УДК. 504.064.3
№ держ. реєстр. 0113 U 000164с
Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ОДЕКУ)

65016 м. Одеса, вул. Львівська, 15, тел. 35-73-71

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи ОДЕКУ
д. геогр. н., проф. Тучковенко Ю.С.
2015.12.31

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
„УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ОДЕРЖАННЯ І ОБРОБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З МЕТОЮ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА”

Етап 3: Основи побудови радіолокаційної інформаційної системи моніторингу навколишнього середовища

Заключний

Науковий керівник, к.т.н. Б.В. Перелигін

Рукопис закінчено „1” грудня 2015 р.
Результати цієї роботи розглянуто Науково-технічною радою ОДЕКУ
Протокол від 2015.12. 15 № 7

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник, старший науковий співробітник, к.т.н., доцент	2015.12.31	Перелигін Б.В. (Загальне керівництво, вступ, висновок, розділ 1)
Старший науковий співробітник, відповідальний виконавець, к.т.н., доцент	2015.12.31	Вельміскін Д.І. (Збір та підготовка матеріалу, розділ 3)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент	2015.12.31	Лімонов О.С. (Розділ 2, підрозділ 2.1)
Старший науковий співробітник, к.т.н., доцент	2015.12.31	Лавріненко Ю.В. (Підрозділ 2.3)
Старший науковий співробітник, к.г.н., доцент	2015.12.31	Боровська Г.О. (Підрозділ 1.1.8)
Інженер III категорії	2015.12.31	Пустовіт Т.М. (Оформлення проміжного звіту, підрозділи 3.1, 3.2)
Інженер III категорії	2015.12.31	Дяченко К.О. (Підрозділи 2.2, 2.4)
Магістр	2015.12.31	Акімова М.О. (Підрозділ 1.3.1)
Магістр	2015.12.31	Бурма К. С. (Підрозділ 1.4)
Магістр	2015.12.31	Муркіна К.С. (Підрозділ 3.3)
Нормоконтролер	2015.12.31	Малацковська С.В.

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 222 с., 91 рисунок, 11 таблиць, 101 джерело.

Метою даного заключного звіту є аналіз існуючих неавтоматизованих та автоматизованих мереж радіолокаційних станцій країн Європи, США, Російської Федерації, Японії для моніторингу навколишнього середовища, і також використання допплерівських РЛС для вимірювання метеорологічних параметрів та цифрової обробки сигналів на проміжній частоті.

Запропонована концепція побудови метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж. Визначені задачі, шляхи їх розвитку. Сформульований системний підхід щодо побудови радіолокаційної інформаційної системи моніторингу атмосфери. Виконана оптимізація побудови системи моніторингу за декількома крітеріґми: кількістю метеорологічних РЛС, їх потужності, з просторовою прив'язкою, мінімуму перекриття зон спостереження, ярусності радіолокаційного поля.

Проаналізована можливість використання допплерівських РЛС для вимірювання метеорологічних параметрів гідрометеооб´єктів. Визначені поляризаційної характеристики відбитих сигналів для вимірювання параметрів метеооб´єктів. Виконана оцінка точності алгоритмів інтенсивності опадів на базі поляризаційних вимірювань.

Проведений аналіз можливості цифрової обробки сигналів на проміжній частоті. Розглянуті існуючі методи демодуляції сигналів телеметрії. Розроблений алгоритм виділення сигналу радіозонду за дальністю.

МОНІТОРИНГ, РАДІОЛОКАЦІЙНА СИСТЕМА, СИСТЕМНИЙ ПІДХІД, ЗОНА СПОСТЕРЕЖЕННЯ, РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ПОЛЕ, СТІЙКІСТЬ РАДІЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯ, ВАРІАНТИ ПОБУДОВИ, ОБРОБКА СИГНАЛУ, РАДІОЗОНД, ПОЛЯРИЗАЦІЯ.

Умови одержання звіту: за договором, 65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15, ОДЕКУ.

ЗМІСТ

ВСТУП ……... 9

1 ПОБУДОВА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА..... 11

1.1 Аналіз побудови існуючих мереж метеорологічних радіолокаційних станцій..... 11

1.1.1 Аналіз побудови неавтоматизованих мереж метеорологічних радіолокаційних станцій..... 11

1.1.2 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Великобританії й Ірландії..... 16

1.1.2.1 Склад мережі..... 16

1.1.2.2 Одержання та передача інформації..... 17

1.1.2.3 Центр збору..... 21

1.1.2.4 Система FRONTIERS (Nimrod)..... 23

1.1.2.5 Контроль технічного стану мережі..... 24

1.1.3 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Скандинавських країн..... 30

1.1.4 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Іспанії..... 33

1.1.4.1 Загальні завдання..... 33

1.1.4.2 Структура мережі й вихідні продукти..... 35

1.1.4.3 Національний центр..... 37

1.1.4.4 Модуль RAINSAT..... 39

1.1.4.5 Обмеження..... 41

1.1.5 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Західної Європи..... 41

1.1.5.1 Результати проекту COST-73..... 41
1.1.5.2 Склад мережі по проекту COST-75..... 47
1.1.5.3 Пріоритети мережі по проекту COST-75..... 49
1.1.6 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Японії..... 51
1.1.7 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі США..... 53
1.1.7.1 Склад мережі..... 53
1.1.7.2 Алгоритми обробки інформації..... 58
1.1.7.3 Продукти мережі і їх поширення..... 60
1.1.7.4 Технічне забезпечення роботи мережі..... 65
1.1.8 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої мережі радіолокації Російської Федерації..... 66
1.1.8.1 Стан мережі..... 66
1.1.8.2 Розвиток мережі..... 67
1.2 Аналіз концепцій побудови існуючих метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж..... 71
1.2.1 Завдання метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж..... 71
1.2.2 Концепції створення метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж..... 73
1.2.3 Шляхи створення мереж і пріоритети..... 74
1.2.4 Вибір нижнього рівня для єдиного радіолокаційного поля..... 78
1.2.5 Вимоги споживачів..... 79
1.2.6 Вибір географічного пункту для установки МРЛС..... 84
1.2.7 Вибір позиції МРЛС..... 85
1.2.8 Експлуатація мережі..... 92
1.2.9 Висновки..... 93

1.3 Системний підхід до побудови інформаційної радіолокаційної системи моніторингу довкілля..... 95
1.3.1 Особливості системного підходу до побудови радіолокаційних систем 95
1.3.2 Побудова інформаційної радіолокаційної системи моніторингу довкілля на основі принципів радіолокаційної системотехніки..... 99
1.4 Оптимізація побудови радіолокаційної системи моніторингу навколишнього середовища..... 105
1.4.1 Варіант побудови радіолокаційної системи з мінімальною кількістю метеорологічних РЛС..... 105
1.4.2 Варіант побудови радіолокаційної системи при мінімальній потрібній випромінюваній потужності метеорологічної РЛС.... 109
1.4.3 Варіант побудови радіолокаційної системи з просторовою прив'язкою позицій метеорологічних РЛС до існуючої мережі метеорологічних станцій..... 112
1.4.4 Оптимізація геометричного розташування метеорологічних РЛС за мінімумом перекриття зон спостереження..... 116
1.4.5 Забезпечення стійкості радіолокаційного поля системи моніторингу довкілля..... 127
1.4.6 Варіант побудови радіолокаційної системи з рівнем випромінювання, безпечним для людей..... 130
1.4.7 Варіанти побудови радіолокаційної системи з застосуванням однотипних метеорологічних радіолокаційних станцій з різною дальністю дії..... 139
1.4.8 Варіант побудови радіолокаційної системи з двохярусним радіолокаційним полем 143
1.4.9 Варіант побудови радіолокаційної системи, адаптований до небезпечних явищ погоди..... 147

2 ОСОБЛИВОСТІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ МЕТЕООБ´ЄКТІВ І ВИМІРЮВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОМЕТЕООБ´ЄКТІВ..... 156

2.1 Коваріаційна матриця розсіяння метеооб´єктів..... 156

2.1.1 Диференціальна відбиваність..... 160

2.1.2 Лінійне відношення деполяризації..... 161

2.1.3 Диференціальна фаза..... 162

2.1.4 Коефіцієнт взаємної кореляції..... 165

2.1.5 Поляризаційні характеристики метеооб´єктів в коловому базисі..... 166

2.2 Поляризаційні параметри радіолокаційних антен та їх вплив на прийом відбитих сигналів..... 169

2.3 Фізична інтерпретація поляризаційних характеристик метеооб´єктів..... 172

2.4 Поляризаційна інформація в оперативному режимі роботи допплерівського метеорологічного радіолокатора..... 183

2.4.1 Постановка завдання..... 183

2.4.2 Схема корекції послаблення в *C*-діапазоні..... 184

2.4.3 Оцінка точності алгоритмів інтенсивності опадів на базі поляриметричних вимірювань в *C*-діапазоні..... 193

3 ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ..... 196

3.1 Постановка задачі та форма оброблюваного сигналу..... 196

3.2 Існуючі методи демодуляції сигналів телеметрії та вимірювання дальності..... 197

3.2.1 Демодуляція сигналів телеметрії..... 197

3.2.2 Виділення сигналу зонду за дальністю..... 198

3.2.3 Робота алгоритму виділення сигналу за дальністю в аерологічному обчислювальному комплексі (АОК) з малопотужним передавачем..... 199
3.3 Ймовірнісні алгоритми..... 200
3.3.1 Демодуляція сигналів телеметрії за допомогою максимального апостеріорного ймовірнісного демодулятора... 200
3.3.2 Оптимальне виділення сигналу радіозонда за дальністю..... 204

ВИСНОВКИ …….. 212
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ……..... 214

ВСТУП

Відомо, що моніторингом було запропоновано називати систему повторних спостережень одного і більше елементів навколишнього природного середовища у просторі та часі з певною метою відповідно до заздалегідь підготовленої програми. Це поняття визначають також як систему спостережень, що дозволяє виділити зміни біосфери під впливом людської діяльності. В даний час цей термін дуже широко використовується для позначення спостережень, що тривало проводяться, за зміною природних і природно-техногенних процесів, що впливають на стан природних і природно-технічних систем [1, 2]. У найзагальнішому вигляді моніторинг можна визначити як організовану з контрольно-діагностичними цілями просторово-часову систему спостережень за змінами природних і природно-технічних систем, об'єктів і окремих складових їх частин у взаємодії з навколишнім середовищем.

Виходячи з цього в даному звіті необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз побудови існуючих мереж метеорологічних радіолокаційних станцій в різних країнах;
- розробити концепції побудови існуючих метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж;
- розробити концепцію створення метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж;
- розробити шляхи створення мереж і пріоритети;
- здійснити оптимізацію побудови радіолокаційної системи моніторингу навколишнього середовища;
- розробити різні варіанти побудови радіолокаційних систем моніторингу навколишнього середовища;
- проаналізувати можливість використання допплерівських МРЛ для вимірювання метеорологічних параметрів метеооб´єктів;

- провести аналіз можливості цифрової обробки сигналів радіозонду на проміжній частоті.

Метою даного заключного звіту є аналіз існуючих мереж неавтоматизованих, автоматизованих радіолокаційних станцій країн Європи, США, Російської Федерації, Японії для моніторингу навколишнього середовища і, на цій базі, створення методології побудови систем одержанна і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу довкілля на Україні, а також використання допплерівських РЛС для вимірювання метеорологічних параметрів та цифрової обробки сигналів на проміжній частоті.

1 ПОБУДОВА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

1.1 Аналіз побудови існуючих мереж метеорологічних радіолокаційних станцій

1.1.1 Аналіз побудови неавтоматизованих мереж метеорологічних радіолокаційних станцій

Обмеження й недоліки радіолокаційних метеорологічних спостережень знижують їх ефективність при оперативній роботі й можуть привести до неправильної інтерпретації метеорологічної обстановки. Крім того, для синоптика інформація однієї метеорологічної радіолокаційної станції (МРЛС) дозволяє аналізувати хід атмосферних процесів тільки в мезомасштабі. Це свідомо знижує заздалегідність і точність прогнозу небезпечних явищ, пов'язаних із проходженням атмосферних фронтів.

Мінімізувати недоліки інформації однієї МРЛС і розширити можливості використання радіолокаційної інформації в синоптичному масштабі дозволяє мережа МРЛС. Мережі МРЛС у всіх країнах створювалися в районах найбільшої повторюваності небезпечних явищ. Це можна показати на прикладі США (рис. 1.1 і рис. 1.2).

Найбільша щільність мережі WSR-57 і WSR-74S Національної метеослужби США досягається в тих регіонах, де найбільш велике число днів із грозою.

При розміщенні МРЛС на мережі й обґрунтуванні економічних аспектів необхідно вирішувати питання про розміри зон перекриття. У них спостереження за небезпечним явищем ведуться з декількох точок огляду. Це дозволяє при аналізі характеристик явища виключити або суттєво зменшити вплив обмежень, пов'язаних з ослабленням радіохвиль в опадах і видаленням

небезпечного явища від МРЛС. Наприклад, розміщення 128 МРЛС на території США забезпечило перекриття зони огляду однієї (центральної) МРЛС (200 морських миль) із зонами огляду дев'яти сусідніх МРЛС [1].

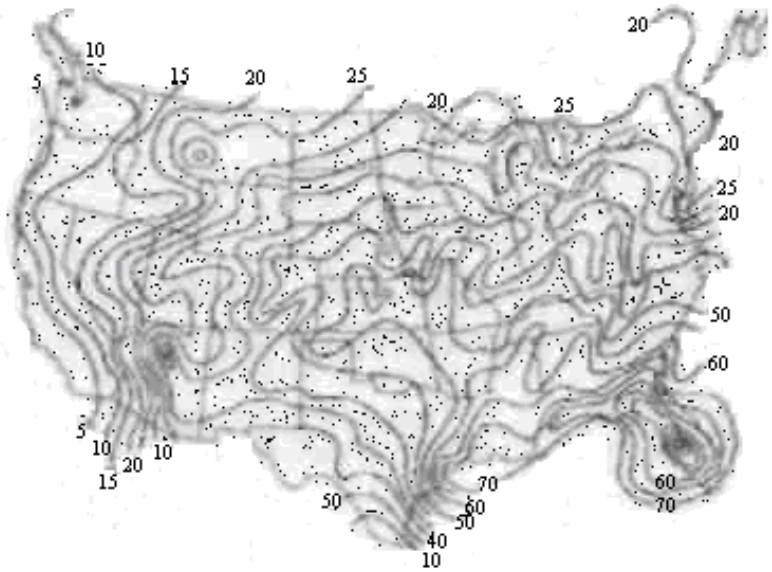


Рисунок 1.1 - Повторюваність числа днів з грозою по території США

Рисунок 1.2 - Розподіл МРЛС Національної метеослужби по території США до створення мережі NEXRAD

За результатами спостережень на мережі МРЛС складалася стикована (композитна) карта для території США в полярній стереографічній проекції. При синоптичному аналізі вона сполучалася із супутниковими зображеннями хмарності й даними інших видів метеоспостережень.

Щільність мережі МРЛС, забезпечуючи суцільне перекриття території, суттєво залежить від характеру розв'язуваних завдань. Найменша щільність мережі МРЛС потрібна для надійного виявлення літніх Cb і пов'язаних з ними явищ, найбільша – для виявлення мілкокрапельної слоїстоподібної хмарності, що не дає опадів.

При обґрунтуванні концепції розміщення МРЛС на території СРСР ураховувалося, що найнебезпечніші конвективні явища виникають улітку, тому оптимальна відстань між сусідніми МРЛС на мережі було обрано рівним 300 км. Це значення дорівнює максимальному радіусу виявлення або подвоєному радіусу 100%-го виявлення небезпечних явищ на МРЛ-1 і МРЛ-2 [2]. Відстань 300 км з урахуванням рельєфу місцевості при розміщенні МРЛС могло змінюватися в межах ±20%.

З урахуванням метеорологічної ефективності МРЛС, необхідності одержання в першу чергу радіолокаційної інформації про небезпечні явища погоди й, нарешті, економічної доцільності Держкомгідрометом СРСР були прийняті наступні принципи розміщення МРЛС на оперативній мережі штормового оповіщення й метеообеспечення авіації [3]:

а) у якості первинної (основної) ланки системи радіолокаційного штормового оповіщення була прийнята зональна гідрометобсерваторія (ЗГМО). Тому в кожної ЗГМО, де б вона територіально не перебувала, повинна була встановлюватися МРЛС;

б) суцільне перекриття основних промислових і сільськогосподарських районів і авіатрас із інтенсивною грозовою діяльніст;

в) дискретне перекриття іншої території СРСР (установка МРЛС в аеропортах першого класу, спеціально призначених для оперативного обслуговування аеропорту; установка МРЛС у найбільш великих містах для

забезпечення міста штормовою інформацією).

Мережа МРЛС Держкомгідромета СРСР до 1990 року складалася з 120 МРЛС, які працювали за єдиною методикою [1, 6, 7]. Спостереження проводилися в синоптичні й додаткові строки (при виникненні небезпечних явищ) і з таким розрахунками, щоб синоптики змогли одержувати й використовувати радіолокаційну інформацію при складанні чергового прогнозу й підготовці штормового оповіщення.

Для передачі інформації МРЛС у прогностичні центри по телефонних і телеграфних каналах зв'язку використовувався код RADOB [8]. Стикована карта мережі МРЛС складалася й складається на ЕОМ у масштабі, який відповідає масштабу синоптичних карт, по гніздах вистави 60х60 км [9, 10]. На рис. 1.3 наведений фрагмент зразка стикованої карти даних МРЛС по європейській частині території колишнього СРСР [5].

Рисунок 1.3 - Зразок стикованої карти даних МРЛС по європейській частини території колишнього СРСР

Інформація в зонах перекриття дублюється декількома МРЛС, при цьому вона може бути не завжди однозначною. Вибір найбільш достовірної інформації в зоні перекриття здійснюється за наступним правилом: просторовому осередку представлення даних (60х60 км) приписується найнебезпечніше метеоявище (певне на МРЛС за фізико-статистичними критеріями), якщо сусідні МРЛС дають різні типи метеоявищ для обраного осередка, або явище з могутнішими характеристиками, якщо сусідні МРЛС дають один тип метеоявищ [11].

Можливий і інший варіант збору даних МРЛС: увесь регіон розділяється на непересічні зони відповідальності, закріплені за кожною МРЛС. У цьому випадку для стикованої карти повинна враховуватися й аналізуватися тільки інформація, що належить зоні відповідальності конкретної МРЛС. Дані за межами зони відповідальності не використовуються. Цей варіант через відсутність зон перекриття й дублювання інформації знижує вірогідність і надійність одержання інформації у випадку виходу з ладу однієї із МРЛС. Із цієї причини він і не використовувався.

Періодичність відновлення стикованої карти мережі неавтоматизованих МРЛС один раз на три години влаштовувала не всіх споживачів. Роботи з автоматизації процесів спостереження на МРЛС, створенню регіональних мереж автоматизованих МРЛС і складанню стикованих карт по регіону спочатку 1 раз у годину, потім кожні 30 хвилин і, нарешті, кожні 15 хвилин зайняли в цілому три десятиліття. У процесі виконання цих робіт були розроблені й перевірені алгоритми розпізнавання небезпечних явищ, способи передачі й стикування інформації, оцінені в оперативному режимі вірогідність і точність автоматизованої радіолокаційної метеорологічної інформації.

Усе це разом узяте було важливою передумовою створення повністю автоматизованих МРЛС і їх мереж у національних масштабах.

1.1.2 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Великобританії й Ірландії

1.1.2.1 Склад мережі

Основне завдання інтегрованої мережі оперативних МРЛС Великобританії – робити кількісні вимірювання опадів на поверхні Землі для поточного прогнозування повеней і короткострокового прогнозу погоди [12-14].

Мережа складається з 12 МРЛС фірми Siemens-Plessey (Plessey 45-C), випущених у різні роки. МРЛС Plessey 45-C забезпечують цілодобову роботу під час відсутності обслуговуючого персоналу й сполучені з телеметричними дощомірами в радіусі огляду.

Розміщення МРЛС на мережі (рис. 1.4) [15] дозволяє створити єдине радіолокаційне поле над територією країни на рівні 1,5 км над поверхнею Землі.

Дані двох радіолокаторів Республіки Ірландії й одного радіолокатора в графстві Джерсі доповнюють цю мережу [15].

Мережа створювалася протягом декількох років починаючи з 1983 року при участі на паях у фінансуванні установок зацікавлених відомств і об'єднанні їх зусиль при проведенні робіт. Такий підхід характерний майже для всіх країн.

У Великобританії в створенні мережі МРЛС взяли участь [16]: дев'ять з десяти керувань водними ресурсами в Англії й Уелсі, Рада графства Девон, дирекція Військово-морської океанографії й метеорології, Міністерство сільського господарства, рибного промислу й продовольства й Департаменти навколишнього середовища й сільського господарства Північної Ірландії.

