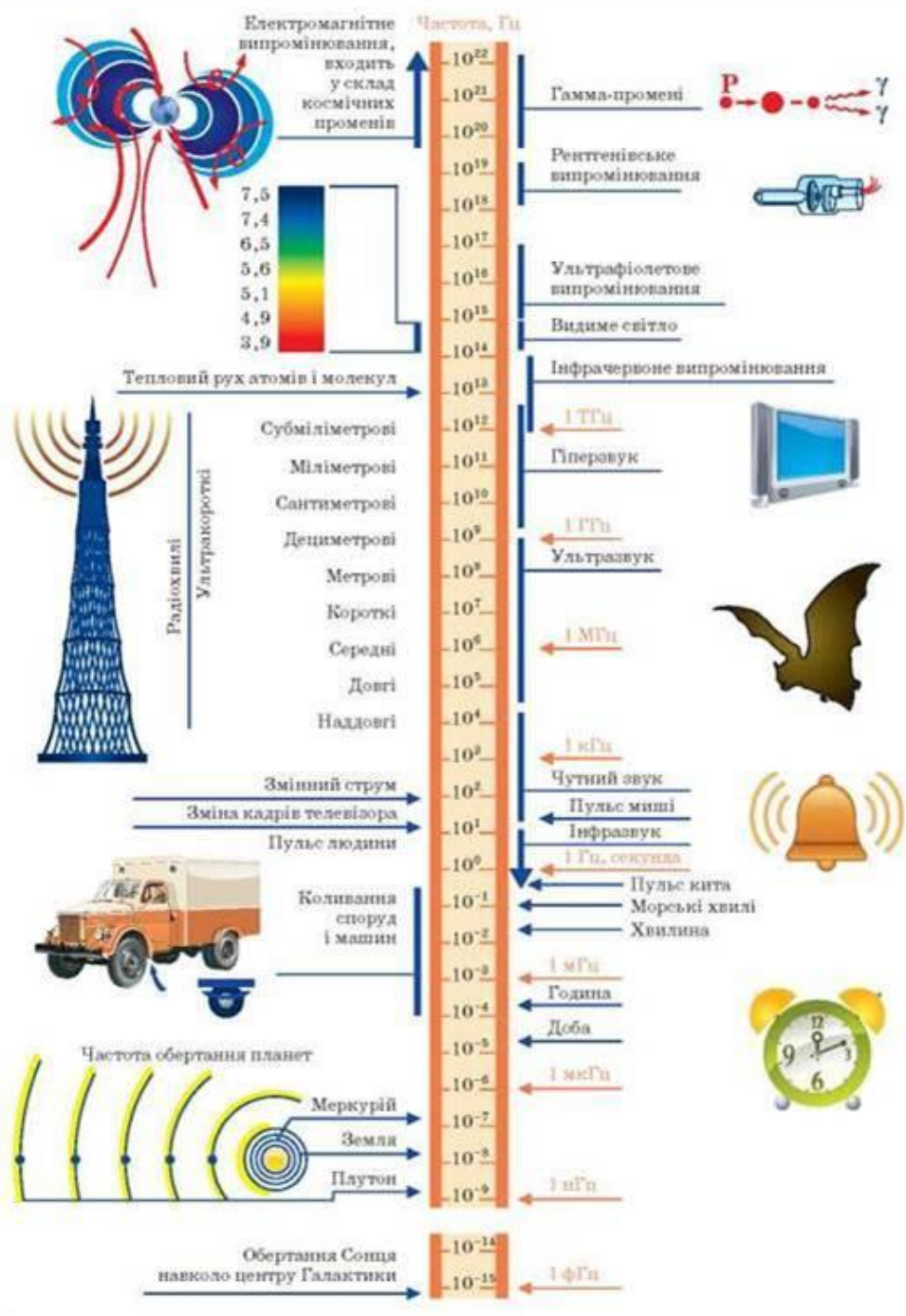


Рис. 5.1. – Шкала механічних та електромагнітних коливань і хвиль[5]

Види електромагнітного випромінювання

Існує сім типів електромагнітного випромінювання. Спільним для них є те, що всі вони генеруються електричними зарядами, а відмінності між ними залежать від середовища та обставин, за яких заряди можуть реагувати на випромінювані частоти.

У діапазоні електромагнітного спектра до 1012Гц радіохвилі, радарні хвилі і мікрохвилі генеруються рухом вільних зарядів і електронів у металевих частинах антен і в просторі. Найбільш високих частотах в інфрачервоній області спектра (від 1012Гц до 5070Гц) рухомі заряди характеризуються переважно рухом атомних молекул у речовині. Електромагнітне випромінювання, від видимого світла до рентгенівських променів, має частоти, що відповідають зарядам всередині атомів. Гамма-промені відповідають зарядам в середині атомного ядра.

