

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

«На правах рукопису»
УДК 621.396.96

До захисту допущено:
Завідувач кафедри ПРЕ
Мовчанюк А.В.
« 17 » грудня 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
на тему: «Радіолокаційна система на основі розгалуженої системи
датчиків для первинної обробки сигналів»**

Виконав:
студент 2 курсу, групи РЕ-41мп
Проценко Олександр Сергійович
Керівник:
Ст. викл., PhD каф. ПРЕ
Сокольський Сергій Олегович
Рецензент:
доц., к.т.н. каф.РТС
Чмельов В'ячеслав Орійович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Студент _____

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра Прикладної радіоелектроніки**

Рівень вищої освіти — другий (магістерський)

Спеціальність — **172 «Електронні комунікації та радіотехніка»**

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ПРЕ
_____ Мовчанюк А.В.
« 8 » вересня 2025

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Проценку Олександрю Сергійовичу**

1. Тема дисертації: «Радіолокаційна система на основі розгалуженої системи датчиків для первинної обробки сигналів», науковий керівник роботи Сокольський Сергій Олеговч Ст. викл., PhD каф. ПРЕ, затверджені наказом по університету від «11» листопада 2025 р. № 4895-с.

2. Термін подання студентом роботи 9 грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження: Методика розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв.

4. Вихідні дані: Параметри, що впливають на електромагнітну сумісність радіоелектронних пристроїв, програмне середовище Matlab.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Провести аналітичний огляд сучасних радіолокаційних станцій та мобільних систем спостереження.

2. Здійснити підбір оптимальних технічних засобів для основних вузлів системи.

3. Розробити програмні алгоритми симуляції інформаційного потоку від сенсорних модулів, первинної обробки радіолокаційних даних та їх візуалізації.

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо).

7. Орієнтовний перелік публікацій: одна публікація на конференції.

8. Консультанти розділів дисертації: Науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання 8 вересня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання на дипломну роботу	до 15.09.2025	Виконано
2.	Аналіз літератури з радіолокації	до 29.09.2025	Виконано
3.	Підбір пристроїв для проектування системи	до 06.10.2025	Виконано
4.	Розробка програмного забезпечення	до 20.10.2025	Виконано
5.	Аналіз результатів роботи розробленого програмного забезпечення	до 24.11.2025	Виконано
6.	Отримання допуску до захисту		Виконано
7.	Оформлення дипломної роботи		Виконано

Студент

Олександр ПРОЦЕНКО

Керівник

Сергій СОКОЛЬСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Зростання інтенсивності бойових дій та протяжність лінії фронту роблять розвідку критичною важливою. Це створює потребу в застосуванні компактних, мобільних і не дорогих радіолокаційних систем, що можуть здійснювати оперативний моніторинг. Особливої актуальності набувають малі радіолокаційні станції ближньої дії, здатні працювати автономно, швидко розгортатися в польових умовах і забезпечувати передачу інформації до віддалених пунктів управління. У сучасних умовах такі системи все частіше доповнюються оптико-електронними засобами, зокрема тепловізійними камерами, що дозволяє підвищити достовірність виявлення та класифікації цілей. Водночас інтеграція радіолокаційних даних із топографічною інформацією про місцевість та організація завадостійкого радіоканалу передачі даних залишаються складними інженерними задачами. Це зумовлює необхідність розробки узгодженої архітектури мобільної багатопозиційної радіолокаційної системи та спеціалізованого програмного забезпечення для симуляції, обробки й наочної візуалізації її роботи.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розробка архітектури та принципів функціонування мобільної багатопозиційної радіолокаційної системи з використанням малих РЛС та тепловізійних камер, а також створення програмних алгоритмів для симуляції, обробки та візуалізації радіолокаційної інформації з урахуванням топографічних особливостей місцевості.

Завдання дослідження. У ході виконання роботи проведено аналітичний аналіз сучасних мобільних радіолокаційних систем і сенсорних комплексів спостереження, здійснено класифікацію їхніх функціональних можливостей. Розроблено структурну схему мобільної системи з виділенням сенсорного, передавального та обчислювального рівнів, обґрунтовано вибір та здійснено підбір оптимальних технічних засобів, а також сформульовано вимоги до програмного забезпечення. Окрему увагу приділено розробці програмних

алгоритмів симуляції руху цілей різних класів, інтеграції радіолокаційних даних із геоінформацією про місцевість та формуванню інтерфейсу оператора, який забезпечує зручне сприйняття ситуаційної обстановки.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процеси прийому, формування, обробки та передавання радіолокаційної інформації в мобільних радіолокаційних системах ближньої дії.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є алгоритми симуляції, обробки та візуалізації радіолокаційних даних, а також методи інтеграції інформації від сенсорних засобів з топографічними даними про місцевість.

Практична цінність. Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованої архітектури та програмних алгоритмів для проектування реальних мобільних радіолокаційних комплексів, а також для моделювання й аналізу їхньої роботи на етапі розробки. Створене програмне забезпечення може застосовуватися як демонстраційний і навчальний інструмент для підготовки фахівців у галузі радіолокації та систем спостереження.

Дипломна робота складається зі вступу, шести розділів та висновків. Повний обсяг дипломної роботи складає 139 сторінок, в тому числі 113 сторінки основного тексту, 25 таблиць, 17 рисунків, 3 сторінки списку використаних джерел у кількості 20 найменувань, 3 додатка.

Ключові слова. Мала РЛС, мобільна РЛС, ТК, ТТХ, радіолокація, радіоканал, симуляція, топографічна інформація, інтерфейс оператора, візуалізація.

ABSTRACT

Relevance of the topic. The increasing intensity of combat operations and the extensive length of the frontline make reconnaissance critically important. This creates a demand for compact, mobile, and low-cost radar systems capable of performing operational monitoring. Small short-range radar stations, which can operate autonomously, be rapidly deployed in field conditions, and ensure data transmission to remote command and control points, are of particular relevance. Under modern conditions, such systems are increasingly complemented by electro-optical sensors, in particular thermal imaging cameras, which make it possible to improve the reliability of target detection and classification. At the same time, the integration of radar data with topographic information about the terrain and the organization of a jamming-resistant radio data transmission channel remain complex engineering challenges. This determines the need to develop a coordinated architecture of a mobile radar system and specialized software for simulation, processing, and clear visualization of its operation.

Research purpose. The purpose of the diploma thesis is to develop the architecture and principles of operation of a mobile radar system using small radar stations and thermal imaging cameras, as well as to create software algorithms for the simulation, processing, and visualization of radar information with consideration of the topographic features of the terrain.

Research objectives. In the course of the study, an analytical review of modern mobile radar systems and sensor-based surveillance complexes was conducted, and their functional capabilities were classified. A structural architecture of a mobile system was developed with the identification of sensor, communication, and computational layers; the selection of optimal technical components was justified and carried out, and software requirements were formulated. Particular attention was paid to the development of software algorithms for simulating the movement of targets of various classes, the

integration of radar data with geospatial information about the terrain, and the design of an operator interface that ensures intuitive and efficient perception of the situational picture.

Object of research. The object of research is the processes of reception, formation, processing, and transmission of radar information in mobile short-range radar systems.

Subject of research. The subject of research is algorithms for the simulation, processing, and visualization of radar data, as well as methods for integrating information from sensor systems with topographic terrain data.

Practical value. The practical significance of the work lies in the possibility of using the proposed architecture and software algorithms for the design of real mobile radar complexes, as well as for modeling and analyzing their operation at the development stage. The developed software can be used as a demonstration and training tool for educating specialists in the field of radar systems and surveillance.

The diploma thesis consists of an introduction, four chapters, and conclusions. The total volume of the diploma thesis is 139 pages, including 113 pages of main text, 25 tables, 17 figures, 3 pages of references comprising 20 sources, and 3 appendix.

Keywords. Small radar station, mobile radar system, thermal imaging camera, tactical and technical characteristics, radiolocation, radio channel, simulation, topographic information, operator interface, visualization.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
1. ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ.....	15
1.1 Класифікація РЛС за призначенням	15
1.1.1 Пошукові радіолокаційні станції	15
1.1.2 Радіолокаційні станції наведення цілі	19
1.2 Класифікація РЛС за об'ємом інформації про ціль	20
1.2.1 Однооординатні РЛС.....	20
1.2.2 Двокоординатні РЛС.....	24
1.2.3 Трьохкоординатні РЛС.....	27
1.2.4 Порівняння зондуючих сигналів радіолокаційної системи.....	31
2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	35
2.1 Огляд існуючих мобільних комплексів наземного спостереження ближньої дії.....	35
2.2 Узагальнення результатів огляду	38
3. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ.....	40
3.1 Загальна структура комплексу.....	40
3.2 Функціональна мета та критичні обмеження	42
3.3 Критерії відбору приладів.....	43
3.4 Сенсорний блок.....	46

3.4.1 Вибір радіолокаційної станції.....	46
3.4.2 Висновок щодо придатності РЛС.....	48
3.4.3 Вибір тепловізійної камери.....	49
3.4.4 Обґрунтований вибір тепловізійної камери.....	53
3.5 Захищений обчислювальний модуль.....	54
3.6 Обґрунтування вибору обчислювального модуля	59
3.7 Передавальний модуль.....	60
3.8 Обґрунтований вибір конфігурації радіоканалу.....	63
3.9 Система живлення.....	64
3.10 Структура системи живлення сенсорного вузла	66
3.11 Програмна, фізична та функціональна інтеграція системи.....	67
3.12. Висновки до розділу.....	67
4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ, СИМУЛЯЦІЇ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РОБОТИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	69
4.2. Особливості відображення інформації на інтерфейсі оператора РЛС	71
4.3. Алгоритм обробки та відображення топографічної інформації.....	76
4.4. Алгоритм симуляції роботи сенсорного блоку та передачі інформаційного потоку системи.....	80
4.5. Алгоритм обробки та візуалізації отриманих даних від РЛС	82
4.6 Обробка та відображення відеоданих тепловізора	84
4.7 Висновки до розділу.....	86
5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	87

5.1	Опис ідеї проекту.....	87
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	90
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	91
5.4	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	95
5.5	Висновок до розділу.....	96
6.	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	97
6.1	Ідентифікація основних потенційно небезпечних і шкідливих факторів при виконанні науково-дослідної роботи.....	97
6.2	Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії на робочих місцях.....	99
6.2.1	Електробезпека.....	100
6.2.2	Розрахунок захисного відключення електромережі в аварійному режимі роботи обладнання.....	102
6.2.3	Мікроклімат робочої зони.....	103
6.2.4	Виробничий шум.....	104
6.3	Технічні рішення та організаційні заходи з виробничої безпеки на робочих місцях користувачів ВДТ ПЕОМ.....	105
6.3.1	Вимоги до освітлення робочих місцях користувачів.....	105
6.3.2	Організація оптимального режиму праці та відпочинку при використанні комп'ютера.....	106
6.4	Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	107
6.4.1	Вимоги до організації системи оповіщення персоналу.....	107
6.4.2	Обов'язки та дії персоналу при надзвичайній ситуації.....	108
6.4.3	Пожежна безпека.....	109

ВИСНОВКИ.....	111
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	113
ДОДАТОК А.....	115
ДОДАТОК Б.....	125
ДОДАТОК В.....	131

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЛС — радіолокаційна станція.

ТК — тепловізійна камера.

ФАР— фазована антенна решітка

МРЛС — мала радіолокаційна станція

ППО — протиповітряна оборона

ЗГРЛС — загоризонтна радіолокаційна станція

КБРЛС — контрбатарейна радіолокаційна станція

РЕБ — радіоелектронна боротьба

PTZ — Pan-Tilt-Zoom

DC — directional current

ГІС — геоінформаційна система

БПЛА — безпілотний літальний апарат

ПК — персональний комп'ютер

DEM — digital elevation model

PPI — plan position indicator

ВСТУП

Після початку повномасштабної війни, Україна опинилась в нових реаліях, де від ефективності збройних сил, ВПК та логістики залежить майбутнє держави. З кожним роком зростають потреби збройних сил в нових технічних рішеннях, технологіях та підходах до вирішення різноманітних задач, серед яких велике значення має розвідка. Вдала розвідка дозволяє отримати не тільки значну перевагу в бойових діях а і зменшити втрати особового складу та техніки, що в реаліях нинішньої війни є критично важливим. Реалії війни в епоху стрімкого розвитку технологій загострюють потребу у компактних, мобільних і автономних системах виявлення об'єктів у складних умовах експлуатації.

У практичних задачах дедалі частіше виникає необхідність оперативного отримання інформації про наявність, переміщення та характеристики цілей у режимі реального часу за відсутності стаціонарної інфраструктури зв'язку та енергопостачання. Такі вимоги є характерними для систем охорони периметра, польових спостережних комплексів, мобільних пунктів контролю, а також для застосувань у надзвичайних та кризових ситуаціях.

Традиційні стаціонарні радіолокаційні системи, попри високу точність і дальність виявлення, мають суттєві обмеження щодо мобільності, автономності та швидкості розгортання. Крім того, у ряді прикладних задач використання лише радіолокаційного каналу є недостатнім для достовірної ідентифікації типу цілі, особливо в умовах завад радіоелектронної боротьби, складного рельєфу або щільної забудови. Це зумовлює необхідність поєднання різних сенсорних каналів та інтеграції їхніх даних у єдину інформаційну систему.

Ефективним підходом до підвищення інформативності та надійності виявлення є використання мультисенсорних мобільних комплексів, що поєднують радіолокаційні та оптико-електронні засоби спостереження.

Радіолокаційний канал забезпечує виявлення цілей незалежно від освітленості та погодних умов, тоді як інфрачервоний канал дозволяє виконувати візуальне підтвердження та класифікацію об'єктів. Передавання даних від таких сенсорів у реальному часі потребує застосування стійких радіоканалів різної пропускної здатності та ретельно спроектованої архітектури обробки інформації.

Особливого значення у мобільних системах набувають питання автономного енергозабезпечення, завадостійкості каналів зв'язку та уніфікації апаратних вузлів. Обмеження за масогабаритними характеристиками, вимоги до тривалої автономної роботи та можливість швидкого розгортання без використання генераторів зумовлюють доцільність застосування акумуляторних джерел живлення з високою енергетичною щільністю та промислових інтерфейсів обміну даними.

Мета роботи: розробка структури та принципів функціонування малої РЛС, здатної здійснювати прийом і первинну обробку сигналів від масиву датчиків з подальшою передачею результатів (координатних параметрів) до центральної РЛС.

Завдання дослідження:

1. Аналіз сучасних методів побудови малих радіолокаційних систем і схем багатопозиційного прийому;
2. Розробка оптимальної структури системи датчиків для визначення дальності, кута місця та азимуту, що має переваги в мобільності, автономності, модульності, економічній привабливості та стійкості до пошкоджень;
3. Створення алгоритму первинної обробки сигналів у реальному часі;

Об'єкт дослідження: процеси прийому, первинної обробки та передачі радіолокаційних сигналів від масиву датчиків засобами малої радіолокаційної станції (МРЛС) у складі розгалуженої системи моніторингу.

Предмет дослідження: методи та алгоритми формування, прийому й обробки даних (дальності, кута місця та азимуту) з багатоканального масиву датчиків у польових умовах.

1. ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

1.1 Класифікація РЛС за призначенням

Радіолокація має широке застосування в сферах науки і техніки, а саме для виявлення об'єктів – від літаків та ракет до кораблів та підводних човнів. Вона дозволяє визначити їх просторові координати, швидкість та напрямок руху. Також її використовують для навігації повітряних та морських суден, для контролю за рухом транспорту, для засобів протиповітряної оборони (ППО) та навіть для прогноза погоди. Крім цього, принципи радіолокації знаходять застосування і в медицині, наприклад, для діагностики стану організму.

Радіолокаційна станція (РЛС) – це сукупність пристроїв об'єднаних в комплексну систему, що дозволяє спостерігати за об'єктами на землі, в повітрі та на воді. Розглянемо детальніше, які основні задачі вирішуються за допомогою радіолокаційних систем.

1.1.1 Пошукові радіолокаційні станції

Основне завдання цих станцій – сканувати простір, посилаючи короткі радіохвилі. Вони працюють за простим принципом: більшість об'єктів, які являються цілями пошукової станції, здатні відбивати радіохвилі. Приймаючи відбитий сигнал, РЛС визначає відстань до об'єкта, його швидкість та інші важливі параметри.

До цього типу станцій відносяться:

Радіолокаційні станції контролю повітряного руху: Вони як правило розміщуються у аеропортах та відповідають за визначення позиції, відстеження та супроводу великої кількості цілей (літаків). Зазвичай такі станції являють собою пару радарів – один для детектування цілі на великих відстанях та може мати досить малу точність по відстанях, натомість

допоміжний радар повинен точно надавати інформацію про відстані між літаками [1].

Радіолокатор точного заходу на посадку: Є типом радіолокаційної системи, що призначений для визначення бічного та вертикального наведення пілота для досягнення місця посадки. Такі радары оснащуються дисплеєм з двома лініями, які відображають відповідно вертикальні і горизонтальні відхилення літака від траєкторії оптимального приземлення.

Метеорологічна радіолокаційна станція: Як правило, вони базуються імпульсні доплерівські радары. Основна задача таких станцій фіксувати і відстежувати небезпечні погодні явища (циклони, град чи грози), а також надавати данні для прогнозу погоди. Метеорологічний радар працює, випромінюючи короткі імпульси мікрохвильового випромінювання, тривалістю близько мікросекунди. Довжина хвилі приблизно в десять разів більша за розмір частинок, тому частина енергії відбивається назад до станції. Важливо, що короткі хвилі краще підходять для виявлення малих частинок, але дальність таких систем обмежена. Це пов'язане з швидшим розсіюванням, ніж при використанні довгих хвиль. Інформація, яку збирають ці радіолокаційні станції, дозволяє дізнатися тип опадів, їх висоту, швидкість переміщення, а також відстань до грозових хмар чи інших небезпечних явищ. Це все підтверджено дослідженнями [1].

Отже, доплерівські радары є дуже важливим інструментом для метеорологів, оскільки вони допомагають вчасно виявляти та аналізувати небезпечні погодні явища, тим самим сприяючи безпеці населення та зменшенню можливих збитків. Аналіз отриманих даних дозволяє краще зрозуміти процеси, які відбуваються в атмосфері, та вдосконалити моделі прогнозування погоди. Зібрана інформація використовується для попередження населення про можливі небезпеки, планування дій у випадку надзвичайних ситуацій та прийняття обґрунтованих рішень у різних галузях економіки, таких як сільське господарство, транспорт та енергетика. Важливо

відзначити, що точність та ефективність метеорологічних радарів залежить від багатьох факторів, включаючи якість обладнання, методи обробки даних та кваліфікацію персоналу. Регулярне обслуговування та модернізація обладнання, а також постійне навчання фахівців є необхідними умовами для забезпечення надійної та своєчасної інформації про погодні умови. Крім того, розвиток нових технологій, таких як використання штучного інтелекту та машинного навчання, відкриває перспективи для подальшого покращення можливостей метеорологічних радарів та підвищення точності прогнозів погоди.

Станції раннього попередження: Ці станції, зазвичай, використовуються у військовій сфері. Їхня мета – заздалегідь виявляти потенційні загрози на великій відстані. Такі станції працюють на низьких частотах, випромінюючи довгі хвилі. Хоча вони здатні виявляти об'єкти на великій відстані, точність визначення їхнього місцезнаходження дещо нижча, ніж у інших типів РЛС.

Радіолокаційні станції протиповітряної оборони (ППО): Вони потрібні для виявлення, супроводження та ідентифікації повітряних цілей. Зібрана інформація передається до командного центру, де приймається рішення щодо стратегії реагування на загрозу. За своїм призначенням, ці станції схожі на станції раннього виявлення, проте вони більш компактні і можуть розміщуватись як на землі, так і на літаках. Це дозволяє їм бути більш мобільними та адаптованими до різних умов використання.

Станції раннього попередження: Ці станції відіграють вирішальну роль в системах оборони, адже їхня основна мета – виявляти потенційні загрози на максимально можливій відстані. Щоб досягти такого великого радіуса дії, станції раннього попередження зазвичай працюють у низькочастотному діапазоні. Низькочастотні сигнали мають більшу довжину хвилі, що дозволяє їм поширюватися на значні відстані, огинаючи перешкоди. Проте, використання низьких частот має і свої недоліки.

Зокрема, станції раннього попередження не можуть похвалитися високою точністю визначення координат цілі. Через велику довжину хвилі, роздільна здатність таких РЛС є обмеженою, що ускладнює точне позиціонування об'єктів. Тому, часто їх використовують лише для первинного виявлення, а для детальнішого визначення координат залучають інші типи радіолокаційних систем.

Загоризонтні радіолокаційні станції: на відміну від звичайних РЛС, дальність дії яких обмежена радіогоризонтом (прямою видимістю), вони здатні виявляти об'єкти, розташовані на значно більших відстанях – від сотень до тисяч кілометрів. Вони заглядають за горизонт, використовуючи особливі фізичні явища поширення радіохвиль.

Станції з використанням іоносферного відбиття: Ці системи випромінюють короткохвильові імпульси, які, досягаючи іоносфери (верхнього шару атмосфери), відбиваються назад до Землі. Таким чином, сигнал може перестрибнути через радіогоризонт і досягти віддалених цілей. Відбитий сигнал повертається тим самим шляхом, дозволяючи станції виявити об'єкт.

Станції з використанням поверхневої хвилі: Цей тип ЗГРЛС використовує низькочастотні радіохвилі, які здатні поширюватися вздовж поверхні Землі, повторюючи її кривизну. Це дозволяє їм огинати природні перешкоди та досягати значних відстаней.

Загоризонтні станції, хоч і забезпечують унікальну можливість виявлення цілей на великих відстанях, також мають обмеження щодо точності. Через особливості поширення сигналу, визначення координат цілі може бути неточним.

Контрбатарейні радіолокаційні станції: Основне завдання цих РЛС – визначення координат позицій артилерійських систем противника, з яких ведеться обстріл. Це дозволяє оперативно реагувати на вогонь противника, наприклад, шляхом нанесення контрбатарейного удару.

Принцип роботи КБРЛС полягає у відстеженні траєкторії польоту снаряда або міни. Станція захоплює об'єкт в польоті та вимірює його координати в різні моменти часу. На основі цих даних, за допомогою складних математичних алгоритмів, обчислюється траєкторія польоту снаряда в зворотному напрямку, що дозволяє визначити точку його випуску.

Розвиток КБРЛС тісно пов'язаний з розвитком обчислювальної техніки. Раніше, коли обчислювальні потужності були обмеженими, точність визначення координат була невисокою, а процес обробки даних – трудомістким та тривалим. Сучасні контрбатареїні станції використовують потужні комп'ютери та складні алгоритми обробки сигналу, що дозволяє значно підвищити точність і швидкість виявлення ворожих артилерійських позицій.

Важливим фактором, що впливає на ефективність роботи КБРЛС, є розмір і відбивна здатність снарядів. Чим менший розмір об'єкта і чим гірше він відбиває радіохвилі, тим складніше його виявити і відстежити.

1.1.2 Радіолокаційні станції наведення цілі.

РЛС наведення цілі використовують ті ж фізичні принципи, що й пошукові радары, але відрізняються за способом застосування. Замість широкого сканування простору, вони фокусуються на менших ділянках, але роблять це значно швидше, оновлюючи інформацію кілька разів на секунду. Це дозволяє точно відстежувати рухомі об'єкти.

Серед систем наведення цілі виділяють, зокрема, такі типи ракет:

Ракети класу повітря-повітря: Являються важливим елементом озброєння сучасних винищувачів, бомбардувальників та штурмовиків. Їх основне завдання – перехоплювати літаки противника, крилаті ракети та інші повітряні загрози. Сучасні ракети цього типу здатні вражати цілі, що швидко маневрують, в будь-який час доби та за будь-якої погоди, незалежно від того, чи знаходяться цілі над землею, водою чи в повітрі.

Ракети класу повітря-поверхня (або повітря-земля): Вони призначені для ураження наземних об'єктів. До них відносяться: військова техніка, захисні споруди (наприклад, бункери чи укріплені пункти), об'єкти інфраструктури (мости, аеродроми).