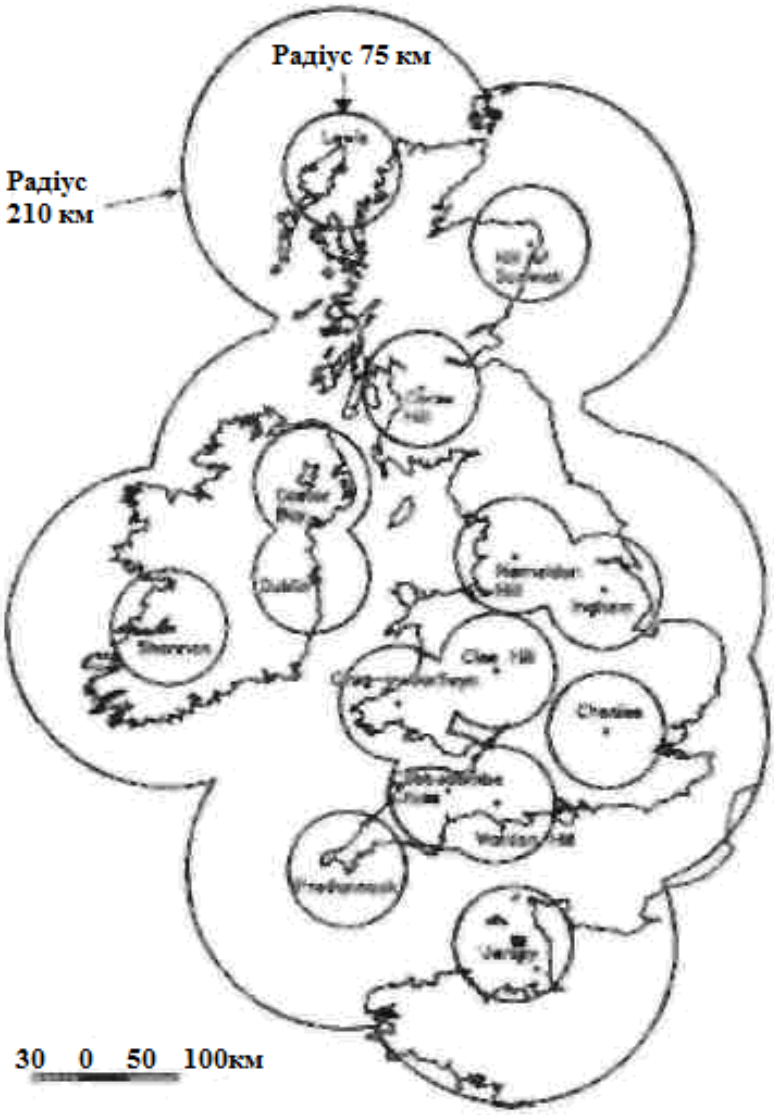


Рисунок 1.4 - Мережа метеорологічних радіолокаторів Великобританії і Ірландії

1.1.2.2 Одержання та передача інформації

МРЛС на оперативній мережі працюють цілодобово циклами по 5 хв. Дані виходять при коловомі огляді на чотирьох кутах місця (0,5°; 1,5°; 2,5°; 4,0°), а потім обробляються для одержання кількісних даних про опади у квадратах сітки 2х2 км у радіусі 75 км і 5х5 км у радіусі 210 км у декартових координатах. Крім виробництва стандартних даних, комп'ютер МРЛС розраховує сумарні опади для 200 водозборів.

У Великобританії існують кліматологічна й синоптична мережі дощомірів. На першій середня відстань між дощомірами становить близько 8 км, на другій – 40 км. Радіолокаційні дані калібруються в реальному часі по невеликому числу спеціальних перевірочних дощомірів, установлених у районах, де можна чекати найвищої точності вимірювання опадів на МРЛС. Підгінні поля добових сум опадів за даними МРЛС складаються за даними дощомірів синоптичної мережі.

Деяким місцевим споживачам потрібне додаткове сканування за кутом місця в обраних азимутах. Згідно з оперативними вимогами, одержання інформації на 12 МРЛС не повинне бути нижче 93% у будь-який місяць (еквівалентно втраті даних майже за два повні дні) [15].

Стандартні дані й дані для водозборів з кожної МРЛС передаються місцевим споживачам – керуванням водними ресурсами й прогностичним центрам; через кожні 15 хвилин стандартні дані передаються на центральний комп'ютер мережі МРЛС Великобританії Radarnet (рис. 1.5 [13]). Спеціальне програмне забезпечення на комп'ютерах МРЛС працює в операційній системі реального часу RSXII-M і вирішує наступні завдання:

– керування антеною;

– контроль над роботою апаратури й виявлення помилок;

– аналого-цифрове перетворення, введення й усереднення радіолокаційних сигналів;

– видалення местників (за картою местників);

– корекція на затінення, дальність і ослаблення;

– переклад відбиваності Z в інтенсивність опадів I;

– виявлення яскравої смуги;

– перетворення полярних координат у декартові;

– інфіллінг (infilling) (введення даних, отриманих на більших кутах місця, у картину радіолуни при мінімальному куті місця);

– опитування телеметричних дощомірів;

– узгодження радіолокаційних і дощовимірюваних даних;

– інтеграція водозборів;

– архівація даних;

– передача даних місцевим споживачам і на центральний комп'ютер мережі МРЛС (Radarnet).

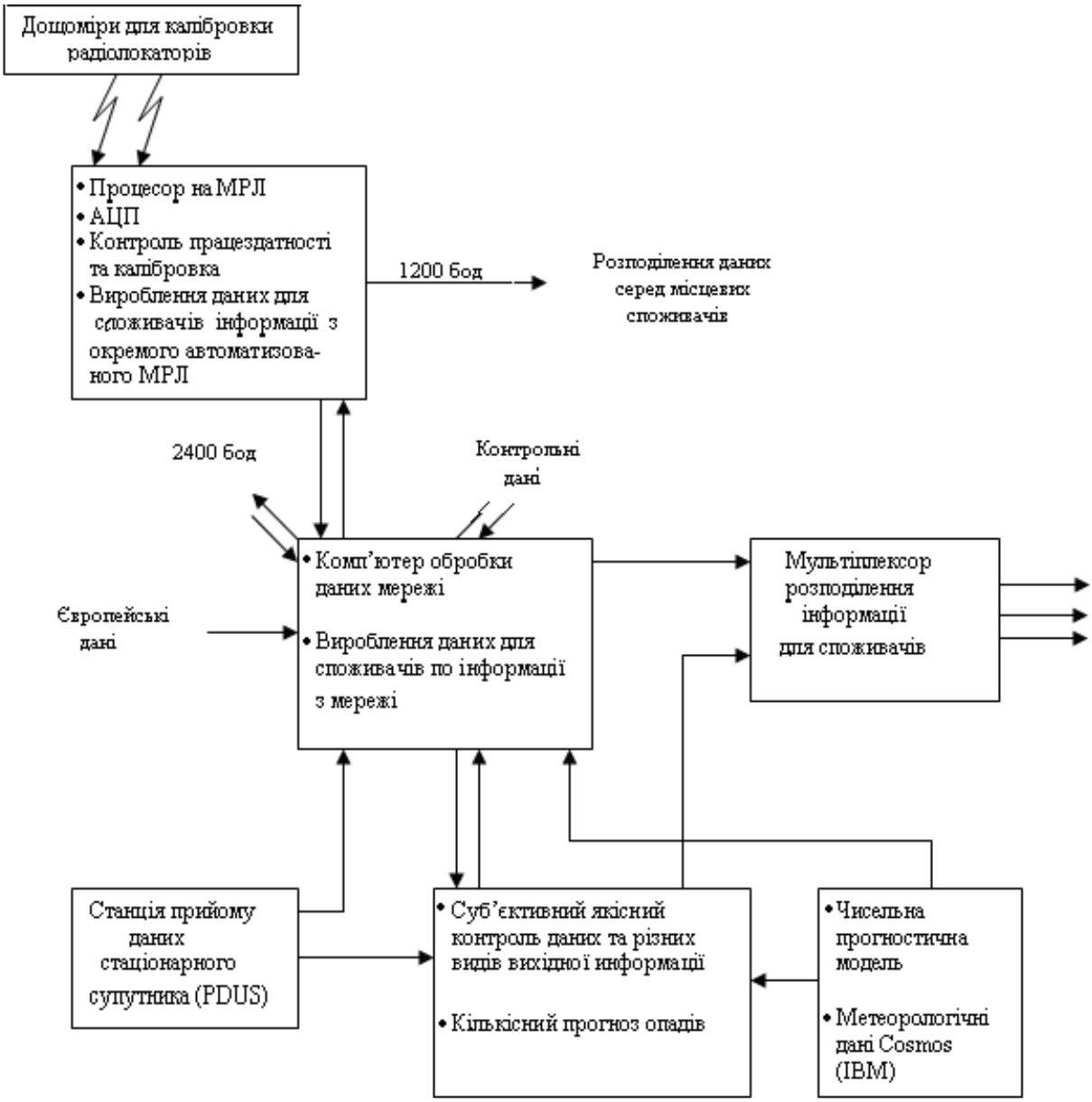


Рисунок 1.5 - Система обробки й розподілу інформації, заснованої на даних мережі автоматизованих МРЛС

Функціональна схема взаємодії автоматизованої радіолокаційної, супутникової наземної й гідрологічної інформації в проекті COST-72 представлена на рис. 1.6 [6, 7].

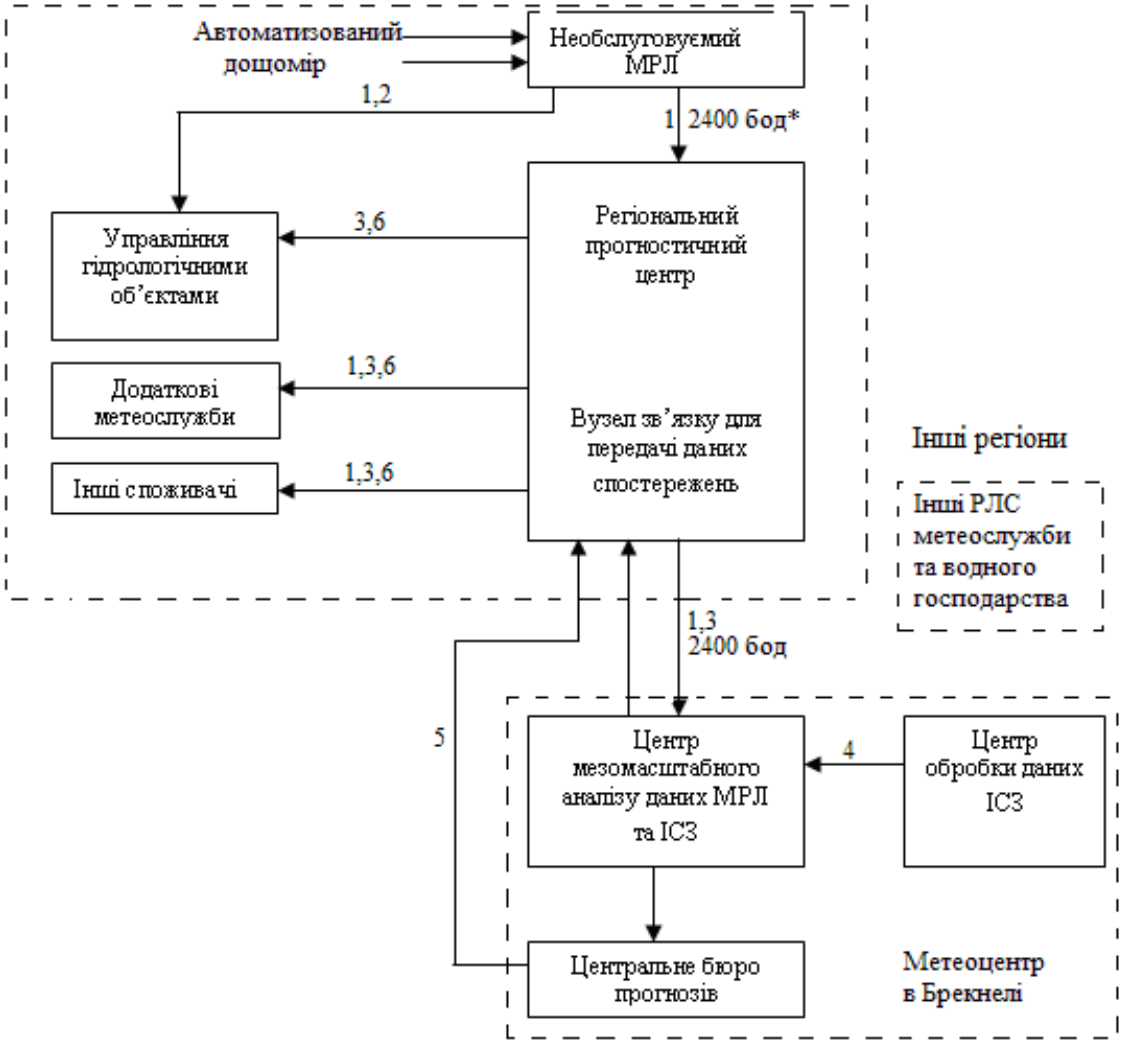


Рисунок 1.6 - Функціональна схема взаємодії автоматизованої радіолокаційної, супутникової наземної й гідрологічної інформації в проекті COST-72 (1 – дані МРЛС одного регіону через 1 хв послу спостережень без якісного контролю; 2 – сумарні результати по другорядних водозборах; 3 – минули якісний контроль дані МРЛС і ШСЗ про опади)

1.1.2.3 Центр збору

Центральному комп'ютеру мережі МРЛС, який розміщений у головному центрі комунікацій у штабі метеослужби Великобританії в Брекнелі, привласнена назва Radarnet. Кожні 15 хвилин Radarnet збирає дані із усіх МРЛС і становить загальну (композитну) картину. Композитна картина й отримані з неї продукти потім передаються різними засобами споживачам у Великобританії, Бельгії, Ірландії й Франції.

Radarnet складається із двох процесорів (основного й резервного), кожний ємністю 2 мегабайта й з двома дисками по 10 мегабайтів.

Кожна система має 16-канальний препроцесор синхронного зв'язку для приймання даних від МРЛС Великобританії й 22 асинхронних каналу й 8 портів з використанням протоколу X.25, які використовуються для приймання даних з інших європейських країн і для передачі продуктів. Ці системи зв'язані також з мережею DECNET через Ethernet, що зв'язує більшість комп'ютерів метеослужби. Усі дані Radarnet архівуються.

Майже вся оперативна програма в Radarnet працює за суровим тимчасовим графіком відповідно до запуску завдань по тимчасовій черговості. Це забезпечує чіткий і гнучкий контроль усієї системи й запобігає її перевантаженню в період великої зайнятості. Крім того, це дозволяє вводити в систему нові завдання. Недолік її в тому, що збільшується час підготовки й передачі радіолокаційних зображень, тому що кожне завдання повинне вставлятися в графік при тій умові, що попередні завдання вирішувалися за максимум відведеного їм часу.

Кожні 15 хвилин у відведене тимчасове вікно всі МРЛС передають в Radarnet останнє зображення. Після збору даних із усіх МРЛС мережі або коли приходить час перерви, складається загальна картина 256x256 квадратів, але 5 км, що охоплює Великобританію. У кожному квадраті загальної картини втримуються дані тільки однієї МРЛС, дані, що перекриваються МРЛС не усереднюються. У кожному 5-кілометровому

квадраті дається карта із вказівкою ієрархії МРЛС, що відповідає «якості покриття». Досвід показує, що звичайно МРЛС дає найбільше покриття, якщо його ДНА перебуває якнайнижче над певною точкою. Дані «самої гарної» МРЛС включаються в композитну картину, але якщо даних з нього немає, то вибираються дані наступної «самої гарної» МРЛС. Карти ієрархії створюються автоматично шляхом обчислення центру ваги всіх радіолокаційних променів по 5-кілометровим квадратам з обліком детально розрахованих радіолокаційних обріїв, ДНА й інших факторів.

Зона огляду однієї МРЛС Великобританії визначена в 210 км. МРЛС, розташовані на видаленні 420 км один від одного, мають загальні зони огляду. Якщо різниця між висотами осей двох променів перебуває на відстані, яка дорівнює 0,25° ширини ДНА, то квадрат 5х5 км (піксель) вважається загальним для кожної пари МРЛС (рис. 1.7) [15].

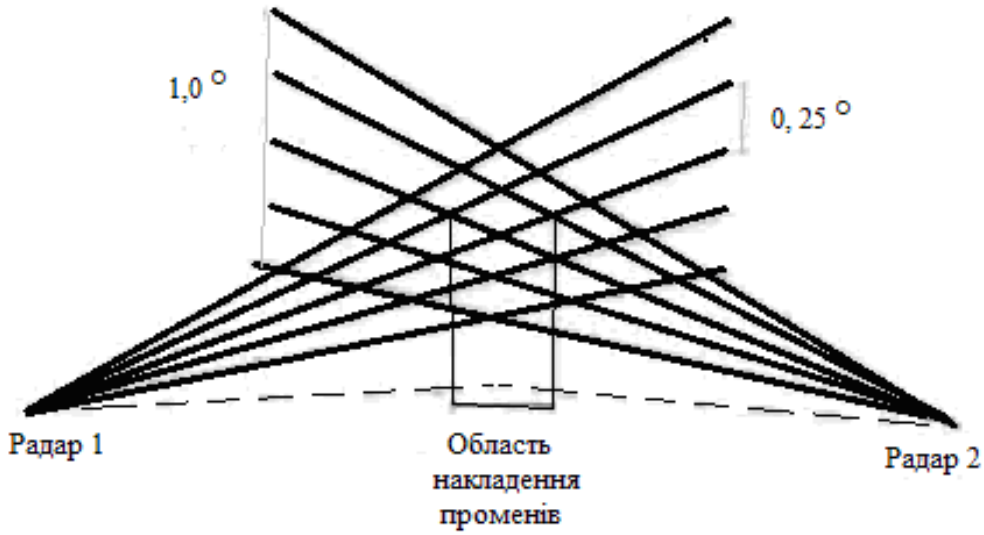


Рисунок 1.7 - Область перекриття двох радіолокаторів

Складається карта всіх пікселів, загальних для кожної пари МРЛС (насправді складаються дві карти, що зв'язують площу перекриття з координатами МРЛС). Карти складаються один раз і використовуються разом з оперативними радіолокаційними даними в центрі збору.

Після складання композитної картини 256x256 вона архівується й передається в різних формах у метеослужби, керування водних ресурсів і іншим споживачам у Великобританії й за кордоном. Повна композитна картина передається по міжкомп’ютерним лініям у метеослужби Бельгії й Франції, а також на головний комп'ютерний комплекс метеослужби Великобританії й на комп'ютерні системи інших станцій по протоколах X.25. Крім того, щогодини вона передається по національній віщальній мережі тим споживачам, у яких є дисплеї з достатньою пам'яттю для її запису й відображення. Споживачам, що розташовують менш потужними дисплеями, кожні 15 хвилин по цій віщальній мережі передаються регіональні сегменти розміром 128x128.

Вже в 1989 році по цій спеціальній мережі постійно одержували радіолокаційні зображення більш 80 споживачів.

1.1.2.4 Система FRONTIERS (Nimrod)

Після приймання первинних радіолокаційних зображень із окремих МРЛС вони направляються в єдину комп'ютерну систему FRONTIERS (Nimrod), де підготовляються зведені прогнози, що перевіряються по якості картини й, і потім передаються знову в Radarnet для передачі в COSMOS, OASYS і в національну віщальну мережу у вигляді регіональних сегментів 128x128.

Перевірені на якість картини, передані в COSMOS, уводяться в мезомасштабную цифрову прогностичну модель разом з дощомірними даними із кліматологічної бази даних про опади й передаються у ВПС для показу щоденних прогнозів погоди.

Концепція FRONTIERS (з 1981 р.) – оптимізований прогноз опадів методами інтерактивного одержання радіолокаційних і супутникових даних [18] – FRONTIERS – комп'ютерна система, що забезпечує синоптика всією необхідною інформацією для підготовки короткострокових прогнозів опадів.

Інформація представляється в ній на кольорових дисплеях. Система дає синоптику можливість інтерактивно маніпулювати даними й контролювати якість радіолокаційних зображень до складання прогнозу.

Якість прогностичної інформації із заблаготривалістю 3 години перевіряється до її оперативного розсилання.

1.1.2.5 Контроль технічного стану мережі

Як метеослужба Великобританії, так і споживачі її інформації зацікавлені в постійному контролі якості радіолокаційних даних про опади.

Експлуатаційники оперативних МРЛС зобов'язано виявляти технічні проблеми МРЛС до того, як вона припинить роботу. Докладні й об'єктивні публікації [15, 19] переконливо показали, що єдиного методу виявлення всіх технічних проблем, що виникають при експлуатації МРЛС на оперативній мережі Великобританії, не існує. Тому фахівцями пропонується використовувати комбінований підхід до оцінки технічного стану МРЛС: апаратний моніторинг, контроль якості оперативних даних і аналіз якості даних у реальному часі за один місяць і більш [15, 19].