Вище сказане показує, що іонізуюче випромінювання є складовою більш широкого діапазону електромагнітного випромінювання на Землі, оскільки частина космічного випромінювання відхиляється або поглинається електромагнітним випромінюванням Землі і шарами атмосфери.[5]

Таким чином, типи електромагнітного випромінювання включають в себе наступні:

- Радіохвилі;
- Мікрохвилі;
- Інфрачервоне випромінювання;
- Видиме світло;
- Ультрафіолетове випромінювання;
- Рентгенівські промені;
- Гамма-промені.

Вплив радіотехнічних об'єктів на електромагнітну обстановку аеропортів

Радіонавігаційне, посадочне, зв'язкове та диспетчерське обладнання відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки польотів у цивільній авіації. Кількість і потужність такого обладнання постійно зростає. Однак широке впровадження в цивільній авіації сучасного радіообладнання, яке передбачає випромінювання в космос електромагнітної енергії НВЧ діапазону високої

інтенсивності, ставить питання про необхідність його регулювання як одного з потенційно шкідливих факторів впливу на здоров'я людини.

Електромагнітне середовище аеропортів характеризується наявністю великої кількості радіотехнічних об'єктів (РТО), які є найбільш небезпечними джерелами електромагнітних випромінювань для людей. До них відносяться засоби зв'язку, навігації та моніторингу (радіотехнічне забезпечення): радіоелектронні технічні засоби (телекомунікаційне, радіонавігаційне та радіолокаційне обладнання, системи автоматизації та їх робочі місця, засоби відображення інформації, антени), призначені для забезпечення польотів повітряних суден, обслуговування повітряного руху та забезпечення виробничої діяльності приватних компаній та фідери електроживлення, лінії управління телекомунікацій, автономні джерела живлення, електроустановки та електрообладнання.[6]

Основну потенційну небезпеку для довкілля та здоров'я населення становлять джерела електромагнітного випромінювання, такі як радіолокаційні станції, телевізійні станції, радіопередавачі та інше радіообладнання. Основне радіообладнання на аеродромах має досить високу потужність і частоту випромінювання; передавальні антени РТЗ значно вищі за існуючі будівлі і мають відносно великий кут нахилу у вертикальній площині. Електромагнітна енергія, що випромінюється антенами передавальних РТО, поширюється в просторі, утворюючи електромагнітне поле. В останні роки потужність радіолокаційних станцій збільшується в 10-30 разів кожне десятиліття.

Радіолокаційні системи працюють на частотах від 500МГц до 15ГГц, хоча деякі системи працюють на частотах до 100ГГц.

Електромагнітні сигнали, що генеруються радаром, принципово відрізняються від випромінювання інших джерел. Це пов'язано з тим, що періодичний рух антени в просторі призводить до просторових розривів у випромінюванні. Тимчасові розриви випромінювання викликані періодичною

роботою радара. Тривалість роботи в різних режимах роботи радіообладнання може становити від декількох годин до доби.[6]

Наприклад, у випадку метеорологічного радіолокатора загальний час роботи не перевищує 12 годин через 30-хвилинний інтервал випромінювання та 30-хвилинну паузу, в той час як аеропортові радіолокаційні станції в більшості випадків працюють 24 години на добу. Ширина діаграми спрямованості в горизонтальній площині зазвичай становить кілька градусів, а час опромінення протягом періоду огляду - десятки мілісекунд. Метеорологічні радіолокатори можуть створювати щільність потоку енергії $\sim 100\text{Вт/м}^2$ на відстані 1 км протягом кожного циклу опромінення.

Тому наразі актуальною науково-технічною задачею є розробка нових підходів і методів для розрахункового прогнозування та інструментального моніторингу рівнів електромагнітного поля поблизу антени з метою забезпечення безпеки електромагнітного випромінювання. Інтегральне електромагнітне навантаження визначається виходячи з інтенсивності електричної та магнітної складових електромагнітного поля, фактичного значення щільності потоку енергії електромагнітного випромінювання, що генерується технічними засобами, принципу суперпозиції та гранично допустимих рівнів цих елементів у кожній смузі частот. Радіотехнічні засоби, що мають значний вплив на електромагнітну обстановку в приаеродромних операційних зонах більшості аеропортів цивільної авіації України (Дніпро, Київ (Бориспіль) та Одеса), практично ідентичні і працюють в однаковому режимі.

Вимірювання рівнів електромагнітного випромінювання за межами офіційно встановлених санітарних зон систематично перевищують гранично допустимі рівні на 10-25%. При цьому така ситуація спостерігається і в зонах, де працівники перебувають постійно. Значною мірою це пов'язано з відмінностями в нормативах.

Наприклад, гранично допустимий рівень випромінювання від метеорологічних радіолокаційних станцій та подібних режимів роботи

становить 10 мкВт/см^2 за гігієнічними нормами, тоді як за санітарними нормами $2,5 \text{ мкВт/см}^2$. При цьому ці гігієнічні нормативи є чинними і не змінювалися. Для радіолокаційних станцій спостереження цивільної авіації максимально допустимі рівні становлять $15,20$ і 25 мкВт/см^2 , хоча всі вони працюють в одному діапазоні (UHF).