Радіолокаційні технології, завдяки своїй розвиненій теоретичній базі та практичному застосуванню, знайшли широке застосування в різних сферах. Особливо важливу роль радари відіграють у військовій справі, де їх використовують для контролю за повітряним простором, наведення засобів протиповітряної оборони (ППО) та забезпечення безпеки важливих об'єктів.

1.2 Класифікація РЛС за об'ємом інформації про ціль

За обсягом радіолокаційних даних РЛС ділять на три типи: однокоординатні, двокоординатні та трьохкоординатні. Кожен тип по-своєму збирає та аналізує інформацію про об'єкти. Далі ми розглянемо кожен клас РЛС окремо: як вони працюють, які дані збирають і де використовуються. Розгляд цієї класифікації допоможе краще зрозуміти відмінності між радіолокаційними системами та їх можливості щодо точного визначення параметрів цілей. Детальніше вивчимо кожен тип РЛС, щоб визначити їх сильні та слабкі сторони в контексті отримання інформації про цілі.

1.2.1 Однокоординатні РЛС

Принцип дії радіолокаційних систем з однією координатою зводиться до вимірювання або азимуту, або, рідше, відстані до об'єкта. Пеленгатори, що використовують антенні системи, визначають напрямок на ціль через вимірювання азимутального кута. Вони включають антени та блоки обробки сигналу, які дозволяють обчислювати цей кут. Дальноміри ж потрібні для вимірювання відстані, використовуючи час, за який сигнал доходить до об'єкта і повертається назад. Приклад однокоординатної РЛС зображено на рис. 1.1



Рисунок 1.1 – Пеленгатор та його антена

Принцип вимірювання азимуту можна описати наступним чином:

1. *Передача сигналу:* радар створює електромагнітну хвилю та посиляє її в бік потрібних об'єктів. Сигнал може бути коротким імпульсом або безперервним.
2. *Приймання сигналу:* радар ловить відбитий від об'єкта сигнал. Приймач радара може знаходити слабкий відбитий сигнал серед перешкод.
3. *Обробка сигналу:* прийнятий сигнал аналізується для знаходження азимуту об'єкта. Тут використовуються різні обчислення та алгоритми, засновані на властивостях сигналу.
4. *Визначення азимуту:* після обробки сигналу та з урахуванням положення антени, радар знаходить азимут об'єкта. Це робиться шляхом вимірювання різниці фаз між переданим та прийнятим сигналами, а також за допомогою спеціальних антенних діаграм та алгоритмів.

Принцип вимірювання дальності:

1. *Випромінювання сигналу:* РЛС формує електромагнітний імпульс або безперервне випромінювання та передає його у бік об'єктів, відстань до яких необхідно визначити.

2. *Прийом сигналу*: відбитий від цілі радіосигнал повертається назад і фіксується приймальною частиною РЛС. Приймач здатен виявити навіть дуже слабкі відгуки серед завад та сторонніх перешкод.

3. *Обробка сигналу*: отриманий відбитий сигнал піддається подальшому аналізу для обчислення азимутального положення цілі. Для цього застосовуються спеціальні методи та математичні процедури, що враховують характеристики сигналу та взаємодію з антеною.

4. *Визначення азимуту*: використовуючи результати обробки сигналу та дані про поточне положення антени, РЛС визначає азимут цілі. Це здійснюється шляхом аналізу фазових змін між випроміненим і прийнятим сигналами з урахуванням особливостей антенної діаграми та відповідних алгоритмів.

Принцип вимірювання дальності:

1. *Випромінювання сигналу*: РЛС створює та передає радіосигнал у напрямку потенційних об'єктів спостереження; він може бути імпульсним або безперервним.

2. *Прийом сигналу*: станція отримує відбитий сигнал, що повертається від поверхні цілі. Приймальна апаратура здатна вловити відбиття низької інтенсивності у присутності шумів.

3. *Обробка сигналу*: прийнятий сигнал аналізується з метою визначення дальності. Для цього використовуються відповідні алгоритми та методи обчислення.

4. *Визначення дальності*: на основі часової затримки між випромінюванням та прийомом сигналу РЛС визначає відстань до об'єкта.

Основні обмеження однокоординатних РЛС включають наступні аспекти:

Обмежена просторова деталізація: однокоординатні РЛС здатні визначати лише азимутальне (горизонтальне) розташування об'єктів. Вони не можуть отримати інформацію про висоту або вертикальне положення цілей. Через це неможливо сформувати повну тривимірну картину просторового розташування об'єкта.

Відсутність вимірювання дальності: такі РЛС не забезпечують прямого визначення дистанції до цілі. Тому для оцінки відстані необхідно застосовувати інші інструменти або поєднувати однокоординатну станцію з додатковими засобами, наприклад із дальномірами чи іншими типами РЛС.

Знижена здатність розрізнення цілей: однокоординатні радіолокатори мають обмежену роздільну здатність, через що можуть не відокремлювати близько розташовані одна до одної цілі в тому ж азимутальному напрямку або не фіксувати дрібні деталі далеких об'єктів.

Попри перелічені обмеження, однокоординатні РЛС і надалі широко застосовуються у сферах, де потрібно швидко отримати базові параметри цілі:

- *авіація:* такі радары слугують для визначення азимуту та відстані до літальних апаратів. Вони надають пілотам інформацію щодо напрямку та швидкості об'єктів, що сприяє безпечній та ефективній навігації.

- *залізнична інфраструктура:* однокоординатні системи здатні виявляти сторонні предмети на коліях і визначати дистанцію до них.

- *автоматизований супровід:* ці радары застосовують у системах відстеження цілей, де необхідно швидко визначати напрямок руху й/або швидкість об'єкта, що забезпечує своєчасне попередження про загрози та підвищення безпеки в різних галузях [2, 3].

Переваги однокоординатних РЛС:

- простота вимірювання азимуту, що дозволяє швидко отримувати інформацію про напрямки цілей.

- компактність та мобільність, що сприяє їхньому використанню в рухомих системах та на невеликих площадках.

- низька вартість, в порівнянні з багатокоординатними РЛС.

Недоліки однокоординатних РЛС:

- обмежена здатність до вимірювання висоти

- відсутність прямої інформації по другій координаті.

- низька точність.

1.2.2 Двокоординатні РЛС

Двокоординатні радіолокаційні станції (РЛС) здатні вимірювати дві ключові координати об'єкта: його дальність та азимут. Основою їхньої роботи є використання радіохвиль і аналіз сигналів, що повертаються після відбиття від цілі. Антенна система РЛС забезпечує випромінювання радіохвиль у напрямку об'єкта та приймання ехо-сигналів після їхнього відбиття.

Щоб визначити дальність, РЛС застосовує принцип вимірювання часу проходження імпульсу. Станція надсилає короткий радіоімпульс до цілі й фіксує момент його повернення. Визначивши інтервал часу між передачею та прийомом сигналу, можна обчислити, на якій відстані перебуває ціль. Цей механізм і становить суть визначення дальності.

Для отримання азимутальної координати використовується спосіб горизонтального сканування. Антена РЛС постійно обертається або змінює напрямки випромінювання в площині горизонту. Коли об'єкт відбиває сигнал, станція приймає ехо, після чого аналізує, з якого саме напрямку він надійшов. Це дає можливість визначити азимутальне положення об'єкта.

Поєднання даних про дальність та азимут дозволяє двокоординатним РЛС будувати просторове розташування цілей. Завдяки цьому такі системи можуть відстежувати рух об'єктів, визначати їхнє точне місцезнаходження та забезпечувати подальше реагування на виявлені цілі.

Додатково важливо враховувати ефект Доплера та його значення при роботі з рухомими об'єктами. Ефект Доплера — це фізичне явище, за якого частота хвилі змінюється через відносний рух джерела та приймача. Якщо об'єкт наближається, зафіксована частота збільшується; якщо віддаляється — зменшується.

У радіолокаційних системах ця зміна частоти використовується для визначення швидкості руху цілей. Зсув спектра сигналу, викликаний ефектом Доплера, аналізується за допомогою спеціальних методів обробки сигналів. Завдяки цьому РЛС отримують можливість точніше вимірювати швидкість, оцінювати траєкторії, прогнозувати рух та виконувати інші важливі функції. Таким чином, ефект Доплера є незамінним інструментом для отримання інформації про рухомі цілі в радіолокаційних системах.

Переваги:

Розширена інформація про об'єкт: двокоординатні РЛС дають змогу отримати дані про положення цілі одразу у двох просторових вимірах — азимуті та дальності. Це забезпечує більш детальне уявлення про місцеперебування, швидкість та напрям руху об'єкта.

Підвищена точність: завдяки одночасному вимірюванню двох координат такі РЛС зазвичай забезпечують точніше визначення позиції та параметрів руху цілі. Це особливо важливо в сферах, де потрібна висока точність, наприклад, у навігації або керуванні повітряними й морськими об'єктами.

Супровід динамічних об'єктів: двокоординатні РЛС здатні відстежувати переміщення цілей у просторі та визначати їхні траєкторії. Це

відіграє ключову роль у контролі транспортних потоків, моніторингу повітряного простору, спостереженні за морськими суднами та інших подібних застосуваннях.

Недоліки:

Підвищена складність системи: робота з двома координатами потребує більш складних процедур налаштування й калібрування радіолокаційної станції. Крім того, додаткова обробка сигналів і керування обладнанням вимагають більшої кількості технічних рішень та ресурсів.

Зростання ресурсних витрат: формування та аналіз інформації у двох координатах потребує більшого часу, енергоспоживання та обчислювальних можливостей.

Вища вартість: у порівнянні з однокоординатними комплексами, двокоординатні РЛС містять більш складні та технологічні компоненти, що збільшує вартість їх проєктування, виробництва та подальшої експлуатації.

Попри наявні недоліки, двокоординатні радіолокаційні системи широко застосовуються в різних галузях — у повітряному, морському та наземному середовищах. Нижче наведено кілька типових сфер використання:

– *Повітряний сегмент:* в авіації такі РЛС служать для визначення позиції та траєкторії руху літальних апаратів, а також для виявлення й супроводу інших повітряних цілей. Вони допомагають підтримувати безпеку польотів, фіксувати небезпечні маневри та уникати критичних ситуацій.

– *Морський сегмент:* у морській галузі ці РЛС застосовують для спостереження за акваторією, виявлення та супроводу суден, контролю рибальських зон, виконання пошуково-рятувальних операцій. Вони дають змогу визначати місцеперебування кораблів, їх маршрут, швидкість, а також виявляти потенційні загрози — наприклад, айсберги чи інші перешкоди.

– *Наземний сегмент*: на суші вони використовуються для контролю дорожнього й залізничного руху, моніторингу місцевості, охорони кордонів та об'єктів інфраструктури, таких як електростанції чи промислові комплекси. Вони здатні виявляти рухомі об'єкти, визначати їх координати, напрямок та швидкість руху, забезпечуючи функції безпеки та нагляду [2, 3]. Типовий зразок двокоординатної РЛС представлено на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – РЛс мобільна суміщена РЛС L-діапазону MARS-L

1.2.3 Трьохкоординатні РЛС

У наземних умовах двокоординатні радіолокаційні станції застосовують для широкого спектра завдань: контролю дорожнього та залізничного руху, спостереження за місцевістю, охорони державного кордону та забезпечення безпеки важливих об'єктів інфраструктури, таких як електростанції чи промислові комплекси. Такі системи здатні фіксувати рух цілей, визначати їхнє розташування та траєкторію переміщення, а також підтримувати функціонування охоронних і наглядових комплексів.

Трьохкоординатні РЛС забезпечують (рис. 1.3) визначення положення об'єкта в трьох просторових параметрах: азимуті, дальності та висоті. Вони використовуються переважно для виявлення, супроводу та класифікації повітряних цілей. Одним із поширених способів вимірювання висоти є використання двох антен або антенних модулів, розміщених на певній відстані один від одного. Вимірюючи різницю фаз між сигналами, що надходять з обох антен, система визначає вертикальний кут на ціль, а отже — її висоту.



Рисунок 1.3 – РЛС “80K6K1”

Отримані сигнали проходять обробку для визначення фазового зсуву, який виникає через різницю довжин шляхів відбитого сигналу до кожної антени. Завдяки спеціальним алгоритмам аналізу сигналів обчислюється вертикальний кут між ціллю та радіолокаційною станцією. Оскільки відома відстань між антенами, висоту об'єкта можна визначити за допомогою тригонометричних співвідношень. Цей спосіб дає змогу точно обчислити висоту навіть за умов обмеженої видимості, наприклад, коли ціль прихована перешкодами чи знаходиться в тумані.

Трьохкоординатні радары вирізняються високою точністю й детальністю вимірювань, що дозволяє застосовувати їх на значних дистанціях, за наявності швидкорухомих об'єктів і за несприятливих

погодних умов. Вони широко використовуються як у цивільних сферах — наприклад, у системах управління повітряним рухом, так і у військовій сфері — у комплексах ППО, навігаційних системах та інших видах радіолокаційного забезпечення.

Основою більшості сучасних радарів виступають фазовані антени решітки (ФАР). Фазована решітка являє собою набір антенних елементів, організованих у формі регулярної сітки. Кожен елемент функціонує окремо й отримує індивідуальні значення фази та амплітуди сигналу. Сукупність цих елементів формує спрямоване випромінювання та прийом. Головна перевага ФАР полягає в керованій зміні фаз між елементами, завдяки чому можна регулювати напрямок, ширину та форму випромінюваного променя. Зміна фази на окремих елементах дозволяє створювати конструктивні інтерференційні схеми та формувати промінь, спрямований у потрібному напрямку.

Антенні решітки мають низку переваг, серед яких:

- *висока спрямованість випромінювання*: така конструкція формує вузький промінь, що дає змогу з великою точністю визначати напрямок приходу сигналу.

- *підвищена роздільна здатність*: завдяки роботі багатьох елементів одночасно антенна решітка здатна добре розділяти близько розташовані об'єкти та виявляти дрібні деталі.

- *керування характеристиками пучка*: змінюючи амплітуди та фази сигналів у різних елементах, можна гнучко регулювати форму та напрям випромінювання.

Водночас фазовані решітки мають певні недоліки:

- *значна вартість*: складність конструкції та високі вимоги до електроніки роблять такі системи дорогими як у виробництві, так і в експлуатації.

– *великі масо-габаритні показники*: через численні елементи та схеми їх синхронізації ФАР займають багато місця та мають суттєву вагу.

– *складність керування*: функціонування решітки потребує складних алгоритмів і точного налаштування параметрів кожного елементу, що ускладнює обслуговування.

Попри ці недоліки, ФАР залишаються одним із найефективніших рішень у сферах, де потрібні висока точність, велика дальність та деталізоване зондування. Використання фазованих решіток у трьохкоординатних РЛС забезпечує розширений набір даних про об'єкт.

Основні переваги таких радіолокаційних станцій включають:

Точне визначення просторового положення: одночасне вимірювання трьох координат забезпечує високу точність у встановленні дальності, азимуту й висоти цілі. Збільшена ефективна площа прийому: ФАР здатні збирати більше енергії відбитого сигналу, що покращує чутливість і дозволяє бачити цілі на великих дистанціях.

Здатність розрізняти об'єкти на різних висотах: тривимірна інформація дозволяє розмежовувати цілі, розташовані на різних рівнях, що є ключовим у багатошаровому повітряному чи наземному просторі.

Визначення траєкторій руху: знання трьох координат у реальному часі дає можливість встановлювати шлях руху цілі, прогнозувати її подальші дії та визначати можливі зони небезпеки.

Покращена просторова роздільна здатність: завдяки ФАР система здатна добре розділяти дуже близько розташовані об'єкти, що важливо для точного спостереження та супроводу малих цілей.

Оскільки фундаментальним елементом трьохкоординатних станцій є фазовані антенні решітки, їхні недоліки також пов'язані з високою вартістю, технологічною складністю та великими вимогами до точного керування.

Проте загалом, попри ці особливості, трьохкоординатні РЛС залишаються надзвичайно потужним інструментом для отримання повної та точної інформації про об'єкти у тривимірному просторі. Це особливо актуально у військових та наукових сферах [2, 3].

Враховуючи вищеописані переваги наша система буде опиратись саме на трьохкоординатну РЛС.

1.2.4 Порівняння зондуючих сигналів радіолокаційної системи

В радіочастотних і мікрохвильових системах імпульсні (рис. 1.4) та безперервні сигнали застосовуються для різних цілей, зокрема для передачі голосу, відео, даних, радіоелектронної боротьби, спостереження та радіолокації. Імпульсні сигнали, які є активними протягом короткого часу, можуть бути модульовані за амплітудою, частотою або фазою, або ж використовуватися без модуляції. Безперервні сигнали, на відміну від імпульсних, є постійно активними і також можуть бути модульовані для використання в радарх або системах зв'язку [4].

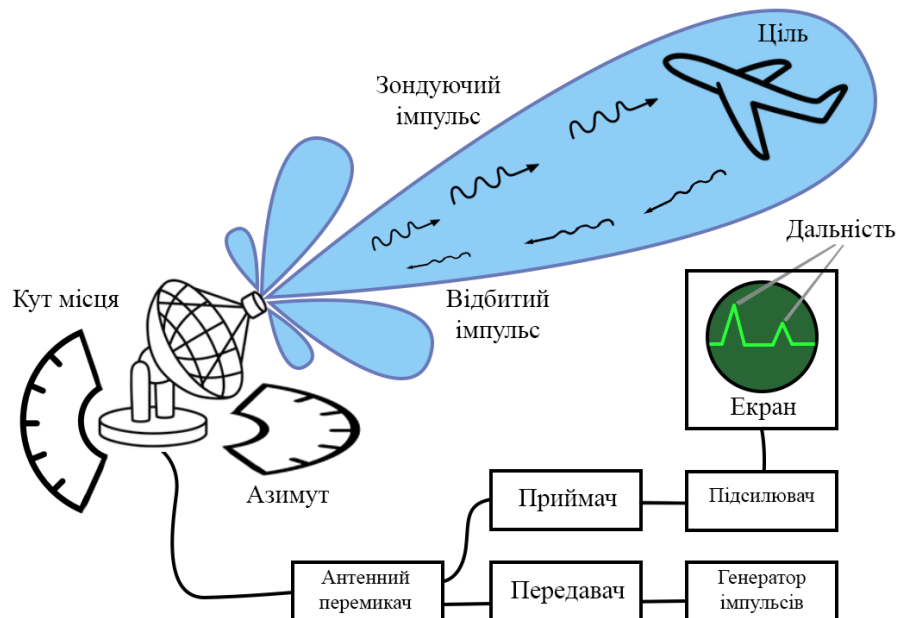


Рисунок 1.4 — Схема роботи РЛС із зондуючим сигналом

Обидва типи систем працюють з багатьма активними та пасивними деталями, щоб обробляти різні сигнали.

При цьому, кожна система здатна виконувати певні завдання з певними обмеженнями (габарити, живлення), що спрощує вибір потрібних характеристик і можливостей [5]. Безперервний передавач постійно надсилає сигнал, на відміну від імпульсного.

Імпульсний сигнал можна зробити як систему з одним імпульсом, де вся інформація contained в одному імпульсі. Але, такий спосіб рідко зустрічається в радіолокації через складнощі зі стабільним відстеженням параметрів об'єкта. Головне при виборі між безперервним та імпульсним сигналами – це знайти баланс з огляду на вимоги, особливо щодо енергії.

Інженер вирішує, що краще, порівнюючи, скільки енергії йде на підсилення безперервних сигналів і амплітуд імпульсних, які створюються та обробляються у певний час. Імпульсні сигнали часто застосовують в радіолокаційних системах, але й безперервні використовують, наприклад, у звичайних радарх допомоги водієві в сучасних машинах. Імпульсні радары надсилають короткі імпульси і визначають відстань за часом між відправленим та відбитим сигналом. Частотно-модульований радар (рис. 1.5) з безперервним випромінюванням передає потік сигналів, частота яких лінійно змінюється, і вираховує відстань за різницею частот відправленого та отриманого сигналу [6].

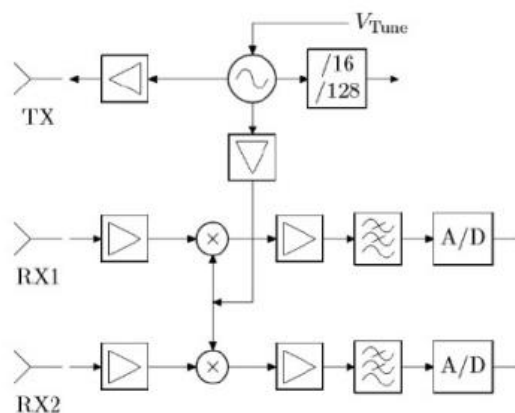


Рисунок 1.5 — схема РЛС з неперервним ЛЧМ сигналом

Частотна маніпуляція в безперервному радарі дає змогу точно визначити відстань (до десятих сантиметра), чого складно добитися з імпульсними системами. Але, щоб виявити об'єкти далеко, краще застосовувати імпульсні сигнали, оскільки вони забезпечують краще співвідношення сигнал/шум і достатню точність визначення відстані [6].

$$f_T(t) = f_C + \frac{B}{T} * t \quad (1.1)$$

де $f_T(t)$ - частота одного імпульсу; B - ширина смуги; T - тривалість.

Радіолокаційні системи, що використовують імпульсний сигнал, мають більшу дальність виявлення цілі, ніж ті, що працюють з безперервним сигналом, і при цьому споживають менше енергії. З іншого боку, безперервний сигнал забезпечує безперервний потік даних про ціль з вищою точністю і не має обмежень щодо мінімальної відстані до цілі.

Проте такі системи легше виявити, ніж ті, що використовують імпульсні сигнали. Також, радару з безперервним сигналом легше створити перешкоди, оскільки його сигнал простіше знайти й проаналізувати. Імпульсні ж радари, особливо надширокосмугові, важко виявити, особливо якщо потужність сигналу низька. Наприклад, радар на 24 ГГц з імпульсами тривалістю в кілька наносекунд може мати смугу пропускання 8 ГГц, але потребуватиме лише 4 мВт потужності. У такому разі потужність сигналу майже не відрізнятиметься від оточуючого шуму, що ускладнює його виявлення, на відміну від безперервного сигналу. Імпульсні радари випромінюють імпульси певної тривалості. Між імпульсами передавач вимкнений і не споживає енергію. Приймач же має бути постійно увімкненим, щоб приймати відбиті сигнали.

У радарях із безперервним сигналом передавач і приймач повинні постійно працювати. Тому потрібно вживати заходів для їх ізоляції, щоб вони не заважали один одному. Часто використовують низьку потужність

сигналу, але це зменшує дальність виявлення цілі. Крім того, якщо ціль рухається, виникає Доплерівський зсув частоти відбитого сигналу.

$$F_D = \frac{2V_{\text{ц}}}{\lambda} * \cos \alpha \quad (1.2)$$

де $V_{\text{ц}}$ - швидкість цілі, λ - довжина хвилі

У звичайній роботі, радар, який надсилає короткі сигнали та вміє враховувати особливості їх відбиття, може точно визначити, як швидко об'єкт рухається відносно нього. Але якщо радар використовує постійний сигнал із зміною частоти, то вимірювання відстані до об'єкта може бути неточним [6].

Тому, для точного вимірювання відстані в таких радарах, потрібно застосовувати різні способи та програми, які змінюють частоту сигналу з часом. Щоб зробити сигнал сильнішим, в радарах можуть використовуватись різні підсилювачі – як транзисторні, так і лампові, незалежно від того, які сигнали вони використовують: короткі чи постійні. Важливо знати ці особливості для розробки та вдосконалення радіолокаційних систем.

Для нашої мобільної системи було обрано РЛС 112L1-A “Барсук-A”. Вона використовує безперервний частотно-модульований сигнал, що дає змогу дуже точно вимірювати відстань поблизу та постійно отримувати дані. Її малі вага та габарити дуже важливі в польових умовах. Висока точність визначення координат разом із постійним оновленням даних дає змогу правильно поєднати радар ІЧ-камерами в мережу та якісно обробити інформацію.