1. Апаратний моніторинг. Найбільш типові причини відсутності даних МРЛС – переривання зв'язку між МРЛС і споживачем або припинення її роботи.

Кожна МРЛС оснащена блоком відстеження збоїв (БВЗ), який реєструє обладнанням на базі ПЕОМ. БВЗ відслідковує роботу найбільш важливих вузлів МРЛС і допоміжних обладнань (струм магнетрона, напруга гетеродину, стабільність електроживлення). Ці параметри перевіряються кожні 10 секунд і видаються на монітор ПЕОМ.

Якщо контрольований параметр виходить за межі допуску, на екрані з'являється сигнал тривоги й у метеослужбу в Брекнелле відправляється повідомлення, що повідомляє, по Met WAN (великої мережі метеослужби).

Це повідомлення повідомляє чергового Центру контролю в Брекнелі, що МРЛС вимагає втручання фахівця, і туди направляється радіоінженер.

Значення всіх параметрів, обмірюваних блоком відстеження збоїв, автоматично переустановлюються кожні 10 хвилин, щоб відразу були видні збої МРЛС. В 50 хвилин кожної години БВЗ відправляє повідомлення в Центр контролю про нормальне функціонування.

У випадку збою магнетрона БВЗ видає сигнал місцевої переустановки для повторного запуску магнетрона. У випадку невдачі з інтервалом 15 секунд задаються ще два перезапуски. Якщо й вони виявляються невдалими, система чекає наступної ініціалізації БВЗ в 50 хвилин, коли зробить новий сигнал переустановки струму магнетрона.

Особливий випадок представляє збій у живленні фідера, коли магнетрон не працює в перші 5 хвилин після запуску. Це перешкоджає переустановці струму магнетрона протягом 5 хвилин. У даній ситуації приймач продовжує працювати, а процесор МРЛС видає дані, що містять в основному нульові інтенсивності, за винятком деяких пікселів, змішаних із шумом або перешкодами від інших МРЛС.

Комп'ютер Radarnet, що ухвалює всі дані МРЛС, перед їх обробкою в Nimrod автоматично ігнорує групи даних з усіма нульовими інтенсивностями, але якщо немає домішку шуму, то дані будуть сприйматися як реальні. При цьому може скластися враження, що дані декількох МРЛС були об'єднані й вийшла одна загальна картина з більшими площами дощу, фактично відсутніми й подібними з більшими площами фронтальної структури опадів.

Інтенсивність дощу, вимірювана в районах перекриття двох МРЛС, можна зрівняти відразу після вступу даних в Nimrod і довідатися, чи правильно працює передавач МРЛС. Радіолокаційні дані всіх МРЛС обробляються в Nimrod кожні 15 хвилин для видалення местників у нормальних і аномальних умовах поширення радіохвиль, потім

розраховується інтенсивність опадів у кожному районі, що перекривається (підсумовування 5-кілометрових пікселів у мм/годину).

Якщо інтенсивність дощу, обмірювана МРЛС у районі сполучення ДНА двох МРЛС, менше 1,56 мм/година й інтенсивність опадів на відстані 210 км менше 3,12 мм/година, то можна констатувати, що МРЛС виявляє мало опадів і що система Nimrod продовжує порівнювати райони перекриття двох МРЛС. Це означає, що тест на збій передавача проводиться тільки тоді, коли МРЛС не виявила великої кількості опадів.

Наступна умова тестування полягає в перевірці виявлення в зоні перекриття МРЛС інтенсивності опадів більш 3,12 мм/година й більше 20 «мокрих» пікселів у тому ж районі перетинання ДНА. Якщо МРЛС пройшла всі ці перевірки на двох районах, що перекриваються, то з'являється сумнів у правильній роботі передавача, про що видається повідомлення й заноситься у файл журналу. У підсумку дані однієї МРЛС не будуть включені в загальну карту Nimrod Великобританії.

У той же час при порівнянні районів на предмет збоїв передавача можна перевірити раптові зміни чутливості МРЛС. Для кожної МРЛС визначаються накопичені опади (тобто сума по всім 5-кілометровим пікселям у мм/годину) і просторова довжина зон опадів (число «мокрих» пікселів), які рівняються з тими ж характеристиками, отриманими за попередні 15 хвилин. Раптова зміна інтенсивності опадів і їх просторової довжини показує, що в роботі МРЛС відбулася якась зміна. Коли в роботі МРЛС відбувається така східчаста зміна, ніякі заходи не ухвалюються, тільки робиться позначка в журналі збоїв. Цю інформацію вивчають потім, і вона буде першим сигналом, що в апаратури МРЛС з'явилися проблеми. Таким чином, метод виявлення змін чутливості корисний для одержання відомостей про робочі характеристики МРЛС, але, на думку авторів [15], недостатньо надійний для видалення рядів даних із загальної карти Nimrod Великобританії.

2. Виявлення прихованих дефектів. Розглянуті вище методи сприятливі для виключення передачі помилкових даних споживачам. Однак

багаторічний досвід показує, що більш сховані проблеми МРЛС можуть існувати непоміченими тривалий час. Для їхнього виявлення можна використовувати оперативні дані про опади з районів перекриття двох МРЛС за тривалі періоди часу.

Отримані при такому зіставленні тренди технічних характеристик МРЛС (і середньомісячних співвідношень обмірюваних опадів в областях простору, загальних для двох або декількох МРЛС) часто однозначно вказують на спад основних параметрів МРЛС, розгоризонтування або порушення орієнтування МРЛС у процесі експлуатації.

З моменту організації мережі МРЛС для виявлення схованих змін параметрів МРЛС кожні три місяці аналізуються узагальнені дані вимірів по невеликому числу годинних дощомірів і дощомірів, які знімають показання один раз на добу [20]. Для розв'язку цього завдання можна використовувати й одночасні вимірювання опадів на МРЛС і за допомогою дощомірів. Досвід такого аналізу показав, що для виключення непотрібних припасувань потрібно, щоб виконувалися сурові критерії зіставлення даних [15].

Придатними вважаються тільки ті результати зіставлення, які пройдуть наступні тести:

– дощомір повинен перебувати не далі 100 км від МРЛС;

– МРЛС повинна реєструвати накопичений шар опадів, що перевищує 0,2 мм у пікселі, де встановлений дощомір;

– опади повинні випадати в цьому пікселі протягом години;

– дощомір не повинен бути в списку недоступних.

Для виключення помилок, пов'язаних із чутливістю МРЛС, дані МРЛС спочатку зазнають якісній перевірці й коректуванню на ефекти яскравої смуги, дальності, орографічних опадів та ін.

Узгодження проводиться раз у тиждень, але тільки при виконанні наступних умов:

– після попереднього узгодження проведене більше 50 нормальних радіолокаційно-дощомірних порівнянь;

– невизначеність фактора сумісності перебуває в прийнятних границях;

– фактор сумісності суттєво відрізняється від того, що діяв раніше.

Незважаючи на ці обережності, неминучою залишається невизначеність фактора сумісності. Вона обмежена прийнятним рівнем, і часовий ряд факторів служить заходом стабільності настроювання МРЛС, особливо коли рівняються тимчасові ряди різних МРЛС. В [15] відзначається, що узгодження по дощомірах не можна вважати задовільним, якщо мова йде про довгочасні варіації чутливості МРЛС. Проблеми стабільності МРЛС треба виявляти в момент їх виникнення.

В [19] на підставі багаторічного досвіду експлуатації МРЛС на оперативній мережі для забезпечення гарантованого якості радіолокаційних даних про опади рекомендується застосовувати онлайновий моніторинг апаратури, автоматизований реально-часовий контроль якості й офлайнові методи діагностики й ослаблення ефектів обмежень радіолокаційних методів.

Методи, що працюють у реальному часі, як правило, дозволяють виявити тільки більші помилки, а методи довгострокової оцінки якості повинні застосовуватися для виявлення схованих помилок зсуву вимірювання опадів. Ці методи необхідно об'єднати, і навіть таке об'єднання вимагає постійних відвідувань МРЛС радіотехнічним персоналом.

3. Аналіз надійності НВЧ елементів апаратури. Дослідження радіотехнічного персоналу, проведені на МРЛС, показали [19] зв'язок різких змін інтенсивності опадів з невеликими змінами струму магнетрона МРЛС і зміною напруги на обладнанні автоматичного контролю частоти. При цьому була виявлена технічна причина – різке погіршення спектра магнетрона через зміни надвисокої напруги живлення. При поганому спектрі магнетрона на величину відбитого сигналу впливає нестабільність роботи вузькополосного фільтра по проміжній частоті приймача.

При безперервній роботі МРЛС спектр магнетрона поступово погіршується, і типовий строк придатності магнетрона становить приблизно рік (а не кілька років, як гарантують його виробники).

У приймачі Plessey 45-С слабкою ланкою виявився блок перетворювача й обмежник, який захищає приймач від потужних радіочастотних сигналів, які надходять через антену. «Просочування» у приймач НВЧ енергії приводить до збільшення коефіцієнта шуму й, отже, до зменшення чутливості МРЛС.

Більш частої (ніж передбачене регламентом) перевірки за допомогою аналізатора спектра вимагає система автоматичного регулювання частоти. Фільтр узгодження приймача на проміжній частоті замість номінальної смуги 750 кГц (по крапках 3 дб) має на ряді МРЛС менше значення (до 650 кГц). Настільки вузька смуга робить роботу АРЧ критичною й у граничних випадках приводить до заниження інтенсивності опадів на 85 %.

Погана робота осушувача хвилеводу при наявності у хвилеводі вологи може привести до однобічної втрати у хвилеводі в 17 дБ.

Як рекомендують автори [19], для запобігання поганої роботи осушувача хвилеводу на кожної МРЛС треба встановити датчики точки роси. Вони будуть контролювати повітря, що накачується у хвилевід. Точка роси буде автоматично реєструватися комп'ютерами, які уже є на кожній МРЛС. Коли точка роси перевищить заданий рівень, буде виданий сигнал тривоги. У Великобританії несправні осушувачі хвилеводів вертаються виготовлювачеві для ремонту через неможливість провести його на МРЛС.

Несвоєчасна або рідка профілактика механічних систем МРЛС може приводити до неузгодженості антени за кутом місця й виникненню помилки в юстировці антени МРЛС за азимутом. Явною ознакою останнього служить збільшення числа местниів, коли радіолокаційні відбиття від опадів зрушуються щодо точки местників, або є зсув місцевих предметів щодо географічної прив'язки.

1.1.3 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Скандинавських країн

A Nordic Weather Radar Network (NORDRAD) – мережа допплерівських МРЛС Скандинавських країн (Норвегія, Швеція, Фінляндія) – працює з 1991 року й до теперішнього часу складається з 19 МРЛС (11 у Швеції, 7 у Фінляндії й 1 у Норвегії). МРЛС для Швеції й Норвегії поставлені фірмою Ericsson, а шість МРЛС для Фінляндії – фірмою Gematronic, Gmbh. Усі вони працюють у С діапазоні. Пакети програм для МРЛС підготовлені фірмами EWIS (Ericsson Weather Information System) і IRIS (Interactive Weather Information System (від Sigmet Inc., USA)). Вони забезпечують одержання інформації кожні 5-10 хвилин на площі 240x240 км по пікселях 2x2 км по 12 шарах ІКО ПВ. Цей обсяг даних оцінюється в 170 Кбайт при середньому коефіцієнті ущільнення не менш 5; обсяг даних у допплерівському режимі становить 340 Кбайт [21-30].

NORDRAD – автономна, дистанційно керована мережа МРЛС, на якій відбувається безкоштовний обмін між національними метеослужбами трьох країн продуктами як окремої МРЛС, так і їхніх різних комбінацій. На комерційній основі продукти NORDRAD поставляються численним споживачам. Завдання програмного забезпечення NORDRAD покладена на приватну компанію.

На мережі NORDRAD існують три головні вузли збору даних мережі: у Норчеппінгі, Гельсінкі й Осло, які зв'язані між собою високошвидкісними лініями зв'язку (рис. 1.8) [29].

Головні вузли мережі NORDRAD служать центрами національної мережі, що має форму зірки. Усі споживачі й МРЛС з'єднані з головним вузлом країни або прямо, або через місцевий вузол. Місцевий вузол може поєднувати вузли одержання даних і мати споживачів, підключених до вузла розподілу даних.

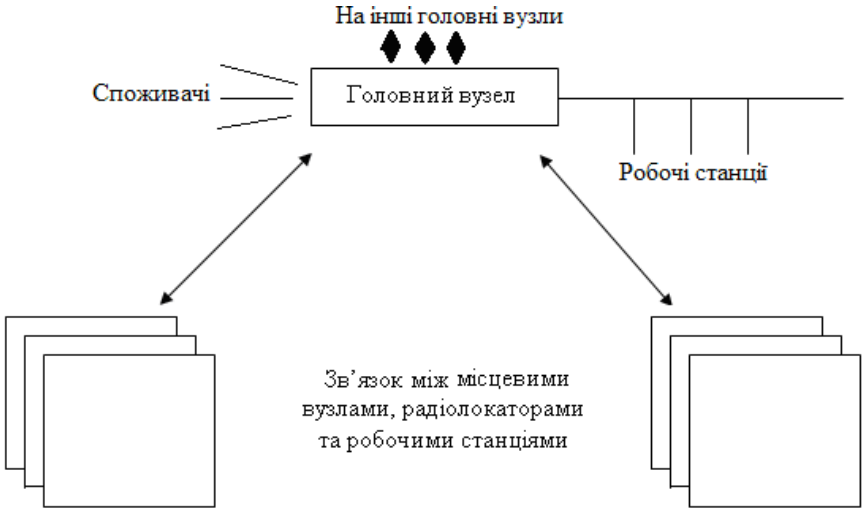


Рисунок 1.8 - Головний вузол і регіональні робочі станції мережі NORDRAD

Мережа NORDRAD виконує функції від комунікаційних до споживчих. Логічна структура мережі NORDRAD представлена в табл. 1.1 [29], а функціональна схема – на рис. 1.9 [29].

Таблиця 1.1 – Логічна структура мережі NORDRAD

Джерела даних	Спосіб зберігання	Види обробки	Відображення інформації в споживачів
Допплерівські радіолокатори Вихідні продукти й зображення Інші	Архів	Стикування інформації МРЛС Витяг і введення необхідних синоптикові даних Переклад з формату у формат	Дисплеї Інтерфейс
Вистава інформації мережі МРЛС: замовлення, адміністративне керування й контроль, кодування й стиск *Сеанс:* стандартизація діалогу *Передача інформації:* захист переданих даних, протокол *Мережа:* вибір маршруту доставки переданих даних до місця призначення *Зв'язок:* захист переданих байтів *Фізичний зв'язок:* лінії PIN			

Деякі з функцій виконуються комп'ютером МРЛС, і результат цієї обробки завжди є в комп'ютері вузла; інші функції виконуються тільки за запитом споживача мережі.

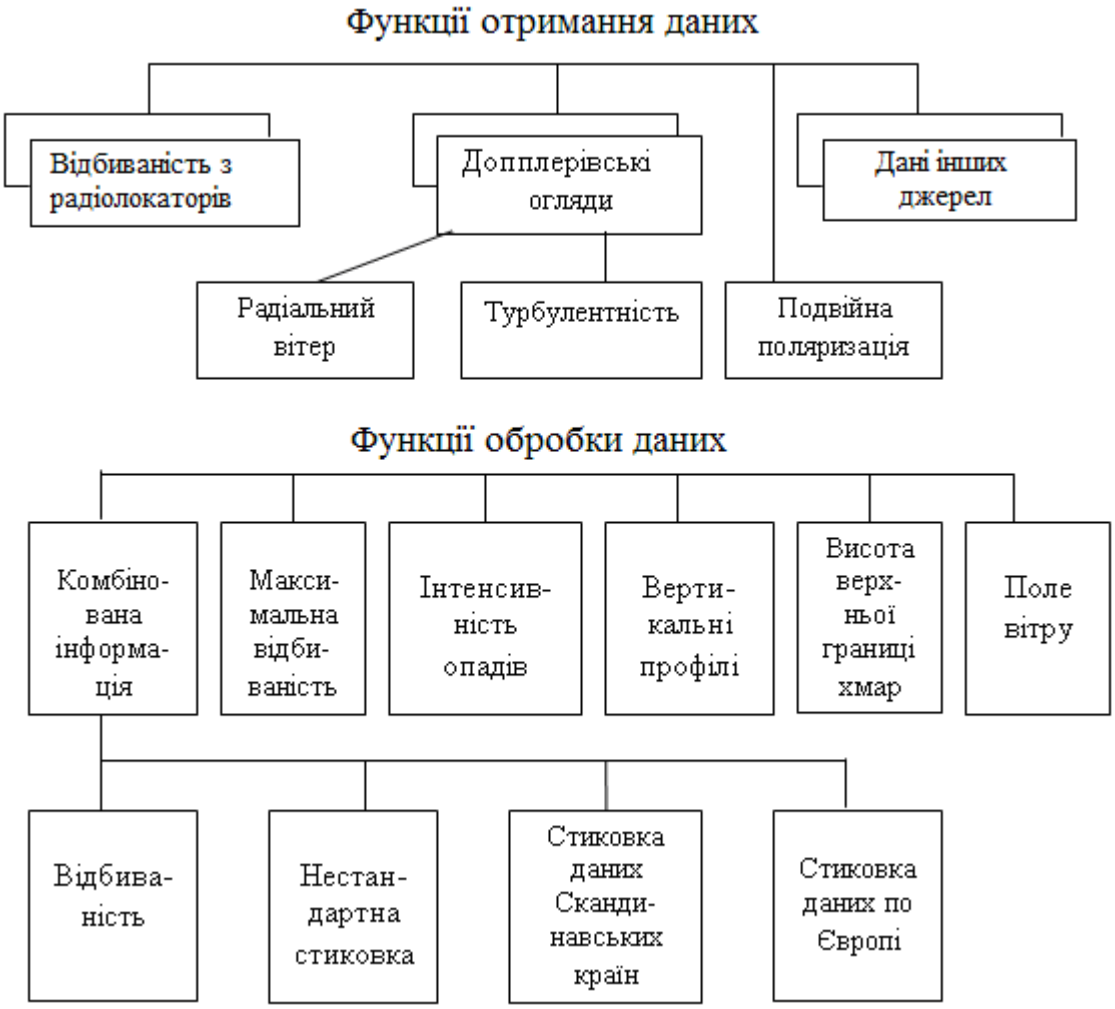


Рисунок 1.9 - Функціональна схема обробки й передачі даних мережі NORDRAD

Загальними продуктами мережі NORDRAD є композитні зображення даних більш ніж з однієї МРЛС. Стандартні композитні зображення складаються:

- для району з максимальним розміром 1500x1500 км із максимальним дозволом 2x2 км;

- для всіх Скандинавських країн з максимальним дозволом 2x2 км;

- для північної частини Європи з максимальним дозволом 8х8 км.

Зображення даються в полярній стереографічній проекції з можливістю підключати для аналізу інформацію від інших джерел (дощомірів, супутників, наземної мережі і т. д.).

Визначений мінімальний набір результатів спостережень МРЛС, які завжди є на МРЛС і на мережному вузлі:

- карта відбиваності;
- карта доплперівських швидкостей;
- карти за результатами вимірювань на МРЛС із подвійною поляризацією;
- дані інших джерел.

Споживач мережі NORDRAD може переводити ці зображення або дані з інших вузлів на свій власний комп'ютер. На ньому він може обробляти їх за своїм розсудом: становити свої композиції або замовити додаткові розрахунки.

У Фінляндії приватним споживачам пропонується ліцензійна комп'ютерна програма. Радіолокаційні дані (комплексні ІКО ПВ і по суб'єктивній колірній шкалі дані про інтенсивність опадів у трьох градаціях: слабкі, помірні й сильні) завантажуються з Bulletin board system для мікрокомп'ютера й передаються по телефону [31].

1.1.4 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Іспанії

1.1.4.1 Загальні завдання

Мережа МРЛС Іспанії з 1989 року складається з 12 допплерівських радіолокаторів фірми Ericsson, установлених на Піренейському півострові, і одного – на Канарських островах (рис. 1.10) [32] (вісім з них у діапазоні *S,*

чотири в діапазоні С). При організації мережі в північно-західних і центральних районах Іспанії були встановлені наступні пріорітети [32]:

- забезпечення радіолокаційною інформацією прогностичних служб для підготовки поточних і короткострокових прогнозів заблагочасністю 0-2 години (поточний прогноз небезпечних явищ для авіації), 0-6 годин (прогноз опадів і небезпечних явищ для населення), 0-12 годин (прогноз при інтерактивному сполученні радіолокаційної й супутникової інформації з подальшою перспективою введення сполучених даних у мезомасштабні чисельні моделі).

- гідрологія – кліматологія опадів для прогнозу повеней, оцінки влагозапасів ґрунту, досліджень по фізиці хмар і оцінки можливості проведення активних впливів.