Для зниження напруженості електричних полів у робочій зоні рекомендується застосовувати різні інженерно-технічні засоби і методи, а також організаційні, лікувально-профілактичні заходи. Можуть використовуватися такі інженерно-технічні засоби і методи:

- екранування випромінюючих тіл, приміщень або робочих зон;
- зменшення потужності джерел випромінювання (якщо дозволяють технічні умови);
- зниження інтенсивності та щільності потоків енергії в робочій або житловій зоні за рахунок використання атенюаторів потужності і регулюючих навантажень (наприклад, антенних еквівалентів);
- засоби індивідуального захисту.

Для захисту населення від впливу електромагнітних полів, що генеруються радіообладнанням, встановлюються санітарно-захисні зони та зони обмеження забудови, які визначаються гранично допустимим рівнем електромагнітних полів.

5.2. Вплив радіолокації та електромагнітних полів на людину

Електромагнітні поля (ЕМП) можуть спричиняти:

- Несприятливі функціональні ефекти в організмі;
- Несприятливий вплив на організм.

Функціональні ефекти проявляються у швидкій втомлюваності, головних болях, порушеннях сну, функцій серцево-судинної та нервової систем. Тривалий вплив інтенсивного електромагнітного випромінювання викликає стійкі розлади і захворювання.[7]

Наприклад, дослідження людей, які працюють в умовах високої інтенсивності електромагнітного випромінювання, показали, що нервова і серцево-судинна системи є найбільш чутливими до цього впливу. Значні зміни також були виявлені в кровотворенні, порушеннях ендокринної системи, метаболічних процесах і захворюваннях очей. Найбільш поширеними клінічними проявами радіочастотного опромінення виявилися непрацездатні та вегетативні реакції.

В умовах тривалого професійного опромінення з періодичними підвищеннями гранично допустимих рівнів (ГДР) у деяких людей спостерігалися функціональні зміни з боку травної системи, представлені змінами секреції та кислотності шлункового соку, а також розладами кишечника.

Найбільш шкідливим і небезпечним ефектом вважається пригнічення функцій центральної нервової системи через стимуляцію чутливих нейрорецепторів у клітинах мозку, органах і шкірі людини. Систематичний вплив електромагнітного випромінювання спричиняє низку небезпечних захворювань, а також довготривалі негативні наслідки.

Дослідження впливу електромагнітного випромінювання на організм людини показують так і негативні факти. На додаток до вже згаданих станів, електромагнітне випромінювання може викликати наступні симптоми:

- Зниження частоти серцевих скорочень, артеріального тиску, головний біль, загальна слабкість і порушення сну;
- Пульсації та звукові хвилі в потиличній та скроневій ділянках;
- Емоційні зміни настрою, підвищена дратівливість, зміна свідомості і навіть часткова втрата пам'яті;
- Непередбачувана агресія, включаючи непереборне бажання безпричинно з'ясувати стосунки з власними людьми. [7,8]

Існує гіпотеза, що віруси, які спочатку є нейтральними до середовища органів людини, можуть під впливом факторів навколишнього середовища (радіація, радіоактивність тощо) трансформуватися в найнебезпечніші

інфекційні віруси, такі як СНІД.

Таким чином, до захворювань, які можуть виникнути в результаті впливу електромагнітного випромінювання, відносяться наступні захворювання, що загрожують життю.[9]

(хвороба Альцгеймера, пухлини головного мозку (у дорослих і дітей), рак молочної залози (у чоловіків і жінок), депресія (суїцидальна), хвороби серця, лейкемія (у дорослих і дітей), викидень);

Інші симптоми: (алергія, аутизм, гіпертонія, електрогіперчутливість, головні болі, гормональні зміни, ураження імунної системи, ураження нервової системи, порушення сну,). Біологічно небажані ефекти впливу ЕМП проявляються у тепловому та нетепловому впливі.

Встановлено, що найбільш небезпечними для людини є, як не дивно, слабкі та надслабкі складові ЕМП у високочастотному діапазоні понад 10ГГц. Ці складові генеруються багатьма видами сучасного електронного обладнання. Аналогічні висновки можна зробити із наступних тверджень.

Організм людини по відношенню до провідності низьких частот. Іони є основними представниками вільних зарядів. Довжина низькочастотного електромагнітного випромінювання в багато разів перевищує розміри людського тіла, а отже, все тіло піддається впливу такого випромінювання. Однак цей вплив не є однаковим для різних тканин, оскільки вони мають різні електричні властивості та чутливість до струмів, що проводяться. Нервова система є надзвичайно чутливою. Під впливом зовнішніх електромагнітних хвиль частотою 10Гц і напругою 10Вм¹ тканина мозку генерує електричне поле, яке в 10⁵ разів слабше, ніж зовнішні електромагнітні хвилі.

Індукований провідний струм протікає переважно через міжклітинну рідину, оскільки його опір набагато нижчий за опір клітинної мембрани.

Через плазматичну мембрану нейрона протікає приблизно 1/1000 частина струму провідності, індукованого зовнішніми ЕРС.