2. ОГЛЯД СУЧАСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Сучасний підхід до створення радіолокаційних систем демонструє безперервний розвиток цієї галузі та активне впровадження нових технологій. Радари нового покоління є результатом багаторічних досліджень і технічних інновацій, спрямованих на підвищення їх продуктивності, точності та надійності. Однією з ключових тенденцій є застосування передових сенсорів та антенних комплексів, які забезпечують високу просторову роздільну здатність, оперативність обробки даних і стабільність роботи в різних умовах. Завдяки прогресу в мікроелектроніці та цифровій обробці сигналів створюються компактні, енергоефективні та потужні радіолокаційні системи.

Важливу роль відіграють також новітні алгоритми радіолокаційної обробки, які дають змогу точно виявляти, супроводжувати та розпізнавати об'єкти у режимі реального часу. Використання методів адаптивної фільтрації, спектрального аналізу та нейромережевих технологій значно підвищує точність і стійкість роботи РЛС. Крім того, сучасні радіолокаційні комплекси широко інтегруються з супутниковими й геоінформаційними системами, що дає змогу істотно підвищити точність визначення координат та покращити інтерпретацію радіолокаційної інформації. Поєднання радіолокаційних даних із просторовими моделями місцевості забезпечує операторів повною, структурованою та детальною інформацією про цілі.

2.1 Огляд існуючих мобільних комплексів наземного спостереження ближньої дії

У сучасних умовах тактичної розвідки та охорони локальних ділянок місцевості широко застосовуються мобільні комплекси наземного спостереження, що поєднують радіолокаційні та оптико-електронні засоби. Такі системи призначені для виявлення, супроводу та візуалізації рухомих цілей у ближній зоні та використовуються для охорони периметра, прикордонного контролю, захисту тимчасових позицій і баз. Нижче наведено

огляд типових представників цього класу систем, характеристики яких використовуються як орієнтир при формуванні вимог до розроблюваного комплексу.

HENSOLDT Spexer 2000 (мобільна конфігурація): Цей комплекс у мобільному виконанні належить до класу легких тактичних систем наземного спостереження (рис.2.1). Він базується на малогабаритній радіолокаційній станції з цифровою обробкою сигналів та можливістю інтеграції з оптико-електронними й тепловізійними модулями.

Система забезпечує виявлення рухомих цілей типу «людина» на дальностях порядку 6–8 км та техніки на більших відстанях. Як правило, радіолокаційний і оптико-електронний модулі розміщуються на одному сенсорному посту, що спрощує синхронізацію даних і керування. Комплекс орієнтований на швидке розгортання та роботу в польових умовах, однак передбачає використання сертифікованих військових компонентів і має високу вартість [7].



Рисунок 2.1 — HENSOLDT Spexer в польових умовах

SRC SR Hawk / SR Border (light configuration): Системи даного класу призначені для тактичного спостереження та охорони кордонів і периметрів.

Вони поєднують наземну радіолокаційну станцію з оптико-електронними або тепловізійними засобами та централізований пункт керування (рис.2.2).

Комплекси цього типу забезпечують виявлення людей на дальностях приблизно 5–7 км та рухомої техніки до 8–10 км. Архітектура системи є переважно централізованою, з фіксованою конфігурацією сенсорів. Такі рішення орієнтовані на тривалу безперервну експлуатацію у визначеній зоні відповідальності та часто розгортаються на транспортних платформах або стаціонарних опорах. [8]



Рисунок 2.2 — SRC SR Hawk в польових умовах

Blighter A400/A422 з оптико-електронним модулем: Данні радіолокаційні системи у поєднанні з оптико-електронними або тепловізійними камерами застосовуються для охорони периметра та тактичного наземного спостереження. Основою комплексу є безперервно працююча наземна РЛС (рис.2.3), оптимізована для виявлення повільнорухомих цілей.

Дальність виявлення людей становить близько 4–6 км, а техніки — до 8 км. Система, як правило, реалізується у вигляді одиночного сенсорного посту з локальним пунктом керування. Основний акцент зроблено на простоту експлуатації та стабільність роботи в умовах охорони об'єктів. [9]



Рисунок 2.3 — Blighter A422

2.2 Узагальнення результатів огляду

Проаналізовані мобільні комплекси наземного спостереження ближньої дії мають спільні концептуальні риси:

1. використання наземної РЛС як основного засобу виявлення;
2. застосування оптико-електронних або тепловізійних каналів для підтвердження цілей;
3. дальності виявлення в межах кількох кілометрів, характерні для тактичних задач;
4. орієнтацію на роботу в польових умовах з обмеженою інфраструктурою.

Водночас більшість розглянутих систем реалізовані за централізованою архітектурою, з фіксованим розміщенням сенсорів та обмеженими можливостями гнучкого перепланування структури комплексу. Аналіз таких рішень дозволяє сформулювати вимоги до перспективних систем спостереження, зокрема щодо мобільності, автономності, організації радіоканалу та можливості рознесення сенсорних вузлів.

Отримані результати огляду слугують основою для формування концепції та архітектури розроблюваної в даній роботі радіолокаційної системи, що буде мати переваги в мобільності, гнучкості конфігурації, багатопозиційності та вартості.

3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ

3.1 Загальна структура комплексу

Розроблювана мобільна радіолокаційна система побудована за багаторівневою архітектурою (рис 3.1), що включає чотири основні структурні ланки: сенсорний блок, передавальний блок, блок прийому та обробки інформації, та центр прийняття рішень. Сенсори системи розташовуються на відстані від центру керування і між собою, одночасно використовується лише частина датчиків, в той час як інші знаходяться в резерві.

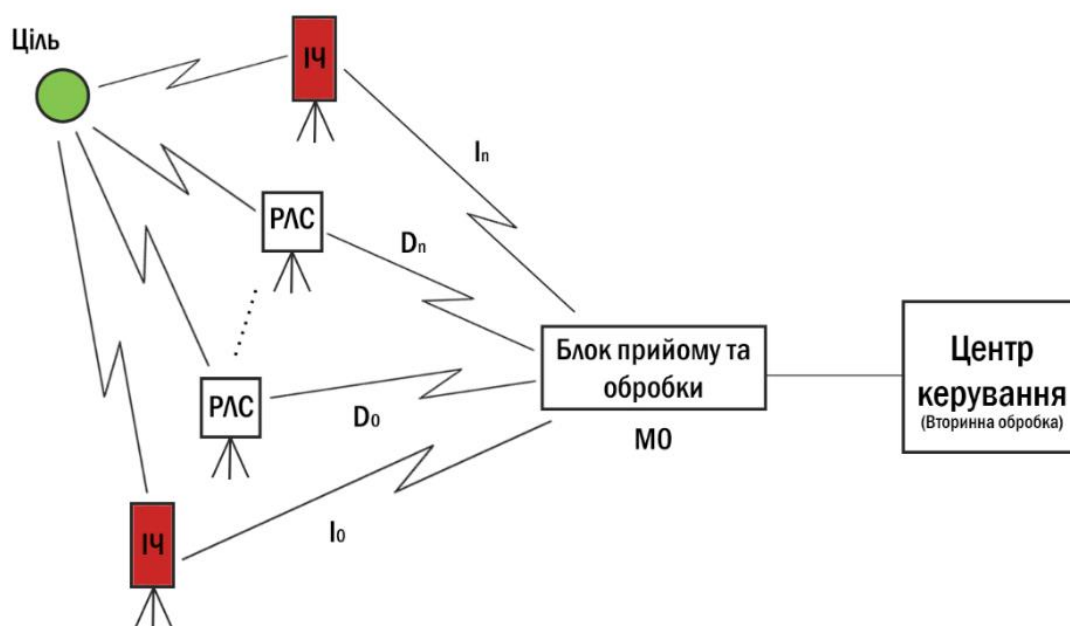


Рисунок 3.1 — Загальна структура комплексу

Детальніше проаналізуємо блоки:

Сенсорний блок: радіолокаційна станція та тепловізійна камера

На першому рівні розташовані малогабаритні радіолокаційні станції, які виконують функцію виявлення та супроводу цілей. В данній роботі використовується РЛС класу 112L1A «Барсук-А», що характеризується компактністю, низьким енергоспоживанням і можливістю монтажу на

штатив, що робить її придатною для мобільного розгортання. РЛС забезпечує визначення дальності, азимуту та кута місця цілей у ближній зоні. Детальніше характеристики РЛС описані в наступних пунктах.

Доповнюючим елементом сенсорної підсистеми є тепловізійна камера, що виконує функцію підтвердження цілі та підвищення достовірності класифікації. Камера формує відеопотік що передається до блоку прийому та обробки. Об'єднане використання РЛС та ІЧ-датчика забезпечує багатоканальне спостереження та зменшує імовірність хибних спрацювань.

Передавальний блок: Другою ланкою є сукупність обладнання що забезпечує передачу телеметричних та відеоданих через радіоканал. Блок повинен забезпечувати:

- 1) дальність передавання не менше 10 км
- 2) стійкість до перешкод
- 3) достатню пропускну здатність (кілька десятків кБ/с для РЛС і 2–8 Мбіт/с для відео залежно від компресії)
- 4) можливість шифрування та дуплексний режим для зворотного керування.

Таким чином, система зберігає функціональність у середовищах із підвищеним радіоелектронним впливом та різноманітними погодними умовами, та дозволяє персоналу працювати з безпечної відстані.

Блок прийому та обробки інформації: Третю ланку утворює захищений переносний комп'ютер або спеціалізований обчислювальний модуль. Він відповідає за:

- 1) приймання даних від РЛС через RS-422/485;
- 2) приймання відеосигналу від тепловізора;
- 3) первинну фільтрацію, синхронізацію та агрегування інформації;

4) формування уніфікованих даних для передавання по радіоканалу.

Саме на цьому рівні виконується побудова радарного інтерфейсу, візуалізація параметрів цілей та первинна класифікація типів об'єктів (транспорт, людина, плавзасіб) .

Центр прийняття рішень: Це стаціонарний або пересувний центр прийняття рішень, забезпечений комп'ютером, який отримує дані від обчислювального модуля, та по кабелю передає до укриття/захищеного штабу на безпечну відстань. Тут здійснюється:

1. інтегральний аналіз ситуаційної обстановки;
2. накопичення, збереження та архівація даних;
3. супровід цілей у реальному часі;
4. ухвалення тактичних рішень.

У даній роботі центр розміщується у захищеному укритті або бункері та є кінцевим пунктом візуалізації результатів спостереження.

3.2 Функціональна мета та критичні обмеження

1) *Варіативність зони покриття:* Здійснюючи розгортання сенсорів можна спостерігати як обширний суцільний сегмент території так і утворювати “акцентоване” спостереження за несумісними між собою зонами, що розширює тактичні можливості системи.

2) *Точність:* Для уникнення помилокових детектувань цілі що спостерігає РЛС будуть підтверджуватись їх детектуванням ІЧ-камерою

3) *Мобільність:* Масогабаритні параметри сенсорної частини дозволяють доставляти і розгортувати обладнання зусиллями команди із 3х осіб та одного пікапу/мікроавтобусу.

4) *Автономність та безпека:* Система розрахована на мінімізацію ризиків з боку особового складу що здійснює розгортання сенсорної частини,

та операторів керування/осіб приймаючих рішення. Після доставки і розгортання системи датчиків потреба в присутності технічного персоналу відпадає аж до моменту згортання, передислокації або заміни блоку живлення. Увесь інший час команда може перебувати на безпечній відстані в укритті, або здійснювати передислокацію/розгортання інших комплектів сенсорів. Блок прийому та обробки інформації через кабельну ров'язку передає отримані данні до центру прийняття рішень що знаходиться на певній відстані в захищеній споруді.

5) *Стійкість*: Пропонується викорисовувати близько 6-8 пар датчиків, а з них використовувати одночасно 4-5 пари. Таким чином у випадку враження/втрати датчику/пари система не припинить функціонування, а резерв буде використано для швидкої заміни втраченого.

3.3 Критерії відбору приладів

Відбір апаратури для мобільної радіолокаційної системи здійснюється з урахуванням вимог до мобільності, надійності та сумісності окремих модулів у межах єдиного функціонального комплексу. Оскільки система розгортається у польових умовах і включає декілька автономних сенсорних комплектів, критично важливо, щоб усі прилади відповідали експлуатаційним обмеженням та забезпечували надійне передання даних на дистанцію до 10 км. Першим ключовим аспектом виступає адаптованість обладнання до польових умов, що включає захист від пилу та вологи, стійкість до різких температурних змін і механічних впливів під час транспортування та роботи. Усі сенсорні модулі — радіолокаційні станції, тепловізори, радіомодеми та допоміжне обладнання — мають підтримувати стабільну роботу у розширених кліматичних діапазонах. Другим критерієм є інтерфейсна сумісність, яка визначає можливість безпосередньої інтеграції РЛС та тепловізора з апаратурою радіоканалу. Радіолокаційні станції використовують інтерфейс RS-422/485, тоді як тепловізори можуть формувати як цифровий мережевий потік, так і аналоговий сигнал. Це

визначає необхідність вибору радіоапаратури, здатної прозоро передавати відповідні типи даних без втрати структури сигналу. Наступним параметром є пропускна здатність засобів зв'язку, що повинна забезпечувати передавання телеметрії та відеопотоку в реальному часі.

Відібране обладнання має стабільно підтримувати необхідні швидкості на дистанції до 10 км та бути стійким до можливих радіоперешкод. Енергоспоживання є критичним через автономний характер роботи сенсорних комплектів. Усі прилади повинні бути сумісними з портативними джерелами живлення та забезпечувати мінімальне навантаження на батареї для тривалої роботи без підзарядки. Важливим є також критерій інтеграції в єдиний обчислювальний контур, що включає сумісність протоколів, можливість синхронізації даних та подальшої їх обробки центральним модулем. Це створює умови для коректної візуалізації ситуаційної обстановки та роботи алгоритмів класифікації. Окремо враховуються масогабаритні параметри та транспортабельність. Кожен сенсорний комплект (РЛС, тепловізор, штативи, антени, живлення та радіоканал) має бути достатньо компактним та легким для перенесення невеликою командою. Загальний обсяг 2–3 таких комплектів повинен дозволяти їхнє транспортування у мікроватобусі або пікапі та швидке оперативне розгортання у польових умовах. Всі ці критерії зібрані в таблиці 3.1

Таблиця 3.1— Основні критерії вибору приладів

Критерій	Вимоги / Пояснення	Вплив на систему
Надійність у польових умовах	Захист не нижче IP65; робочий температурний діапазон $-20...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; стійкість до опадів, пилу, вібрацій	Гарантує безвідмовну роботу сенсорів і радіообладнання в реальних польових умовах

Продовження таблиці 3.1

Параметр	Значення	Параметр
Інтерфейсна сумісність	RS-422/485 для РЛС; 10Base-T/100Base-TX або BNC (CVBS) для тепловізора; сумісні радіомодеми та радіомости	Дозволяє об'єднати різномірні канали в єдину систему
Пропускна здатність каналів передачі	≥ 10 км дальності; достатня смуга для телеметрії РЛС (кбіт/с) і відеопотоку (2–8 Мбіт/с)	Забезпечує передавання даних у реальному часі та синхронізацію сенсорів
Стійкість до перешкод	FHSS/OFDM, адаптивна модуляція, можливість шифрування	Підвищує живучість системи у складній РЕБ-обстановці
Енергоспоживання та автономність	Низьке споживання; робота від акумуляторних станцій; можливість резервування	Забезпечує тривале використання сенсорного комплексу без підзарядки
Інтеграція в обчислювальний контур	Підтримка TCP/UDP; передача RS-422/485; синхронізація часових міток	Гарантує можливість обробки та візуалізації даних на центральному модулі
Масогабаритні параметри	Один сенсорний комплект (РЛС + тепловізор + штативи + живлення + антени) має бути портативним	Забезпечує мобільність та швидке розгортання сенсорних вузлів
Мобільність системи	2–3 комплектів повинні вміщуватися в мікроватобус або пікап; наявність ударозахисних кейсів	Дозволяє оперативне переміщення й створює тактичну гнучкість системи
Швидкість монтажу / демонтажу	Мінімальна кількість кабелів; модульність конструкції; сумісні кріплення	Критично для роботи в умовах загрози та обмеженого часу

3.4 Сенсорний блок

3.4.1 Вибір радіолокаційної станції

Для сенсорної частини мобільної радіолокаційної системи обрано малогабаритну РЛС ближньої дії 112L1A «Барсук-А» (рис. 3.2) , яка належить до класу портативних засобів розвідки наземних та надводних цілей [10]. Вибір цієї станції обумовлений її відповідністю вимогам до мобільності, енергоспоживання, дальності дії та інтеграції в багатосенсорну систему спостереження. РЛС використовує інтерфейс RS-422/485, що забезпечує пряму сумісність із радіомодемами для передавання телеметрії на відстань до 10 км, згідно з архітектурою системи.

Таблиця 3.2 — Основні технічні характеристики РЛС « Барсук-А »

Параметр	Значення
Робочий діапазон частот	Х-діапазон (≈ 10 ГГц)
Максимальна дальність виявлення великої цілі (транспорт)	до 3 км
Дальність виявлення цілі типу «людина»	до 1 км
Мінімальна дальність виявлення	50–100 м
Точність визначення дальності	~ 5 м
Точність визначення азимуту	$\sim 1\text{--}2^\circ$
Кут місця	залежить від конфігурації антени; типовий сектор до $\pm 10\text{--}12^\circ$
Частота оновлення інформації	1–10 Гц (залежно від режиму)
Тип антени	Направлена антена з вузькою ДН
Тип обробки сигналу	Доплерівська, з фільтрацією рухомих цілей (MTI)
Інтерфейс передачі даних	RS-422 / RS-485

Продовження таблиці 3.2

Параметр	Значення
Час безперервної роботи від акумулятора	8+ год (залежно від батареї)
Споживана потужність	$\approx 10\text{--}15\text{ Вт}$
Маса РЛС (без штатива)	6–7 кг
Габарити станції	$\sim 270 \times 250 \times 140\text{ мм}$
Час розгортання	до 5 хвилин



Рисунок 3.2 — 112L1A «Барсук-А»

Переваги використання РЛС « Барсук-А » в системі:

1. Висока мобільність та придатність до розгортання у польових умовах: Станція має малу масу та компактні габарити, що дозволяє переносити її однією людиною або на легкому транспорті. Це відповідає вимогам системи, у якій 2–3 сенсорні комплекти повинні розміщуватися в мікроватобусі або пікапі разом зі штативами та допоміжним обладнанням.

2. Низьке енергоспоживання: РЛС може працювати від акумуляторних станцій, що дозволяє застосовувати її у складі автономних сенсорних вузлів з тривалим часом роботи без підзарядки.

3. *Сумісність з інтерфейсом RS-422/485*: Станція передає телеметрію у форматі, який легко інтегрується з радіоканалами, що підтримують прозору передачу послідовних інтерфейсів. Це зменшує складність електронної інтеграції та не потребує додаткових конвертерів.

4. *Достатня дальність і точність для задач спостереження на рубежі до 1–3 км*: Станція забезпечує виявлення транспортних засобів і крупних цілей на відстані до кількох кілометрів, а людини — до 1 км, що відповідає практичним умовам використання системи у ближній зоні.

5. *Швидке приведення у робочий стан*: Час установки та ініціалізації є мінімальним, що критично для мобільних груп, які мають розгорнути сенсорний вузол у найкоротший час.

Недоліки та обмеження:

1. *Обмежена дальність дії порівняно зі стаціонарними РЛС*: Станція не призначена для середньої або великої дальності — її ефективність оптимізована саме під ближню зону. Це необхідно враховувати при плануванні секторів покриття й розміщенні сенсорних комплектів.

2. *Вузькі можливості аналізу складних маневрових цілей*: Малогабаритні РЛС зазвичай мають обмежену роздільну здатність та точність у складних умовах рельєфу або за наявності щільних перешкод.

3. *Потреба в точному встановленні штатива*: Похибки при встановленні платформи можуть впливати на точність визначення азимуту і кута місця, особливо на нерівних поверхнях.

3.4.2 Висновок щодо придатності РЛС

Вибір РЛС « Барсук-А » є обґрунтованим для мобільної системи ближнього радіолокаційного спостереження. Її конструктивні особливості та

технічні параметри відповідають вимогам автономності, малих габаритів, сумісності з радіоканалом та роботи у складі багатосенсорного вузла. Станція забезпечує оптимальне співвідношення між мобільністю й точністю, що робить її доцільним елементом сенсорної частини розроблюваної системи.

3.4.3 Вибір тепловізійної камери

Тепловізійна камера є ключовим елементом сенсорного рівня системи та доповнює роботу РЛС за рахунок візуального підтвердження ідентифікації цілі. Для розроблюваного комплексу тепловізор повинен мати можливість автономної роботи без оператора, зокрема автоматичного виявлення, супроводу та передачі відеопотоку через цифровий інтерфейс Ethernet. Також важливими є стійкість до зовнішніх факторів, інтеграція через RS-485, наявність тривожних входів/виходів і відповідність вимогам мобільності.

У цьому підрозділі проаналізовано три кандидати, що відповідають зазначеним критеріям: Sheenrun Thermal PTZ Camera, Dahua TPC-PT8421A, Hikvision DS-2TD4638T-25X. Після порівняння наведено обґрунтований вибір для сенсорної частини системи.

Кандидат 1: Hikvision DS-2TD4638T-25X (Thermal PTZ, Deep Learning) — Тепловізійна PTZ-камера із вбудованим модулем Deep Learning та двоспектральною оптикою (оптичний + тепловий канал). Забезпечує автономне відстеження та класифікацію цілей. [11] Її характеристики наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 — Основні технічні характеристики Hikvision

Параметр	Значення
Матриця	384×288 або 640×512
PTZ	оптичний зум + тепловізійний модуль
Дальність виявлення людини	до 1.5 км

Продовження таблиці 3.3

Параметр	Значення
Інтерфейси	Gigabit Ethernet, ONVIF, RS-485
Корпус	IP66, анти-корозійний корпус
Автономність	так, завдяки алгоритмам AI
Ціна, тис.	≈\$6.5–8 або \$10–12

Перевагами кандидата є: наявність AI-класифікації; Надійний захист та висока стабільність роботи; Сумісність з радіомостами та промисловими інтерфейсами; Наявність додаткової деталізації через оптичний канал. До недоліків кандидата належать менша дальність та більш складне калібрування при двоспектральному режимі.

Кандидат 2: Sheenrun Thermal Vision PTZ Camera — Обрана модель є автономною PTZ тепловізійною камерою, що забезпечує автоматичне виявлення та супровід цілей без участі оператора. Пристрій належить до класу охоронних та тактичних систем спостереження та підтримує повну інтеграцію через Ethernet та RS-485 [12]. В таблиці 3.4 наведено її характеристики.

Таблиця 3.4 — Основні технічні характеристики Sheenrun

Параметр	Значення
Матриця	384×288 або 640×512, 17 μm
PTZ	панорамування та нахил з високою точністю
Дальність виявлення людини	до 2–3 км
Інтерфейси	Ethernet (TCP/UDP), ONVIF, RS-485, тривожні входи/виходи

Продовження таблиці 3.4

Параметр	Значення
Корпус	IP66–IP67, робота в екстремальних умовах
Автономність	повністю автономні алгоритми автоматичного виявлення та автотрекінгу
Ціна	≈\$2 500 – \$6 500 USD

Серед переваг кандидата: Автономність; PTZ; Автотрекінг; Достатня дальність виявлення у ближній та середній зоні; Сумісність з радіомостами та промисловими інтерфейсами; Адаптованість для мобільних розвідувальних систем. Недоліками є чутливість до точного налаштування алгоритмів трекінгу при складному фоні та залежність від якості живлення та стабільності мережевого каналу.

Кандидат 3: Dahua TPC-PT8421A (Thermal PTZ Network Camera) — Промислова тепловізійна PTZ-камера високої надійності, з розширеним панорамним сектором, яка підтримує штучний інтелект і автономну аналітику. Часто використовується в системах спостереження за периметром а також в безпілотних комплексах [13]. Характеристики наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Основні технічні характеристики Dahua

Параметр	Значення
Матриця	640×512, 17 μm
PTZ	повне 360° панорамування, розширений вертикальний сектор
Дальність виявлення людини	виявлення людини: 1.5–2 км

Продовження таблиці 3.5

Параметр	Значення
Інтерфейси	Ethernet 10/100, ONVIF, RS-485, сигналізаційні порти
Корпус	IP66, робота при $-40...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$
Автономність	AI-аналітика, автоматичне виявлення, класифікація та супровід цілей
Ціна	$\approx \$8\,000 - \$15\,000\text{ USD}$

Перевагами кандидата є: висока надійність та стійкість до погодних умов, потужний блок аналітики а також повна інтеграція через Ethernet та RS-485. До недоліків кандидата належать: Вища маса та потреба у стаціонарнішому кріпленні та висока вартість.