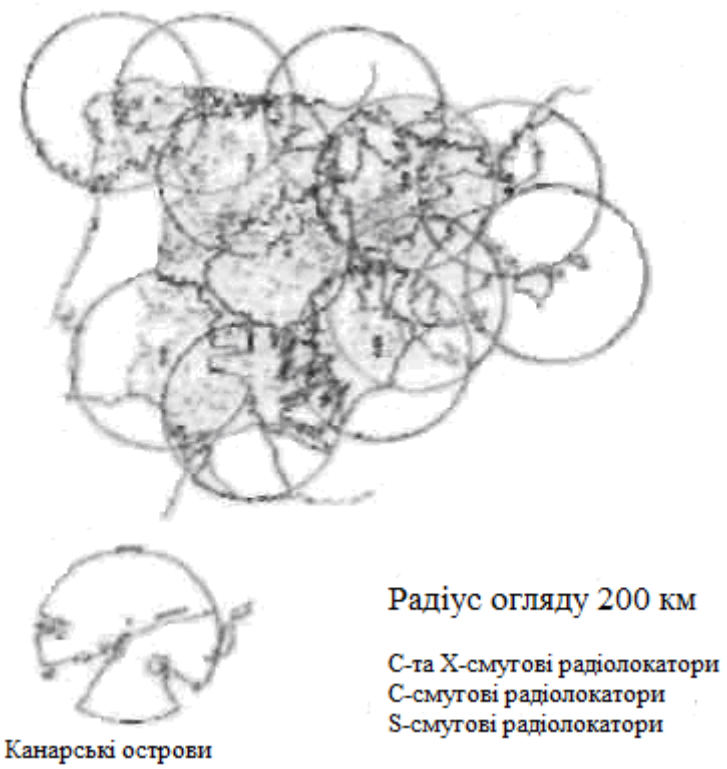


Рисунок 1.10 - Мережа допплерівських МРЛС в Іспанії

Радіолокаційні дані повинні накопичуватися й систематизуватися для трьох регіонів Іспанії: прибережного середземноморського, рівнин центральної частини Іспанії з виділенням зон опадів помірної інтенсивності або снігу взимку й північно-західного прибережного регіону для оцінки ймовірності випадання й інтенсивності слабких і помірних опадів на більших площах у будь-який час року.

1.1.4.2 Структура мережі й вихідні продукти

1. Перший рівень: допплерівські радіолокатори, що обслуговують споживачів у радіусі огляду.

2. Другий рівень: регіональні контрольні центри, де поєднуються дані двох-трьох радіолокаторів (наприклад, Малага-Севілья, Сарагосса-Барселона, САНТАНДЕР-ЛА-КОРУНЬЯ).

3. Третій рівень: об'єднання інформації всіх радіолокаторів у Національному прогностичному центрі в Мадриді на центральному комп'ютері (SIRAM).

У Національному центрі проводиться сполучення радіолокаційної й супутникової інформації. Остання виходить за допомогою SAIDAS.

Усі позиції розміщення МРЛС пов'язані з регіональними й національними центрами телефонними або оптоволоконними лініями з мінімальною швидкістю передачі 4800 байт/с.

Зона ефективного радіуса встановлена для кожної МРЛС рівної 200 км; спостереження проводяться в радіусі 240 км зі швидкістю обертання антени 6 об/хв. До базових даних ставляться відбиваність, допплерівська швидкість і спектр допплерівських швидкостей. Відновлення інформації проводиться кожні 10 хв.

За 10 хв у режимі «відбиваність» проводиться коловий огляд на 20 кутах місця, що дає 12 зображень CAPPI і одне ІКО (піксель 2х2 км), з яких виходять максимальна відбиваність у кожному стовпі, висота максимальної

відбиваності, висота радіовідлуння, вертикальний розріз за будь-яким напрямком.

У допплерівському режимі під одним кутом місця з дозволом 1х1 км виходять три зображення ІКО. Допплерівські продукти виходять за допомогою швидкого перетворення Фур'є для 32 імпульсів при частотах проходження 900 і 1200 Гц. В останні роки в допплерівському режимі додалися колові огляди ще під вісьмома кутами місця.

Зображення на дисплей виводяться в 16 кольорах, які вибираються самим споживачем; у якості фону можуть використовуватися адміністративна карта Іспанії, водозбори рік, авіатраси.

До спеціальних продуктів ставляться: шар накопичених опадів; прогноз переміщення й початку опадів для 16 пунктів, обраних зі списку; карта вертикальних профілей вітру на висотах CAPPI, обраних споживачем. Їх одержують за допомогою програм радіолокаційної метеорологічної обсерваторії Макгильского університету (Канада) [33, 34].

Местники віддаляються за допомогою маски в режимі «відбиваність» і фільтра нульової швидкості в допплерівскому режимі.

Шар опадів (дощу або снігу) у міліметрах у кожному пікселі 2х2 км одержують за наступні періоди: 0-6, 6-12, 12-18, 18-24 години, за добу з 7 до 7 годин, за добу з 0 до 24 годин і за будь-який період, обраний споживачем. Розрахунки шару опадів проводиться для 200 пікселів на вибір споживача.

Регіональні контрольні центри управляють радіолокаторами, що входять у регіон, і відповідають за їхній ремонт. Крім того, у них стикуються зображення 240х240 км, з яких створюється зведена карта на загальній площі 960х960 км по квадратах 4х4 км. Зведена карта може передаватися в сусідні регіони й Національний центр.

1.1.4.3 Національний центр

Основні функції Національного центру мережі в Мадриді зводяться до наступного:

– збір супутникових і синоптичних даних з SAIDAS;

– збір інформації з радіолокаторів (шар опадів, висота радіовідлуння, картини CAPPI, запит додаткових продуктів);

– одержання продуктів RAINSAT і складання прогнозів;

– одержання комбінованого зображення супутникових і радіолокаційних даних;

– автоматична представлення отриманих продуктів;

– запис продуктів за файлами;

– передача продуктів RAINSAT і комбінацій на радіолокатори;

– архівація.

Супутникові дані представляються у форматі супутникової проекції по елементам 2,5 км при візуальних даних і 5 км у смугах ІК і водяної пари.

Комбіноване зображення із МРЛС складається з елементів розміром 4x4 км і займає площу 512x512 елементів у проекції Ламберта. Комбіноване зображення опадів на CAPPI містить інтенсивність дощу (мм/год), комбіноване зображення максимальних висот радіовідлуння містить максимальну висоту радіолуни (км) і нагромадження опадів (мм) за певний період.

Зображення опадів на ІКО ПВ містить інтенсивність дощу (мм/год), максимальну висоту радіолуни (км), нагромадження опадів (мм) при дозволі елемента 4 км у форматі 120x120 елементів.

Синоптичні дані містять відомості про температуру (°C), тиск (гПа), швидкості вітру (км/год), напрямку вітру (градуси за годинниковою стрілкою від півночі) і точку роси (°C) на декількох висотах. Ці ряди даних представляються на відповідній широті й довготі у встановленому форматі.

Головним завданням процесу обробки є одержання наступних продуктів:

– перетворення супутникового зображення (візуального, ІКО й водяної пари) у конічну проекцію Ламберта (кожні 30 хв). У візуальне зображення вводиться виправлення на кут сонця (для кожної широти й довготи елемента, дати й часу доби виправлення різні);

– ймовірність дощу (кожні 30 хв), одержувана по кліматологічному алгоритму опадів. Ця карта зіставляється з районами опадів на комбінованій радіолокаційній карті з повторенням при необхідності (коли площі дощу із супутника більше або менше площ дощу на радіолокаторі);

– інтенсивність дощу (кожні 30 хв);

– ймовірність дощу за прогнозом (кожні 30 хв);

– інтенсивність дощу за прогнозом (кожні 30 хв);

– комбінація радіолокаційних і супутникових даних про дощ у пікселях без радіолокаційної інформації (кожні 10 хв);

– комбінована карта максимальних висот радіолуни й супутникової інформації (кожні 10 хв). Для цього ІК дані переводяться в карту висот із залученням даних репрезентативного зондування, уведених оператором;

– зведена карта шару опадів для всієї країни, що складається з годинних нагромаджень на кожній МРЛС (щогодини). Для прогнозування по цих зображеннях використовується алгоритм взаємної кореляції 16 територій. Система дає також прогноз для 16 пунктів на вибір споживача.

Ці продукти охоплюють усю карту Іспанії в конічній проекції Ламберта, використовуються на місцях і знову передаються в регіональні керування.

Зображення за останні 48 годин зберігаються на диску й можуть проглядатися на площі 2048x2048 км із відрізненням 4 км.

Система може видавати на дисплей ці зображення з накладенням чотирьох сіток: географічних границь, широти й довготи, радіуса

радіолокаційних спостережень і поля вітру в реальному часі за даними RAINSAT.

1.1.4.4 Модуль RAINSAT

Модуль RAINSAT є основою системи й відповідає за створення перерахованих вище продуктів за вхідним даними в прийнятній для відображення формі [33, 34].

RAINSAT поєднує інформацію про опади й верхню границю радіовідлуння з декількох МРЛС із зображенням геостаціонарного супутника (GOES, GMS або Meteosat) для створення композитних зображень синоптичного масштабу (2000x2000 км) з метою моніторингу в реальному часі й наукастингу. Програма RAINSAT картирує візуальні й ICAO зображення в конічній проекції Ламберта або в полярній стереографічній проекції, вводить необхідні виправлення у візуальні дані на кутові варіації сонця, а потім поєднує візуальні й ІК дані, створюючи карти з виділенням зон дощу й гроз на основі фізико-статистичної класифікації. Остання розроблена по великій кількості зіставлень даних МРЛС і ШСЗ.

Радіолокаційні дані про опади накладаються на карту опадів RAINSAT. До отриманої в такий спосіб карти опадів за допомогою алгоритмів розрахунків швидкості на основі кросскореляції й лінійної екстраполяції готуються матеріали для короткострокового прогнозу заблаговчастністю від 1 до 6 годин. При створенні прогностичних карт можна також використовувати синоптичні швидкості на рівні повороту вітру разом зі швидкостями, розрахованими методом кросскореляції під час підготовки прогностичних карт.

Можна одержати карту висоти радіовідлуння, у якій об'єднані інформація про висоту радіолуни з мережі МРЛС і ІЧ зображення.

Пакет програм для відображення в інтерактивному режимі дає синоптикові можливість повністю використовувати потенціал супутникових і радіолокаційних даних.

Модуль RAINSAT установлений у Національному центрі за версією RAINSAT-MASTER. Він не діє доти, поки від SIRAM-SAIDAS-COM не зробить повідомлення про приймання нового ряду супутникових даних, після чого він починає переклад цих даних у проекцію Ламберта площею 512x512 пікселів (4x4 км) для виводу на дисплей. Після цього перетворення модуль нормалізує візуальне зображення за яскравістю щодо сонця (дня року або часу доби) і калібрує ІК зображення шляхом перекладу рівня сигналу на супутнику в шкалу радіояскравих температур. Отримані зображення заносяться в головний файл вихідних продуктів для споживачів.

Після цього модуль RAINSAT визначає ймовірність дощу й інтенсивність опадів за візуальними і ІЧ даними, якщо заздалегідь у нього були закладені схеми класифікації. Потім RAINSAT видає будь-яке зображення згідно зі схемами фізико-статистичної класифікації, обраним споживачем.

Виконуючи ці завдання, модуль RAINSAT розподіляє супутникову інформацію з комбінованих радіолокаційних зображень по пікселях, де немає радіолокаційних даних.

Одержавши продукти по наукастингу, модуль RAINSAT починає підбирати необхідні продукти для прогнозу. Для встановлення кореляції між двома сусідніми зображеннями, зсувами за часом на 30 хв, він розбиває всі зображення на матрицю елементів (5x5). Кожна ділянка (з 25) оцінюється окремо. У процесі обчислення виходить поле вітру на площі 2084x2084 км. Первісне поле вітру можна визначати по синоптичних продуктах, отриманих SAIDAS, і по оцінці вітру на радіолокаторах (модуль FORECAST). По обчисленому полю вітру модуль RAINSAT вставляє кожний елемент вхідного зображення з обчисленою сумою опадів на своє місце у вихідному зображенні прогнозу. Система видає одне прогностичне зображення для

ймовірності дощу й одне для інтенсивності опадів. Кожне вихідне зображення (з наукастингом і прогнозом) записується для споживача у файл основних продуктів і повідомляється про наявність продуктів.

1.1.4.5 Обмеження

Досвід практичної роботи мережі дозволив встановити обмеження [35], що виникають при використанні оперативної інформації.

1. Великі міста навколо радіолокатора (у радіусі до 60 км) створюють «мертві» зони. Для точного моніторингу опадів у цій ситуації потрібно залучати допплерівську інформацію й наземні дані про опади.
2. Допплерівський радіальний вітер не дуже придатний для швидкої діагностики, але досить корисний для досвідченого синоптика.
3. Зимові опади на 10-сантиметрової МРЛС відображаються неточно, а під час гроз із градами відзначається помітне ослаблення на 5-сантиметрової МРЛС.
4. Виникають утруднення при адекватному виборі порогів відображення, визначенні максимальної висоти радіовідлуння й масок местників, особливо для ДМРЛС у діапазоні *S*.
5. На великому віддаленні від радіолокатора помітна втрата точності, її доводиться компенсувати, використовуючи дані сусідніх ДМРЛС.

1.1.5 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Західної Європи

1.1.5.1 Результати проекту COST-73

Різні кліматичні умови в країнах Європи (рис. 1.11 і табл. 1.2) [36] диктують і різні вимоги до радіолокаційної метеорологічної інформації. В одних країнах головна погроза – повені, в інших збиток заподіюють

грозоградові процеси. Під час виконання проектів COST-72 і COST-73 мережі автоматизованих МРЛС сформувалися майже в кожній країні. Об'єднання їх інформації [37] стало актуальним для більшості країн.

Рисунок 1.11 - Розподіл параметра «град/гроза» у Європі

Таблиця 1.2 – Екстремальні середні відносини числа днів з грозою й числа днів з градами за сезон (травень-вересень) для європейських країн за період з 1961 по 1990 роки

Країна	Число днів з грозою		Число днів з градами		Райони небезпечної погоди
	від	до	від	до	
Австрія	7	43	0,1	3,6	Південно–західна дуга Альп
Великобританія	1	13	0,4	5,0	До сходу від Уельсу по лінії Манчестер – Бірмінгем – Ноттінгем
Германія	16	33	0	3,8	Шварцвальд, Швабські Альпи
Іспанія	1	25	0,1	2,9	Кастилія й Леон, Ла-Манча, до півдня від Піренеїв
Італія	9	39	0,2	1,8	Уздовж північних границь країни
Словаччина	11	34	0,3	2,1	Татри
Словенія	6	54	0,1	2,7	Північ країни по лінії Грац – Марибор – Вазардин
Франція	5	29	0,1	3,1	Райони навколо центрального масиву до півдня від Тулузи по лінії Лимож – Гренобль
Хорватія	6	34	0	2,4	Північ країни
Швейцарія	9	42	0,1	1,8	Північна й південна частина країни

На рис. 1.12 – 1.14 [38] показано, яку важливу для практичних цілей інформацію можна одержати з об'єднаних радіолокаційних даних, користуючись результатами спостережень мереж МРЛС різних країн [5].

Рисунок 1.12 - Схематична вистава нагромадження снігу за 12 годин по радіолокаційних і супутникових даних для Європи

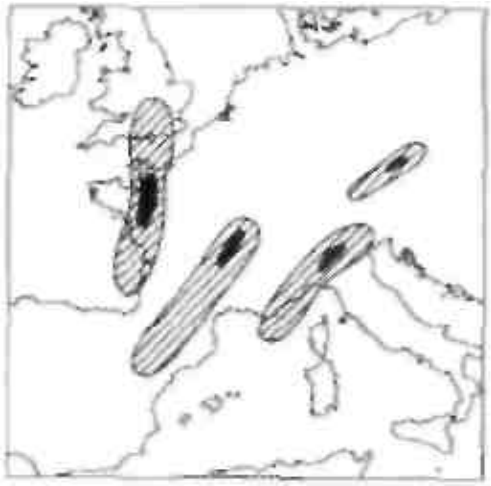


Рисунок 1.13 – Схематичне представлення зведення небезпечної погоди за попередню годину по зображеннях COST за допомогою різних алгоритмів і незалежних даних

Рисунок 1.14 - COST-73 – проект створення мережі метеорологічних радіолокаторів (заштриховані ділянки – області огляду локаторів нижче 1500 м над рівнем моря за станом на вересень 1991 року, не заштриховані ділянки – плановані області огляду)

Приклади траєкторій радіовідлуння над північно-заходом Європи представлені на рис. 1.15.

Незважаючи на те, що вимоги до радіолокаційних метеоданих у країнах Європи відрізняються через відмінність не тільки кліматичних умов, але й соціально-економічних структур, між країнами досягнута згода по вимогах, можливостях, співвідношенні витрат і вигід, а також каналам поширення інформації. Зазначені угоди вилилися в зразкові специфікації для стандартних радіолокаційних систем Європи. Основні рекомендації COST-73 сформульовані в [39].

1. Визнана цінність і корисність побудови стикованих (композитних) зображень з використанням міжнародних радіолокаційних даних, сполучених з супутниковими даними. Багатонаціональне сполучення радіолокаційних

даних і обмін цими даними повинні ґрунтуватися:

– на використанні двосторонніх і/або багатосторонніх угод, що регулюють міжнародний обмін радіолокаційними даними;

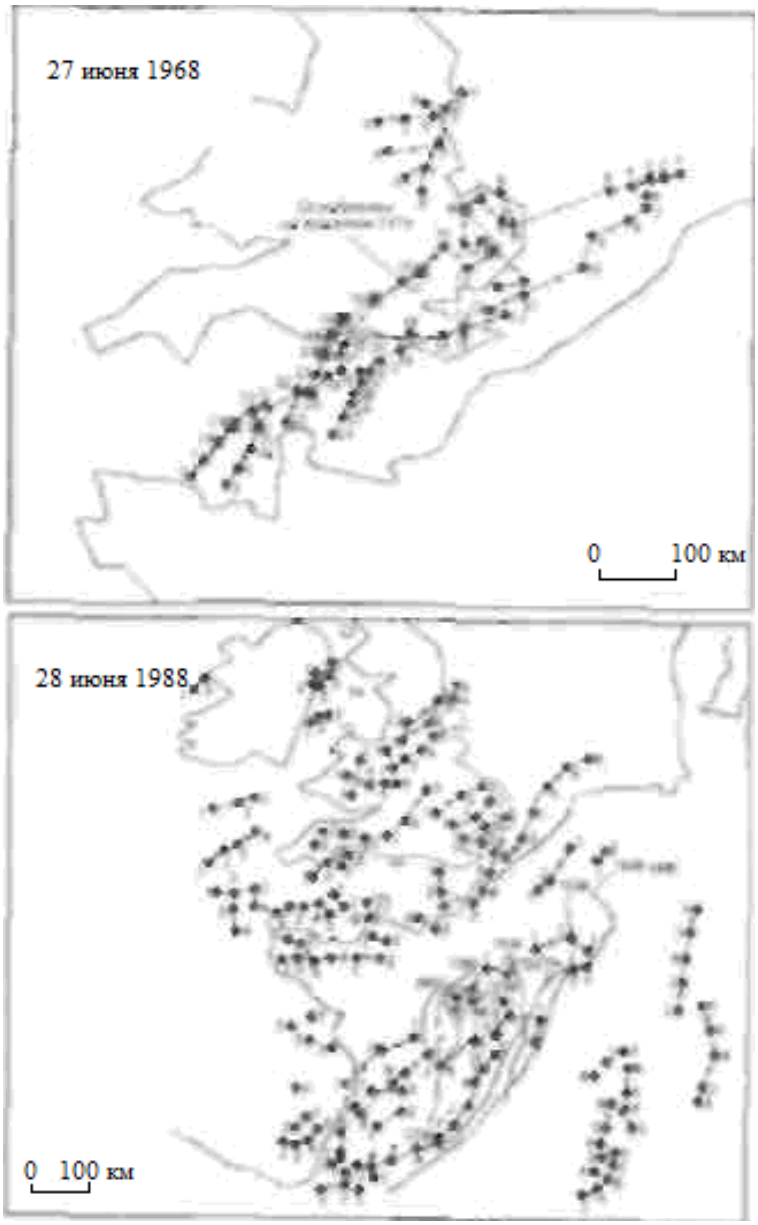


Рисунок 1.15 - Приклади траєкторій радіовідлуння над північно-заходом Європи, отримані за радіолокаційним даними з Великобританії, Нідерландів, Франції й Швейцарії для вивчення взаємодії конвективних гнізд і ефектів топографії (напрямок руху зазначений стрілками, положення з інтервалами 1 година пронумерована, а на нижньому рисунку показаний генезис лінії шквалів – тонка лінія – над Францією)

– на розробці стандартизованих процедур спостережень і створенні банків даних;

– на розробці підходящих структур мережі;

– на використанні BUFR FM-94 і відповідних методів редукції даних у найближчому майбутньому й, можливо, іншого коду в перспективі.