Граничне значення струму провідності, що викликає збудження, залежить від частоти ЕРС. Струми частотою понад 3кГц, прикладені до шкіри

людини, практично не збуджують нерви і м'язи.

При безпосередньому впливі на нервові клітини або м'язи ця частотна межа зсувається до 200кГц, але тканини на цій частоті збуджуються тільки сильними струмами. Збільшення струмів провідності зі збільшенням частоти зовнішніх ЕМП відбувається в основному за рахунок іонних каналів; на частотах вище 105Гц процес гейтінгу іонних каналів не активується. Тому електромагнітні хвилі на високих частотах не можуть руйнувати біологічні тканини. [10]

Поглинання електромагнітної енергії біологічною тканиною організму супроводжується зміною і підвищенням її температури, якщо поглинута потужність перевищує розсіяну потужність теплової енергії. Остання визначається тепловіддачею з поверхні тіла шляхом випромінювання, конвекції, тепло провідності та випаровування води. Відведення теплової енергії від глибоких тканин до поверхні тіла відбувається за допомогою кровообігу. Оскільки організм постійно виробляє велику кількість тепла в процесі метаболізму, механізми тепловіддачі постійно працюють. Тому температура біологічних тканин помітно підвищується, коли додаткове теплове навантаження (особливо під впливом електромагнітного випромінювання) досягає щонайменше 70% від метаболічної теплопродукції.

Іншими словами, поглинання живою тканиною електромагнітної енергії супроводжується підвищенням її температури, якщо поглинута потужність перевищує розсіяну потужність теплової енергії. Основні наслідки впливу на організм електромагнітного випромінювання таких частот пов'язані з руйнуванням тканин тіла або його окремих органів.

Низка різних досліджень виявила позитивний зв'язок між низькочастотним електромагнітним випромінюванням і розвитком пухлин. Однак не всі дослідження підтвердили цей зв'язок. Вплив електромагнітного випромінювання найбільш виражений у розвитку лейкемії у дітей та лейкемії і пухлин головного мозку у дорослих.

Особливо небезпечними є дуже низькочастотні електричні поля, а також

виявлені високочастотні та дуже високочастотні електричні поля з дуже низькочастотною шкідливою модуляцією, які вивільняють активні вільні радикали.

Вони діють на ДНК і РНК як жорстке випромінювання і можуть мати дуже довготривалі негативні наслідки, починаючи від генотипової дегенерації. Ці ефекти дуже важко виявити безпосередньо.[11]

На відміну від реакції організму на низькочастотне електромагнітне випромінювання, біологічні ефекти високочастотного електромагнітного випромінювання в основному пов'язані з тепловою енергією, що виділяється в тканинах, які піддаються опроміненню. Фізіологічні механізми тепловіддачі не можуть компенсувати тепло продукцію організму, яка відбувається під впливом високочастотного електромагнітного випромінювання.

У діапазоні частот 1,0-300МГц механізм взаємодії ЕМП з організмом визначається як струмами провідності, так і струмами зсуву, при чому провідні струми на частотах близько 1МГц і струми зсуву на частотах вище 20МГц є провідними. Обидва типи струмів спричиняють зміну температури та нагрівання тканин. Тепловий ефект зростає зі збільшенням частоти зовнішнього поля. На відміну від низькочастотного випромінювання, високочастотні провідні струми (частоти вище 105Гц) не впливають на нервові клітини або м'язові волокна. Струми зсуву також не викликають збудження.

Після того, як електромагнітні хвилі були передані таким чином, вони зберігають приблизно 13% своєї початкової інтенсивності. Глибина проникнення залежить не тільки від частоти зовнішніх електромагнітних хвиль, але і від електричних властивостей тканини, що проникає.

У випадку з жировою і кістковою тканиною ця величина на порядок більша, ніж у м'язовій тканині.[7]

Слід зазначити, що тепловий вплив високочастотних електричних полів також використовується як засіб лікування. До методів високочастотної електротерапії відносяться діатермія, індуктотермія, мікрохвильова терапія.

Діатермія використовує електромагнітні хвилі з частотою 0,5-2,0МГц. Індукто терапія – це метод, який використовує електрорушійні сили з частотою 10-15МГц. Біологічний ефект (тепловий ефект) визначається магнітною складовою ЕРС, що генерується апаратом індуктотермії. Магнітне поле генерує в тканинах вихрові струми, які нагрівають опромінюваний об'єкт.

У мікрохвильовій терапії використовуються електромагнітні хвилі з частотою 40-50МГц. Як і в попередніх двох методах, пацієнт перебуває в зоні неоформлених хвиль. Оскільки електроди мають форму пластин, біологічний ефект обумовлений електричною складовою ЕМП, а тепло генерується під впливом як струмів провідності, так і струмів зміщення.