Порівняння кандидатів наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 — Порівняльна таблиця кандидатів

Параметр	Sheenrun	Dahua TPC-PT8421A	Hikvision DS-2TD4638T-25X
Автономна робота	Так + автотрекінг	Так+AI-трекінг	так+Deep Learning
Роздільна здатність	384×288 / 640×512	640×512	384×288 / 640×512
Дальність виявлення людини	2–3 км	1.5–2 км	до 1.5 км

Продовження таблиці 3.6

Параметр	Sheenrun	Dahua TPC-PT8421A	Hikvision DS-2TD4638T-25X
Ethernet	є	є	є (Гігабітний)
RS-485	є	є	є
BNC	В розширеній версії	відсутній	відсутній
Захист	IP66–IP67	IP66	IP66
Живлення	12–24V	24V / PoE	24V / PoE
Аналітика	Базова (tracking)	Сильна (AI)	Сильна (DL AI)
Ціна, USD	≈\$2 500 – \$6 500	≈ \$8 000 – \$15 000	≈\$6.5–8 або \$10–12

3.4.4 Обґрунтований вибір тепловізійної камери

З огляду на архітектуру системи, вимоги до автономності, підтримку Ethernet-передачі, PTZ-керування, RS-485 та можливість роботи у складі польового мобільного вузла, оптимальним вибором є Sheenrun Thermal Vision PTZ Camera (рис. 3.3)

Цей варіант забезпечує:

- 1) Повну автономність без оператора — автоматичне виявлення й супровід.
- 2) Найбільшу дальність виявлення серед трьох кандидатів (до 3 км)
- 3) Ідеальну інтеграцію з радіомостом (Ethernet) та системою управління (RS-485).

4) Високу стійкість до погодних умов та мобільність, що важливо при розгортанні сенсорного комплексу в польових умовах.

5) Оптимальне співвідношення маси, енергоспоживання та функціональності.



Рисунок 3.3 — Sheenrun Thermal Vision PTZ Camera

Таким чином, Sheenrun є найбільш придатною моделлю для ролі основної тепловізійної камери сенсорного вузла, тоді як Dahua та Hikvision можуть використовуватися як функціональні альтернативи або резервні модулі в розширеній конфігурації системи.

3.5 Захищений обчислювальний модуль

Захищений обчислювальний модуль (ЗОМ) є ключовою ланкою архітектури системи, оскільки саме в ньому виконується приймання телеметрії від РЛС, відеопотоку від тепловізійної камери, первинна обробка даних, їх синхронізація та формування уніфікованого інформаційного пакета для центру прийняття рішень. Обчислювальний модуль розташовується у точці прийому радіоканалу, поза межами небезпечної зони. Це дозволяє мінімізувати кількість дорогого обладнання на передовій та спрощує

живлення й технічну підтримку. Технічні вимоги до модуля наведні в таблиці 3.7.

Функціональні завдання обчислювального модуля:

- 1) Приймання даних від РЛС через RS-422/485 (через радіомодем або інтерфейсний шлюз).
- 2) Приймання відеопотоку тепловізора через Ethernet (RTSP/ONVIF).
- 3) Синхронізація радарних та тепловізійних даних за часовими мітками.
- 4) Первинна обробка: фільтрація шумових відміток, нормалізація даних, формування треків.
- 5) Візуалізація в реальному часі (радарне поле, маркери цілей, відеопотік).
- 6) Запис історії спостережень та архівація даних.
- 7) Передача агрегованої інформації у центр прийняття рішень (TCP/UDP).
- 8) Робота в автономному режимі при нестабільному або прерваному радіозв'язку.

Таблиця 3.7 — Технічні вимоги до обчислювального модуля

Параметр	Вимога
Інтерфейсна сумісність	Мінімум 2× Ethernet 10/100/1000 (для прийому відео та підключення до мережі ЦПР). Підтримка RS-422/485 (або USB → RS-485 адаптер промислового класу). Сумісність з IP-протоколами тепловізора: RTSP, ONVIF, TCP/UDP.
Обчислювальна потужність	Процесор не нижче Intel i5 / Ryzen 5 або ARM-випадки промислового класу. Підтримка апаратного декодування відео (H.264/H.265). Не менше 8 ГБ RAM для стабільної роботи алгоритмів фільтрації.

Продовження таблиці 3.7

Параметр	Вимога
Захищеність	Стандарт захисту корпусу IP65 або MIL-STD-810G. Антивібраційне кріплення та ударостійкість. Робочий температурний діапазон: $-20...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Живлення	Підтримка 9–36V DC. Наявність захисту від перенапруг та переполюсування.
Масогабаритні параметри	Компактність для перевезення у мікробусі разом із сенсорними вузлами. Можливість монтажу у захищений кейс або виносний контейнер.

Для аналізу вибрано три реальних кандидати обчислювальних модулів, які відповідають вимогам мобільної радіолокаційної системи.

Кандидат 1 — Winmate Rugged Box PC (Індустріальний модуль, IP65)
Один з найпоширеніших промислових комп'ютерів для систем відеоаналітики та військово-промислових застосувань [14]. В таблиці 3.8 наведені основні характеристики.

Таблиця 3.8 — Характеристики Winmate

Параметр	Значення
CPU	Intel i5 / i7, 6–12 покоління
RAM	8–32 GB
Ethernet	2–4 × Gigabit
RS-422/485	1–2 порти
Захист	IP65, MIL-STD-810
Температура	$-20...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Перевагами кандидата є: високий захист, потужність, легкість монтажу в польовому контейнері. Серед недоліків можна виділити вартість вище середньої та вагу в 2–3 кг.

Кандидат 2 — Advantech UNO-2484G (Industrial IoT Computer) — Компактний, енергоефективний, часто використовується у мобільних системах [15]. Основні характеристики наведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 — Характеристики Advantech

Параметр	Значення
CPU	Intel i5 (Ultra-low power)
RAM	4–16 GB
Ethernet	3 × Gigabit
RS-422/485	2 порти
Захист	IP40 (можливе посилення у польовому кейсі)
Температура	–20...+60 °C
Ціна	\$900 – \$1 600

Перевагами кандидата є: низьке енергоспоживання, компактність, достатньо Ethernet-портів. Серед недоліків потреба в додатковому кейсі для підвищення захисту.

Кандидат 3 — Getac V360 Pro (Захищений ноутбук) — Польовий варіант з високою мобільністю, підходить коли потрібен переносний операторський пункт [16].

Характеристики кандидата наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 — Характеристики Getac

Параметр	Значення
CPU	Intel i7
RAM	16–32 GB
Ethernet	1 порт
RS-485	через адаптер
Захист	MIL-STD-810H, IP66
Температура	–29...+63 °C
Ціна	\$3 800 – \$5 500

Серед переваг варто виділити максимальну мобільність, зручність експлуатації та екстремальний захист. Недоліками кандидата є менша кількість мережевих інтерфейсів та необхідність в адаптерах для промислових задач.

В таблиці 3.11 проведено порівняння кандидатів, враховуючи їх особливості та переваги.

Таблиця 3.11 — Порівняльна таблиця кандидатів

Параметр	Winmate Rugged Box	Advantech UNO-2484G	Getac B360 Pro
Форм-фактор	промисловий бокс PC	компактний IoT PC	захищений ноутбук
Потужність CPU	висока	середня	висока
Ethernet	2–4 порти	3 порти	1 порт
RS-422/485	1	2	Залежить від адаптера

Продовження таблиці 3.11

Параметр	Winmate Rugged Box	Advantech UNO-2484G	Getac B360 Pro
Захист	IP65, MIL-STD-810	IP40 (у кейсі — IP65)	IP66, MIL-STD-810H
Робоча температура	–20...+60 °C	–20...+60 °C	–29...+63 °C
Ціна	\$1200–2500	\$900–1600	\$3800–5500
призначення	стаціонарного польового пункту	компактної мобільної станції	мобільного оператора

3.6 Обґрунтування вибору обчислювального модуля

Для сенсорної архітектури, у якій здійснюється одночасний прийом IP-відеопотоку від тепловізійної камери та телеметричних даних РЛС по інтерфейсах RS-422/485, а також виконується їх обробка і візуалізація в режимі реального часу, до обчислювального модуля висуваються підвищені вимоги. Обладнання повинно стабільно працювати в польових умовах, витримувати механічні та кліматичні впливи, забезпечувати сумісність із автономними джерелами живлення та мати достатню обчислювальну потужність для паралельної роботи з кількома потоками даних.

З урахуванням зазначених вимог оптимальним вибором є захищений промисловий бокс-комп'ютер класу Winmate Rugged Box PC (Рис. 3.4) або функціонально еквівалентний йому аналог. Такі пристрої оснащуються повним набором промислових інтерфейсів, зокрема RS-422/485 для прийому даних РЛС та Ethernet для роботи з IP-відеопотоком тепловізора. Захищене виконання корпусу з класом захисту IP65 та відповідність стандартам типу MIL-STD-810 забезпечують надійну роботу в умовах підвищеної вологості, запиленості та вібрацій.



Рисунок 3.4 — Winmate Rugged Box PC

Обчислювальні ресурси подібних промислових ПК є достатніми для обробки радіолокаційної інформації, декодування відеопотоку та формування графічної візуалізації в реальному часі. Крім того, вони підтримують роботу від автономних джерел живлення та широкий діапазон робочих температур, що є критичним для мобільних систем. Компактні габарити й можливість монтажу у транспортному або польовому контейнері спрощують інтеграцію такого комп'ютера до складу мобільної радіолокаційної системи.

Таким чином, застосування промислового захищеного ПК класу Winmate або аналогічного рішення забезпечує оптимальний баланс між надійністю, продуктивністю та економічною доцільністю системи.

3.7 Передавальний модуль

Радіоканал є критичною складовою мобільної радіолокаційної системи, оскільки забезпечує передавання як телеметричних даних РЛС, так і відеопотоку від тепловізійної камери на відстань до 10 км. На відміну від сенсорної частини, розташованої у зоні можливої загрози, апаратура приймального пункту перебуває у безпечнішій позиції. Таким чином, радіоканал виконує функцію фізичного та інформаційного рознесення, що підвищує живучість системи та безпеку персоналу. Відповідно вимоги до нього мають бути досить високими і описані в таблиці 3.12

Таблиця 3.12 — Функціональні вимоги до радіоканалу

Параметр	Вимога
Дальність роботи	Не менше 10 км за умов прямої видимості (LOS); Можливість стабільної роботи при часткових перешкодах рельєфу.
Пропускна здатність	Для РЛС (радіомодем) 20–200 кбіт/с достатньо для передавання телеметрії. Для тепловізора (радіоміст): необхідна швидкість: 2–8 Мбіт/с, залежно від компресії відео (H.264/H.265).
Стійкість до перешкод	Підтримка Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) або OFDM; Захист від навмисних і ненавмисних радіоперешкод; Аналітика стану каналу.
Захищеність	Апаратне або програмне шифрування AES-128 / AES-256; Можливість встановлення власних ключів.
Режим роботи	Дуплексний канал для можливості керування PTZ-камерою і модулем РЛС; Автономна стабільність при виході одного з потоків.

Телеметрія РЛС має невеликий обсяг (до кількох десятків кілобайт за секунду), тому для її передавання оптимально використовувати вузькосмуговий радіомодем, що працює в діапазонах: 433 МГц, 868/915 МГц, або 1.3–1.4 ГГц. Перевагами вузькосмугових радіомодемів є: висока завадостійкість, низьке енергоспоживання, можливість прозорості передачі RS-422/485 без додаткових протоколів, дальність 10–20 км при потужності 1–5 Вт. Оскільки відеопотік значно «важчий» тип даних, тому потребує широкосмугового радіоканалу. Оптимальними є точка-точка радіомости у діапазоні 5 ГГц або 2.4 ГГц з високою спрямованістю антени.

Вимоги до радіомосту: пропускна здатність не менше 10 Мбіт/с; дальність до 10–15 км при спрямованих антенах 18–30 dBi; режим PTP (Point to Point) для мінімізації затримок; підтримка протоколів QoS для пріоритезації відео. Антени повинні бути спрямованими параболічними або секторними, що забезпечує високу завадостійкість та стабільність у польових умовах. В таблиці 3.13 проведено порівняння кандидатів.

Таблиця 3.13 — Таблиця порівняння кандидатів

Параметр	Ubiquiti airFiber 5U	MikroTik LHG XL HP5 (5 ГГц, high-power dish)	Satel EASy Pro
Призначення	відео + дані	високошвидкісне відео	телеметрія РЛС
Діапазон	5.8 ГГц	5 ГГц	300–470 / 868 МГц
Дальність	10–100 км	до 10–15 км	20–30 км
Пропускна здатність	100+ Мбіт/с	200–350 Мбіт/с (у реальних умовах 150–250 Мбіт/с)	38.4 кбіт/с
Антенa	вбудована 23 дБі	вбудована 27 дБі	вбудована 23 дБі
Підтримка RS-485	AES	AES	так
Температурний режим	–20...+60 °C	–20...+60 °C	–29...+63 °C
Захист	IP54	IP54	IP67 (NEMA 6)
Ціна	800–1200 USD	150–250 USD	700–1200 USD

3.8 Обґрунтований вибір конфігурації радіоканалу

З урахуванням вимог системи, оптимальною є гібридна конфігурація радіоканалу (рис. 3.5):

Для тепловізора (відеопотік) — Ubiquiti airFiber 5U

Так як він забезпечує необхідну пропускну здатність, працює стабільно на 10 км, має низьку затримку та підтримує захищений зв'язок та сумісний з Ethernet-виходом тепловізора [17].

Для РЛС (RS-422/485) — Satel EASy Pro (або аналогічний вузькосмуговий модем) Адже він призначений саме для серійних інтерфейсів, забезпечує велику дальність при низькому енергоспоживанні та стійкий до перешкод [18].

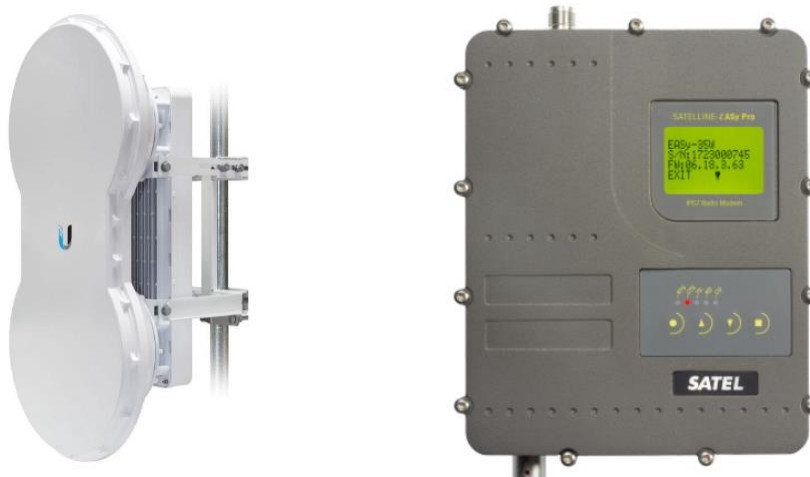


Рисунок 3.5 — Ubiquiti airFiber 5U (ліворуч), Satel EASy Pro (праворуч)

Причина вибору гібридного варіанту полягає в тому що, відео та телеметрія мають різні вимоги до пропускну здатності, тому оптимально передавати їх по різних каналах, що підвищує стабільність роботи та дозволяє використовувати обладнання, спеціалізоване під конкретний тип даних.

Радіоканал є критичним компонентом системи, що забезпечує рознесення сенсорного вузла та обчислювального центру. Для тепловізійного відеопотоку використовується широкосмуговий радіоміст 5.8 ГГц, який забезпечує стабільну роботу на 10 км. Для телеметрії РЛС застосовується вузькосмуговий радіомодем у суб-гігагерцовому діапазоні. Така розділена архітектура мінімізує взаємні перешкоди та підвищує живучість комплексу. Обрана апаратура відповідає вимогам автономності, мобільності та роботи у складних польових умовах.

У запропонованій конфігурації передбачається використання одного радіомосту для передавання відеопотоку від усіх тепловізійних камер та одного радіомодему для об'єднання телеметрії від декількох РЛС, що забезпечує оптимальний баланс між функціональністю та вартістю системи. Проте залежно від вимог замовника або умов застосування можливі різні варіації кількості передавального обладнання. У бюджетно-орієнтованих версіях доцільно об'єднувати кілька сенсорних вузлів у спільний радіоканал, використовуючи один радіоміст або один радіомодем на групу з двох-трьох приладів, що суттєво зменшує загальну вартість системи, зберігаючи достатній запас пропускної здатності для передавання відео та низькошвидкісної телеметрії. У системах підвищеної надійності, навпаки, можливе застосування окремого радіомосту й радіомодема для кожного сенсорного комплексу, що забезпечує рознесення каналів, мінімізує взаємні завади та підвищує живучість комплексу у випадку відмови одного з радіолінків. Таким чином, архітектура радіоканалу може масштабуватися у бік економічності або завадозахищеності без зміни базових принципів роботи системи.

3.9 Система живлення

Система живлення сенсорних та комунікаційних вузлів повинна забезпечувати автономну роботу комплексу у польових умовах,

підтримувати стабільну напругу для всіх модулів та гарантувати безперебійну роботу під час розгортання на відстані до 10 км від центра прийняття рішень. Оскільки сенсорний вузол містить тепловізійну камеру PTZ-типу, радіолокаційну станцію, радіомодеми та допоміжне обладнання, система живлення повинна бути мобільною, надійною та захищеною від зовнішніх впливів. Для виконання задач розвідки на близьких до лінії зіткнення дистанціях необхідно забезпечити безперебійну роботу сенсорних вузлів до 5 діб. Нижче, в таблиці 3.14 наведено основні вимоги.

Таблиця 3.14 — Основні вимоги до джерела живлення

Параметр	Вимога
Автономність	Сенсорний комплект має працювати без доступу до мережі не менше 120 годин, залежно від режиму застосування. Це критично для розгортання в умовах відсутності інфраструктури та при необхідності швидкої зміни позиції.
Стабільність напруги	РЛС « Барсук-А » — 12–24V DC, PTZ тепловізор — 12V або 24V DC, радіомодеми — 9–30V DC, радіомости — PoE 42–58 В DC; допоміжні вузли — 5–12V, Для цього застосовуються високоефективні DC–DC перетворювачі та PoE-інжектори, які забезпечують стабільну напругу без провалів і пікових перенапруг.
Захищеність	захист від короткого замикання; захист від перенапруги; термозахист; волого-та пилозахищений корпус (IP65).

Продовження таблиці 3.14

Мобільність	Один сенсорний комплект повинен перевозитися у легковому пікапі разом із штативами, антенами та кабелями. Тому масогабаритні характеристики акумуляторних станцій — критичні.
--------------------	---

3.10 Структура системи живлення сенсорного вузла

З урахуванням різного енергоспоживання вузлів система живлення реалізується у вигляді двох типів акумуляторних комплектів, оптимізованих під конкретні навантаження. Розрахуємо ємності необхідних акумуляторів за формулою:

$$E_{\text{ак}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot t}{\eta} \cdot K \quad (1.3)$$

Де $t = 120$ год - час роботи, $\eta = 0.90$ - втрати, $K = 1.25$ - запас на холод/старіння/піки, P_{Σ} - сумарна потужність.

1) Акумуляторний комплект для вузла “РЛС з радіомодемом”

Тоді потужність комплекту: $P_{\Sigma} = 8 + 13.6 = 21.6$ Вт, тоді $E_{\text{ак}} = 3.6$ кВт/год

Даний вузол характеризується відносно низьким середнім енергоспоживанням, оскільки телеметрія РЛС передається пакетами, а радіомодем працює в імпульсному режимі. Для забезпечення 5 діб безперервної роботи доцільно застосувати акумуляторний блок з такими характеристиками: хімічний склад — LiFePO_4 , потужність — близько 5 кВт·год; номінальна шина живлення — 24 В DC; DC–DC перетворювачі для живлення допоміжних модулів. Такий блок забезпечує повний запас енергії з урахуванням втрат, температурних факторів та деградації батареї.

2) Акумуляторний комплект для вузла “Тепловізор PTZ з радіомостом”

Потужність комплекту: $P_{\Sigma} = 50 + 40 = 90$ Вт, тоді $E_{\text{ак}} = 15$ кВт/год

Відеоканал тепловізора та ширококутовий радіоміст мають суттєво вищі вимоги до енергоспоживання, особливо при безперервній роботі. Для цього вузла застосовується LiFePO₄ батарейний комплект ~15 кВт·год з номінальною шиною живлення — 48 В DC та DC–DC перетворювачами для живлення камери (12/24 В). З метою зручності транспортування батарейний комплект реалізується модульно, у вигляді 3–4 однакових блоків по ~4.8 кВт·год кожен, які можуть паралельно підключатися.

3) Обчислювальний модуль, 2 радіомости та 2 радіомодеми.

Вирішено використовувати аналогічне живлення як і для РЛС з радіомодемом.

3.11 Програмна, фізична та функціональна інтеграція системи

Об'єднання компонентів мобільного радіолокаційного комплексу відбувається шляхом узгодження різних типів даних в одній обчислювальній системі. Радіолокаційна телеметрія передається від РЛС через радіомодем як послідовний потік RS-422/485. Тепловізійна камера створює цифровий відеопотік Ethernet, який через радіоміст надходить до того ж обчислювального модуля. Програми виконують початкове очищення даних, зчитують мітки часу, узгоджують радарну інформацію з відео та створюють узгоджені дані про ситуацію. Фізичне об'єднання забезпечується стандартними роз'ємами живлення (24 В та 48 В DC), однаковими мережевими з'єднаннями, звичайними місцями для кріплення сенсорів і використанням міцних корпусів. Це дає змогу швидко налаштувати систему, змінювати окремі частини без перебудови всієї системи та підтримувати роботу комплексу, якщо щось зламається.

3.12 Висновки до розділу

У цьому розділі проаналізовано сенсорні, комунікаційні, обчислювальні та енергетичні частини мобільної радіолокаційної системи, а

також вибрано обладнання для кожного. Основним радіолокаційним сенсором є РЛС Барсук-А, що дає потрібну дальність і точність виявлення при малих розмірах і сумісності з промисловими інтерфейсами RS-422/485. Для перевірки класифікації цілей використано тепловізійну PTZ-камеру Sheenrun, яка може працювати без допомоги інших пристроїв і передавати відео через Ethernet.

Для радіозв'язку використано гібридну систему, яка поєднує широкосмуговий радіоміст для відео та вузькосмуговий радіомодем для телеметрії РЛС, що дає високу пропускну здатність і захист від перешкод. Особливу увагу приділено живленню: запропоновано систему на основі LiFePO_4 акумуляторів із двома рівнями ємності — близько 5 кВт·год для вузлів з низьким споживанням і близько 15 кВт·год для відеосенсорних вузлів. Це забезпечує п'ятиденну безперервну роботу, мобільність, незалежність від генераторів і можливість розширення системи додаванням нових сенсорних вузлів. Узагальнюючи результати, запропонована конфігурація забезпечує повну сумісність усіх компонентів, високу автономність, мобільність та стійкість до зовнішніх перешкод. Система може бути швидко розгорнута в польових умовах, забезпечує передачу та обробку інформації в реальному часі та має потенціал до подальшого масштабування через додавання нових сенсорних вузлів і каналів зв'язку.

4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ, СИМУЛЯЦІЇ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РОБОТИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Алгоритм візуалізації роботи радіолокаційної системи є важливим етапом в дослідженні та розробці цього типу технологій. Візуалізація дозволяє операторам РЛС ефективно сприймати та аналізувати інформацію, необхідну для прийняття рішень в реальному часі та виконання поставлених завдань. У даному розділі розглядається алгоритм, які дозволяють візуалізувати роботу РЛС з точністю та реалістичністю. Почнемо з опису алгоритму побудови топографічної карти на основі контрольних точок. Далі буде розглянуто алгоритм симуляції роботи РЛС для виявлення цілей. Цей алгоритм дозволяє моделювати процес виявлення цілей та візуалізувати його результати. Ми розглянемо принципи роботи РЛС, розробимо відповідний алгоритм симуляції та візуалізуватимемо його результати для зручного сприйняття оператором. Генерації випадкових параметрів цілі. Ця частина алгоритму дозволяє створювати випадкові параметри цілей, такі як початкова позиція, швидкість, напрямок руху тощо. Ми розглянемо процес визначення параметрів цілі та перевіримо їх відповідність встановленим вимогам.