2. Уже розроблена в рамках проекту програма кодування/декодування BUFR FM-94 представлена у ВМО для широкого впровадження. Крім того, повинні бути продовжені зусилля по розробці ще більш ефективної схеми стиску для передачі результатів радіолокаційних спостережень через ГСТ, супутниковий зв'язок або будь-яким іншим підходящим способом.

3. З технічних міркувань структура створюваної мережі МРЛС повинна включати наступні елементи:

– регіональні субрайони із власними центрами стикування даних, які будуть відповідати за збір і обробку (включаючи стикування) метеорологічних радіолокаційних даних, що надходять від країн відповідного субрайону. Планується розширення регіону збору даних, який буде включати від п'яти до восьми центрів стикування;

– розсилання результатів стикування в усі регіональні центри у вигляді набору по можливості перекриваючих субрайонов з підходящими розмірами. Зараз передбачається, що таких субрайонов буде шість. Розсилання буде здійснюватися через ГСТ, супутниковий зв'язок або будь-якими іншими методами, і по можливості буде використовуватися програма BUFR FM-94;

– насамперед, повинні бути затверджені основні ідеї по географічних проекціях, крокам сітки, вибору рівнів і визначенню кінцевих продуктів.

4. Внаслідок того, що: а) основні моделі циркуляції (ОМЦ) мають поганий дозвіл і характеризують кількість опадів тільки у вигляді середніх добових і місячних значень; б) зв'язок між дощем і стоком найвищою мірою нелінійна; в) швидкість інфільтрації дуже сильно змінюється, що вкрай затрудняє параметризацію, для розробки більш ефективної схеми

параметризації поверхневих гідрологічних процесів у рамках ОМЦ і забезпечення адекватності бази даних для гідрологічних досліджень у континентальному масштабі необхідно використовувати комплексну базу радіолокаційних даних. Створення системи «спостереження за ріками» у міжнародному масштабі (макрогідрологія), особливо для цілей оповіщення про небезпеку повеней, а також в інтересах повсякденної експлуатації міжнародної річкової мережі, було б корисним для споживачів, розташованих як у джерел рік, так і в їхньому нижньому плині.

1.1.5.2 Склад мережі по проекту COST-75

В 1998 році в Європі функціонувало більш 110 МРЛС (рис. 1.16) [31], причому більш 60 з них допплерівські.

Рисунок 1.16 - Розподіл метеорологічних радіолокаторів на оперативній мережі в Європі: 1 – автоматизовані некогерентні МРЛС; 2 – доплеровскі МРЛС і поляриметричні доплеровскі МРЛС

Число ДМРЛС постійно збільшується. Більшість – МРЛС С-діапазону. Національні мережі МРЛС існують у Великобританії, Іспанії й Франції (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Оперативні метеорологічні радіолокатори в Європі на грудень 1997 року

Країна	Число радіо-локато-рів	Діапазон довжин хвиль	Число кутів місця антени	Частота оновлення даних, хв	Число оборотів антени у хвилину	Частота проходження імпульсів, Гц	Метод усунення местників
Австрія	4	C	21	10; 5	4,5	600	M, D, S, R, I
Велике-Британія	12	C	4	5	1–3	300–1200	-
Угорщина	3	X, S	4	5	3	250	-
Германія	10	C	19	15	3	600–1200	M, D, I
Греція	4	S, C	4	10	3	250	-
Данія	2	C	10	10	2–6	250–1200	M, S
Ірландія	2	C	10	15	2–6	250–1200	-
Іспанія	12	S, C	20	10	2–6	250–1200	M, D
Італія	14	X, C	10	15	2–6	300–1200	M, D, P, I
Нідерланди	2	C	4	10	3	250	S
Норвегія	1	C	12	10	6	250–1200	M, D
Польща	2	X, C	14	10	6	250	M, D
Португалія	1	C	13	15	3	250	M, S, I
Румунія	3	X, S	10	25	1–6	250	M
Словаччина	2	X, S	15	15; 30	6	250	M
Словенія	2	C	16	7,5	3	250–1200	M
Фінляндія	б	X, C	11	15	2–6	250–1200	M, D
Франція	13	S, C	3	3	0,84	250–330	S, I
Хорватія	1	S	14	10	2–3	600	M
Чехія	2	X, S, C	13, 20	10; 10	3	250; 556	M, D, I
Швейцарія	3	C	20	5	3–6	600–1200	M, D, S, R, I
Швеція	11	C	10 – 15	15; 5	2–6	250–1200	M, D

Примітки. 1. Метод усунення местників: M – карта месників; D – допплерівські вимірювання; S – статистика сигналів; P – поляризація; R – дозвіл; I – інтерполяція. 2. Діапазон довжин хвиль МРЛС: X – 3 см; S – 10 см; C – 5 см.

1.1.5.3 Пріоритети мережі по проекту COST-75

В 1998 році однієї з найбільш пріоритетних завдань застосування МРЛС у Європі став загальний регіональний і локальний метеопрогноз, і особливо заблаговчастністю до 3 годин [31].

Національні метеослужби європейських країн, конкуруючи із приватними компаніями, запропонували широке різноманіття орієнтованих на споживача продуктів МРЛС, які швидко поширюються через засоби масової інформації.

Серед продуктів МРЛС і мережі МРЛС (NORDRAD, German Composite, CERAD): зображення ІКО й ІКО ПВ (CAPPI) на різних висотах і віддаленнях, різні дБZ-шкали й пороги з різним ступенем осреднення, висота верхньої границі радіовідлуння, VIL, вертикальні профілі відбиваності й вітру, горизонтальні поля вітру й розрізи (вертикальні й горизонтальні).

Синоптикам регіональних установ для вибору рівнів передається зображення відбиваності з ІКО й ІКО ПВ із окремих МРЛС або національних мереж. Стандарту передачі зображення не існує, а частота відновлення інформації може досягати 4 годин.

Надійність вступу споживачеві інформації про опади для короткострокового прогнозу, на думку європейських фахівців, повинна становити при заданій ймовірності 95% часу. Найбільш строгі вимоги пред'являються до попередження про рідкі зливові опади інтенсивністю понад 10-30 мм/год й про сильний снігопад інтенсивністю понад 6 мм/год для густонаселених районів.

Для керування повітряним рухом від МРЛС у європейських країнах потрібна метеоінформація для прийняття розв'язків по маршрутах, а в районах аеропортів для керування повітряним рухом не тільки в повітрі, але й на землі. Найбільш важливими продуктами є прогноз небезпечної погоди, профілі вітру й зсуву вітру. Для країн Північної Європи на одне з перших місць по важливості вийшов поточний прогноз проміжків у снігопаді й

розпізнавання за допомогою допплерівського радіолокатора зон можливого зледеніння.

Зображення CAPPI, зведені карти CAPPI, шари опадів за 3, 6 і 12 годин потрібні дорожнім і транспортним службам для технічного обслуговування й очищення доріг від снігу.

Прогнози початку й закінчення дощу, очікувана величина шару опадів, повторюваність опадів потрібні фермерам і продавцям, що торгують на вулиці.

Таким чином, у європейських країнах велика увага приділяється доведенню інформації МРЛС до споживача.

На півдні Європи на перше місце в застосуванні даних МРЛС у літню пору виходить наукастинг небезпечних явищ погоди при проходженні мезомасштабних конвективних систем – градів, шквалів і інтенсивної грозової діяльності [36].

Радіолокаційні спостереження дозволяють розпізнавати й докладно прослідковувати всі конвективні процеси з небезпечними явищами. Їх мезомасштабна організація в рамках системи визначається по відбиваності; конвергенція на нижньому рівні, завихренность на середньому рівні й дивергенція на верхньому рівні – за даними допплерівської МРЛС; мікрофізичний і динамічний стан – за даними допплерівської поляриметричної МРЛС.

Вимоги європейських гідрологів (міська гідрологія й прогноз повеней) по надзвичайно високому дозволу в часі й просторі граничать із граничними можливостями радіолокаційної технології вимірювання опадів. Очевидно, вони ще не дійшли висновку, як їх американські колеги, що за допомогою радіолокаційної інформації всі проблеми вимірювання опадів не розв'язати.

1.1.6 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі Японії

Мережа МРЛС у Японії призначена для вимірювання характеристик опадів з метою прогнозу повеней і регулювання режиму річок при експлуатації гребель на гірських ріках [40].

Контроль режиму річок здійснюється в Японії річковими управліннями міністерства будівництва, яке має для цього мережа з 22 автоматизованих МРЛС (рис. 1.17) для передачі інформації місцевим будівельним управлінням.

Доведенням інформації про опади від окремих МРЛС і їх мережі до префектур і муніципалітетів займається Управління інтегрованих комунікації між ріками й басейнами FRICS.

Радіус дії радіолокаційної системи OWASAN, на базі якої створена мережа, становить 200 км, кількісні вимірювання проводяться в радіусі 120 км. Система OWASAN має наступні технічні характеристики: переносна частота 5270 МГц (5 см), ширина ДНА 1,2°, імпульсна потужність 250 кВт, швидкість обертання антени 5 об/хв, частота посилок 260 Гц, тривалість зондувального імпульсу 2 мкс. У полярній системі розмір пікселя для вимірювання (2,81°х3 км) або (1,41°х3 км). Усунення местників проводиться за допомогою індикатору об'єктів, що рухаються, або карти местників. Для одержання даних на однакових висотах радіолокатор веде спостереження на трьох кутах місця для одержання зображення ІКО ПВ. Радіолокатор у місці установки, що не обслуговується, тому його робота контролюється автоматично (передбачене тестування всіх систем і виявлення несправностей).

Мережа МРЛС працює цілодобово з інтервалом 5 хв із комп'ютерною обробкою даних про опади, відображенням і передачею цієї інформації споживачам.

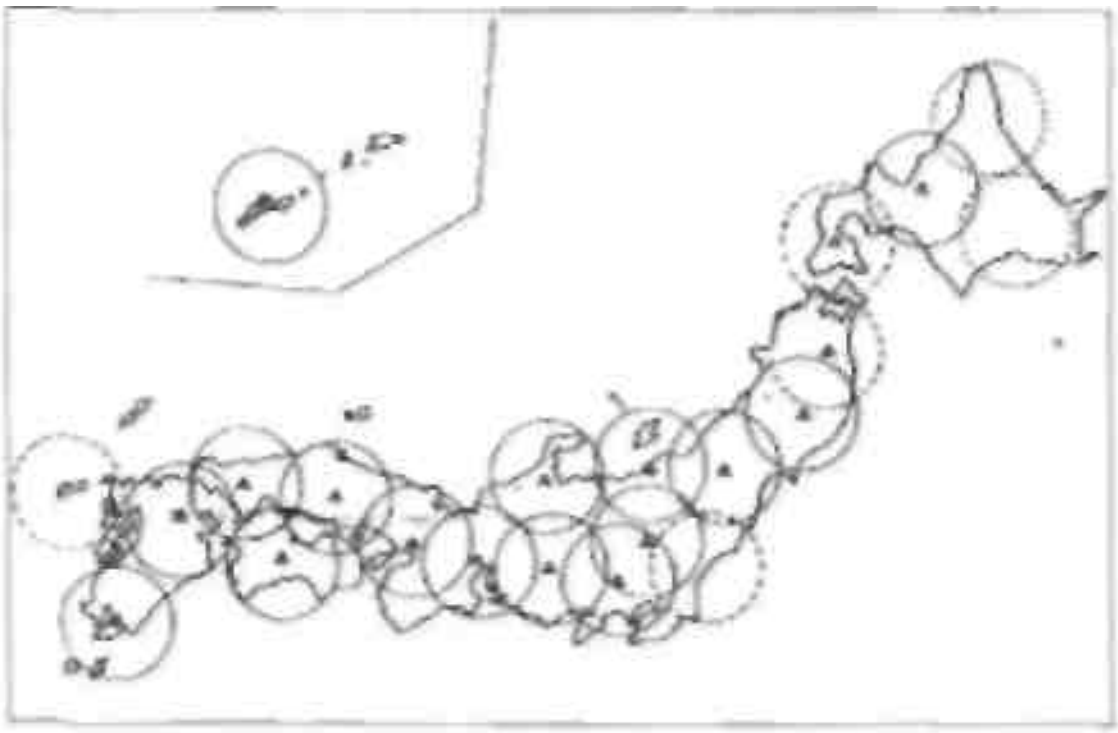


Рисунок 1.17 - Розташування радіолокаторів-дощомірів у Японії

Автоматизований радіолокатор-дощомір після первинної обробки перетворить інформацію про опади у форму, зручну для застосування в річкових і дорожніх управліннях, і передає її на термінальні станції місцевих управлінь міністерства будівництва. На них надходить базова інформація: середня за 5 хвилин інтенсивність опадів у полярних координатах і картина просторового розподілу опадів у радіусі огляду МРЛС.

Кольорова (якісна) і цифрова (кількісна) карти розподілу інтенсивності опадів дозволяють визначити швидкість і напрямок переміщення зон опадів і працювати в анімаційному режимі для вивчення історії процесу випадання опадів.

У єдиному центрі міністерства будівництва складається зведена карта по Японії (4800х2000 символів), яка передається всім зацікавленим споживачам по орендованій міністерством передавальної лінії зі швидкістю 4800 біт у секунду.

Передачу даних у префектуру й муніципалітети центр FRICS здійснює по запиту термінала, що ухвалює, цілодобово по телефонній мережі NTT по протоколу CAPTAIN PLPS.

При погрозі повені на термінал споживача передаються повідомлення й звукові сигнали. Якщо на терміналі відсутній черговий, центр FRICS передає йому повідомлення додому через автоматичний мовний генератор. Це ж відбувається, коли сума опадів за годину перевищує 20 мм, 80 мм і коли рівень води перевищує певний поріг.

У кожному з десяти регіональних бюро по будівництву створений центр збору даних по регіону, який збирає інформацію про опади; до нього можливий доступ з іншого регіону.

Зображення передаються роздільно (для приймання одного), пакетами (по чотири групи) і всіх радіолокаційних зображень за 6 годин із записом для подальшого копіювання й аналізу. Щоб телефонна лінія не була зайнята без користі, вона автоматично відключається від центрів.

На березень 1989 року в Японії було встановлено 2290 терміналів, кінцева мета – установка 10000 терміналів.

Зразок переданих зображень наведений на рис. 1.18.

1.1.7 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої радіолокаційної мережі США

1.1.7.1 Склад мережі

Мережа NEXRAD США – єдина багатофункціональна мережа, призначена для одночасного одержання інформації, що задовольняє вимогам штормового оповіщення, метеозабезпечення авіації й вимірювання опадів.

Розроблений у процесі реалізації концепції допплерівський радіолокатор WSR-88D забезпечив якісний стрибок у проведенні автоматизованих метеорологічних радіолокаційних спостережень у будь-

яких погодних умовах – від чистої атмосфери до випадків проходження ураганів.

Вчасно виконані трудомісткі роботи з вибору й підготовці позицій для розміщення WSR-88D дозволили в короткий строк (з 1991 по 1997 рік) установити 138 WSR-88D в 48 штатах континентальної частини США, сім установок на Алясці, а також розмістити WSR-88D у Пуерто-Ріко й на Гавайських островах.

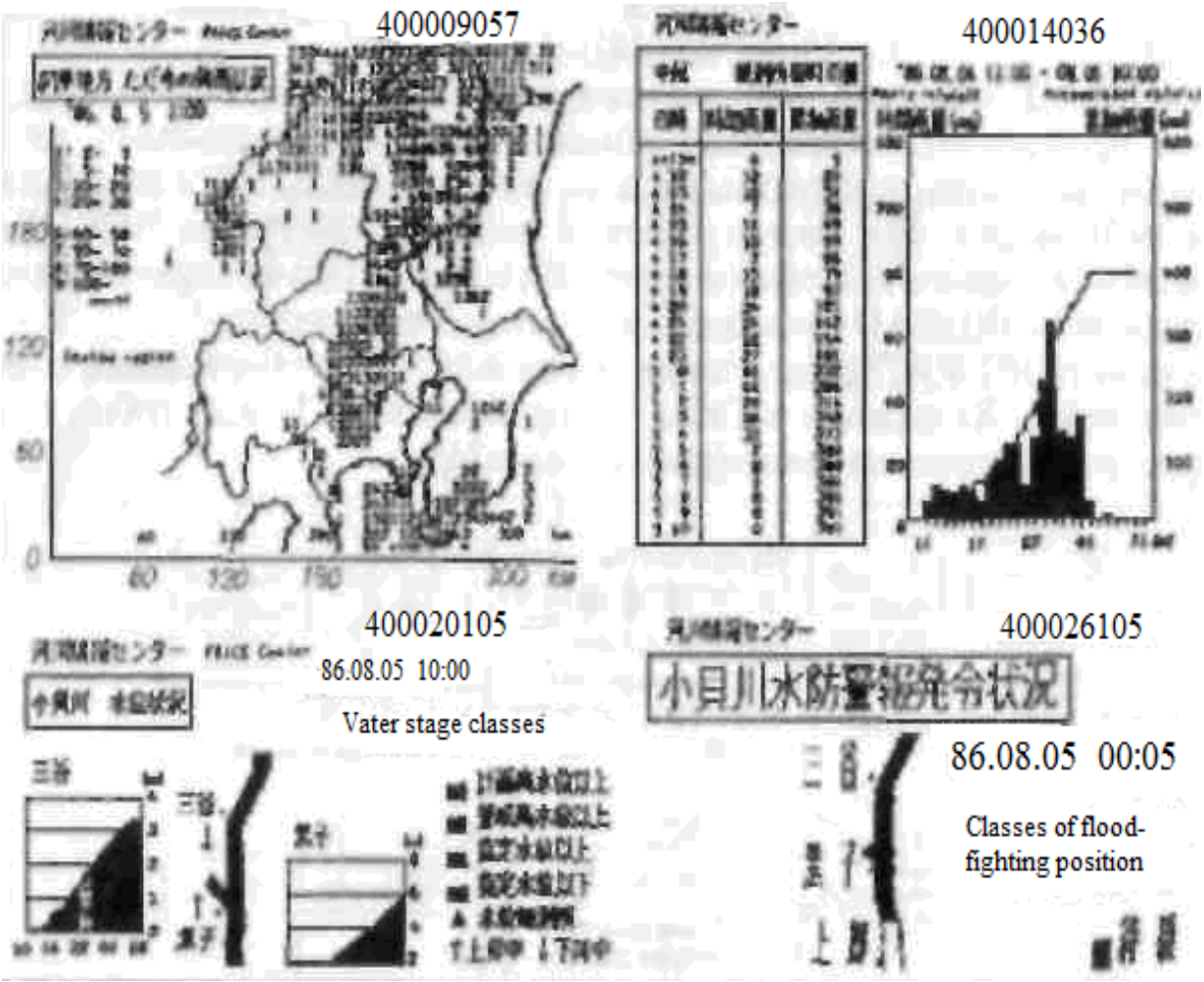


Рисунок 1.18 - Зразок гідрометеоінформації й заходу проти повені

Розміщення мережі NEXRAD наведене на рис. 1.19 і рис. 1.20 [41].

Рисунок 1.19 - Загальне радіолокаційне покриття на висоті 10 000 футів від місця установки радіолокаторів у суміжних штатах, що існувало до введення NEXRAD, і розташування радіолокаторів типу WSR-57 і WSR-74

Передача інформації споживачеві з кожної станції NEXRAD проводиться в єдиному форматі даних з використанням усіх можливих видів і засобів зв'язку, які в даному пункті економічно доцільні.

Мережа NEXRAD працює цілодобово з періодом відновлення інформації від 5 до 15 хвилин залежно від атмосферних умов. Стратегія огляду простору антеною залежно від типу погоди не оптимізована [41].

У чистому повітрі застосовується повільний коловий огляд на п'ятьох кутах місця, який займає 10 хвилин.

Рисунок 1.20 - Загальне радіолокаційне покриття радіолокаторами NEXRAD на висоті 10 000 футів від місця установки радіолокаторів у суміжних штатах і розташування станцій Національної метеослужби й міністерства оборони США. Заштриховані райони, де звужене покриття мережею NEXRAD на висоті 10 000 футів у порівнянні з покриттям, що існували до впровадження мережі NEXRAD

При наявності опадів коловий огляд відбувається під кутами місця від 0,5 до 19,5° у двох режимах: у першому режимі потрібно 6 хвилин на дев'ятьох кутах місця, у другому – 5 хвилин на 14 кутах місця (рис. 1.21) [42].

Взимку при невеликих висотах радіолуни опадів (3-4 км) синоптики віддають перевагу інформації колових оглядів, проведених до менших кутів місця з кроком менше ширини ДНА (1°), а при виникненні інтенсивних конвективних процесів нерідко наполягають на проведенні більш частих оглядів на малих кутах місця.

Передача базових даних і продуктів спостережень WSR-88D усім зацікавленим споживачам забезпечує складання двічі в годину стикованої карти по території США в національних центрах метеослужби у Вашингтоні, Канзас-Сіті, Майами й у Національному метеоцентрі міністерства оборони у Вашингтоні.