У мікрохвильовій терапії теплові ефекти спричиняються лише струмами зміщення, що генеруються в тілі людини під впливом мікрохвильового випромінювання. Діапазон його частот становить від $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц. Для фізіотерапії та терапевтичних процедур часто використовують хвилі довжиною зазвичай 12,7см. Вони впливають на людину в межах діапазону генерованих хвиль. Таким чином, тепловий ефект визначається інтенсивністю електромагнітного поля. Оскільки частотний діапазон мікрохвильового випромінювання включає характерні частоти релаксації води, саме водні середовища в організмі поглинають найбільше енергії від мікрохвильових полів. Мікрохвилі інтенсивно поглинаються в м'язах і внутрішніх органах через слабку взаємодію зі шкірою і жировою тканиною. Саме тому м'язи та внутрішні органи отримують найбільше тепла під час мікрохвильової терапії. Багато тепла також виділяється в рідинах, які заповнюють різні порожнини. [7]

Характер такого впливу необхідно враховувати на робочому місці, оскільки мікрохвильове випромінювання використовується не тільки у фізіотерапевтичних кабінетах.

Важливу роль відіграють резонансні процеси, пов'язані з біологічними ритмами людини. Резонансне посилення і ослаблення цих ритмів, поява гармонік і субгармонік, а також наслідки інтермодуляції в не лінійних клітинних елементах можуть мати різноманітні психофізіологічні ефекти з

негативними наслідками.

Хронічні порушення – це порушення, що виникають в наслідок тривалого впливу мікрохвильового випромінювання з субтермальною густиною потоку енергії.

Табл. 5.1. - Картина клінічних проявів впливу мікрохвиль на організм людини при різних інтенсивностях випромінювання[12]

Інтенсивність мікрохвиль, мВт/см²	Зміни що спостерігаються
600	Больові відчуття в період опромінення
200	Пригнічення окислювально-відновних процесів тканин
100	Підвищення артеріального тиску з наступним його зниженням, в разі хронічного впливу - стійка гіпотонія. Двостороння катаракта.
40	Відчуття тепла. Розширення судин. При опроміненні підвищення тиску на 20-30 мм рт.ст.
20	Стимуляція окислювально-відновних процесів тканин
10	Астенізація після 15 хв. опромінення, зміна біоелектричної активності мозку
8	Невизначені зрушення з боку крові із загальним часом опромінення 150 год, зміна згортання крові
6	Електрокардіографічні зміни, зміни в рецепторному апараті
4-5	Зміна артеріального тиску при багаторазових опромінюваннях, нетривала лейкопенія, еритропенія
3-4	Ваготонічна реакція з симптомами брадикардія, уповільнення електропровідності серця
2-3	Виражений характер зниження артеріального тиску, збільшення частоти пульсу, коливання об'єму крові серця
1	Зниження артеріального тиску, тенденція до почастишання пульсу, незначні коливання об'єму крові серця. Зниження офтальмотонуса при щоденному впливі протягом 3,5 міс.
0,4	Слуховий ефект при впливі імпульсних ЕМВ
0,3	Деякі зміни з боку нервової системи при хронічному впливі протягом 5-10 років
0,1	Електрокардіографічні зміни
До 0,05	Тенденція до зниження артеріального тиску при хронічному впливі.

При хронічних серцево-судинних захворюваннях спостерігається гіпертонічна нейроциркуляторна дистонія, з швидко прогресуючою коронарною недостатністю. Фахівці з електромагнітно-хвильової терапії мають суперечливі характеристики щодо змін в системі периферичного кровообігу. Спочатку спостерігається помірне зниження гемоглобіну та кількості еритроцитів. Згодом ці показники підвищуються, іноді значно

перевищуючи норму. Кількість лейкоцитів спочатку має тенденцію до збільшення порівняно з нормативними значеннями; після 7-9 років кількість лейкоцитів має тенденцію до меншення; у осіб зі стажем 7-12 років можлива персистуюча лейкемія. У деяких людей спостерігаються зміни у згортанні крові.

Біологічні дослідження показують, що центральна нервова система, очі та статеві залози є найбільш чутливими до ЕМІ. В результаті можуть порушуватися серцево-судинні, нейроендокринні, кровотворні, імунні та метаболічні процеси. Дослідження показали, що статеві органи дуже чутливі до впливу ЕМП. При цьому імпотенція та зниження рівня тестостерону в крові спостерігаються у значно більшого відсотка чоловіків.

Людський організм небайдужий до локалізації ЕМ-енергії в певних органах (голова для мобільних радіотелефонів, стегна або спина для портативних радіоприймачів). Вплив на організм, очевидно, залежить від інтенсивності електричного поля, поляризації, напрямку хвиль і співвідношення між розмірами органів і тіла людини та довжиною ЕМ хвиль. Складність полягає в тому, що кількість поглинутої ЕМ енергії, діелектричні властивості, форма і маса тканини, орієнтація біологічного об'єкта, поляризація ЕМВ, складі характеристики джерела, експозиція, інтенсивність і частота випромінювання, а також різні фактори, що визначають всі особливості генерації і поширення НВЧ ЕМВ.

Випромінювання на частоті 900МГц, яка дозволена для мобільних телефонів, є особливо проникаючим і часто викликає "резонансний ефект" на голову.