4.1 Підходи до інтеграції даних РЛС і геоінформації про місцевість

У цьому розділі розглядається питання поєднання радіолокаційних систем (РЛС) із геоінформаційними даними про місцевість. Під геоінформацією розуміють набір відомостей, що описують географічні та фізичні характеристики певної території. Об'єднання таких даних із радіолокаційною інформацією створює нові можливості для отримання детальних і всебічних знань про об'єкти та процеси у просторі. Метою розділу є ознайомлення з поняттям геоінформації про місцевість та з особливостями її інтеграції з РЛС. Розглядається, яким чином такі дані можуть підвищити ефективність радіолокаційного аналізу, уточнити визначення цілей і розширити навігаційні можливості систем.

Геоінформація про місцевість охоплює широкий набір характеристик, що описують просторові умови: координати, рельєф, гідрографічну структуру, типи ландшафту, наявність об'єктів та інфраструктури, які можуть бути важливими для орієнтації та навігації. Такі дані забезпечують контекст, що дозволяє краще розуміти взаємне розташування об'єктів у просторі та їхній вплив на довкілля.

Поєднання інформації РЛС з геоінформаційними даними має ключове значення для створення повної картини ситуації на місцевості. Радари надають відомості про параметри цілей — дальність, азимут, висоту та швидкість, тоді як геоінформація відображає топографічні та географічні особливості території. Інтегрування цих джерел дозволяє отримати значно ширший спектр даних і глибше розуміння ситуаційної обстановки. Наприклад, поєднання обох типів інформації дає можливість точніше визначати координати цілей, враховувати рельєф місцевості, який впливає на поширення сигналу, та створювати більш наочну і зрозумілу картину для операторів та аналітиків. Для цього можуть бути використані різні методи та підходи інтеграції радіолокаційних даних із геоінформацією.

Ось декілька з них:

1. Геопросторова база даних: використання спеціальної геопросторової бази даних дозволяє об'єднати дані РЛС та геоінформації у єдину структуру. Ця база даних зберігає географічні та топографічні дані разом з радіолокаційними параметрами цілей. Такий підхід дозволяє ефективно управляти та аналізувати дані, забезпечуючи інтегрований погляд на ситуацію.

2. API та інтегровані платформи: використання API (Application Programming Interface) та інтегрованих платформ дозволяє зв'язувати функціональність систем РЛС та геоінформації. Це дозволяє розробникам створювати спеціалізовані програмні додатки, які можуть взаємодіяти з обома типами даних і проводити комплексний аналіз і візуалізацію.

Стосовно технологій, стандартів та протоколів, які підтримують інтеграцію даних РЛС і геоінформації, наступні можуть бути використані:

1. *Географічні інформаційні системи (ГІС)*: Такі системи, як ArcGIS, QGIS, MapInfo і інші, надають інструменти для збору, зберігання, обробки та відображення географічних даних. Вони можуть бути інтегровані з системами РЛС для аналізу і візуалізації радіолокаційної інформації [8, 9].

2. *Web Mapping Services (WMS)*: Це протоколи, які дозволяють отримувати географічні дані через мережу Інтернет. За допомогою WMS, дані РЛС можуть бути інтегровані в веб-додатки, що дозволяє доступ до них з різних пристроїв та платформ.

3. *Сервіси геопроцесінгу*: Ці сервіси дозволяють виконувати геоінформаційний аналіз і обробку даних за допомогою веб-серверів. Вони можуть бути використані для обробки радіолокаційних даних та їх інтеграції з геоінформацією про місцевість. У контексті роботи, інтеграція даних РЛС і геоінформації про місцевість дозволить вам отримати більш повну та деталізовану інформацію, що відкриє нові можливості для аналізу сприйняття інформації. Використання даних РЛС дозволить виявити та ідентифікувати об'єкти та структури на місцевості, визначити їх географічні координати та вивчити зміни, що відбуваються з часом. Комбінування цих даних з геоінформацією дозволить вам побудувати детальну модель рельєфу, визначити розташування об'єктів та структур, а також здійснити аналіз та моніторинг змін місцевості [19, 20].

4.2 Особливості відображення інформації на інтерфейсі оператора РЛС

Ця модель не враховує вплив зовнішніх перешкод, тому використовується як базовий еталон для порівняння з іншими підходами. У цьому розділі розглядається один із ключових аспектів роботи радіолокаційних систем, що стосується візуалізації — спосіб подання даних

оператору. Значення ефективного відображення інформації полягає в тому, щоб забезпечити оператору швидкий і зручний доступ до необхідних даних, що дозволить своєчасно реагувати на зміни обстановки та приймати відповідні рішення.

У підрозділі описуються характеристики типової операторської панелі РЛС та аналізуються її сильні й слабкі сторони. Особливу увагу приділено відображенню тривимірної інформації, застосуванню умовних позначень, індикації шумів і завад, а також можливим шляхам удосконалення інтерфейсу для підвищення зручності роботи оператора.

Вивчення принципів подання даних на інтерфейсі оператора є важливим елементом покращення функціональності та результативності радіолокаційних систем. Результати такого аналізу можуть бути використані для подальшої оптимізації інтерфейсів з метою спрощення роботи оператора та підвищення точності прийняття рішень у системах РЛС.

У типовому інтерфейсі радару інформація подається так, щоб сформувати для оператора зрозумілу й упорядковану картину роботи системи. Головні елементи відображення включають:

- *радіальну сітку*: як правило, інтерфейс РЛС містить радіальну координатну сітку, яка дозволяє оператору визначати розташування цілей за азимутом і дальністю.

- *маркування цілей*: виявлені об'єкти показуються у вигляді піктограм чи умовних символів, що демонструють їхнє місцезнаходження та параметри. Символи можуть відрізнятися кольором або формою залежно від типу цілі (наприклад, літак, ракета, БПЛА).

- *індикацію висоти*: якщо РЛС визначає висоту цілей, відповідне значення відображається поруч із знаком цілі, що дозволяє оператору швидко оцінити її вертикальну позицію.

– *шумові та завадові індикатори*: спеціальні позначення відображають рівень шумів і перешкод, які впливають на якість радіолокаційних даних. Це дає змогу визначати достовірність поточної інформації.

– *стрілки та маркери руху*: інтерфейс може містити індикатори, що показують напрямок і швидкість руху цілей, що допомагає відслідковувати траєкторію та прогнозувати подальші дії об'єкта.

– *додаткові параметри*: інтерфейс може відображати допоміжні дані, такі як час виявлення, співвідношення сигнал/шум, сектор сканування та інші характеристики, що підвищують інформативність відображення.

Стандартний інтерфейс радіолокаційної станції створюється так, щоб оператор міг максимально швидко орієнтуватися у ситуації. Його головне завдання — надати ключові дані для прийняття рішень у режимі реального часу та для виконання завдань, пов'язаних з роботою РЛС.

Для підтримання прийняття рішень оператором інтерфейс повинен містити мінімальний набір важливих параметрів. Найважливішими серед них є координати цілей і відомості про їхній рух. З цієї причини переважна більшість радіолокаційних систем обмежується відображенням координатної (зазвичай радіальної) сітки та маркерів цілей у вигляді точок. Приклади таких інтерфейсів наведені на рисунках (рис. 4.1, 4.2)



Рисунок 4.1 — Приклад інтерфейсу оператора наземної РЛС



Рисунок 4.2 — Приклад інтерфейсу оператора РЛС літака

Проте відсутність даних про рельєф місцевості може спричинити низку наслідків, які ускладнюють роботу оператора радіолокаційної системи. Серед основних можливих проблем:

- *складність у виявленні перешкод*: без інформації про ландшафт оператору важко оцінити наявність природних або штучних перешкод — гір, западин, забудови чи лісових масивів. Їх неврахування може негативно позначатися на точності визначення координат і положення цілей.

- *помилкове трактування дистанцій та позицій*: брак даних про рельєф може призвести до неправильного розуміння фактичної відстані до цілі. Наприклад, гірські підвищення або низини здатні викривляти сприйняття дистанції, що впливає на точність оцінки обстановки.

- *затримка у виявленні цілей*: якщо об'єкт знаходиться у низині або за підвищенням, його відображення може з'явитися із запізненням через відсутність прямої видимості для РЛС.

Використання топографічної карти дозволяє компенсувати ці недоліки. Топографічне відображення є наочним способом подати інформацію про рельєф та характер місцевості. Інтеграція такої карти в інтерфейс РЛС забезпечує оператору додатковий просторовий контекст, допомагаючи

оцінювати природні та штучні елементи рельєфу, які впливають на дальність і точність радіолокаційного спостереження.

Топографічна інформація дозволяє оператору краще інтерпретувати відстані та положення об'єктів з урахуванням рельєфних особливостей. Наприклад, знання про наявність гори чи балки дозволяє оцінити, як ці перешкоди можуть впливати на траєкторію руху цілей, їхню здатність укриватися або змінювати маршрут. Це допомагає формувати більш достовірну ситуаційну картину, що сприяє точному та аргументованому прийняттю рішень.

Додавання рельєфних даних у вигляді топографічної карти в інтерфейс РЛС є важливим кроком у підвищенні зручності та результативності роботи оператора.

Окрім топографічних карт, рельєф може візуалізуватися на екрані системи й іншими способами, залежно від можливостей РЛС. Серед найпоширеніших:

- *триангуляційна сітка*: рельєф подається у вигляді набору трикутників, висоти яких відповідають реальним позначкам висот. Це створює плавну тривимірну поверхню або ізолінії.

- *штрихове відображення*: висоти показуються за допомогою штрихів або градієнтного затінення, що дозволяє швидко «зчитувати» перепади висот.

- *кольорова висотна карта*: рельєф позначається кольорами, де нижні відмітки подаються холодними відтінками, а більш високі — теплими.

Попри різноманіття методів, саме топографічна карта найчастіше є оптимальним варіантом з таких причин:

Простота: вона використовує контурні лінії, що легко сприймаються та забезпечують інтуїтивне розуміння структури рельєфу.

Невеликий обсяг інформації: така карта містить лише ключові дані, не перевантажуючи екран та не створюючи надмірної візуальної складності.

Надлишок інформації на екрані може становити значну проблему для оператора РЛС. Занадто деталізоване відображення призводить до візуального перенавантаження, ускладнює пошук важливих елементів і сповільнює аналіз. Крім того, надмірний обсяг інформації збільшує когнітивне навантаження, що негативно позначається на швидкості реакції та здатності приймати рішення.

Топографічна карта завдяки своїй простоті зменшує ці ризики: вона подає лише ключові відомості про рельєф, концентруючи увагу оператора на найважливішій інформації та підтримуючи високу оперативність у роботі.

4.3 Алгоритм обробки та відображення топографічної інформації

Для підвищення інформативності інтерфейсу оператора та коректної інтерпретації радіолокаційних даних у роботі використовується інтеграція РЛС з топографічною інформацією про місцевість. Це вимагає побудови точного алгоритму обробки картографічних та висотних даних, який забезпечує однозначне співпадіння центру радіолокаційного індикатора з географічним положенням РЛС і коректне масштабування просторових координат.

Алгоритм обробки топографічної інформації ґрунтується на таких етапах:

1) Задання вихідних координат РЛС.

На вході задаються географічні координати РЛС (широта та довгота у градусах). Ці координати надалі використовуються як центр усіх картографічних перетворень, а також як точка прив'язки радіолокаційної системи координат (полярні координати дальність–азимут) до площинної проєкції карти.

2) Формування параметрів зони відображення.

Виходячи з максимальної дальності огляду РЛС $R_{\max}$ та необхідного запасу по краях (для відображення рельєфу за межами радіус-покриття), визначається квадратна область місцевості, що підлягає відображенню. Її лінійні розміри у кілометрах обчислюються з урахуванням кривизни Землі, а межі задаються в географічних координатах відносно центра (РЛС).

3) Завантаження та зшивання картографічних тайлів.

Для описаної області місцевості завантажуються фрагменти базової карти (наприклад, растрові тайли онлайн-карти). Тайли підбираються за рівнем масштабу таким чином, щоб мінімальний розмір зшитого зображення по ширині або висоті був не меншим за розраховану зону відображення. Далі окремі тайли зшиваються в одне суцільне зображення, яке зберігається в оперативній пам'яті ПК для повторного використання без додаткових мережевих запитів.

4) Перетворення та нормалізація картографічного зображення.

Отримане зображення орієнтується так, щоб північ знаходилась у верхній частині екрана (установлюється відповідний напрямок осі Y). За необхідності застосовуються прості перетворення (негатив, зниження яскравості, корекція контрасту), які забезпечують хорошу видимість радарної сітки та символів цілей на фоні карти.

5) Побудова висотної моделі місцевості.

Паралельно з картографічною основою формується двовимірний масив висот на основі цифрової моделі рельєфу (DEM) або доступних висотних даних. Для цього географічні координати вузлів сітки проєктуються у ту саму площинну систему координат, що й карта, і кожній точці призначається значення висоти над рівнем моря. Результат зберігається у вигляді матриці висот, синхронізованої з картографічним зображенням.

6) *Калібрування радарної та картографічної систем координат.*

Ключовим етапом побудови візуалізації є забезпечення коректної просторової прив'язки радіолокаційних даних до картографічної основи, зокрема гарантування того, що проєкція точки з координатами РЛС, заданими в географічній системі координат, точно відповідає центру радарного індикатора у площинній системі координат відображення. Для цього використовується єдиний перетворювач координат. Для цього використовується єдиний перетворювач:

$$(\varphi, \lambda) \rightarrow (x, y)$$

Де x, y — координати в кілометрах відносно РЛС. Масштаб картографічного зображення підбирається таким чином, щоб одиниця виміру по осях відображення відповідала одному кілометру в реальному просторі, що забезпечує метричну узгодженість усіх шарів візуалізації. За такої побудови дані про цілі, задані в полярній системі координат (R, θ) , шляхом стандартного перетворення у декартову систему координат (x, y) відображаються в тому самому масштабі, що й топографічна та висотна інформація.

У результаті досягається повна узгодженість радарного індикатора з картографічною основою: центр радара точно співпадає з точкою розташування РЛС на карті, а положення цілей коректно відображається відносно рельєфу місцевості. Це дозволяє поєднувати радіолокаційні, висотні та геопросторові дані в єдиному координатному просторі без додаткових коригувальних перетворень.

7) *Формування двох топографічних представлень.*

На основі згаданих даних формуються два вихідні представлення:

- растрова карта місцевості як фон для першого радарного індикатора;

- псевдокольорова або градаційна карта висот (наприклад, у вигляді матриці інтенсивностей), яка використовується в другому індикаторі для аналізу рельєфу.

Блок схема наведена на рис. 4.3.

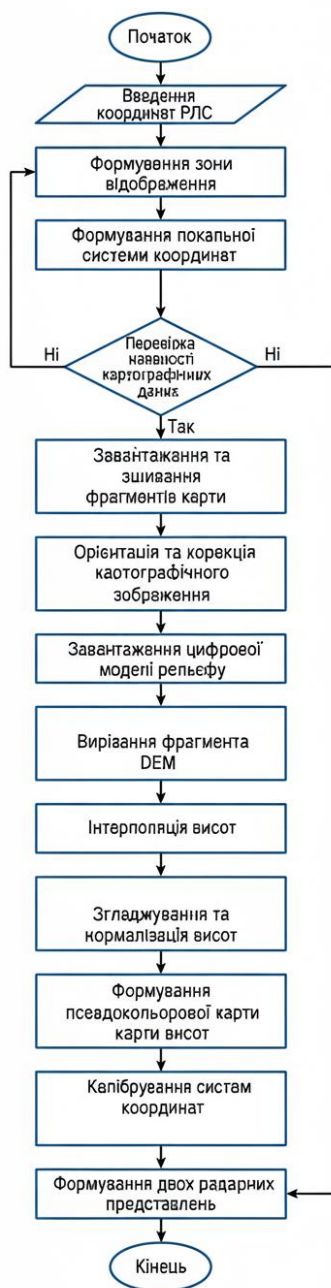


Рисунок 4.3 — Алгоритм візуалізації

4.4 Алгоритм симуляції роботи сенсорного блоку та передачі інформаційного потоку системи

Для відпрацювання алгоритмів відображення та оцінки навантаження на інтерфейс оператора в роботі використовується програмна симуляція сенсорного блоку. Симулюється робота РЛС із набором рухомих цілей різних типів, а також формування інформаційного потоку телеметрії, який в подальшому інтерпретується як дані реальної станції.

Математична модель руху цілей ґрунтується на таких припущеннях:

- 1) У зоні огляду РЛС одночасно присутня змінна кількість цілей (у деякому діапазоні від мінімальної до максимальної кількості);
- 2) Кожна ціль характеризується початковим положенням у площині (x_0, y_0) , курсом, швидкістю та класом (наприклад, «людина», «транспортний засіб», «плавзасіб», «пловець»);
- 3) Траєкторії цілей є гладкими кривими, утвореними шляхом послідовного оновлення положення з невеликими випадковими змінами курсу, що моделює реалістичну зміну напрямку руху.

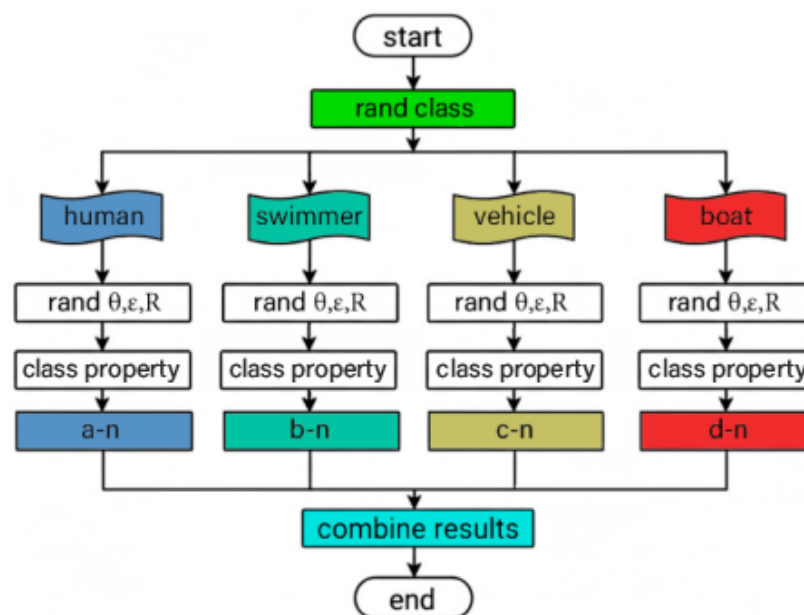


Рисунок 4.4 — Алгоритм симуляції цілей

Ключовою відмінністю від наявних моделей є введення обмежень на швидкість і прискорення залежно від класу цілі. Для кожного класу задається діапазон допустимих швидкостей, що відображає фізичні можливості об'єкта:

- 1) для цілей класу «людина» — невелика швидкість (кілька км/год) з обмеженою зміною координат між тактами;
- 2) для наземної техніки — вищі швидкості та більший радіус повороту;
- 3) для плавзасобів — менша середня швидкість, можливі паузи, детектування тільки в зонах вказаних як водойми;
- 4) для пловця — найменша швидкість і невеликий радіус дії.

Таким чином, на кожному кроці моделювання виконується:

- 1) оновлення курсу цілі з урахуванням невеликого випадкового повороту, обмеженого максимально допустимою кутовою швидкістю;
- 2) обчислення приросту координат Δx , Δy з використанням швидкості, що відповідає класу цілі;
- 3) перевірка, чи не вийшла ціль за межі зони огляду; у разі виходу виконується розворот або зміщення траєкторії;
- 4) можливе введення простих ефектів «зникнення/появи» цілей (наприклад, об'єкт виходить із зони і через певний час з'являється в іншому місці).

У результаті формується набір траєкторій, що є реалістичнішими з точки зору швидкості та плавності руху об'єктів для кожного класу.

Формування інформаційного потоку телеметрії - на виході моделі руху для кожного такту часу t_k формується кадр телеметрії, який містить дані про всі активні цілі у форматі, наближеному до реальної вихідної інформації РЛС. Для кожної цілі обчислюються:

- дальність до РЛС R_k ;

- азимут θ_k у градусах;
- кут місця ε ;
- радіальна швидкість або інші похідні параметри (за потреби);
- ідентифікатор класу цілі;
- часова мітка.

У термінах реалізації це може бути структурований масив або таблиця, але концептуально важливо, що дані представлені як послідовність кадрів інформаційного потоку, які надалі інтерпретуються модулем візуалізації як «телеметрія РЛС». У реальній системі цей потік надходив би через інтерфейс RS-422/485 або інший канал зв'язку; у моделі він формується програмно, але структура кадру зберігає сумісність із реальною системою.

4.5 Алгоритм обробки та візуалізації отриманих даних від РЛС

Алгоритм обробки та візуалізації отриманих даних об'єднує радіолокаційну телеметрію та відеоінформацію тепловізійної камери, формуючи для оператора цілісну картину ситуаційної обстановки.

Обробка та візуалізація радарних даних полягає в тому що на вході модуль візуалізації приймає послідовність кадрів телеметрії від сенсорного блоку (у реальній системі — від РЛС). Алгоритм перетворення і відображення даних включає такі операції:

1) Прийом і попередня обробка кадру.

З отриманого кадру виділяються параметри всіх актуальних цілей: дальність, азимут, клас, кут місця та інші допоміжні дані. За необхідності застосовується просте фільтрування (відкидання некоректних або явно аномальних значень).

2) Перетворення в декартову систему координат.

Для кожної цілі полярні координати (R, θ) переводяться у декартові (x, y) з урахуванням обраного масштабу (1 одиниця по осях відображення

відповідає одному кілометру в реальному просторі). Це забезпечує безпосередню сумісність із раніше підготовленими картографічними та висотними даними.

3) Оновлення історії треків.

До буфера для кожної цілі додається нова точка траєкторії. Довжина історії обмежується певною кількістю останніх відміток, що дозволяє відображати «хвіст» руху без надмірного навантаження на інтерфейс.

4) Візуалізація у двох радарних полях.

В одному графічному вікні відображаються два незалежних, але узгоджених радарних представлення:

перше поле — RPI-індикатор на фоні топографічної карти; на ньому візуалізується радарна сітка (кільця дальності, лінії азимутів), положення цілей та їхні траєкторії поверх картографічної основи;

друге поле — індикатор з урахуванням рельєфу, де як фон використовується карта висот. Для кожної цілі, окрім планових координат, можуть додатково відображатися кут місця та різниця між кутом місця й кутом, який задається висотою рельєфу у цьому напрямку. Це дозволяє оператору оцінювати взаємне положення цілей і місцевості (чи знаходиться ціль над рельєфом, у низині, за перешкодою тощо).

5) Формування легенди та додаткових індикаторів.

У вікні візуалізації також розміщується легенда, яка пояснює використані умовні позначення, зокрема форму та колір маркерів для кожного класу цілей, а також значення додаткових параметрів, що відображаються. До таких параметрів належать кут місця, різниця кутів та інші характеристичні ознаки, які використовуються для ідентифікації та аналізу цілей. За потреби у вікні можуть додатково відображатися часові мітки, масштаб дальності, параметри оновлення та інші службові дані, що

підвищують інформативність інтерфейсу та зручність роботи оператора під час аналізу поточної ситуації.