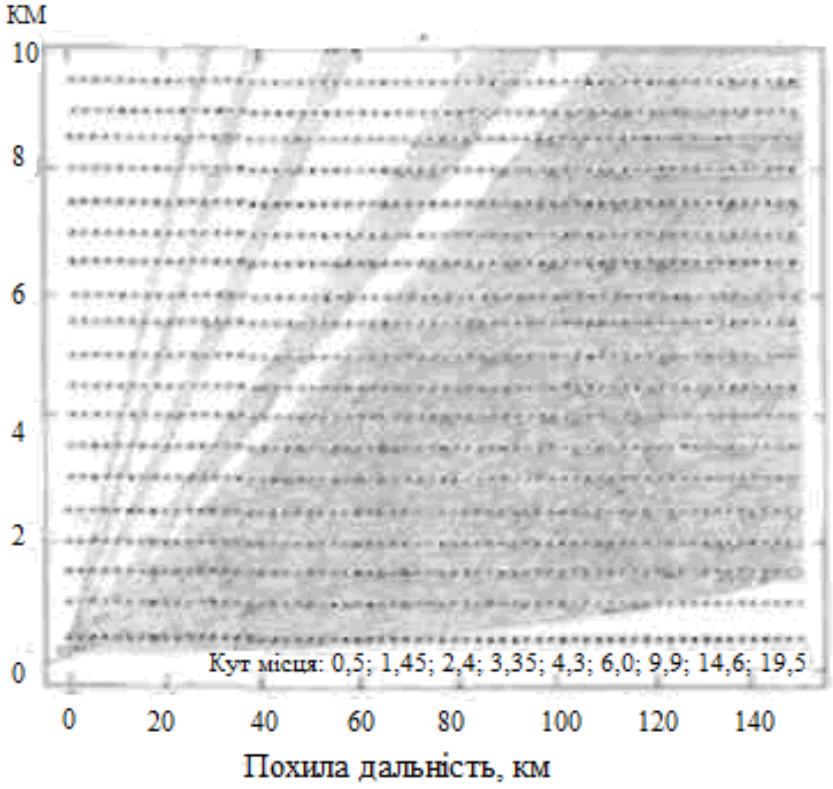


Рисунок 1.21 - Вертикальний розріз типового об'ємного огляду WSR-88D, зробленого над островом Камано, в 150 км до сходу від радіолокатора. Райони з даними заштриховані. Місце розташування кожної крапки сітки декартових координат відзначене хрестиком. Місце розташування антени радіолокатора відзначене кружком

У результаті оперативної роботи однією з важливих перваг інформації мережі NEXRAD визнана можливість її застосування в експертних системах поточного прогнозування синоптика й гідролога, а також для ініціації національних, регіональних і хмарних прогностичних моделей з високим

відрізнянням для складання чисельного метеопрогнозу заблаговчастністю до 24 годин.

1.1.7.2 Алгоритми обробки інформації

Базові дані WSR-88D – відбиваність, середня радіальна швидкість і ширина спектра радіальної швидкості – після обробки виводяться на дисплей радіолокатора й одночасно аналізуються за допомогою алгоритмів.

На WSR-88D [41] постійно виходять вихідні продукти по 19 алгоритмах (один із прикладів наведений на рис. 1.22).

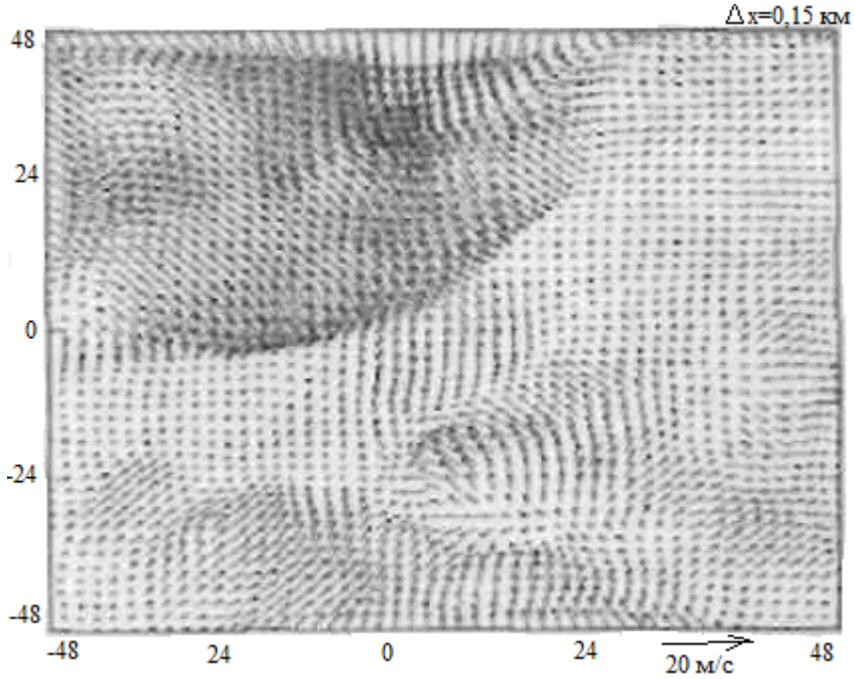


Рисунок 1.22 - Горизонтальне поле вітру, отримане на WSR-88D у Мемфісі методом сполученого витягу. Явище спостерігалося 24 липня 1996 р. і мало форму двох ліній конвергенції. Крок сітки по дальності Δx=0,15 км

Як відзначають американські фахівці, їх перелік постійно змінюється в міру зміни й удосконалення алгоритмів і придбання досвіду їх практичного

використання синоптиками. Приведемо їх у порядку затребуваності споживачами [41]:

1) VIL – вертикально проінтегрована водність;
2) VAD – профілі вітру;
3) опади;
4) висота радіовідлуння купчасто-дощових хмар;
5) виявлення мезоциклонів;
6) розпізнавання й супровід штормів;
7) TVS – сигнатура смерчів (вихрів торнадо);
8) структура штормів (конвективних процесів з небезпечними явищами);
9) ширина спектру;
10) комплексна відбиваність шару;
11) контури висот радіовідлуння,
12) виявлення градів;
13) потенціал небезпечної погоди;
14) загальний зсув.

Інші п'ять алгоритмів використовуються епізодично.

Профіль вітру за допомогою методики VAD виходить тільки на тих WSR-88D, на яких використовується режим допплерівської швидкості. Частота відновлення інформації при цьому становить 5-10 хвилин. Як правило, спостереження по алгоритму VAD ведуться в районах, де відзначаються багато розсіювачів. У теплий сезон вітер виміряється в приграничному шарі чистого повітря, у районах з опадами й часто в хмарах Ci і As. Синоптики використовують продукти VAD для наступних цілей:

а) контролю висоти струйних потоків нижнього рівня;

б) пророкування типу й інтенсивності грозових процесів по профілю вертикального зсуву вітру;

в) підготовки попереджень про вітер на верхніх рівнях;

г) моніторингу проходження хвиль;

д) моніторингу сильного вітру на верхніх рівнях;

е) уточнення границь фронтальних розділів на висотах.

Якість вихідних продуктів по застосовуваних алгоритмах залежить від якості радіолокаційних даних. Серйозними джерелами їх погіршення є відбиття від місцевих предметів у нормальних і аномальних умовах поширення радіохвиль і виникаючі невизначеності у вимірюванні допплерівських швидкостей.

Останні найбільше часто відзначаються при високій частоті посилок (1000 Гц) при низьких кутах місця антени. У цьому випадку район невизначеностей зафарбоється в пурпуровий колір, що для оператора WSR-88D означає відсутність корисної інформації.

Для зменшення відбиттів від місцевих предметів оператори WSR-88D мають можливість вибрати один із трьох режекторних фільтрів нульової швидкості. Ці фільтри погіршують відбиття від місцевих предметів приблизно при нульовій радіальній швидкості на 30, 40 або 50 дб, що відповідає допплерівській швидкості, яка дорівнює приблизно 2,3; 3,0 і 4,5 м/с у допплерівському режимі й 1,7; 2,4 і 3,4 м/с у режимі огляду.

У режимі огляду на малих кутах місця (0,5° та 1,5°) фільтр може займати до 20% однозначного діапазону вимірювання дальності й швидкості. Тому зі статистичної точки зору буде пригнічуватися до 20% сигналів, відбитих від метеоутворень. При слабкому або ортогональному до діаграми направленості антени WSR-88D, вітрі, це значення буде більше, що приведе до заниження інтенсивності зливових опадів.

1.1.7.3 Продукти мережі і їх поширення

Масив оперативних даних з кожної станції NEXRAD складається із двох частин: даних про опади й радіолокаційного закодованого повідомлення. Останнє складається із трьох частин (A, B і C) і формується автоматично [43].

Частина А містить проміжний графічний продукт і буквенно-цифровий список у вигляді таблиці. У графічному продукті представлені дані по відбиваності для обмеженої моделі на дрібній сітці 1/16 х 1/16 (limited fine-mesh model, LFMM) для всієї зони огляду WSR-88D – 460 км. Цей продукт передасться синоптикові Національної метеослужби для редагування шляхом видалення або зміни даних. Буквенно-цифровий список кодує в кожному пікселі (квадраті) значення відбиваності й висоти, положення максимальної висоти радіовідлуння (де воно є), координати (місце розташування) усіх центроїдів радіовідлуння конвективної хмарності зі значеннями відбиваності, що перевищують мінімальний поріг, і прогнозоване переміщення кожного центроїду.

Частина В містить один профіль горизонтального вітру, отриманого після обробки інформації алгоритмом VAD.

Частина С містить буквенно-цифрову інформацію, яка вказує положення кожного виявленого мезоциклону й некорельований район горизонтального зсуву, кожна виявлена ознака вихру торнадо, індекс градів і дані про верхню границю шторму для кожного центроїду.

Радіолокаційне закодоване повідомлення передається автоматично після ручного редагування (якщо воно потрібно) по мережі зв'язку AFOS Syslem Z у Національний метеоцентр, де складається національна радіолокаційна зведена карта. Національні зведені карти з дозволом 8х8 км, включаючи детальну карту опадів, складаються двічі в годину.

Дані про опади виходять у графічному й цифровому вигляді [44]. Графічні продукти системи NEXRAD по опадах відображаються 16 кольорами на сітці 2х2 км у радіусі 230 км. Вони призначені в основному для виводу на кольорові графічні дисплеї головного процесора користувача (ПУП) NEXRAD. Кожний WSR-88D одночасно може обслуговувати до 16 ПУП. Дисплеї ПУП мають відрізнення не менш 640х512 елементів і 16 кольорів. Функції відображення графічних продуктів про опади наступні:

– вивід фонової карти;

– зсув центру;

– масштабування;

– періодичні знімки.

Дані про опади в цифровому виді призначені для передачі на комп'ютери центрів річкових прогнозів (ЦРП) і бюро прогнозів метеослужби (БПМС) для використання в автоматизованих моделях річкового стоку й прогностичних розрахунках:

– годинний цифровий продукт – поточні годинні або погодинні суми опадів по квадратах 4х4 км. Їхній динамічний діапазон становить від –18 до 32 дБІ, а точність 0,5 дБІ. Період відновлення – кожні 5 хвилин і автоматична передача два рази в годину в ЦРП і по запиту до чотирьох раз у годину в усі БПМС,

– вибрані додаткові дані, що представляють собою осереднені по площі 40х40 км значення інтенсивності опадів за один або більше колових оглядів за останню годину. Оновлюються кожні 5 хвилин і автоматично передаються кожні 30 хв у ЦРП і по запиту в БПМС. Передбачена при необхідності передача й інших додаткових даних.

До передачі споживачеві дані переводяться на «універсальну» сітку, застосовувану в Національній метеослужбі й засновану на полярній стереографічній проекції. Це дозволяє виконати швидке сполучення даних, що надходять з різних пунктів. Після процедури ущільнення, з метою зниження навантаження на засоби зв'язку, дані передаються в БПМС і ЦРП для їхньої обробки на регіональному й національному рівнях.

У процесі створення мережі NEXRAD була організована служба поширення інформації NIDS (NEXRAD information dissemination service) [41, 43]. Для закордонних споживачів, метеорологів приватного сектору, телевізійних служб і деяких членів уряду NIDS готовить у закодованому виді вісім основних продуктів NEXRAD:

1) базові відбиваності;

2) базові допплерівські швидкості;

3) VIL;

4) загальна кількість опадів (нагромадження) у штормі;

5) картина VAD;

6) профілі вітру;

7) відносна швидкість шторму;

8) таблиця атрибутів шторму.

NIDS передає їх через посередників у сфері телекомунікацій (телебачення, радіо, приватні засоби зв'язку) або через метеорологічні сервісні компанії. Із цією метою на кожному WSR-88D для споживачів виділено чотири порти. На конкурсній основі відбираються чотири компанії, первинні дистриб'ютори, які мають право продавати основні продукти й створювати нові продукти підвищеного якості, наприклад місцеві, регіональні й національні мозаїки даних мережі NEXRAD.

Як відзначається в [41], «ні при яких умовах ніякої компанії не буде дано виключне право одержання даних і продуктів NEXRAD». Поширення інформації мережі NEXRAD через приватний сектор розглядається в США як виконання зобов'язань Федеральної національної метеослужби по доведенню до населення країни результатів своєї прогностичної діяльності через засоби масової інформації.

Найбільшу користь інформація окремої МРЛС WSR-88D і мережі NEXRAD приносить, якщо вона вчасно виявиться в руках кваліфікованого синоптика. При погрозі появи небезпечних явищ жодне джерело даних не вивчається синоптиком більш уважно й не вимагає більш частих консультацій чим радіолокаційний. Однак для складання успішного короткострокового прогнозу відомостей тільки з одного джерела навіть найдосвідченішому синоптикові недостатньо.

Розроблена в США в рамках програми створення метеорологічних робочих станцій удосконалена інтерактивна система обробки метеоданих (AWIPS) здатна відображати всі дані, необхідні для проведення поточного (nowcasting) і короткострокового прогнозу [41, 43, 45].

Основне завдання AWIPS – об'єднання поточної інформації від різних джерел на одному дисплеї без витрати синоптиком часу на подолання технічних труднощів при введенні на дисплей різнорідної інформації і її об'єднанні.

На дисплеї поточної погоди AWIPS можуть відображатися: карти відбиваності, опадів і радіальної швидкості з WSR-88D, супутникові зображення з більшим дозволом, дані про блискавки, результати мезомасштабних наземних спостережень, інформація про ландшафт, гідрологічні дані, адміністративні карти й інші відомості, необхідні синоптику для роботи.

Об'єднання інформації на AWIPS виконується з використанням кольору й анімації, алгоритмів екстраполяції положення радіовідлуння хмар і опадів і інших метеорологічних явищ. Вивчаючи комбінації радіолокаційних і інших даних, синоптики судять про потенціал небезпечного явища погоди й дають прямо з AWIPS у напівавтоматичному режимі штормові попередження тільки для тих населених пунктів і районів, яким небезпечне явище дійсно загрожує.

Десятилітній практичний досвід роботи синоптиків США дозволив рекомендувати AWIPS у якості першої системи-резидента в офісах метеопрогнозів. Частиною AWIPS є супутниковий зв'язок між усіма офісами й Вашингтоном. Супутниковий зв'язок дозволяє одержувати в реальному часі супутникові дані, а також набір результатів прогнозів з національних центрів прогнозування. Уперше за допомогою AW1PS синоптики на своїх робочих місцях у будь-якому прогностичному офісі США одержують можливість детально розглянути погодні умови в національному й глобальному масштабі, маючи в той же час детальні поля опадів і небезпечних явищ із WSR-88D.

Важливими компонентами впроваджуваних AWIPS є обчислювальне обладнання, нові алгоритми прогнозу погоди, моделі й алгоритми гідрометеорологічного прогнозу для своєчасного попередження про повені,

можливість оперативного добору співвідношень Z-I, редагування даних, видозміни правил прогнозу й переробки прогнозів.

AWIPS допоможе перетворити кожний центр метеопрогнозів не тільки в зроблений метеоцентр, але й у місце вивчення метеопрогнозу.

Планується встановити AWIPS в університетських містечках для їхнього використання в науковій праці.

Подальший розвиток за рахунок спільного використання даних усіх видів спостережень дозволить AWIPS максимально вірогідно описувати погоду незалежно від способу одержання вихідної інформації. Останнє забезпечить, в остаточному підсумку, максимально можливе практичне використання базової інформації й продуктів WSR-88D.

1.1.7.4 Технічне забезпечення роботи мережі

Технічний контроль над роботою WSR-88D на мережі NEXRAD здійснює OSF NEXRAD – підрозділ оперативної підтримки Національної метеослужби США. Воно було створене в 1988 році в Норманові (Оклахома) для координації керування, розробки додатків і технічної підтримки мережі NEXRAD. Цей підрозділ здійснює супровід оперативних систем (технічне керування, обслуговування програмного забезпечення й контроль конфігурації компонентів системи), а також координацію з аналогічною службою Федерального авіаційного управління [41, 46].

В OSF розроблені процедури перевірки параметрів основних робочих характеристик передавача, приймача, антени й системи обробки сигналу. На WSR-88D автоматично контролюється потужність передавача й настроювання прийомного обладнання, визначені обов'язкові настроювання в процесі профілактичних робіт. Для перевірки точності юстіровки й орієнтування антени кожні 28 днів проводиться перевірка WSR-88D по сонцю. Настроювання й перевірка помилок відбиваності проводяться з

інтервалом у 84 дні. Постійно перевіряється мінімально виявлений сигнал WSR-88D.

На всі технічні питання, що виникають у процесі експлуатації WSR-88D, цілодобово можна одержати відповідь із центру обслуговування мережі OSF NEXRAD. В OSF ведеться постійний контроль стану всіх МРЛС мережі NEXRAD з обов'язковим попередженням кожної МРЛС про виникаючі проблеми, які не можна розв'язати на місці.

OSF визначає й контролює параметр SYSCAL. Коли цей параметр перебуває у встановлених межах, вважається, що оцінка відбиваності не виходить за необхідні границі ± 1 дБ.

1.1.8 Аналіз побудови існуючої метеорологічної автоматизованої мережі радіолокації Російської Федерації

1.1.8.1 Стан мережі

Коротко визначити сучасний стан мережі метеорологічних радіолокаторів можна як перехідний. Колишня мережа Росгідромета, що існувала до 2011 року і складалася з 31 радіолокатора МРЛ- 5 і чотирьох МРЛ-2, поступово припиняє своє існування.

Сукупність згаданих радіотехнічних засобів можна було називати мережею лише умовно, оскільки біля третини з них не були автоматизовані, а встановлені системи автоматизації не були об'єднані в єдиний інформаційний простір. Самі радіолокатори вже давно морально застаріли, оскільки не мають когерентного режиму роботи, тобто здатні вимірювати тільки один параметр спостережуваних цілей, а саме потужність відбитого сигналу або величину радіолокаційної відбиваності, що розраховується по ній.

1.1.8.2 Розвиток мережі

З 2011 року на мережі встановлюються допплерівські поляриметричні метеорологічні станції радіолокацій ДМРЛ-С розробки ВАТ НВО "Лианозовский електромеханический завод". За своїми характеристиками вони є одними з кращих у світі МРЛС, з режимами когерентності, подвійною поляризаціїєю і стискуванням випромінюваного імпульсу [47]. Всі вони забезпечені системою обробки і представлення даних і відразу по установці на позицію включаються в єдину систему. На початок 2014 року було виготовлено 40 комплексів, приблизно половина з них розгорнута на позиціях і поставляє інформацію. До числа вимірюваних ними параметрів сигналу входять:

– радіолокаційна відбиваність;
– середня частота спектру радіальних швидкостей гідрометеорів;
– ширина спектру радіальних швидкостей гідрометеорів;
– диференціальна відбиваність;
– диференціальна фаза;
– модуль коефіцієнта взаємної кореляції поляризаційних складових сигналу.

Такий арсенал засобів моніторингу довкілля дозволяє значно розширити перелік небезпечних явищ погоди, що виявляються, і підвищити ефективність використання МРЛС. Так, введення режиму когерентності дає можливість до традиційного списку небезпечних явищ, таких як злива, гроза, град додати:

– зони сильного вітру;
– торнадо (смерчі);
– фронти поривчастої;
– області зсуву вітру;
– зони підвищеної турбулентності;

– мікрошквали.

На основі отриманої в цьому режимі інформації розраховуються структура поля вітру в горизонтальних шарах простору і вертикальний профіль вітру в спостережуваній області.

Головна перевага режиму подвійної поляризації полягає в можливості визначення агрегатного стану часток, з яких складаються спостережувані метеорологічні об'єкти [48]. Це означає, що град і області переохолодженої води виявляються не по непрямих методах, як це робилося в некогерентних МРЛС, а безпосередньо і, отже, з набагато більшою вірогідністю. За характерними співвідношеннями радіолокаційної і диференціальної відбиваності ідентифікуються наступні об'єкти і явища:

– сухий град, сніг, яким відповідають мале значення відбиваності Z і близьке до нуля значення диференціальної відбиваності ZDR;

– мокрий град і сніг - великі значення Z і малі ZDR;

– слабкий або середній дощ - середні значення обох параметрів;

– сильний дощ, злива - великі значення обох параметрів;

– скупчення птахів або комах - дуже великі значення ZDR;

– відбиття від місцевих предметів (местники) - негативні значення ZDR.