Однак різні моделі та модифікації радіотелефонів, що існують на сьогоднішній день, сильно відрізняються за потужністю та довжиною хвилі, а індивідуальна сприйнятливність до них дуже сильно варіюється.

Мішенями мікрохвильового випромінювання є молекули з електромагнітними властивостями. В основному це молекули води. Як відомо, організм людини в основному складається з води (95% в дитинстві і 60% в

старості). Всі речовини, розчиняючись у воді, утворюють гідратну оболонку. Слабкі низькочастотні ЕМП змінюють метастабільну структуру води і різко знижують концентрацію іонів калію, що призводить до утворення активних вільних радикалів.[13,14]

Численні дослідження, проведені в останні роки, показали, що порушення функцій організму під впливом мікрохвильового випромінювання пов'язані не тільки з генерацією надлишкового тепла в тканинах. Таким чином, біофізичні механізми впливу ЕМП на біологічні системи не можуть бути зведені до двох згаданих вище - перегріву у високочастотних полях і збудження в низькочастотних полях. Зараз дослідники зосереджують увагу на третьому механізмі біологічної дії ЕМП. Його називають специфічним ефектом. Найхарактернішим аспектом специфічного впливу ЕМП на живі організми є те, що біологічні системи реагують на випромінювання дуже низької інтенсивності, недостатньої для збудження або нагрівання, але такі реакції відбуваються не у всьому діапазоні ЕМП, а на певних частотах. Тому третій тип реакції біологічних систем на ЕМП також називають резонансною або слабкою взаємодією, або частотно-залежною біологічною дією ЕМП.

Біологічна дія слабких ЕМП визначається високою вибірковою чутливістю певних типів клітин (у вузькому спектральному діапазоні) до ЕМП. Мабуть, найбільш чутливими до слабких електричних полів є нейрони головного мозку. Одним із механізмів вибіркової чутливості нейронів мозку до низьких частот може бути взаємодія катіонів (наприклад, Ca^{2+} згідно з кальцієвою гіпотезою) з попередньо зв'язаними клітинними мембранами при їх десорбції з них.[15]

Розвиток уявлення про те, що електрони і електромагнітні хвилі більш рухливі, ніж молекули (елементи біологічної матерії), переносять енергію, заряд і інформацію, і є якби паливом для біологічних процесів, привів багатьох авторів до думки, що живі організми мають системи, які підтримують біоелектричний гомеостаз, що забезпечує нормальний фізіологічний стан клітин. Припущення, що існує механізм, який централізовано регулює

фізіологічні процеси в організмі, призначений для узгодження з періодично змінюваними параметрами електричного і магнітного полі в Землі і захисту від спорадичної генерації сильного космічного електромагнітного випромінювання у всіх частотних діапазонах, призводить до думки, що високо організований організм має сенсорну систему, яка відчуває зміни зовнішнього середовища. Це наводить на думку, що високо організовані організми оснащені сенсорними системами, які відчувають зміни у зовнішньому середовищі.[16]

Поки що цей тип механізму впливу вивчений недостатньо, але серед виявлених в ході досліджень закономірностей дії електромагнітних полів надвисокої частоти не теплової інтенсивності можна відзначити наступні, що стосуються здатності електромагнітних хвиль надавати несприятливі ефекти[12]:

- Впливають на біохімічні реакції внутрішньоклітинного метаболізму;
- Впливають на ферментативну активність білків (ензимів) у мозку, печінці та інших структурах;
- Впливають (прямо чи опосередковано) на процес передачі генетичної інформації (транскрипцію та трансляцію);
- Впливають на рівень сульфгідрильних груп та інших груп, що визначають полярність білкових молекул;
- Впливають на нейрогуморальну регуляцію, зокрема гіпоталамо-гіпофізарну систему; впливають на рівень гіпоталамуса та гіпоталамо-гіпофізарної системи;
- Змінюють динаміку імунних реакцій;
- Змінюють структуру імпульсного потоку, що генерується нейронами;
- Змінюють функціональну активність рецепторів та різних іонних каналів.

Ці механізми лежать в основі негативного впливу на організм, оскільки вони включають порушення передачі генетичної інформації та механізми, за

допомогою яких формуються патології після тривалого впливу електромагнітного випромінювання.

Важливо відзначити, що подальші дослідження в цій галузі можуть дати відповідь на актуальне і суперечливе питання про негативний вплив випромінювання мобільних телефонів на користувачів.

Несприятливі біологічні ефекти були підсумовані вище, і в результаті взаємодії організму з електричною складовою електромагнітного випромінювання можуть виникати три типи біологічних ефектів:

- Збудження;
- Нагрівання;
- Кооперативні процеси.