Результати продемонстровані на рис. 4.5

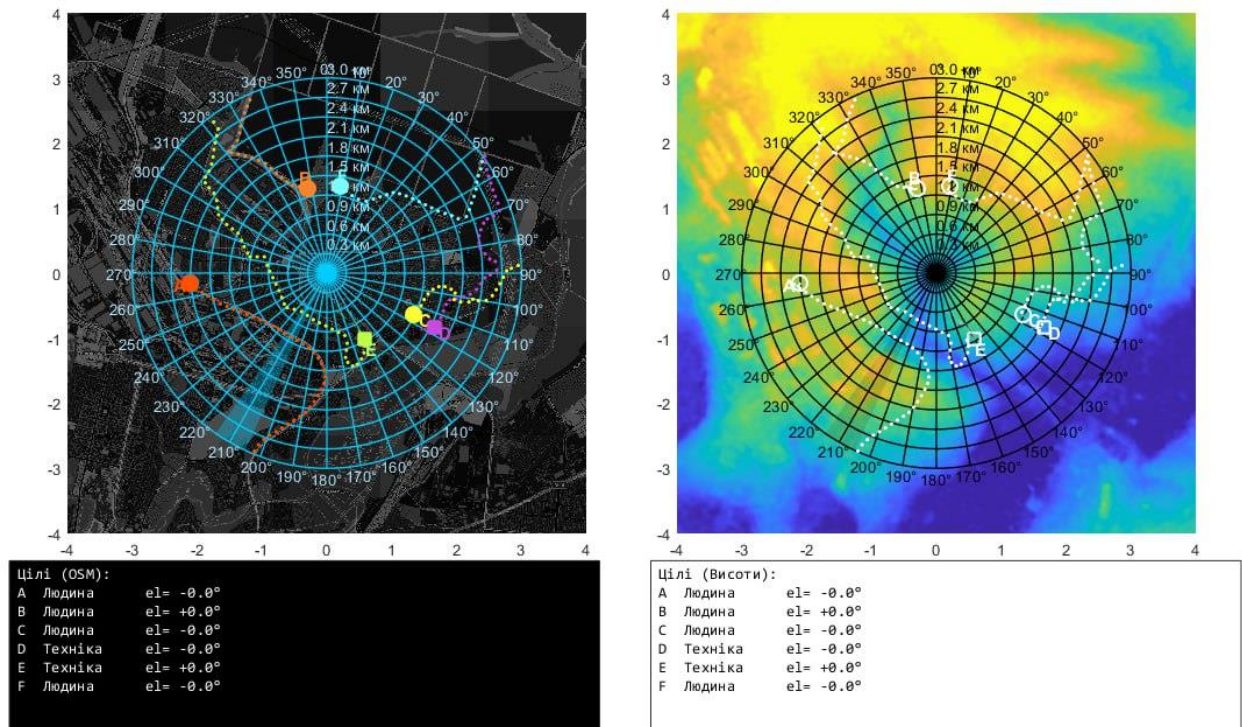


Рисунок 4.5 — Відображення радіолокаційної інформації

4.6 Обробка та відображення відеоданих тепловізора

Паралельно з радарним представленням в окремому вікні або панелі інтерфейсу виконується відображення відеопотоку тепловізійної камери.

Алгоритм роботи з відео включає:

Прийом відеопотоку від тепловізора - відеодані надходять до програмного модуля (у загальному випадку — по мережевому інтерфейсу з використанням стандартних протоколів передавання мультимедійного контенту).

Нормалізація параметрів відео - для забезпечення стабільного відображення всі кадри масштабуються до єдиного фіксованого розширення (у роботі використовується формат 640×512 пікселів). Це спрощує

компонування інтерфейсу, дозволяє уникнути зміни розмірів вікна при зміні джерела відео та зменшує навантаження на графічну підсистему.

Декодування й відображення кадрів - кадри відео декодуються й послідовно виводяться у відведену область екрану з фіксованою частотою оновлення (частота підбирається таким чином, щоб забезпечити плавне відтворення при прийнятній обчислювальній складності). За потреби можуть застосовуватися базові перетворення зображення (контраст, інверсія, накладання простих графічних елементів).

У підсумку оператор одночасно отримує два взаємодоповнюючі представлення: радарну картину з урахуванням рельєфу та топографії й візуальну інформацію з тепловізійної камери. Такий підхід підвищує рівень ситуаційної обізнаності, дозволяє уточнювати характер цілей за рахунок візуального підтвердження й оцінювати вплив місцевості на умови спостереження.



Рисунок 4.6 — Відображення інформації з тепловізору

4.7 Висновки до розділу

В данному розділі розроблено та реалізовано в Matlab алгоритми для імітації роботи сенсорних вузлів, обробки радіолокаційних даних та поєднання їх з інформацією про місцевість. Результатом роботи запропонованих програмних рішень є програми візуалізації інформації від РЛС та тепловізора у вигляді 2х радарів та потокового відеозображення. Два радарних вікна дублюють інформацію про цілі але відрізняються відображенням топографіної та висотної карт, що забезпечує більшу інформованість оператора про місцевість. Розроблено імітаційну модель руху цілей різних типів з параметрами, яка базується на об'єктивних особливостях та обмеженнях цілей.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

У даному розділі виконано аналіз запропонованої ідеї з точки зору практичної реалізації, технологічної здійсненності та потенціалу використання в реальних умовах. Розглянуто можливі напрямки застосування мобільної радіолокаційної системи, її конкурентні переваги, а також проведено технологічний аудит ідеї. На основі отриманих результатів зроблено висновки щодо доцільності реалізації проекту та його перспектив.

5.1 Опис ідеї проекту

Ідея стартап-проекту полягає у створенні мобільної радіолокаційної системи ближньої дії, що складається з малої РЛС, тепловізійної камери, приладів передачі даних по радіоканалу та спеціалізованого ПЗ для симуляції, обробки та візуалізації інформації. Система призначена для оперативного розгортання в польових умовах і забезпечує виявлення, супровід, розпізнавання та візуальне підтвердження цілей із урахуванням топографічних особливостей місцевості.

Основною відмінністю запропонованого рішення є поєднання сенсорних засобів із системою передачі інформації на відстань, що збільшить безпеку технічного персоналу. Також розроблено власний програмний комплекс, який дозволяє не лише відображати поточну ситуацію, а й моделювати роботу системи, що є важливим на етапі проєктування та навчання персоналу.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Мобільна РЛС з інтеграцією тепловізора та ПЗ для візуалізації	1. Військова та прикордонна розвідка	Мобільність, гнучкість, автономність системи та безпека особового складу

Продовження таблиці 5.1

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
	2. Охорона об'єктів та периметрів	Зменшення витрат на стаціонарні системи
	3. Моніторинг місцевості та інфраструктури	Підвищення достовірності ситуаційної обстановки
	4. Навчання та тренування персоналу	Можливість симуляції роботи РЛС без реальних приладів

Для оцінки конкурентних переваг ідеї проведено порівняльний аналіз із існуючими рішеннями. Прямі аналоги мобільних малих РЛС з інтегрованим програмним моделюванням представлені обмежено, тому для порівняння розглянуто системи стаціонарного або промислового класу та окремі програмні продукти для радіолокаційного аналізу. Основна увага приділялася рівню інтеграції апаратних і програмних компонентів, мобільності, гнучкості налаштувань та можливості попереднього моделювання роботи системи. В таблиці 5.2 проведемо аналіз сильних та слабких сторін ідеї. Отримані результати дозволяють обґрунтувати доцільність запропонованого підходу та визначити його потенційні переваги у задачах мобільного моніторингу і випробування алгоритмів обробки даних.

Найближчими конкурентами на світовому ринку є:

Конкурент 1 Blighter B202 / B303 — це приклад сучасного мобільного радару, який широко застосовується у сфері безпеки, але не має інтегрованого відео/тепловізора, та передачу здійснює тільки кабельною розв'язкою.

Конкурент 2 Ground Observer 12 — приклад тактичної радарної системи з великою дальністю, яка може доповнюватися зовнішніми сенсорами (напр., тепловізором), але не має такого «під ключ» у стандартній комплектації.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Запропоноване ПЗ / Конкурентні концепції			W	N	S
		Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2			
1	Мобільність	Висока	Висока	Середня		+	
2	Вартість реалізації	Низька	Висока	Висока			+
3	Мультисенсорність	Реалізована	Відсутня	Можлива			+
4	Інтеграція з ГІС	Реалізована	Часткова	Відсутня			+
5	Дистанційна передача/керування	Реалізована	Відсутня	Відсутня			+
6	Точність вимірювань	Середня	Висока	Висока	+		
7	Складність впровадження	Низька	Висока	Середня		+	

Де: W – (слабка сторона), N – (нейтральна сторона) а S – (сильна сторона).

Отримані результати свідчать, що запропонований проєкт має суттєві переваги за рахунок автономності, дистанційності, нижчої вартості та наявності програмного модуля симуляції, що робить його привабливим для практичного застосування.

5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

На етапі технологічного аудиту проаналізовано ключові технології, необхідні для реалізації запропонованої системи, а також оцінено їхню доступність і готовність до використання. Основну увагу приділено програмним алгоритмам, засобам обробки даних, геоінформаційним технологіям та методам візуалізації що наведено в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології їх реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Обробка радіолокаційних даних	Алгоритми обробки РЛС-сигналів	Наявні	Так
2	Інтеграція з топографічними даними	Геоінформаційні алгоритми	Наявні	Так
3	Симуляція руху цілей	Математичні моделі та симуляція	Потребує доопрацювання	Так
4	Візуалізація для оператора	Графічний інтерфейс користувача	Наявна	Так
5	Передача даних	Радіоканали та мережеві протоколи	Наявна	Так

Обрана технологія реалізації ідеї проєкту базується на використанні розробленого програмного забезпечення для симуляції, обробки та

візуалізації радіолокаційної інформації у поєднанні з доступними апаратними засобами малої РЛС і тепловізійної камери. Аналіз показує, що всі необхідні технології є доступними або потребують мінімального доопрацювання, що підтверджує технологічну здійсненність проєкту.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Для оцінки ринкових можливостей запуску запропонованого стартап-проєкту проведено попередній аналіз стану ринку мобільних радіолокаційних та сенсорних систем спостереження. Аналіз показує, що в умовах зростаючої потреби у мобільних, автономних і відносно недорогих засобах розвідки та моніторингу попит на подібні рішення має стійку тенденцію до зростання. Результати попередньої оцінки ринку наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Невелика
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Важко оцінити
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Часткові (технічні та нормативні)
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання вимог до РЕЗ, якості продукції та безпеки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідома

Отримані результати свідчать про те, що ринок характеризується відносно невеликою кількістю основних гравців і водночас демонструє

позитивну динаміку розвитку. Це створює передумови для виходу нового продукту за умови правильного позиціонування та орієнтації на конкретні потреби користувачів. Цільовими групами для впровадження мобільної радіолокаційної системи є організації та установи, діяльність яких пов'язана з моніторингом територій, охороною об'єктів і забезпеченням ситуаційної обізнаності. Характеристика потенційних клієнтів наведена в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
1	Оперативне виявлення та супровід цілей	Військові та прикордонні підрозділи	Надійність, мобільність, завадостійкість
2	Охорона об'єктів і периметрів	Охоронні та інфраструктурні організації	Автономність, простота розгортання
3	Моніторинг місцевості та ситуаційна обізнаність	Державні та спеціалізовані служби	Інтеграція з ГІС, зручний інтерфейс
4	Навчання та підготовка персоналу	Навчальні та дослідницькі установи	Можливість симуляції, наочність

Для більш повної оцінки перспектив реалізації стартап-проекту виконано аналіз потенційних ризиків, що можуть виникнути на етапах

впровадження та експлуатації системи. Основні фактори ризику та можливі реакції на них наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Фактори ризику

№ п/п	Фактор	Зміст ризику	Можлива реакція компанії
1	Технічні характеристики системи	Невідповідність заявленим параметрам	Додаткове тестування та доопрацювання
2	Завадостійкість	Вплив радіоперешкод на якість даних	Оптимізація алгоритмів обробки
3	Сертифікація	Складність отримання дозвільних документів	Адаптація до нормативних вимог

Поряд із ризиками проєкт має низку можливостей, які можуть бути використані для підвищення його конкурентоспроможності. Аналіз таких можливостей наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Модульність системи	Можливість адаптації під різні задачі	Конфігурація під потреби замовника
2	Програмна гнучкість	Розширення функцій через ПЗ	Оновлення та підтримка
3	Мобільність	Швидке розгортання в польових умовах	Орієнтація на тактичне застосування

Таким чином, проведений аналіз ринкових можливостей показує, що запропонований стартап-проєкт має потенціал для практичної реалізації та

подальшого розвитку. Поєднання мобільності, інтеграції сенсорних даних і спеціалізованого програмного забезпечення створює передумови для успішного виходу на ринок за умови мінімізації технічних ризиків і чіткого визначення цільової аудиторії. Також проведено аналіз пропозиції та визначено загальні особливості конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Аналіз конкурентного середовища

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Загальна	Більшість систем орієнтовані на вузькі задачі або стаціонарне застосування	Підвищення універсальності та гнучкості системи
Локальний ринок	Обмежена кількість прямих конкурентів	Адаптація функціоналу під конкретні задачі
Міжгалузева	Система може застосовуватись у різних сферах	Розширення функціоналу
Цінова	Вартість комплексних рішень є високою	Орієнтація на доступні та модульні конфігурації
Формування бренду	Відсутність усталених рішень у сегменті	Необхідність інвестицій у впізнаваність продукту

Основними факторами конкурентоспроможності запропонованого стартап-проєкту є відносно невелика кількість прямих конкурентів, дистанційність системи, а також унікальне поєднання апаратної частини з програмним забезпеченням для симуляції та візуалізації.

Для узагальненої оцінки позиції проєкту виконано SWOT-аналіз, результати якого наведені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Мобільність системи, модульність, наявність програмної симуляції, інтеграція з топографічними даними	Слабкі сторони: Потреба у фінансуванні, новизна продукту, необхідність доопрацювання алгоритмів
Можливості: Розширення функціоналу, використання нових сенсорів, адаптація під різні галузі	Загрози: Вимоги стандартів, складність сертифікації, поява більш досконалих рішень

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Для формування маркетингової концепції стартап-проєкту використано трирівневу модель товару, яка дозволяє чітко визначити сутність продукту, його основні характеристики та супровідні послуги. Результати подано в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Трирівнева маркетингова модель

Рівні товару	Сутність та складові
I. Продукт за задумом	Мобільна система виявлення та моніторингу цілей на основі малої РЛС та тепловізора
II. Продукт у реальному виконанні	Висока мобільність, модульна архітектура, інтеграція з топографічними даними, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс оператора
III. Товар із підкріпленням	Технічна підтримка, оновлення програмного забезпечення, адаптація під потреби замовника

Застосування даної моделі дозволяє чітко визначити цінність продукту для потенційних споживачів і сформулювати основу для подальшого просування стартап-проєкту.

5.5 Висновок до розділу

Запропонований стартап-проєкт мобільної радіолокаційної системи має високий потенціал практичного застосування в умовах зростаючої потреби у мобільних та автономних засобах спостереження. Поєднання малої РЛС, тепловізійної камери, дистанційного керування/передачі даних та спеціалізованого програмного забезпечення створює сильні переваги порівняно з конкурентами. Разом з тим існують фактори, які можуть ускладнити вихід проєкту на ринок, зокрема необхідність доопрацювання алгоритмів, забезпечення відповідності стандартам та залучення фінансових ресурсів. Подальший розвиток проєкту потребує розширення функціоналу, підвищення точності обробки даних і формування команди фахівців, що створює передумови для успішної комерціалізації системи.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У ході виконання науково-дослідної роботи (НДР) неминуче виникають певні виробничі фактори, котрі можуть становити загрозу для здоров'я дослідника. Тому метою цього розділу є чітке окреслення головних потенційних ризиків, пов'язаних із застосуванням комп'ютерної техніки під час проведення досліджень. Важливо ретельно оцінити умови праці на предмет їх відповідності чинним санітарним нормам і вимогам безпеки. Питання електробезпеки, як одного з ключових аспектів, заслуговує на особливу увагу. У цьому розділі буде представлено комплекс технічних та організаційних заходів, розроблених для гарантування безпечних умов праці, підтримки належної виробничої гігієни та суворого дотримання санітарних правил. Крім того, розглянемо важливі аспекти безпеки у випадку виникнення надзвичайних ситуацій, аби забезпечити готовність до будь-яких непередбачених обставин, особливо в умовах повітряних тривог та частих відключень електропостачання по всій Україні. В зв'язку з цим основна частина роботи над ДП проводилась в кабінеті підприємства.

6.1 Ідентифікація основних потенційно небезпечних і шкідливих факторів при виконанні науково-дослідної роботи

У процесі досліджень, спрямованих на розробку структури радіолокаційної системи та ПЗ для симуляції та візуалізації результатів радіолокаційного спостереження, широко застосовується персональний комп'ютер із використанням пакету програмного забезпечення Matlab. Під час роботи з комп'ютером дослідник може піддаватися впливу різних видів випромінювань, зокрема іонізуючого, інфрачервоного та ультрафіолетового. Важливо наголосити, що рівні цих випромінювань повинні неухильно відповідати вимогам Державних санітарних правил і норм (ДСанПіН 3.3.2.007-98) щодо роботи з дисплеєм комп'ютера. Зокрема, граничний рівень рентгеновського випромінювання не повинен перевищувати 100 мкР/год, а

інтенсивність електромагнітного випромінювання у радіочастотному діапазоні – значення 10 Вт/м^2 . Окрім випромінювань, на працездатність та загальний стан організму можуть впливати й інші несприятливі фактори, такі як параметри мікроклімату – температура, вологість і швидкість руху повітря. Нерідко у офісних приміщеннях спостерігається підвищена концентрація вуглекислого газу та озону порівняно з нормальним атмосферним повітрям. Штучне освітлення також може становити певний ризик, оскільки відсутність достатньої кількості біологічно активної ультрафіолетової складової у спектрі ламп (особливо при тривалому перебуванні) може призводити до ультрафіолетової недостатності, ослаблення імунітету та зниження бактерицидних властивостей шкіри. Недостатнє освітлення збільшує навантаження на очі, що призводить до втоми та зниження концентрації. Протягом усього циклу проектних робіт можуть виникати різноманітні небезпечні та шкідливі фактори. Серед них:

1) Ризик ураження електричним струмом, що вимагає суворого дотримання правил електробезпеки та використання захисних засобів.

2) Вплив електромагнітних полів, який може негативно позначатися на нервовій та серцево-судинній системах.

3) Підвищений рівень шуму, що може призводити до погіршення слуху та підвищеної стомлюваності. Рівень шуму має бути досліджений та за можливості зменшений до прийнятних значень. Особливу негативну динаміку створює шум від дизельного генератора під вікном офісу, який працює під час блекаутів.

4) Невідповідність освітлення встановленим нормам, що може викликати зоровий дискомфорт, головний біль та зниження працездатності. Особливо це стосується тривалих періодів відключень енергопостачання коли доводиться обходитись настільними лампами.

5) Несприятливі мікрокліматичні умови (висока або низька температура, підвищена вологість), які можуть негативно впливати на загальне самопочуття та імунітет.

6) Імовірність виникнення пожежі, що вимагає наявності ефективних засобів пожежогасіння та суворого дотримання правил протипожежної безпеки.

7) Значні психофізіологічні навантаження, пов'язані з інтенсивною розумовою діяльністю та тривалою роботою за комп'ютером, що можуть призводити до стресу та вигорання.

8) Нераціональна організація робочого місця, зокрема неправильне розташування обладнання та відсутність ергономічних меблів, що може викликати дискомфорт, біль у спині та інші проблеми зі здоров'ям.

Важливо, щоб робоче місце було обладнане з урахуванням індивідуальних потреб працівника. Враховуючи всі ці фактори, необхідно розробити та впровадити комплекс заходів для мінімізації ризиків та забезпечення безпечних і комфортних умов праці під час виконання науково-дослідної роботи.

6.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії на робочих місцях

Магістерська дисертація готувалася та була оформлена в офісі на підприємстві. Фізично офіс розташований на третьому поверсі семиповерхової будівлі. Просторові характеристики офісу такі: його довжина становить 16 метрів, ширина – 9 метрів, а висота сягає 3 метри. З огляду на це, загальна площа офісу становить 144 квадратних метри. При організації простору для роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ), електронно-обчислювальними машинами (ЕОМ) та персональними електронно-обчислювальними машинами (ПЕОМ), обов'язково враховуються вимоги нормативних документів. Зокрема, йдеться про будівельні норми і

правила СНиП 2.09.04-87 Административные и бытовые здания та Державні санітарні правила і норми ДСанПіН 3.3.2.007-98. Згідно з цими нормативами, заборонено облаштування таких робочих місць у підвальних або цокольних приміщеннях. Також слід уникати розташування поблизу джерел інтенсивного шуму і вібрації, таких як механічні майстерні. Неприпустимим є розміщення в приміщеннях з підвищеною вологістю, вибухонебезпечністю або пожежонебезпечністю (категорій А і Б), а також безпосередньо над або під ними. Санітарні норми чітко визначають мінімальні вимоги до площі та об'єму приміщення, що припадають на одне робоче місце.

На кожне робоче місце має бути виділено не менше 6 квадратних метрів площі та не менше 20 кубічних метрів об'єму, враховуючи максимальну кількість осіб, які можуть одночасно перебувати в приміщенні. У розглянутому приміщенні ці показники значно перевищують встановлені мінімуми. За умови максимальної кількості 9 осіб, що одночасно працюють в офісі, на одного працівника припадає приблизно 18 квадратних метрів робочої площі ($144 \text{ м}^2 / 8 \text{ осіб}$) та 54 кубічних метри об'єму ($432 \text{ м}^3 / 8 \text{ осіб}$). Таким чином, просторові параметри офісу не лише відповідають, але й перевищують вимоги нормативних санітарних і ергономічних документів. Це створює комфортні та безпечні умови для здійснення науково-дослідної роботи, що позитивно позначається на продуктивності та якості роботи працівників. Дотримання цих вимог є суттєвим фактором для забезпечення здоров'я та безпеки праці в робочому приміщенні.

6.2.1 Електробезпека

Ураження електричним струмом зазвичай трапляється у двох випадках: коли людина торкається струмопровідних частин електрообладнання, або коли людина торкається металевих частин, які опинились під напругою через пошкодження ізоляції або інші проблеми.

Під час роботи над дипломним проєктом я використовував комп'ютер І та ІІ класу захисту, який працює від мережі 220 В. Щоб правильно визначити

заходи захисту, треба враховувати допустимі значення напруги дотику та струму, який може пройти через тіло людини. Напруга дотику – це різниця потенціалів між двома точками, до яких людина одночасно торкається в електричному колі. Допустимі значення напруги та струму для різних режимів роботи електроустановок вказані в «Правилах улаштування електроустановок» (ПУЕ-2017), таблиця 6.1.

Таблиця 6.1 – Гранично допустимі значення напруги доторкання

$U_{\text{доп.дот.}} \text{ (В)}$	$t, \text{ (с)}$
500	до 0.1
400	0.2
200	0.5
130	0.7
100	0.9
65	1 - 5 с

Відповідно до ПУЕ-17, ключові технічні засоби для гарантування безпеки праці охоплюють: якісну ізоляцію, захисне заземлення, занулення, захисне відключення та індивідуальні засоби захисту. У трифазних мережах із заземленою нейтраллю, типових для офісів, основними засобами захисту є надійна ізоляція струмопровідних частин електрообладнання (згідно з вимогами ДСТУ ІЕС 61140.2015) та занулення (з'єднання відкритих провідних частин із заземленою нейтраллю). Для переносного обладнання потрібне спеціальне заземлення. Захист в електроустановках регулюється ДБН В.2.5.-27-2006 табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Максимальний час вимкнення живлення

Значення U_0 , (В)	Максимальний час вимкнення t , (с)	
	За постійним струмом	За змінним струмом
$50 < U_0 \leq 120$	відсутній	0.8
$120 < U_0 \leq 230$	5	0.4
$230 < U_0 \leq 400$	0.4	0.2
$U_0 \geq 400$	0.1	0.1

6.2.2 Розрахунок захисного відключення електромережі в аварійному режимі роботи обладнання

Для оцінки умов електробезпеки виконаємо розрахунок струму короткого замикання у фазному проводі та перевіримо працездатність захисного відключення. Струм КЗ визначається за формулою:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_0 + R_{\text{ф}} + Z_{\text{тр}}} \quad (6.1)$$

де $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$ - напруга фазного проводу;

$R_0 = 2 \text{ Ом}$ - опір нульового проводу;

$R_{\text{ф}} = 8 \text{ Ом}$ - опір фазного проводу;

$Z_{\text{тр}} \cong 0.2 \text{ Ом}$ - еквівалентний опір трансформатора.

$$I_{\text{кз}} = \frac{220}{2+8+0.2} \quad (6.2)$$

Струм спрацювання автоматів максимального струмового захисту з електромагнітним розпилювачем повинен бути в 1.4 рази менше струму короткого замикання при струмі до 100 А.

$$I_{\text{спр}} = \frac{21.779}{1.4} = 15.41 \text{ А} \quad (6.3)$$

Отже, струм спрацювання автоматичного вимикача має бути меншим за 15.4 А. Обчислимо напругу дотику до корпусів електрообладнання у разі короткого замикання.