При оцінці диференціальної фази сигналу (різниця фаз між його горизонтальною і вертикальною складовими), що приймається, дістаємо можливість удвічі збільшити точність вимірювання інтенсивності опадів. Отримані при цьому оцінки виявляються незалежними від потенціалу МРЛС і часткового блокування променя місцевими предметами. Все це робить диференціальну фазу ідеальним інструментом для калібрування МРЛС.

Модуль коефіцієнта взаємної кореляції поляризаційних складових сигналу є ідентифікатором того, що спостерігається саме метеорологічна мету. При цьому його величина дорівнює 0,98-1. Інакше вона падає нижче за рівень 0,5. Отже, відкриваються можливості визначити, що спостережуваний

об'єкт - це, наприклад, запорошена буря або скупчення птахів, на що додатково вкажуть значення диференціальної відбиваності. Є надія, що вимірювання цього параметра полегшить виявлення такого важливого об'єкту як смерч, оскільки підняті в повітря пил і сторонні предмети приведуть до деякого зменшення його значення в спостережуваній області простору.

Все вище сказане показує, які можливості відкриваються перед нами в плані своєчасного розпізнавання і прогнозування розвитку небезпечних явищ погоди, тобто в рішенні головної задачі, що стоїть перед мережею метеорологічних станцій радіолокацій.

Додатково до карт, що формуються колишніми системами автоматизації, нова система видає карти розподілу усіх шести вимірюваних параметрів в горизонтальних шарах простору або по поверхні конічного розрізу, а також карти профілю вітру, зсуву вітру і турбулентності.

Головний напрям роботи по розвитку нової мережі на сьогодні - розробка методик застосування даних, що надходять від неї. Інакше, встановивши на території країни 140 першокласних радіолокаторів, відповідних найвищим світовим стандартам, не доб'ємося якісного стрибка в отримуваній інформації.

Але на цьому проблеми сучасної мережі не закінчуються. Якщо подивитися на карту розташування ДМРЛ-С (рис. 1.23), побачимо, що європейська частина Росії практично уся закрита зонами відповідальності радіолокаторів.

У східній частині вони розташовані значно рідше, але і завдання повного закриття цієї території не ставилося. Проте усе сказане відноситься до режиму роботи "Відбиваність", при якому радіолокатор працює в некогерентному режимі, а радіус дії складає 250 км.

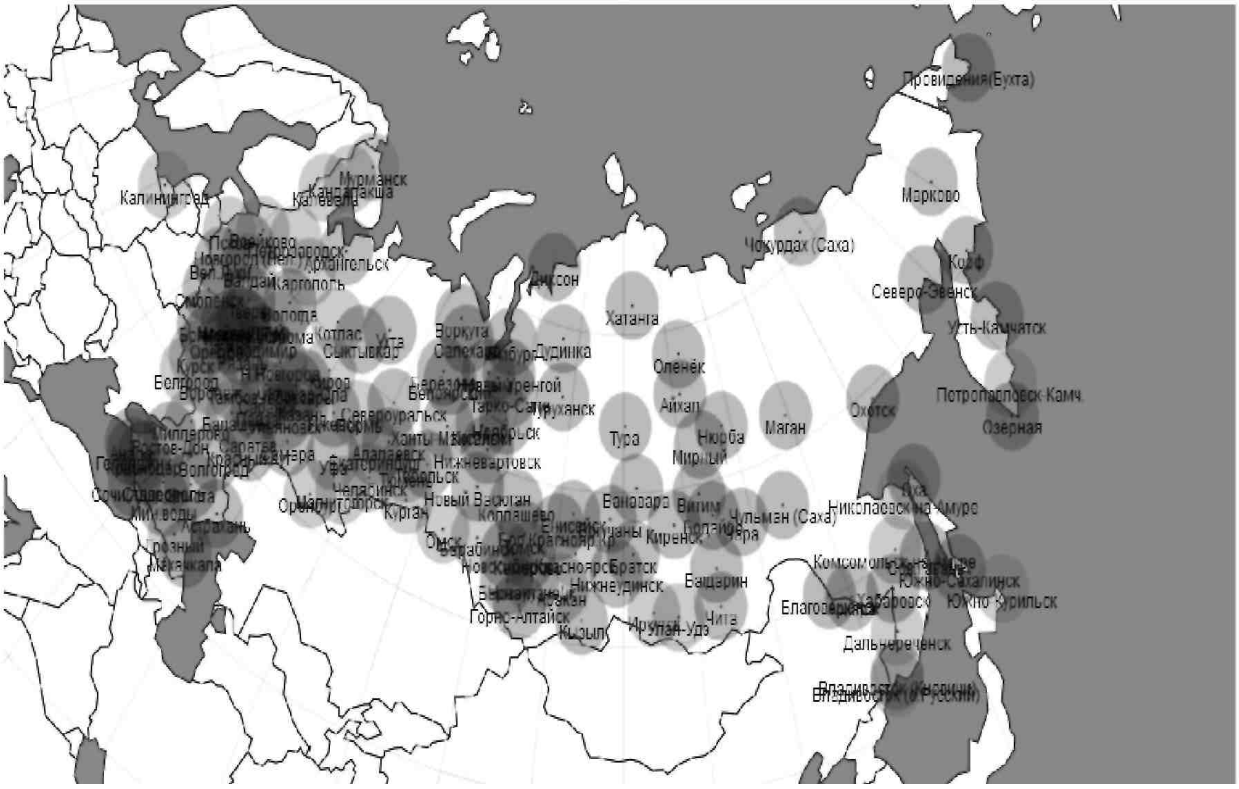


Рисунок 1.23 - Карта зон охоплення території Росії мережею радіолокаторів ДМРЛ-С (радіус огляду 250 км)

Якщо ж подивитися на карту з нанесенням робочих зон радарів в режимі "Швидкість" (рис. 1.24), при якому оцінюються спектральні параметри сигналу, а дальність дії зменшується до 125 км, картина виходить менш оптимістичною.

Стають видні значні території, не охоплені радіолокаційними спостереженнями. Отже, говорити про побудову єдиного для країни поля розподілу параметрів вітру не доводиться.

Рисунок 1.24 - Карта зон охоплення території Росії мережею радіолокаторів ДМРЛ-С (радіус огляду 125 км)

1.2 Аналіз концепцій побудови існуючих метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж

1.2.1 Завдання метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж

У світі різко зросло число споживачів, чия успішна виробнича діяльність залежить від своєчасного одержання якісної радіолокаційної метеорологічної інформації в складних погодних умовах. Високий рівень радіолокаційної й обчислювальної техніки, досягнутий до останнього десятиліття минулого століття, технічна революція в прийманні й передачі інформації, досвід роботи, накопичений трьома поколіннями радіометеорологів на частково автоматизованих або повністю автоматизованих МРЛС, у різних регіонах Землі, дозволили сформулювати вимоги до багатофункціональної метеорологічної автоматизованої

радіолокаційної мережі (МАРС) [49]. Під багатофункціональністю розуміється синхронна робота всіх мережних радіолокаторів по єдиній програмі спостережень і обробці на основі базових вимірювань і алгоритмів вихідних інформаційних продуктів, які задовольняють запити всіх споживачів як окремої МРЛС, так і мережі в цілому.

МАРС призначена для наступних цілей:

а) штормового оповіщення населення й організацій на новому якісному рівні, тобто створення автоматизованої технології поточного прогнозу небезпечних стихійних явищ із метою багаторазового підвищення його оперативності і якості;

б) організації метеозабезпечення цивільної й відомчої авіації відповідно до вимог, пропонованих автоматизованих систем керування повітряним рухом як по території, так і в кожному аеропорті;

в) вимірювання інтенсивності й кількості опадів по територіях для використання в метеорологічних і гідрологічних прогнозах повеней;

г) доведення інформації безпосередньо до інженерних служб комунального господарства адміністрації міст, з метою повного й оперативного її використання при організації робіт і контролі стану міських, приміських і міжміських транспортних магістралей, особливо загальнонаціонального значення;

д) підвищення якості роботи еколого-прогностичних центрів по надзвичайних ситуаціях;

е) підвищення рівня метеозабезпечення адміністративних органів шляхом створення на робочих місцях абонентських пунктів споживачів інформації МАРС;

ж) перехід на якісно новий рівень обслуговування будь-яких споживачів і в першу чергу тих, виробнича діяльність яких суттєво залежить від гідрометеорологічних умов.

Обслуговування споживачів МАРС на договірних засадах (тільки такий підхід знижує експлуатаційні витрати держави на зміст МАРС) можливо

лише при беззастережному виконанні їх вимог до форм, строків, регулярності й вірогідності метеоінформації, яка дозволяє їм ухвалювати рішення, що сприяють мінімізації збитку від погодних умов, або приносити прибуток. Це означає, що метеоінформація повинна бути доставлена на робоче місце споживача в зручній для прийняття розв'язків формі й містити рекомендації практичного характеру.

1.2.2 Концепції створення метеорологічних автоматизованих радіолокаційних мереж

Автоматизована МРЛС – дороге устаткування, яке вимагає більших витрат як при його установці на позиції, так і при щорічній цілодобовій експлуатації. Для мінімізації й слушного розподілу фінансових витрат серед основних інвесторів – споживачів інформації в державному масштабі повинна розроблятися концепція створення мережі МРЛС на території країни.

У концепції необхідно відобразити відповіді на наступні питання:

– вимоги потенційних інвесторів і споживачів інформації (головних , що представляють державу, і всіх інших);

– визначення пріоритетів, розв'язуваних мережею. Залежно від повторюваності небезпечних явищ, інтенсивних опадів і цінності інформації МАРС для мінімізації збитку в кожній країні встановлюють пріоритети завдань (зміни порядкових номерів у переліку завдань МАРС). Наприклад, у США пріоритетним є виявлення торнадо й стихійних гідрометеорологічних явищ, у Великобританії – гідрологічний прогноз, у Росії – штормове оповіження про небезпечні стихійні явища й метеорологічне забезпечення авіації (через рідку мережу наземних метеостанцій і більших територій);

– кліматологічні аспекти (повторюваність небезпечних явищ і інтенсивних опадів по території);

– соціально-економічні фактори (облік розподілу щільності

населення й найважливіших народногосподарських об'єктів по території країни);

– вибір висоти рівня єдиного радіолокаційного поля країни (жодне атмосферне явище, верхня границя якого цей рівень перевищує, не буде пропущено при радіолокаційних спостереженнях);

– основні принципи збору інформації й поширення її споживачам;

– джерела фінансування;

– техніко-економічне обґрунтування концепції.

Після всебічного обговорення й затвердження концепції на державному рівні, а також вибору зон суцільного перекриття основним критерієм при виборі конкретних пунктів для розміщення МРЛС і конкретної позиції в кожному із затверджених пунктів є мінімізація економічних витрат.

Аналізуючи досвід створення МАРС у різних країнах, необхідно відзначити ряд загальних підходів [12, 13, 43]:

1) передумова створення – виникнення нагальної потреби використання радіолокаційної метеорологічної інформації про небезпечні явища й опади для розв'язку господарських завдань;

2) розуміння обов'язковості системного підходу при створенні МАРС;

3) розв'язок питань фінансування МАРС по можливості на державному рівні;

4) залежно від обсягу виділених засобів вибір шляхів створення МАРС – «революційного» або «еволюційного».

1.2.3 Шляхи створення мереж і пріоритети

Прикладом «революційного» шляху створення МАРС є реалізація проекту NEXRAD у США [43], а «еволюційного» – створення МАРС у Західній Європі [13, 38].

МАРС NEXRAD створювався по федеральній цільовій програмі США з кінця 1970-х років трьома федеральними відомствами: Міністерством

торгівлі (національна метеослужба), Міністерством оборони (авіаційна метеослужба й група морської океанографії) і Міністерством перевезень (федеральне авіаційне управління – ФАУ) [43].

Кожне з перерахованих відомств сформулювало свої вимоги до МАРС NEXRAD.

Міністерство торгівлі. Національне управління по океанах і атмосфері (НУОА), Національна метеослужба відповідають за підготовку попереджень про небезпечні явища й повені, а також за прогнози для авіації загального призначення й за метеорологічні рекомендації із захисту життя й майна. Головна вимога – універсальність, надійність і ефективність застосування для раннього й точного виявлення небезпечних явищ.

Міністерство перевезень. ФАУ відповідає за безпечне ефективне використання повітряного простору. Головна вимога – високонадійна дружня система (для АСУВД ГА) для одержання інформації про штормові умови на маршруті польоту повітряних судів і про потенційно небезпечну локальной турбулентності без додаткового навантаження на диспетчерський склад УВС.

Міністерство оборони. Командування ВПС США по авіаційному метеорологічному обслуговуванню й океанографії відповідає за інформацію й попередження збройних сил для підвищення безпеки польотів і за надання допомоги в прийнятті розв'язків. Головна вимога – NEXRAD повинен бути надійною, простою в експлуатації конструкцією, здатною виконувати різні військові завдання за участю співробітників різних спеціальностей і кваліфікації.

Суть концепції NEXRAD полягала в розробці й поставці однотипної радіолокаційної системи, що відповідає мінімальним запитам усіх трьох відомств, і їх об'єднанні в МАРС.

Усі три відомства в технічному завданні на проектування відзначили важливість повної автоматизації NEXRAD, яка повинна забезпечити нову якість радіолокаційних метеоспостережень: дистанційно вимірювати характеристики опадів і оптично чистого прикордонного шару атмосфери,

обробляти в реальному часі, передавати й виводит на дисплеї цифрові дані на основі перевірених в оперативній практиці й удосконалених алгоритмів аналізу.

Радіолокатор NEXRAD (WSR-88D) повинен був повсюдно замінити 56 WSR-57 і WSR-74S на існуючій радіолокаційній мережі Національної метеослужби й 73 МРЛ (в основному WSR-74C) мережі місцевого штормового оповіщення.

В 1988 році після розробки й випробування WSR-88D конгрес санкціонував модернізацію й реструктуризацію Національної метеослужби й виділив для цього засобу [43].

МАРС Західної Європи. Її створення проводилося поступово, у міру появи фінансових можливостей. У цій ситуації в кожній країні до моменту початку функціонування МАРС у повному обсязі були розставлені пріоритети з урахуванням цінності й першочерговості інформації автоматизованих МРЛС (вони наведені відповідно до аналізу Newsome [50] на семінарі COST-73) (табл. 1.4).

У кожній країні Західної Європи МАРС створювалася на базі вітчизняних МРЛС або МРЛС відомих фірм. Системи автоматизації розроблялися під пріоритетні завдання, застосовувалися свої методи кодування й розпізнавання переданої інформації.

Участь усіх країн Західної Європи в дослідницьких проектах Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) для Європи COST-72, COST-73 і COST-75 дозволило уніфікувати вимоги по кожному аспекту функціонування МАРС і створити в остаточному підсумку міжнародну мережу МАРС у Європі.

У цьому умовно названому «еволюційним» шляху створення МАРС уніфікація проведена на рівні обміну інформацією за допомогою єдиного міжнародного коду BUFR 94M і протоколів інформаційного обміну ВМО, а технічні засоби й національні пріоритети вибиралися самими учасниками проектів COST.

Таблиця 1.4 – Вимоги європейських країн до інформації МАРС

	Австрія	Бельгія	Великобританія	Германія	Данія	Іспанія	Італія	Нідерланди	Норвегія	Португалія	Фінляндія	Франція	Швейцарія	Швеція
Метеорологічне забезпечення авіації	+				+		+			+			+	+
Штормове оповіщення	+					+					+		+	+
Короткостроковий прогноз, у т.ч. опадів і небезпечних явищ	+	+		+					+			+		
Активні впливи на гради	+						+							
Метеорологічне забезпечення дорожнього транспорту й доріг	+		+					+	+		+		+	+
Показ радіолокаційних карт погоди по телебаченню	+		+											
Вимірювання опадів і гідрологічний прогноз паводків, повеней, річкового й міського стоку, керування водними ресурсами		+	+	+				+		+	+	+		
Підвищення якості метеопрогнозу проходження фронтальних систем, строків початку й закінчення опадів			+											
Сполучення з даними ИСЗ			+									+		
Метеорологічне забезпечення сільськогосподарських робіт і обслуговування фермерів прогнозами опадів					+		+							+
Будівництво								+						
Розрахунки потоків на гірських річках													+	
Розробка адвективних моделей короткострокового прогнозу														+

У табл. 1.5 наведена схема розподілу інформації МАРС у Західній Європі [13, 17].

Таблиця 1.5 – Концептуальна схема розподілу інформації МАРС у Західній Європі (COST-72)

Національний рівень	Регіональний рівень	Місцевий рівень
Метеорологічна або гідрометеоро-логічна служба	Регіональні органі водного господарства (керування водоймищами, ріками, водоросподіл й водопостачання, попередження про повені – прогноз)	Центр керування ріками й водоймищами, поліція (попередження про повінь – прогноз)
	Великі міста із пригородами (дренування земель, експлуатація магістральних колекторів, попередження про повені – прогноз)	Населені пункти, органи місцевого керування, поліція (попередження про повінь – прогноз)
	Транспорт (несприятливі умови – прогноз – для дорожнього, рейкового, морського й повітряного транспорту, штормове попередження – прогноз – для морського й повітряного транспорту, керування літаками)	Керування повітряним рухом, організація залізничних перевезень, автомобільні організації, берегова охорона
	Виробництво гідроелектроенергії (несприятливі умови – прогноз)	Центри керування операціями
	Інше	Будівельна промисловість, сільське господарство, садівництво

1.2.4 Вибір нижнього рівня для єдиного радіолокаційного поля

Вибір висоти рівня єдиного радіолокаційного поля країни, яке забезпечує діаграми направленості антен (ДНА) МРЛС МАРС з обліком радіорефракції й висоти розміщення МРЛС, визначає число МРЛС МАРС і їх віддалення один від одного.

Якщо висота нижньої межі ДНА МРЛС при нульових кутах місця антени дорівнює 1,35 км, то відповідно до формул (1.1) і (1.2) для нормальної

рефракції ($\xi = 6 \cdot 10^{-5}$ км$^{-1}$) [51] сусідні МРЛС повинні бути розміщені на відстані 300 км один від одного. Якщо робота буде проходити при куті місця 0,5°, то ця відстань не буде перевищувати 200 км:

$$R_{\text{РГ}}\,(\text{км}) = 4{,}12\left(\sqrt{h_a(\text{м})} + \sqrt{H_ц(\text{м})}\right), \tag{1.1}$$

$$H(\text{км}) = R\,(\text{км})\sin\varepsilon + \xi R(\text{км})^2 + h_a(\text{км}), \tag{1.2}$$

де $R_{\text{РГ}}$ – дальність радіовидимості (радіогоризонту);

R – відстань від МРЛС до цілі;

ha – висота антени над поверхнею землі;

$H_ц$ – висота цілі над поверхнею землі;

H – висота цілі щодо висоти антени;

ε – кут місця (піднесення) діаграми направленості антени.

Мережа NEXRAD повинна забезпечувати майже безперервне перекриття території США на висоті 3 км (10 000 футів) над рівнем установки для виявлення сильних штормів і інших небезпечних метеоспостережень [43]. У Західній Європі ця висота дорівнює 1,5 км [38].

1.2.5 Вимоги споживачів

Багаторічні дослідження в рамках проектів COST-72 і COST-73 дозволили узагальнити вимоги потенційних споживачів Західної Європи до радіолокаційної метеорологічної інформації (табл. 1.6 – 1.8) [13, 17, 35]. Вимоги складені для звичайних і аномальних метеорологічних умов для МАРС, пріоритетом якої є вимірювання опадів.