Два з них добре вивчені і можуть бути пояснені в рамках концепції енергетичної взаємодії електричного поля з тілом. Третій ефект, який проявляється у сприйнятті біологічною системою слабого електромагнітного випромінювання, ще не дуже добре вивчений. Його походження, ймовірно, пов'язане з тим, що в процесі еволюції біологічних систем електромагнітні хвилі певних частот виконували свою місію як носії інформації про навколишнє середовище, релевантної для біологічної системи.[17]

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Система спостереження – це загальний термін, що означає PSR, SSR, ADS-B, MLAT або іншу еквівалентну наземну систему, яка дозволяє ідентифікувати повітряні судна за необхідності. Аналіз сучасних і майбутніх систем спостереження підкреслює важливість вдосконалення і розвитку систем спостереження в різних сферах, таких як оборона, цивільна безпека і наукові дослідження. Диспетчери УПР використовують дані від систем моніторингу повітряного простору на дисплеях для покращення використання повітряного простору, зменшення затримок, забезпечення прямих маршрутів і більш оптимізованих профілів польотів, а також підвищення безпеки польотів.

В першому розділі роботи були проаналізовані системи спостереження обслуговування повітряного руху (первинний та вторинний радіолокатори, мультилатераційна система та мультистатичний первинний оглядовий радар).

Особливу увагу в дипломній роботі присвячено процесу автоматизації обробки даних. Обробка аеронавігаційних даних здійснюється як на борту певних бортових пристроїв, так і наземними обчислювальними системами. Визначення точного положення повітряного судна є одним з найважливіших завдань в цивільній авіації. У зв'язку зі збільшенням обсягів повітряного руху стандарт ешелонування постійно переглядається.

Єдиним можливим способом вирішення проблеми перевантаженості повітряного простору є збільшення пропускної спроможності окремих частин повітряного простору за рахунок зменшення безпечної відстані між ПС.

При відновленні та розвитку пріоритет над первинними та вторинними радіолокаційними системами надається наступним системам:

- Радар точного заходження на посадку (PAR - Precision Approach Radar)
- ADS-B,
- Мультистатичний первинний радар спостереження (MSPSR).

Як інструмент навігації мультилатерація використовує єдиний

мобільний приймач для вимірювання сигналів, що передаються з кількох сайтів у фіксованих відомих положеннях.

Мультистатичні радарні системи викликають дедалі більший інтерес, оскільки вони можуть використовувати просторове різноманіття, дозволяючи покращити продуктивність і нові програми. Мультистатичний радар є новою сферою, чому сприяє постійний розвиток цифрових технологій, і, отже, ще багато чого потрібно прояснити щодо того, як його найкраще використовувати.

Одним з основних видів спостереження, що активно використовується у теперішній час є автоматичне залежне спостереження – радіомовне (ADS- B). Додаткове використання інформації ADS-B дозволяє:

- зменшити похибки координат ПО;
- унеможливити маскування ПО – порушників повітряного простору під цивільні повітряні судна;
- підвищити ефективність ведення радіолокаційного спостереження повітряного простору.

Основною перевагою використання ADS-B є можливість визначення координат ПО з використанням інформації супутникових навігаційних систем (наприклад, GPS/ГЛОНАСС).

Перевагою використання мультистатичної системи може бути мультистатичне SAR-зображення, яке дозволяє точно локалізувати та відстежувати невеликі об'єкти в 3-D просторі. Бі- та мультистатичні дані SAR високої роздільної здатності можуть бути отримані за допомогою приймачів, що виглядають у найнижчій точці. Це дозволяє одночасно отримувати дані з однієї області за допомогою інших приладів дистанційного зондування, таких як висотоміри, лідари або оптичні/гіперспектральні датчики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Правил обслуговування повітряного руху з використанням систем спостереження: Наказ М-ва інфраструктури України від 07.11.2011 р. № 521: станом на 25 серп. 2022 р. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1382-11#Text>
2. Повітряний кодекс України: Постанова Верховної Ради від 19.05.2011 р N 3393-VI. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text>
3. Організація повітряного простору – Державна авіаційна служба України. *Державна авіаційна служба України*. URL: <https://avia.gov.ua/organizatsiya-povitryanogo-ruhu-atm/organizatsiya-povitryanogo-prostoru/> (дата звернення: 23.11.2023).
4. Гнатюк С.О. Кібертероризм : історія розвитку, сучасні тенденції та контрзаходи / С.О.Гнатюк // Безпека інформації. – Том 19, №2. – 2013. – С.118-129
5. Харченко В.П., Авіоніка: навч. посіб. / В.П. Харченко, І.В. Остроумов. – К. : НАУ, 2013. – 272 с.
6. Електромагнітне випромінювання – безпечно чи ні?. *Uatom.org*. URL: <https://www.uatom.org/2022/01/17/elektromagnitne-viprominyuvannya-bezpechno-chi-ni.html> (дата звернення: 23.11.2023).
7. Левченко Л.О. Моделювання розповсюдження авіаційного шуму поблизу аеропортів та його вплив на оточуюче середовище / Л.О.Левченко, В.А.Глива, О.Я.Євтушок // Теорія і практика будівництва. – 2010. - № 6. – С.25-29
8. Косов А. А., Ярославцев Н. А., Приходько С. В., Ларіонов Ю. С. Електромагнітні випромінювання у біології. Праці IV міжнародної конференції. Калуга, Росія, 21-23 жовтня 2008 року. Калуга: Вид-во КДПУ ім. Цюлковського, 2008. С. 178-184.
9. Бінг В.М., Савін А.В. Фізичні проблеми впливу слабких магнітних полів на біологічні системи УФН, 2003, Т. 173, № 3.- С. 265 - 300.
10. Александров В.В. та ін НДР на тему Вплив ел.магн.випромінювання на біологічні об'єкти - частини I та II // Александров В.В. та ін / 2003
11. Бінг В.М., Савін А.В. Фізичні проблеми впливу слабких магнітних полів на біологічні системи Т.173.-№ 3.- С.265 – 300.
12. Казначеев Ст П., Михайлова Л. П. Надслабкі випромінювання у міжклітинних взаємодіях. Новосибірськ: Наука, 1981.
13. Бурлаков А. Б., Падалка С. М., Супруненко Є. А. Вплив зовнішніх