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{кз}} R_0 = 21.569 \cdot 3 = 64.7 \text{ В} \quad (6.4)$$

Згідно з ПУЕ-17 (таблиця 6.1), щоб напруга була безпечною, автомати захисту мають спрацювати швидше, ніж за 0.9 секунди. Встановлені в офісі автомати відповідають цій вимозі ($I_{\text{спр}} < 15.4 \text{ А}$, $T_{\text{спр}} < 0.9 \text{ с}$). Сучасні автомати в робочому приміщенні також відповідають вимогам, оскільки мають струм спрацювання 10 А і час спрацювання $\leq 0.1 \text{ с}$. Розрахунки показують, що в приміщенні основним захистом від ураження струмом є занулення та автомати захисту.

6.2.3 Мікроклімат робочої зони

Мікроклімат на виробництві залежить від температури повітря, вологості, швидкості руху повітря, інтенсивності тепла та температури поверхонь на робочому місці. Щоб створити нормальний мікроклімат, існують Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. Вони визначають, якими мають бути оптимальні та допустимі параметри мікроклімату залежно від пори року та виду роботи. В таблиці 6.3 показані оптимальні та допустимі значення для робіт категорії Іа (сидяча робота, яка не вимагає великих фізичних зусиль, з витратою енергії не більше 120 ккал/годину).

Таблиця 6.3 – Оптимальні й допустимі параметри (для постійного робочого місця) мікроклімату в приміщенні.

Параметри	Холодний період		Теплий період	
	оптимальні	допустимі	оптимальні	допустимі
Температура °С	22-24	21-25	23-25	22- 28
Відносна вологість, %	40-60	80	40-60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1-0,2

Для підтримки комфортної температури протягом року в кімнаті встановлено 2 чавунні батареї з шести секцій, що під'єднані до центрального опалення, а також кондиціонер. Природна вентиляція, разом з вікном і кватиркою, допомагає регулювати якість повітря. Варто зазначити, що шкідливі речовини в приміщенні відсутні. Показники мікроклімату в робочій зоні відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042–99.

6.2.4 Виробничий шум

Допустимі шумові характеристики на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 і перелічені в таблиці 6.4. Серед зовнішніх чинників, що створюють шум, можна виділити генератор, який використовується під час відключень електроенергії, та близькість офісу до автомобільної дороги. У приміщенні джерелами шуму є комп'ютери, принтер, телефонні апарати, розмови співробітників тощо. Характер шуму варіюється: він може бути постійним тональним від комп'ютерів або непостійним імпульсним від телефонних дзвінків.

Таблиця 6.4 – Допустимі шумові характеристики на робочих місцях

	Рівні звукового тиску (дБ) в октавних смугах з середньо геометричними частотами, Гц								
	31.5	63	125	250	500	100	2000	4000	8000
Рівні звуку, дБА	86	71	61	54	49	45	42	40	38

На робочих місцях допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку й еквівалентні рівні звуку регулюються згідно з вимогами ДНАОП 0.00-1.31-99 та ДСН 3.3.6.037-99. Зазвичай, в офісі загальний рівень звуку не повинен бути вищим за 50 дБА, але підчас роботи генератора тільки від нього на третій поверх через склопакет лунає шум близько 49 дБ. Щоб захистити приміщення від шуму, що створюється внутрішніми джерелами на робочих місцях, згідно з ДСН 3.3.6.037-99, потрібно зменшувати шум безпосередньо в його джерелі, продумувати планування простору та використовувати звукоізоляційні матеріали для акустичної обробки приміщення, виправити ситуацію можна перенесенням генератор або використовувати звукоізоляційний кожух.

6.3 Технічні рішення та організаційні заходи з виробничої безпеки на робочих місцях користувачів ВДТ ПЕОМ

6.3.1 Вимоги до освітлення робочих місць користувачів

Для комфортної та продуктивної роботи за комп'ютером, освітлення має бути достатнім, рівним і стабільним, відповідати санітарним нормам та враховувати специфіку завдань. У приміщеннях з комп'ютерами потрібне як природне, так і штучне освітлення. Природне світло має становити не менше 1,5 % (згідно з ДБН В.2.5-28-2006). Штучне освітлення повинно бути загальним і рівномірним. Додаткові світильники дозволені для роботи з

документами, але вони не повинні створювати відблиски на екрані чи надмірно освітлювати монітор (не більше 300 лк). Освітленість в зоні документів має бути 300–500 лк.

В основному, для штучного освітлення використовують люмінесцентні лампи ЛБ. У системах відбитого освітлення можна використовувати металогалогенні лампи (250 Вт), а для локального освітлення – лампи розжарювання. Світильники загального освітлення розміщують збоку від робочих місць, паралельно напрямку зору. Якщо комп'ютери стоять по периметру, світильники встановлюють над кожним робочим місцем. Світильники повинні мати розсіювачі або екрановані решітки. Кут захисту світильника – не більше 40° , а яскравість не повинна перевищувати 200 кд/м^2 в певних кутах. Коефіцієнт запасу освітлення – 1,4, а пульсація світла – не більше 5 %. Яскравість відблисків на екрані – до 40 кд/м^2 , а яскравість стелі при відбитому освітленні – до 200 кд/м^2 . Яскравість робочих зон повинна бути розподілена рівномірно (не більше 3:1), а яскравість об'єктів у полі зору – не більше 5:1. Освітлення має регулюватися по зонах та інтенсивності залежно від природного світла. Для підтримки нормального освітлення потрібно чистити світильники та вікна мінімум двічі на рік і вчасно міняти лампи.

6.3.2 Організація оптимального режиму праці та відпочинку при використанні комп'ютера

ДСанПіН 3.3.2.007-98, або Державні санітарні норми і правила для роботи з візуальними дисплейними терміналами, описує, як зробити працю з комп'ютерами безпечнішою. Дотримання цих правил може зменшити шкідливий вплив комп'ютерів та ризик проблем із зором, стресу та серцево-судинних захворювань. Для зручного читання, екран має бути прямо перед очима. Монітор має повертатися на $\pm 30^\circ$ та нахилитися вперед до 85° і назад до 105° . Клавіатуру слід ставити на відстані 100–300 мм від краю столу, з кутом нахилу 5–15°, щоб руки не втомлювалися під час друку. Комп'ютери

слід ставити на відстані 1,5 м від стіни з вікнами та 1 м від інших стін, з відстанню 1,5 м між робочими місцями. Світло має падати збоку (краще зліва), а щоб не було відблисків, використовуйте жалюзі. Для освітлення використовуйте люмінесцентні лампи типу ЛБ. Освітлення має відповідати стандарту ДСТУ ISO 9241-6:2004. Яскравість залежить від розміру об'єктів, кольору фону та контрасту. Важливо, щоб освітлення було рівномірним, без тіней і відблисків, і залишалося стабільним протягом робочого дня.

Згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98, після кожної години роботи з комп'ютером потрібно робити 10-хвилинну перерву. Щоб зняти стрес і втому очей, рекомендуються спеціальні вправи для поліпшення кровообігу мозку та запобігання перевтомі.

6.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях (БНС) регулюється через План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС). Важливим аспектом ПЛАС є розробка технічних та організаційних дій для своєчасного інформування персоналу, налагодження евакуації та визначення порядку дій працівників у випадку надзвичайної ситуації. У цьому розділі представлені основні положення з пожежної безпеки, як складової БНС.

6.4.1 Вимоги до організації системи оповіщення персоналу

Оповіщення працівників при надзвичайних ситуаціях, включно з пожежами, відбувається згідно з вимогами НАПБ А.01.003–2009. Рішення про встановлення певної системи оповіщення (СО) у виробничих приміщеннях приймається на основі ДБН В.1.1–7–2016, додаток Е. Проектуючи СО, будівлю ділять на зони інформування, враховуючи структуру приміщень, евакуаційні шляхи та поділ на протипожежні частини. Розміри зон, черговість та час активації повідомлень встановлюються так, щоб забезпечити безпечну та своєчасну евакуацію людей.

Оповіщення та керування евакуацією може відбуватися через:

- звукові або світлові сигнали;
- текстові повідомлення з інформацією чи інструкціями;
- повідомлення, націлені на запобігання паніці;
- розміщення евакуаційних знаків згідно з ДСТУ ISO 6309;
- евакуаційне освітлення та покажчики руху;
- віддалене відкриття дверей евакуаційних виходів;
- зв'язок диспетчера з окремими зонами.

Зазвичай СО вмикається автоматично, отримавши сигнал від систем пожежної сигналізації або пожежогасіння. Також, потрібно забезпечити можливість увімкнення СО вручну з поста чергового персоналу для швидкої реакції на будь-яку надзвичайну ситуацію.

Система має визначати пріоритетність повідомлень: I пріоритет – голосові повідомлення диспетчера під час пожежі чи іншої надзвичайної ситуації; II пріоритет – запрограмовані автоматичні повідомлення для надзвичайних ситуацій; III пріоритет – службові повідомлення.

Повідомлення з нижчим пріоритетом мають блокуватися у разі потреби. СО повинна транслювати різні повідомлення у різні зони та дозволяти пряме мовлення через мікрофон.

У багатоповерхових будівлях порядок оповіщення такий: поверх, де виникла пожежа; поверхи вище; поверхи нижче.

Час затримки для інформування визначається розрахунками за ГОСТ 12.1.004 та додатком 2 ДБН В.1.1–7–2016, враховуючи потоки людей на евакуаційних шляхах. Якщо будівля поділена на протипожежні відсіки, СО має вмикатися одночасно для всього відсіку, де почалася пожежа.

6.4.2 Обов'язки та дії персоналу при надзвичайній ситуації

При виявленні ознак надзвичайної ситуації працівник повинен:

- 1) негайно повідомити ДСНС та пожежну охорону (адреса, кількість поверхів, місце загоряння, люди, дані);
- 2) повідомити адміністрацію або керівника підрозділу;
- 3) інформувати інших працівників;
- 4) організувати евакуацію людей та майна;
- 5) за можливості, почати ліквідацію наслідків наявними засобами.

Керівництво та пожежна охорона підприємства після отримання повідомлення про надзвичайну ситуацію повинні:

1. перевірити, чи викликано ДСНС;
2. вимкнути, за потреби, струм та вентиляцію;
3. організувати евакуацію людей з небезпечної зони;
4. слідкувати за оповіщенням персоналу;
5. забезпечити дотримання техніки безпеки;
6. зустріти ДСНС та допомогти в локалізації загрози.

Після приїзду рятувальників, потрібно забезпечити їм доступ до місця надзвичайної ситуації.

6.4.3 Пожежна безпека

У робочому приміщенні дотримуються вимоги НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки України». Через велику кількість горючих матеріалів (дерево, пластмаса, гума, папір), офіс є пожежонебезпечним приміщенням категорії В згідно з ДСТУ Б.В.1.1-36:2016. Згідно з ПУЕ-2017, робочі зони приміщення відносяться до класу П-Па – пожежонебезпечні зони з твердими горючими речовинами. Пожежа може виникнути через пошкодження ізоляції проводів, коротке замикання, неправильне використання електроприладів або куріння. Щоб зменшити ризики,

застосовуються запобіжники в електромережі, пилонепроникні коробки та регулярні інструктажі з пожежної безпеки.

Згідно з вимогами ДСТУ 3675-98, ГОСТ 12.4.009-75 та ISO 3941-77, данне приміщення має два вогнегасники: вуглекислотний «ВУ-5» та порошковий «ВП-2». Вуглекислотний вогнегасник знаходиться на висоті 1,5 м біля вихідних дверей. У коридорі є пожежний кран з рукавом і вогнегасник «ВХП-2». Також, у приміщенні є телефони з номерами для виклику пожежної охорони. Отже, в офісі є технічні та організаційні заходи для підтримання пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі успішно виконано задачу розробки архітектури мобільної розподіленої радіолокаційної системи ближньої дії та програмного забезпечення для симуляції та візуалізації результатів її роботи. Запропонована система, працюючи автономно до 5-ти днів, виявляє транспортні засоби на відстані 3 км, а людей на відстані 1.5 км та передає інформацію про цілі на відстань понад 10 км. Важливість таких систем зумовлена великою потребою в компактних, автономних і недорогих системах спостереження. Вони повинні швидко здійснювати розвідку і формувати інформаційний потік про обстановку та передавати його операторам у віддалені пункти управління. В свою чергу інтерфейс візуалізації отриманої інформації має бути зрозумілим і зручним для оператора.

Проаналізувавши наявні мобільні комплекси наземного спостереження, запропоновано більш гнучку, дешеву та розгалужену архітектуру системи. У ній сенсорні вузли можуть бути розташовані на відстані один від одного і працювати разом. Це відрізняється від наявних систем, які побудовані за централізованою схемою з одним сенсорним постом. Такий підхід робить систему більш стійкою до ушкоджень, гнучкою та пристосованою до різних умов місцевості.

Запропонована архітектура складається з комплектів малих радіолокаційних станцій та тепловізійних камер, а також засобів передачі по радіоканалу інформації на обчислювальний модуль. Для цього було здійснено підбір апаратних компонентів. Фізичне рознесення сенсорних вузлів між собою та віддаленість від вузла обробки дозволяє знизити ризики, як для технічного персоналу, так і для системи в цілому, яка зможе функціонувати допоки останній сенсорний вузол не буде виведено з ладу або знищено.

Для візуалізації роботи системи в середовищі MATLAB розроблено та реалізовано програмні алгоритми імітації сенсорних вузлів, обробки радіолокаційних даних і їх інтеграції з геопросторовою інформацією. Результатом є програмний комплекс відображення даних від РЛС і тепловізійної камери у вигляді двох радарних індикаторів та потокового відеозображення. Радарні вікна відображають однакову цільову інформацію, але відрізняються використанням топографічної та висотної карт, що підвищує інформативність інтерфейсу оператора щодо рельєфу місцевості. Реалізовано імітаційну модель руху цілей різних типів, параметри якої враховують кінематичні обмеження, характерні швидкості та особливості маневрування.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції радіолокаційних, оптико-електронних та геоінформаційних даних у межах єдиної мобільної системи, а також у реалізації алгоритмів імітації та візуалізації ситуаційної обстановки. Запропоновано підхід до одночасного відображення кількох радарних полів з урахуванням рельєфу місцевості та даних тепловізійного спостереження, що підвищує інформативність інтерфейсу оператора.

Практична цінність роботи полягає в можливості використання розробленої архітектури та програмного забезпечення для створення мобільних радіолокаційних комплексів. Модульна структура системи забезпечує її подальше вдосконалення шляхом заміни або розширення сенсорних і комунікаційних модулів без зміни базової архітектури, що дозволяє підвищувати дальність виявлення, точність і завадостійкість.

Отримані результати підтверджують доцільність обраного підходу та створюють основу для подальших досліджень у напрямках автоматичної класифікації цілей, підвищення завадостійкості та інтеграції з іншими системами спостереження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ярошенко В. О. Основи радіолокації : навч. посіб. / В. О. Ярошенко. — Київ : НТУУ «КПІ», 2012. — 256 с. — ISBN 978-966-622-476-0 с. 9—42.
2. HENSOLDT AG. TRML-4D Multi-Functional Surveillance and Target Acquisition Sensor System [Electronic resource]. — 2022. — 20 p. — Режим доступу: <https://www.hensoldt.net>
3. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems / M. I. Skolnik. — Singapore : McGraw-Hill, Inc., 1981. — 590 p. — (McGraw-Hill Book Co. — Singapore).
4. Grundlagen der Radartechnik [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu>
5. Pulsed vs. CW Signals: Both Loom on a Designer's Radar [Electronic resource]. — Microwave RF. — Режим доступу: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849213/pulsed-vs-cw-signals-both-loom-on-a-designers-radar>
6. Адаменко Ю. Ф., Первак С. Г. Радіолокаційні системи : підручник /Ю. Ф. Адаменко, С. Г. Первак. — Київ : НТУУ «КПІ», 2016. — 412 с. — ISBN 978-966-622-735-8 с. 45—118.
7. Радіолокаційні системи – SPEXER™ 2000 [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/05.perimeter/karte005.uk.html> (дата звернення: 01.11.2025).
8. SR HAWK™ Ground Surveillance Radar [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/05.perimeter/pubs/Radars-and-Sensors-SRHawkV2E.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
9. A422 Deployable Radar System [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://blighter.com/resources/a422-deployable-radar-system/> (дата звернення: 01.11.2025).
10. РЛС «БАРСУК-А» [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://ust.com.ua/item/rls-barsuk-a-2/> (дата звернення: 05.10.2025).
11. DS-2TD4638-25A4/W – Security Thermal Camera [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://hikvision.co.ua/hikvision-ds-2td2138-25qy/> (дата звернення: 12.11.2025).
12. China Sheenrun Infrared Sensor Network Thermal Camera [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://shandongsheenrun.en.made-in-china.com/product/RnsUWXlOZpYN/China-China-Sheenrun-Infrared-Sensor->

[Network-Thermal-Camera-Cooled-Thermal-Camera-PTZ.html](#) (дата звернення: 12.11.2025).

13. TPC-PT8421A – Dahua Thermal Camera [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.dahuasecurity.com/products/All-Products/Discontinued-Products/Thermal-Cameras/TPC-PT8421A> (дата звернення: 12.11.2025).

14. Box PC / Waterproof Rugged PC IP65 [Electronic resource]. — Режим доступу: https://www.winmate.com/en/ProductCategory/Detail/Box_PC (дата звернення: 12.11.2025).

15. UNO-2484G Industrial Computer [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.advantech.com/en-us/products/1-2mlj9a/uno-2484g> (дата звернення: 12.11.2025).

16. Getac B360 Pro Rugged Laptop [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.getac.com/intl/products/laptops/b360-pro/> (дата звернення: 12.11.2025).

17. Ubiquiti AirFiber 5 GHz Point-to-Point Radio System [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.wifishop.nl/p/ubiquiti-airfiber-access-point-5-ghz-33280> (дата звернення: 12.11.2025).

18. SATELLINE-EASy Pro Radio Modem [Electronic resource]. — Режим доступу: <https://www.satel.com/support-and-services/discontinued-products/satellite-easy-pro/> (дата звернення: 12.11.2025).

19. Geographic Information Systems and Science. — London : IntechOpen, 2019. — 171 p.

20. Bolstad P. GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems / P. Bolstad. — White Bear Lake, MN : Eider Press, 2016. — 640 p.

ДОДАТОК А

```

function RadarPPI-UA()

rMax_km    = 3;

nRangeRings = 10;

azStep_deg = 10;

sweepSpeed = 20;    % град/с

maxTargets = 10;

classNames = {'Техніка','Людина','Плавзасіб','Пловець'};

classMarkers = {'s','o','d','^'};

gridColor_L = [0 0.8 1];

labelColor_L = [0.7 0.9 1];

gridColor_R = [0 0 0];

labelColor_R = [0 0 0];

trackColor_R = [1 1 1];

simOpts = struct( ...

    'minActive', 3, ...

    'maxActive', min(7,maxTargets), ...

    'measNoise_m', 2, ...

    'azNoise_deg', 0.08, ...

    'elNoise_deg', 0.05 ...

);

halfSide = rMax_km + 1;

topo = prepareTopographyUA(); % просить координати РЛС

```

```

if ~isfield(topo,'heightX_km') && isfield(topo,'x_km'), topo.heightX_km =
topo.x_km; end

if ~isfield(topo,'heightY_km') && isfield(topo,'y_km'), topo.heightY_km =
topo.y_km; end

fig = figure('Name','Radar PPI (OSM + Height)','Color','w','NumberTitle','off');
tlo = tiledlayout(fig,1,2,'Padding','compact','TileSpacing','compact');

axL = nexttile(tlo,1);

hold(axL,'on'); axis(axL,'equal');

set(axL,'Color','k','YDir','normal');

axis(axL,[-halfSide halfSide -halfSide halfSide]);

axR = nexttile(tlo,2);

hold(axR,'on'); axis(axR,'equal');

set(axR,'Color','w','YDir','normal');

axis(axR,[-halfSide halfSide -halfSide halfSide]);

if isfield(topo,'mapRgb') && ~isempty(topo.mapRgb) && isfield(topo,'x_km') &&
isfield(topo,'y_km')

    image(axL, topo.x_km, topo.y_km, topo.mapRgb);

end

if isfield(topo,'heightRgb') && ~isempty(topo.heightRgb) &&
isfield(topo,'heightX_km') && isfield(topo,'heightY_km')

    image(axR, topo.heightX_km, topo.heightY_km, topo.heightRgb);

end

drawGrid(axL, rMax_km, nRangeRings, azStep_deg, gridColor_L, labelColor_L);

drawGrid(axR, rMax_km, nRangeRings, azStep_deg, gridColor_R, labelColor_R);

```

```

beamPatchL = patch(axL, [0 0 0], [0 0 0], [0 0.8 1], ...
    'FaceAlpha',0.35,'EdgeColor','none');

beamPatchR = patch(axR, [0 0 0], [0 0 0], [0 0 0], ...
    'FaceAlpha',0.12,'EdgeColor','none');

targetL = gobjects(maxTargets,1);
trackL = gobjects(maxTargets,1);
labelL = gobjects(maxTargets,1);
targetR = gobjects(maxTargets,1);
trackR = gobjects(maxTargets,1);
labelR = gobjects(maxTargets,1);
trackHistory = cell(maxTargets,1);
colors = lines(maxTargets);

legendL = annotation(fig,'textbox',[0.02 0.02 0.46 0.18], ...
    'String','', 'FitBoxToText','off', ...
    'EdgeColor',[0.2 0.2 0.2], 'BackgroundColor',[0 0 0], ...
    'Color',[1 1 1], 'FontName','Consolas', 'FontSize',10);

legendR = annotation(fig,'textbox',[0.52 0.02 0.46 0.18], ...
    'String','', 'FitBoxToText','off', ...
    'EdgeColor',[0.2 0.2 0.2], 'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Color',[0 0 0], 'FontName','Consolas', 'FontSize',10);

beamAz_deg = 0;

prevTime = tic;

while ishandle(fig)

```

```

dt = toc(prevTime);

prevTime = tic;

beamAz_deg = mod(beamAz_deg + sweepSpeed*dt, 360);

beamWidth = 5;

az1 = beamAz_deg - beamWidth;

az2 = beamAz_deg + beamWidth;

[x1,y1] = pol2cart_deg(az1, rMax_km);

[x2,y2] = pol2cart_deg(az2, rMax_km);

set(beamPatchL,'XData',[0 x1 x2],'YData',[0 y1 y2]);

set(beamPatchR,'XData',[0 x1 x2],'YData',[0 y1 y2]);

detections = simulateRadarTargetsUA(maxTargets, rMax_km, dt, simOpts);

linesLegend = strings(0,1);

for i = 1:maxTargets

    if ~isfinite(detections(i,1))

        hideTarget(i, targetL, trackL, labelL, targetR, trackR, labelR);

        continue

    end

    r = detections(i,1);

    az = detections(i,2);

    el = detections(i,3);

    cls = detections(i,4);

    if r > rMax_km

        r = rMax_km - 0.01;