електромагнітних впливів на процеси самоорганізації складних біологічних систем Матеріали конференції «Етика та наука майбутнього». Щорічник "Дельфіс 2003". М., 2003. С. 252-255.

14. Аніщенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманський-Гайєр Л. Стохастичний резонанс як індукований шумом ефект збільшення ступеня порядку УФН, 1999. т. 169. № 1.- С. 7 - 38.

15. Аніщенко В.С. Складні коливання у найпростіших системах. М: Наука. 1990, 312 с.

16. Ефекти нетеплового впливу міліметрового випромінювання на біологічні об'єкти/Зб. статей за ред. Н.Д. Девяткова.- М.: ІРЕ АН СРСР, 1983, С. 3 - 6.

17. А.Ф. Корольов, С.С. Кротов, Н.М. Сисоєв, П.В. Лебедєв-Степанов Вплив електромагнітних полів на теплофізичні та термодинамічні властивості діелектричних рідин // А.Ф. Корольов, С.С. Кротов, Н.М. Сисоєв, П.В. Лебедєв-Степанов / Біомедична радіоелектроніка, 2000, № 10, С.- 21 - 28.

18. Муратов Є.І. Електричні та магнітні поля наднизької частоти та їх роль у розвитку новоутворень // Муратов Є.І. / Питання онкології. -1996.- Т.42.- № 5.-С.13

19. Лещенко С. П., Колесник О. М., Грицаєнко С. А., Бурковський С.І. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. No 3(28). С. 69-75.

20. Спостереження (Surveillance) – Державна авіаційна служба України. *Державна авіаційна служба України*. URL: <https://avia.gov.ua/zv-yazok-navigatsiya-sposterezhennya-cns/sposterezhennya-surveillance/> (дата звернення: 15.11.2023).

21. Multilateration | SKYbrary Aviation Safety. *SKYbrary Aviation Safety*. URL: <https://skybrary.aero/articles/multilateration> (дата звернення: 15.11.2023).

22. Multilateration (MLAT). *Multilateration and ADS-B*. URL: <https://www.multilateration.info/surveillance/multilateration.html> (дата звернення: 15.11.2023).

23. Multilateration system (MLAT) | JRC (Japan Radio Co.,Ltd.) . *Japan Radio Co.,Ltd.* URL: <https://www.jrc.co.jp/en/product/mlatj> (дата звернення: 15.11.2023).

24. Secondary Surveillance Radar (SSR) | SKYbrary Aviation Safety. *SKYbrary Aviation Safety*. URL: <https://skybrary.aero/articles/secondary-surveillance-radar-ssr> (дата звернення: 15.11.2023).

25. Account S. A New Approach for an Old Problem: Testing Secondary Surveillance Radar. *Boonton Electronics*. URL: <https://boonton.com/resource-library/articles/artmid/1867/articleid/2298/a-new-approach-for-an-old-problem-testing-secondary-surveillance-radar> (дата звернення: 15.11.2023).
26. S. Doughty, K. Woodbridge, and C. Baker. Characterisation of a Multistatic Radar System. Radar Conference, 2006. EuRAD 2006. 3rd European, pages 58, September 2006
27. BEZOUSEK, P., SCHEJBAL, V. Radar technology in the Czech Republic. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, vol. 19, no. 8, p. 27-34.
28. G. Krieger, A. Moreira, Spaceborne Bi- and Multistatic SAR: Potentials and Challenges, to appear in *IEE Proc. Radar Sonar Navigation*, 2005.
29. Precision Approach Radar (PAR). *TS2 SPACE*. URL: <https://ts2.space/en/precision-approach-radar-par/#gsc.tab=0> (дата звернення: 15.11.2023).
30. Precision Approach Radar (PAR) | SKYbrary Aviation Safety. *SKYbrary Aviation Safety*. URL: <https://skybrary.aero/articles/precision-approach-radar-par> (дата звернення: 15.11.2023).
31. Radioengineering - About the Journal. URL: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2008/08_03_053_059.pdf (дата звернення: 15.11.2023).