```

```

elseif r < 0

    r = 0;

end

[xT,yT] = pol2cart_deg(az, r);

if hypot(xT,yT) > rMax_km + 1e-6

    hideTarget(i, targetL, trackL, labelL, targetR, trackR, labelR);

    continue

end

trackHistory{i} = appendTrack(trackHistory{i}, xT, yT, 6000);

idxCls = min(max(1, round(cls)), 4);

labelChar = char('A' + i - 1);

[xLab,yLab] = offsetLabel(xT,yT,r,0.18);

baseColor = colors(i,:);

trackColorL = min(1, baseColor*1.2);

brightColor = min(1, baseColor*1.6);

trackL(i) = upsertTrack(axL, trackL(i), trackHistory{i}, trackColorL, '--',
1.2);

targetL(i) = upsertMarker(axL, targetL(i), xT, yT, classMarkers{idxCls},
brightColor, true);

labelL(i) = upsertLabel(axL, labelL(i), xLab, yLab, labelChar, brightColor);

trackR(i) = upsertTrack(axR, trackR(i), trackHistory{i}, trackColor_R, '-',
1.2);

targetR(i) = upsertMarker(axR, targetR(i), xT, yT, classMarkers{idxCls},
trackColor_R, false);

```

```

        labelR(i) = upsertLabel(axR, labelR(i), xLab, yLab, labelChar,
trackColor_R);

        elStr = sprintf('%+5.1f°', el);

        linesLegend(end+1,1) = string(sprintf('%s %-10s el=%s', ...
            labelChar, classNames{idxCls}, elStr));
    end

    if isempty(linesLegend)

        legendL.String = "Цілі (OSM): (немає)";

        legendR.String = "Цілі (Висоти): (немає)";

    else

        legendL.String = "Цілі (OSM):" + newline + join(linesLegend,newline);

        legendR.String = "Цілі (Висоти):" + newline + join(linesLegend,newline);

    end

    drawnow limitrate;

end

end

function drawGrid(ax, rMax_km, nRangeRings, azStep_deg, gridColor,
labelColor)

dr = rMax_km / nRangeRings;

th = linspace(0, 2*pi, 400);

for r = dr:dr:rMax_km

    x = r * sin(th);

    y = r * cos(th);

```

```

    plot(ax, x, y, 'Color',gridColor, 'LineWidth',1.0);
end

for az = 0:azStep_deg:350

    [xEnd, yEnd] = pol2cart_deg(az, rMax_km);

    plot(ax, [0 xEnd], [0 yEnd], 'Color',gridColor, 'LineWidth',1.0);
end

for r = dr:dr:rMax_km

    text(ax, 0, r, sprintf('%.1f км', r), 'Color',labelColor, ...

        'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom');
end

for az = 0:azStep_deg:350

    [xt, yt] = pol2cart_deg(az, rMax_km*1.05);

    text(ax, xt, yt, sprintf('%d°', az), 'Color',labelColor, ...

        'HorizontalAlignment','center');
end

end

function [x, y] = pol2cart_deg(az_deg, r)

% 0° = північ (вісь Y вгору), азимут за годинниковою

x = r .* sind(az_deg);

y = r .* cosd(az_deg);

end

function hist = appendTrack(hist, xT, yT, maxPts)

```

```

if isempty(hist)

    hist = [xT; yT];

else

    hist = [hist [xT; yT]];

end

if size(hist,2) > maxPts

    hist = hist(:, end-maxPts+1:end);

end

end

function h = upsertTrack(ax, h, hist, color, ls, lw)

if ~isgraphics(h)

    h = plot(ax, hist(1,:), hist(2,:), ls, 'Color',color,'LineWidth',lw);

else

    set(h,'XData',hist(1:,:), 'YData',hist(2:,:), 'Color',color, 'LineStyle',ls, 'LineWidth',lw);

end

end

function h = upsertMarker(ax, h, x, y, marker, color, filled)

if ~isgraphics(h)

    if filled

        h = plot(ax, x, y, marker,

'Color',color,'MarkerFaceColor',color,'MarkerSize',10,'LineWidth',1.5);

    else

```

```

        h = plot(ax, x, y, marker,
'Color',color,'MarkerFaceColor','none','MarkerSize',10,'LineWidth',1.6);

        end

    else

        if filled

            set(h,'XData',x,'YData',y,'Marker',marker,'Color',color,'MarkerFaceColor',color);

        else

            set(h,'XData',x,'YData',y,'Marker',marker,'Color',color,'MarkerFaceColor','none');

        end

    end

end

end

function h = upsertLabel(ax, h, x, y, s, color)

if ~isgraphics(h)

    h = text(ax, x, y, s, 'Color',color, 'FontWeight','bold', ...

        'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','middle','FontSize',11);

else

    set(h,'Position',[x y 0],'String',s,'Color',color,'Visible','on');

end

end

function [xL,yL] = offsetLabel(xT,yT,r,offset_km)

rNow = max(r, 0.001);

dx = offset_km * (xT / rNow);

```

```

dy = offset_km * (yT / rNow);

xL = xT + dx;

yL = yT + dy;

end

function hideTarget(i, targetL, trackL, labelL, targetR, trackR, labelR)

if isgraphics(targetL(i)); set(targetL(i),'XData',nan,'YData',nan); end

if isgraphics(trackL(i)); set(trackL(i),'XData',nan,'YData',nan); end

if isgraphics(labelL(i)); set(labelL(i),'Visible','off'); end

if isgraphics(targetR(i)); set(targetR(i),'XData',nan,'YData',nan); end

if isgraphics(trackR(i)); set(trackR(i),'XData',nan,'YData',nan); end

if isgraphics(labelR(i)); set(labelR(i),'Visible','off'); end

end

```

ДОДАТОК Б

```

function detections = simulateRadarTargetsUA(maxTargets, rMax_km, dt, opts)

if nargin < 4, opts = struct(); end

if ~isfield(opts,'minActive'), opts.minActive = 3; end

if ~isfield(opts,'maxActive'), opts.maxActive = min(7,maxTargets); end

if ~isfield(opts,'measNoise_m'), opts.measNoise_m = 2; end

if ~isfield(opts,'azNoise_deg'), opts.azNoise_deg = 0.08; end

if ~isfield(opts,'elNoise_deg'), opts.elNoise_deg = 0.05; end

persistent st cfg initDone

if isempty(initDone)

    rng('shuffle');

    cfg = classConfigSmooth();

    st = initStateFixed(maxTargets, rMax_km, cfg, opts);

    initDone = true;

end

desiredN = randi([opts.minActive opts.maxActive]);

st = ensureActiveFixed(st, desiredN, rMax_km, cfg);

st = stepFixed(st, rMax_km, dt, cfg);

detections = nan(maxTargets,4);

for i=1:maxTargets

    cls = st.cls(i);

    detections(i,4) = cls;

    if ~st.active(i)

```

```

        continue

    end

    x = st.pos(i,1);

    y = st.pos(i,2);

    r = hypot(x,y);

    az = atan2d(x,y);

    r = r + (opts.measNoise_m/1000)*randn();

    az = az + opts.azNoise_deg*randn();

    el =    opts.elNoise_deg*randn();

    if r < 0, r = 0; end

    if r > rMax_km, r = rMax_km - 0.01; end

    detections(i,1) = r;

    detections(i,2) = mod(az,360);

    detections(i,3) = el;

end

end

function cfg = classConfigSmooth()

cfg(1) = mk( 5, 55,  0.9,  3.0,  7.0, 7.0); % техніка

cfg(2) = mk( 2, 7,  0.35, 4.0,  6.0, 6.0); % людина

end

function c = mk(vmin_kmh, vmax_kmh, amax_ms2, wmax_deg_s, tau_w, tau_a)

c.vmin_kmh = vmin_kmh;

c.vmax_kmh = vmax_kmh;

```

```

c.amax_ms2 = amax_ms2;

c.wmax_deg_s = wmax_deg_s;

c.tau_w = tau_w;

c.tau_a = tau_a;

end

function st = initStateFixed(maxTargets, rMax_km, cfg, opts)

st.active = false(maxTargets,1);

st.cls = zeros(maxTargets,1);

st.pos = zeros(maxTargets,2); % km

st.heading = zeros(maxTargets,1); % rad

st.v_kms = zeros(maxTargets,1); % km/s

st.turn_deg_s = zeros(maxTargets,1);

st.acc_ms2 = zeros(maxTargets,1);

for i=1:maxTargets

    st.cls(i) = randi([1 2]);

    st = spawnAt(i, st, rMax_km, cfg);

end

N0 = randi([opts.minActive min(opts.maxActive,maxTargets)]);

st.active(1:N0) = true;

end

function st = ensureActiveFixed(st, desiredN, rMax_km, cfg)

cur = nnz(st.active);

if cur < desiredN

```

```

    idx = find(~st.active);

    addN = min(desiredN-cur, numel(idx));

    st.active(idx(1:addN)) = true;

elseif cur > desiredN

    idx = find(st.active);

    dropN = cur - desiredN;

    st.active(idx(end-dropN+1:end)) = false;

end

function st = spawnAt(i, st, rMax_km, cfg)

r0 = (0.10 + 0.75*rand()) * rMax_km;

az0 = 360*rand();

[x0,y0] = pol2cart_deg_local(az0, r0);

st.pos(i,:) = [x0 y0];

st.heading(i) = 2*pi*rand();

c = cfg(st.cls(i));

v0_kmh = randRange(c.vmin_kmh, c.vmax_kmh);

st.v_kms(i) = v0_kmh/3600;

st.turn_deg_s(i) = (2*rand()-1)*0.5*c.wmax_deg_s;

st.acc_ms2(i) = (2*rand()-1)*0.2*c.amax_ms2;

end

function st = stepFixed(st, rMax_km, dt, cfg)

idx = find(st.active);

for k=1:numel(idx)

```

```

i = idx(k);

c = cfg(st.cls(i));

turnRaw = ouStep(st.turn_deg_s(i), 0, c.tau_w, dt, 0.10*c.wmax_deg_s);

accRaw = ouStep(st.acc_ms2(i), 0, c.tau_a, dt, 0.12*c.amax_ms2);

alpha = exp(-dt/1.4);

st.turn_deg_s(i) = alpha*st.turn_deg_s(i) + (1-alpha)*turnRaw;

st.acc_ms2(i) = alpha*st.acc_ms2(i) + (1-alpha)*accRaw;

st.turn_deg_s(i) = clamp(st.turn_deg_s(i), -c.wmax_deg_s, c.wmax_deg_s);

st.acc_ms2(i) = clamp(st.acc_ms2(i), -c.amax_ms2, c.amax_ms2);

v_ms = st.v_kms(i)*1000;

v_ms = v_ms + st.acc_ms2(i)*dt;

v_kmh = v_ms*3.6;

v_kmh = clamp(v_kmh, c.vmin_kmh, c.vmax_kmh);

st.v_kms(i) = v_kmh/3600;

st.heading(i) = wrapTo2Pi(st.heading(i) + deg2rad(st.turn_deg_s(i))*dt);

dx = st.v_kms(i) * sin(st.heading(i)) * dt;

dy = st.v_kms(i) * cos(st.heading(i)) * dt;

st.pos(i,:) = st.pos(i,:) + [dx dy];

rNow = hypot(st.pos(i,1), st.pos(i,2));

if rNow > rMax_km

    st.pos(i,:) = st.pos(i,:) * ((rMax_km-0.02)/max(rNow,1e-6));

    st.heading(i) = wrapTo2Pi(st.heading(i) + pi + deg2rad((2*rand()-1)*10));

    st.turn_deg_s(i) = 0.6*st.turn_deg_s(i);

```

```

    end

end

end

function x = ouStep(x, mu, tau, dt, sigma)

if tau <= 0, x = mu; return; end

x = x + ((mu - x)/tau)*dt + sigma*sqrt(max(dt,0))*randn();

end

function v = clamp(v,a,b), v = min(max(v,a),b); end

function v = randRange(a,b), v = a + (b-a)*rand(); end

function ang = wrapTo2Pi(ang), ang = mod(ang,2*pi); end

function [x, y] = pol2cart_deg_local(az_deg, r)

x = r .* sind(az_deg);

y = r .* cosd(az_deg);

end

```

ДОДАТОК В

```

function topo = prepareTopographyUA()
RMAX_KM = 3;
HALF_SIDE = RMAX_KM + 1;
DESIRED_MIN_SPAN_KM = 2*HALF_SIDE;
coordStr = input('Координати РЛС (lat, lon) = ', 's');
v = sscanf(coordStr,'%f , %f');
if numel(v)~=2
    error('Формат: 48.918573, 38.243628');
end
lat0=v(1); lon0=v(2);
baseDir = fileparts(mfilename('fullpath'));
cacheDir = fullfile(baseDir,'cache');
demDir = fullfile(baseDir,'dem');
if ~exist(cacheDir,'dir'); mkdir(cacheDir); end
if ~exist(demDir,'dir'); mkdir(demDir); end
Re = 6371;
ll2xy = @(lat,lon) deal( ...
    Re*cosd(lat0).*deg2rad(lon-lon0), ...
    Re*deg2rad(lat-lat0) );
xy2ll = @(x,y) deal( ...
    lat0 + rad2deg(y/Re), ...
    lon0 + rad2deg(x./(Re*cosd(lat0))) );
latKey = round(lat0,5); lonKey = round(lon0,5);
basePad = 1;
[zoomBase, ~, ~] = chooseZoomBySpan(lat0, lon0, basePad,
DESIRED_MIN_SPAN_KM);
zoom = min(18, zoomBase + 1);
pad = basePad;
[widthX_km, heightY_km] = spanForZoomPad(lat0, lon0, zoom, pad);

```

```

while min(widthX_km, heightY_km) < DESIRED_MIN_SPAN_KM && pad < 4
    pad = pad + 1;
    [widthX_km, heightY_km] = spanForZoomPad(lat0, lon0, zoom, pad);
end
key = sprintf('lat%.5f_lon%.5f_zoom%d_pad%d', latKey, lonKey, zoom, pad);
mapPng = fullfile(cacheDir, [key '_map.png']);
metaMat = fullfile(cacheDir, [key '_meta.mat']);
tileServer = 'https://tile.openstreetmap.org/%d/%d/%d.png';
userAgent = 'RadarStudentProject/1.0 (contact@example.com)';
timeout_s = 12;
if exist(mapPng,'file') && exist(metaMat,'file')
    mapRgb = imread(mapPng);
    metaS = load(metaMat); meta = metaS.meta;
    widthX_km = meta.widthX_km;
    heightY_km = meta.heightY_km;
else
    [mapRgb, meta] = fetchAndStitchTiles(lat0, lon0, zoom, pad, tileServer,
userAgent, timeout_s);

    mapRgb = flipud(mapRgb);
    mapRgb = uint8(255 - mapRgb);
    mapRgb = uint8(double(mapRgb) * 0.5);
    meta.widthX_km = widthX_km;
    meta.heightY_km = heightY_km;
    try
        imwrite(mapRgb, mapPng);
        save(metaMat,'meta');
    catch
    end
end
end

```

```

maxDim = 2600;
if max(size(mapRgb,1), size(mapRgb,2)) > maxDim
    scale = maxDim / max(size(mapRgb,1), size(mapRgb,2));
    newH = max(512, round(size(mapRgb,1)*scale));
    newW = max(512, round(size(mapRgb,2)*scale));
    mapRgb = resizeRgbBilinear(mapRgb, newH, newW);
end
x_km = linspace(-widthX_km/2, widthX_km/2, size(mapRgb,2));
y_km = linspace(-heightY_km/2, heightY_km/2, size(mapRgb,1));
halfX = widthX_km/2;
halfY = heightY_km/2;
[latMin,lonMin] = xy2ll(-halfX, -halfY);
[latMax,lonMax] = xy2ll(+halfX, +halfY);
latLo=min(latMin,latMax); latHi=max(latMin,latMax);
lonLo=min(lonMin,lonMax); lonHi=max(lonMin,lonMax);

files = dir(fullfile(demDir,'DEM_ukraine_*.tif'));
if isempty(files)
    error('Не знайдено DEM_ukraine_*.tif у папці /dem');
end

lonPts = [];
latPts = [];
zPts = [];
for k=1:numel(files)
    fn = fullfile(files(k).folder, files(k).name);
    [A, Rg] = readGeoRasterCompat(fn);
    A = double(A);
    if ~isprop(Rg,'LatitudeLimits') || ~isprop(Rg,'LongitudeLimits')

```

```

        error('DEM %s не geographic GeoTIFF (немає
LatitudeLimits/LongitudeLimits).', files(k).name);
    end
    nR=size(A,1); nC=size(A,2);
    lats = linspace(Rg.LatitudeLimits(2), Rg.LatitudeLimits(1), nR); % north->south
    lons = linspace(Rg.LongitudeLimits(1), Rg.LongitudeLimits(2), nC);
    r1=find(lats<=latHi,1,'first');
    r2=find(lats>=latLo,1,'last');
    c1=find(lons>=lonLo,1,'first');
    c2=find(lons<=lonHi,1,'last');
    if isempty(r1)||isempty(r2)||isempty(c1)||isempty(c2)
        continue
    end
    subA = A(r1:r2, c1:c2);
    subLat = lats(r1:r2);
    subLon = lons(c1:c2);
    [LON, LAT] = meshgrid(subLon, subLat);
    lonPts = [lonPts; LON(:)];
    latPts = [latPts; LAT(:)];
    zPts = [zPts; subA(:)];
end
if isempty(zPts)
    error('Жоден DEM не перекриває область OSM-покриття.');
```

```

end
m = isfinite(lonPts) & isfinite(latPts) & isfinite(zPts);
lonPts = lonPts(m); latPts = latPts(m); zPts = zPts(m);
[Xkm, Ykm] = meshgrid(x_km, y_km);
[latQ, lonQ] = xy2ll(Xkm, Ykm);
F = scatteredInterpolant(lonPts, latPts, zPts, 'natural', 'nearest');
height_m = F(lonQ, latQ);

```

```

height_m = gaussianBlur2D(double(height_m), 1.8);
idx = heightToIndex(height_m, 256);
cmap = parula(256);
heightRgb = uint8(255*ind2rgb(idx, cmap));
topo.lat0=lat0; topo.lon0=lon0;
topo.rMax_km=RMAX_KM; topo.halfSide_km=HALF_SIDE;
topo.ll2xy_km=ll2xy;
topo.xy2ll=xy2ll;
topo.mapRgb = mapRgb;
topo.height_m = height_m;
topo.heightRgb = heightRgb;
topo.x_km = x_km;
topo.y_km = y_km;
topo.heightX_km = x_km;
topo.heightY_km = y_km;
end
function [bestZoom, bestW, bestH] = chooseZoomBySpan(lat0, lon0, pad,
desiredMinSpan_km)
    bestZoom = 10; bestSpanMin = -inf; bestW = NaN; bestH = NaN;
    for zoom = 10:18
        [wKm, hKm] = spanForZoomPad(lat0, lon0, zoom, pad);
        spanMin = min(wKm, hKm);
        if spanMin >= desiredMinSpan_km && (bestSpanMin < desiredMinSpan_km
|| spanMin < bestSpanMin)
            bestSpanMin = spanMin; bestZoom = zoom; bestW = wKm; bestH = hKm;
        end
        if bestSpanMin < desiredMinSpan_km && spanMin > bestSpanMin
            bestSpanMin = spanMin; bestZoom = zoom; bestW = wKm; bestH = hKm;
        end
    end
end

```

end

```
function [widthX_km, heightY_km] = spanForZoomPad(lat0, lon0, zoom, pad)
```

```
    R = 6371; n = 2^zoom;
```

```
    xtile = (lon0 + 180) / 360 * n;
```

```
    ytile = (1 - log(tand(lat0) + 1./cosd(lat0)) / pi) / 2 * n;
```

```
    x0 = floor(xtile); y0 = floor(ytile);
```

```
    x_left = (x0-pad) / n;
```

```
    x_right = (x0+pad+1) / n;
```

```
    lon_left_deg = x_left*360 - 180;
```

```
    lon_right_deg = x_right*360 - 180;
```

```
    y_top = (y0-pad) / n;
```

```
    y_bottom = (y0+pad+1) / n;
```

```
    lat_top_deg = rad2deg(atan(sinh(pi*(1 - 2*y_top))));
```

```
    lat_bottom_deg = rad2deg(atan(sinh(pi*(1 - 2*y_bottom))));
```

```
    widthX_km = haversine_km(lat0, lon_left_deg, lat0, lon_right_deg, R);
```

```
    heightY_km = haversine_km(lat_top_deg, lon0, lat_bottom_deg, lon0, R);
```

end

```
function d_km = haversine_km(lat1_deg, lon1_deg, lat2_deg, lon2_deg, R_earth)
```

```
    lat1 = deg2rad(lat1_deg); lon1 = deg2rad(lon1_deg);
```

```
    lat2 = deg2rad(lat2_deg); lon2 = deg2rad(lon2_deg);
```

```
    dlat = lat2 - lat1; dlon = lon2 - lon1;
```

```
    a = sin(dlat/2).^2 + cos(lat1).*cos(lat2).*sin(dlon/2).^2;
```

```
    c = 2*atan2(sqrt(a), sqrt(1-a));
```

```
    d_km = R_earth * c;
```

end

```
function [bigImg, meta] = fetchAndStitchTiles(lat0, lon0, zoom, pad, tileServer,  
userAgent, timeout_s)
```

```
    n = 2^zoom;
```

```
    xtile = (lon0 + 180) / 360 * n;
```

```
    ytile = (1 - log(tand(lat0) + 1./cosd(lat0)) / pi) / 2 * n;
```

```

x0 = floor(xtile); y0 = floor(ytile);
tileXs = (x0-pad):(x0+pad);
tileYs = (y0-pad):(y0+pad);
tileSize = 256;
H = tileSize * numel(tileYs);
W = tileSize * numel(tileXs);
bigImg = zeros(H, W, 3, 'uint8');
ua = matlab.net.http.HeaderField('User-Agent', char(userAgent));
opts = weboptions('Timeout', timeout_s, 'HeaderFields', ua);
for iy = 1:numel(tileYs)
    for ix = 1:numel(tileXs)
        x = tileXs(ix); y = tileYs(iy);
        xWrap = mod(x, n);
        if y < 0 || y >= n
            tileImg = zeros(tileSize, tileSize, 3, 'uint8');
        else
            url = sprintf(char(tileServer), zoom, xWrap, y);
            try
                tileImg = webread(url, opts);
            catch
                tileImg = zeros(tileSize, tileSize, 3, 'uint8');
            end
        end
    end
end

if ndims(tileImg) == 2
    tileImg = repmat(tileImg, [1 1 3]);
elseif size(tileImg,3) == 4
    tileImg = tileImg(:,:,1:3);
end

```

```

        rows = (iy-1)*tileSize + (1:tileSize);
        cols = (ix-1)*tileSize + (1:tileSize);
        bigImg(rows, cols, :) = tileImg;
    end
end
meta = struct('zoom',zoom,'pad',pad,'centerTile',[x0 y0], ...
            'tileXs',tileXs,'tileYs',tileYs);
end
function out = resizeRgbBilinear(rgb, newH, newW)
    rgbD = double(rgb);
    out = zeros(newH, newW, 3, 'uint8');
    for c = 1:3
        out(:,:,c) = uint8(resampleGridToImage(rgbD(:,:,c), newH, newW));
    end
end
function out = resampleGridToImage(in, H, W)
    inD = double(in);
    [h0,w0] = size(inD);
    xi = linspace(1, w0, W);
    yi = linspace(1, h0, H);
    out = interp2(inD, xi, yi, 'linear');
end
function idx = heightToIndex(h, nLevels)
    hf = double(h);
    mask = isfinite(hf);
    if ~any(mask(:)), idx = uint8(zeros(size(h))); return; end
    vmin = prctile(hf(mask), 5);
    vmax = prctile(hf(mask), 95);
    if vmax <= vmin, vmax = vmin + 1; end
    hf(hf < vmin) = vmin;

```

```

hf(hf > vmax) = vmax;
x = (hf - vmin) / (vmax - vmin);
idx = uint8(round((nLevels-1) * x));
end

function out = gaussianBlur2D(A, sigma)
    rad = max(1, ceil(3*sigma));
    x = (-rad:rad);
    k = exp(-(x.^2)/(2*sigma^2));
    k = k / sum(k);
    out = conv2(conv2(A, k, 'same'), k, 'same');
end

function [A, R] = readGeoRasterCompat(fn)
    if exist('readgeoraster','file') == 2
        [A, R] = readgeoraster(fn);
    elseif exist('geotiffread','file') == 2
        [A, R] = geotiffread(fn);
    else
        error('Відсутні readgeoraster/geotiffread у вашій версії MATLAB.');
```

end

```

end

function d = deg2rad(a), d = a*pi/180; end
function a = rad2deg(d), a = d*180/pi; end

```