Таблиця 1.6 – Вимоги споживачів (метеорологічних служб) Західної Європи до інформації МАРС

Вимоги	Гідрометеоро-логічний центр	Гідрометеоро-логічна обсерваторія
Масштаби дослідження	Регіональні, національні	Обласні, регіональні
Роздільна здатність по площі, км×км	50	2
Аномальні метеорологічні умови, тривалі й інтенсивні опади. Відомості про кількість опадів		
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, розділ даних про кількість опадів, хв	60	5
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:		
число рівнів інтенсивності опадів, мм/год	6	127
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (зі збільшенням 1 мм)	
Прогноз випадання опадів:		
періодичність повідомлень, хв	60	60
період прогнозу, година	36	6
часове відрізнення повідомлень про прогнози, година	перші 6 годин – 1 година, далі – 6 годин	1
Звичайні метеорологічні умови. Відомості про кількість опадів		
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, дозвіл даних про кількість опадів, година	1	12
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:		
число рівнів інтенсивності опадів, мм/год	6	
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (з збільшенням залежно від вибору рівнів)	0 – 25 (зі збільшенням 2 мм)
Прогноз випадання опадів:		
періодичність повідомлень, хв	60	15
період прогнозу, година	36	3
часове відрізнення повідомлень про прогнози, хв	перші 6 годин – 1 година, далі – 6 годин	5

Таблиця 1.7 – Вимоги споживачів (гідрологічних служб) Західної Європи до інформації МАРС

Вимоги	Центр керування басейнами рік	Керування міськими колекторами	Виробництво гідроелектро-енергії
Масштаби дослідження	Басейн ріки	Територія міста	Басейн ріки
Роздільна здатність по площі, км×км	50	2	50
Аномальні метеорологічні умови, тривалі й інтенсивні опади. Відомості про кількість опадів			
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, відрізнення даних про кількість опадів, хв	15	5	30
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:			
число рівнів інтенсивності опадів, мм/година	25	25	25
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (зі збільшенням 1 мм)		
Прогноз випадання опадів:			
періодичність повідомлень, година	6	6	6
період прогнозу, година	72	24	36
часов відрізнення повідомлень про прогнози, година	6	6	6
Звичайні метеорологічні умови. Відомості про кількість опадів			
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, відрізнення даних про кількість опадів, година	6	6	
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:			
число рівнів інтенсивності опадів, мм/година	12	12	12
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (зі збільшенням 2 мм)		
Прогноз випадання опадів:			
періодичність повідомлень, хв	15	15	30
період прогнозу, година	3	1	24
часове відрізнення повідомлень про прогнози, хв	15	15	30

Таблиця 1.8 – Вимоги споживачів (деякі галузі господарства) Західної Європи до інформації МАРС

Вимоги	Загальне земле-робство	Садів-ництво	Наземний транспорт	Будів-ництво
Масштаби дослідження	Регіональні	Локальні	Регіональні	Локальні
Роздільна здатність по площі, км×км	50	2	50	2
Аномальні метеорологічні умови, тривалі й інтенсивні опади. Відомості про кількість опадів				
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, відрізнення даних про кількість опадів, година	1	1	1	1
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:				
число рівнів інтенсивності опадів, мм/година	8	8	8	8
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (зі збільшенням 3 мм)			
Прогноз випадання опадів:				
періодичність повідомлень, хв	12	12	12	12
період прогнозу, година	24	24	24	24
часове відрізнення повідомлень про прогнози, година	12	12	12	12
Звичайні метеорологічні умови. Відомості про кількість опадів				
Період часу, за який визначається сумарна кількість опадів, відрізнення даних про кількість опадів, година	12	12	12	12
Інтегровані сумарні кількості за період часу між передачами відомостей:				
число рівнів інтенсивності опадів, мм/година	3	3	3	3
шкала, мм (сумарна кількість опадів)	0 – 25 (зі збільшенням 8 мм)			
Прогноз випадання опадів:				
періодичність повідомлень, хв	3	3	1	1
період прогнозу, година	3	3	3	3
часовий відрізнення повідомлень про прогнози, година	1	1	1	1

Аналіз вимог основних споживачів МАРС Росії наведений у табл. 1.9 [49].

Таблиця 1.9 – Вимоги споживачів (деякі галузі господарства) Росії до інформації МАРС

Галузь господарства	Споживачі інформації	Вимоги споживачів		
		Розв'язна здатність по площі, км^2	Періодичність передачі відомостей про кількість опадів, хв	Дозвіл даних про опади - число градації інтенсивності, мм/год
Цивільна авіація	Синоптики АМСГ, АМЦ, служби УВС, АС УВС аеропортів і районів	4; 16	5; 15	6
Росгідромет (прогностичні підрозділи)	Гідрометцентр РФ Гідрометобсерваторія ЦГМС	50; 100 2 50; 100	60; 180 5; 15 60	6 30 6
Сільське господарство	Диспетчерська служба, окремі господарства, фермери	50 2	60 15	6 30
Енергетика і зв'язок	Підрозділу обслуговування ГЕС, ЛЕП, лінії зв'язку (радіорелейні й через ІСЗ)	50	30	30
Транспорт	Адміністрації дорожнього, залізничного, річкового й прибережного морського транспорту	50	60	8
Комунальне господарство	Керування комунальним господарством великих міст, керування міськими колекторами	2	5	25
Лісове господарство	Служба захисту від лісових пожеж	2; 50	11 по запиту	6 або 15
Будівельництво	Адміністрація, що відає роботами на відкритих будівельні площадках проведення підривних робіт	2; 50	По запиту	6 або 15

Примітка. Для всіх споживачів під відомостями про небезпечні й стихійні явища маються на увазі відомості про гради, грози, інтенсивні зливи, шквали, смерчі.

Концепція МАРС у Росії пропонує такий обсяг вихідної інформації з кожної автоматизованої МРЛС, який дозволяє виробити рекомендації споживачеві у вигляді наступних фактичних і прогностичних карт:

– небезпечних явищ, пов'язаних з грозонебезпекою, градонебезпекою, шквалами, смерчами, мезоциклонами в поле хмар, підвищеною турбулентністю, підвищеними значеннями зсуву вітру;

– висоти хмар і максимальних значень відбиваності, інтенсивності опадів і сумарного шару опадів за різні проміжки часу;

– радіолокаційної відбиваності, радіальній швидкості й ширини спектра швидкості в будь-яких горизонтальних і вертикальних перерізах.

Кожна карта повинна супроводжуватися текстом у термінах і визначеннях, погоджених зі споживачами.

1.2.6 Вибір географічного пункту для установки МРЛС

При створенні мережі NEXRAD обрані пункти повинні були задовольняти наступним критеріям [43]:

– максимальне наближення до існуючих або планованим регіональним прогностичним центрам;

– максимальне наближення МРЛС (до 30 км) до аеропорту або розміщення МРЛС у високопріоритетних аеропортах (національного або регіонального значення) або поруч з авіабазами міністерства оборони;

– розумне перекриття радіусів огляду МРЛС у зонах високої повторюваності небезпечних явищ, пов'язаних з хмарністю;

– відповідність висоти рівня єдиного радіолокаційного поля двох сусідні МРЛС;

– розумна мінімізація числа МРЛС, необхідних для створення єдиної багатофункціональної МАРС.

Після вибору пункту розміщення МРЛС необхідно розв'язати проблеми, пов'язані з вибором по конкретній позиції в пункті (особливо ті з них, які вимагають обов'язкового узгодження з іншими відомствами).

1.2.7 Вибір позиції МРЛС

Вибір позиції для розміщення МРЛС є найбільш відповідальним етапом для будівельних робіт, що передують, на обраній позиції. При виборі позиції треба відразу звикнути з думкою, що ідеального місця для розміщення МРЛС не існує й прийдеться йти на прийняття компромісних розв'язків [6, 52].

Для усунення відбитих сигналів від місцевих предметів по бічним пелюсткам найкращою позицією для МРЛС був би одиночний пагорб з кратером. Глибина кратера повинна бути такою, щоб антена МРЛС змогла дивитися прямо над його крайкою.

Раніше вимоги до вибору позиції різнилися для МРЛС штормових оповіження та МРЛС, призначених для вимірювання опадів, що обслуговується та що не обслуговується.

У режимі штормового попередження МРЛС повинна одержувати інформацію в максимальному радіусі огляду, тобто працювати під малими кутами місця по всіх азимутах і в кожному разі в тих азимутах, звідки приходять найнебезпечніші явища. У режимі штормового оповіщення максимальна дальність виявлення МРЛС повинна становити в середніх широтах 200-250 км. На цих віддаленях нижня межа ДНА при куті місця 0° перебуває на висоті 2,25-3,75 км над рівнем антени МРЛС.

При вимірювання опадів вимоги до максимального радіуса дії залишаються, однак кут місця не повинен перевищувати 0,3-0,5° при мінімальному числі відбиттів від місцевих предметів. При цьому необхідно враховувати ширину ДНА МРЛС і висоту нульової ізотерми в пункті

розміщення. У помірних широтах при ширині ДНА 1° і куті місця 0° максимальний радіус дії МРЛС не може перевищувати 100 км.

МРЛС, що не обслуговується в місці установки, дає значно більші можливості при виборі позиції. Вона повинна забезпечити періодичне відвідування МРЛС і наявність електроенергії, знімаючи питання про необхідність усіх вимог, що виникають у випадку присутності на МРЛС постійного обслуговуючого персоналу.

Для штормового оповіщення МРЛС звичайно розташовувалась на аеродромі або в прогностичному центрі. Якщо не була потрібна установка антени на дуже високу вишку для забезпечення огляду по обрію, а антена МРЛС розміщалася на будинку аеропорту, то в цьому випадку вартість установки була мінімальна.

При виборі позицій МРЛС МАРС вимоги стають більшими, а витрати на встаткування позиції значними. По суті вибір позиції для МРЛС складається із трьох етапів.

На першому етапі відбувається початкова оцінка місця. При цьому виходить карта для пошуку оптимального місця з урахуванням споруджень, що належать державі.

Потім, на другому етапі, відбувається вибір місця й завершується його попереднє вивчення (аналіз радіолокаційного огляду, географічної й оперативної придатності, доріг і комунальних служб).

На третьому етапі можливі позиції зводяться до однієї-двох. На ці позиції знову виїжджають на рекогносцировку й уже детально оцінюють оптимальність обраної позиції.

Як відзначається в [43], процес пошуку, проведення аналізу й одержання землі під МРЛС може зайняти 44 місяця. Мережа NEXRAD спроектована таким чином, щоб сусідня МРЛС могла виявляти шторм, що проходить над МРЛС убік сусідньої станції.

Позиція для установки МРЛС МАРС повинна задовольняти наступним вимогам [6, 7, 43, 52].

1. Слід забезпечити максимальний радіус дії МРЛС, для чого у всіх напрямках колового огляду кути закриття антени МРЛС не повинні перевершувати 0,5°.

2. Необхідно забезпечити найкращі умови огляду в секторах, через які проходять авіатраси.

3. У радіусі 500 м від обираної позиції повинні бути відсутні високі місцеві предмети (будинки, лінії електропередачі, залізничні насипи та ін.).

Кути закриття не повинні перевищувати половини ширини діаграми направленості антени МРЛС або бути нульовими. Більш високі кути закриття, особливо якщо вони відзначаються в азимутах приходу в обраний пункт найнебезпечніших стихійних явищ, різко зменшують метеорологічну ефективність МРЛС за рахунок низької вірогідності його інформації або різкого зменшення заблаговчастності їх прогнозу через пізнє виявлення явищ МРЛС.

Високі кути закриття антени МРЛС в окремих азимутах або секторах приводять до розширення зони відповідальності сусідньої МРЛС єдиної мережі. Щоб оцінити прийнятність кутів закриття, необхідно побудувати зони перетинання діаграм направленості МРЛС із урахуванням кутів закриття в кожному із сусідніх пунктів. Неправильний вибір місця установки МРЛС може привести до втрати інформації про небезпечні явища над важливими для споживача районами. Приклади таких побудов наведені на рис. 1.25, де одна МРЛС (ліворуч) працює при нульових кутах закриття, а друга (праворуч) – при $\varepsilon = 1{,}5°$. У зоні радіотіні (заштрихована) одержання радіолокаційних характеристик неможливо.

4. Обрана позиція повинна виключати можливість виникнення взаємних перешкод радіолокаційних станцій підпереносної частоти, які близькі до діапазону випромінювання МРЛС. Для оцінки електромагнітної сумісності розташовуваної МРЛС із працюючими в пункті радіолокаційними системами потрібно пройти експертизу й одержати дозвіл від регіональної комісії з радіочастот. Питання про електромагнітну сумісність, як правило,

доводиться вирішувати одночасно з питаннями по мінімізації вартості на прокладку комунікацій і вибору позиції з мінімальними кутами закриття.

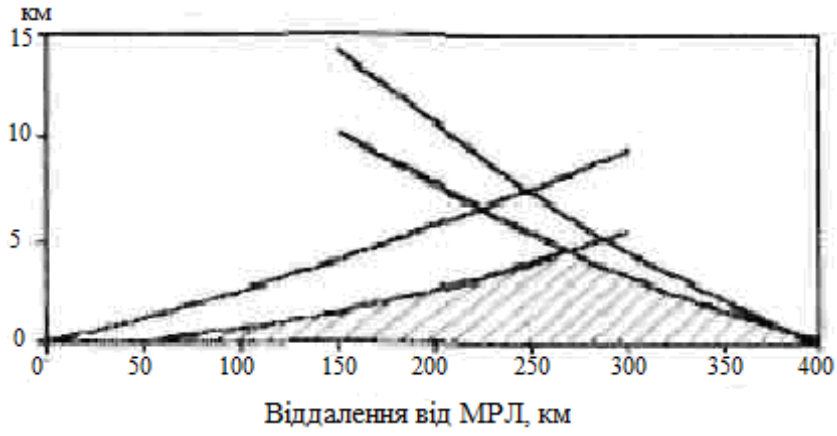


Рисунок 1.25 – Розмір зони радіотіні двох сусідні МРЛС, що працюють під кутами закриття 0° (ліворуч) і 1,5° (праворуч)

5. Позиція повинна відповідати вимогам зо техніки безпеки й строго відповідати границям санітарно-захисної зони.

З метою забезпечення санітарних норм і дотримання правил захисту населення від електромагнітних полів, створюваних МРЛС, вибір позиції МРЛС слід робити відповідно до діючих санітарних норм і методичних вказівок по визначенню електромагнітної обстановки в місцях розміщення МРЛС.

При зверненнях до місцевих органів санепіднагляду можна приблизно розрахувати віддалення МРЛС від найближчих будівель, де можливе опромінення людей. Воно визначається так званою релеївською відстанню *Rpp* – відстанню, на якому формується ДНА МРЛС – і становить сотні метрів.

Віддалення МРЛС від житлових об'єктів не може бути менше *Rpp*. Насправді воно набагато більше (у 5-10 разів) – залежно від установленого Мінздравом гранично припустимого рівня випромінювання. Із цього погляду розміщення МРЛС на найвищих будинках у житлових кварталах завжди

приховує небезпеку. Досить побудувати поруч більш високий будинок, як негайно піде заборона на випромінювання МРЛС у секторі, де воно перебуває. Із цієї причини рекомендується обрану позицію погодити з місцевими зацікавленими організаціями з урахуванням перспективних планів розвитку району.

Крім перерахованих вимог при виборі позиції МРЛС у кожному випадку вирішуються наступні питання:

– зручність підводки силового живлення;

– можливість підключення до зовнішньої телефонної мережі дня забезпечення передачі оперативної інформації;

– для МРЛС, що обслуговується, забезпечення максимуму технічних і експлуатаційних зручностей (під'їзні колії, побутові умови для обслуговуючого персоналу і т.д.).

У деяких місцях розміщення МРЛС відповідно до викладених вимог зустрічаються наступні труднощі:

– орографічні особливості місцевості не дозволяють установити станцію в безпосередній близькості від споживача;

– велика насиченість місцевості сучасними радіолокаційними засобами викликає взаємні перешкоди;

– неможливо дотримати необхідних норм санітарно-захисної зони.

Відповідно до викладеного вище станція може встановлюватися на віддаленні від споживача, якщо по місцевих умовах вибрати позицію ближче неможливо. Метеорологічна інформація в цьому випадку передається за допомогою ліній зв'язку. Вартість розміщення МРЛС при цьому зростає, особливо якщо необхідно побудувати дороги.

6. Необхідно окремо виділити вимоги про обов'язковий захист МРЛС від блискавок. Блискавка може завдати великої шкоди апаратурі, будинку, кабельному господарству.

7. При необхідності й можливості поділу передавального й прийомного обладнань МРЛС необхідно враховувати, що збільшення

довжини хвильоводу приводить до помітних втрат потенціалу МРЛС. Звичайно виробники не рекомендують, щоб довжина хвильоводу перевищувала 15 м, а граничним уважається значення 30 м. У середньому втрати електромагнітної енергії у хвильоводі становлять 0,13 дБ/м при $\lambda = 3$ см, 0,06 дБ/м при $\lambda = 5{,}6$ см і 0,03 дБ/м при $\lambda = 10$ см.

У практичному плані для вибору позиції потрібен теодоліт, який необхідно встановити на висоті розміщення антени МРЛС. З його допомогою треба скласти графік кутів закриття обрію через 1° від 0 до 360°. Графік слід нанести на докладну карту топографічних зйомок місцевості, бажано оцифровану, яку найкраще мати в комп'ютері. За допомогою карти й графіка можна оцінити наявність і висоту местників, висоту зон радіотіні в кожному азимуті через 1°.

Одночасно можна оцінити, яке число местників може бути подавлене за допомогою задіяної на МРЛС системи придушення местників (маска-карта, допплерівський режим).

Якщо МРЛС буде застосовуватися для вимірювання опадів в умовах пересіченої місцевості, то переважніше мати вільне поле огляду над долинами, чим над вершинами пагорбів. Якщо басейни рік складаються із широких долин серед височин з невеликим нахилом, то местники не повинні створювати проблем для радіолокаційного вимірювання опадів.

Якщо долини вузькі й височини мають круті схили, що найчастіше відзначається в районах частих повеней, то вимірювати опади прийдеться на більш високих рівнях, помітно вилучених по вертикалі від місця випадання опадів. Загальне правило при виборі місця установки з урахуванням конкретного басейну: МРЛС необхідно встановлювати на краю басейну.

Тепер подивимося на карту розташування радарів не згори, а "збоку" (рис. 1.26). При середній відстані між ними в 300 км перетин зон огляду відбувається в середині цього відрізку, тобто на дальності 150 км. На такому віддаленні висота розташування осі діаграми направленості антен складає більше 2,5 км і вже при 100 км виходить за межу 1 км. Це говорить про те,

що вимірювання такої важливої характеристики як інтенсивність опадів можливо лише в межах невеликої частини території країни. У зв'язку з цим напрошується висновок про необхідність "згущування" мережі. Але він не реалізовується з економічних міркувань. Більш відповідним слід визнати шлях установки між "великими" радіолокаторами малогабаритних, таких, що мають гірші в порівнянні з першими характеристиками по дозволяючих здібностях і метеорологічному потенціалі, але і значно поступливих їм за вартістю. Маючи дальність дії дещо більше 50 км, вони зуміють закрити ділянки, не охоплені мережею. Як показують дослідження, ефективність їх роботи на вказаних відстанях досить велика [53].

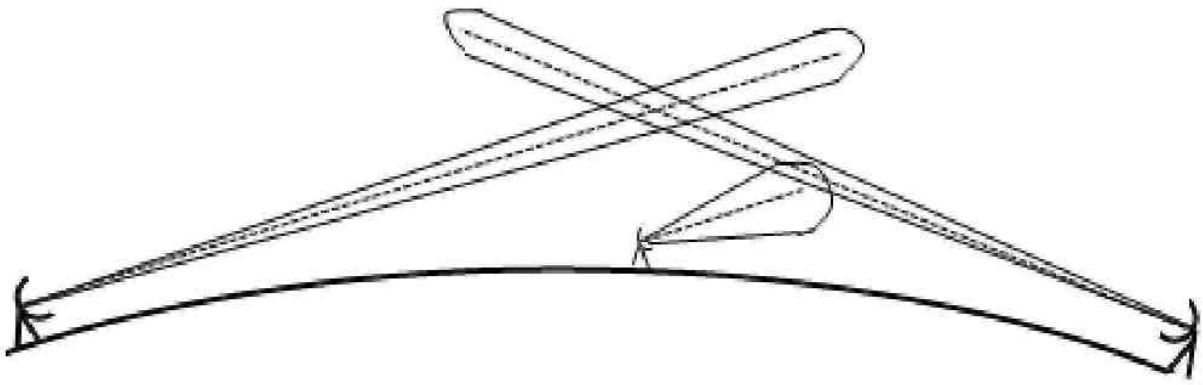


Рисунок 1.26 - Схема розташування діаграм направленості радіолокаторів ДМРЛ-С, встановлених на відстані 300 км один від одного і місце можливої установки малогабаритного радіолокатора

З сказаного зовсім не випливає, що малогабаритні радіолокатори потрібно поставити навколо кожного ДМРЛ-С. Вибір їх позиції повинен визначатися в першу чергу необхідністю забезпечити додатковий захист контрольованому регіону. Це в першу чергу гірські райони, де "великі" радіолокатори малоефективні через великі кути закриття горизонту, місця того, що має в розпорядженні гідротехнічних споруд та ін. Одна тільки катастрофа у Кримську, що сталася в 2012 р., показує актуальність прийняття такого роду рішень. Окрім вже розглянутого, існує ще один шлях,

ефективніший і менш витратний. Йдеться про впровадження методів багатопозиційної радіолокації. У нашому випадку - це установка навколо "великого" радіолокатора мережі приймальних пристроїв, робота яких синхронізована з роботою радара. Це дозволить, по-перше, збільшити радіус зони можливого вимірювання інтенсивності опадів і, по-друге, розв'язати проблему відновлення повного вектору швидкості вітру. Ще один напрям розвиток мережі - це комплексування вимірювання радіолокатора з іншими засобами дистанційного зондування атмосфери [54]. Зокрема, великі можливості відкриваються при його синхронній роботі зі НВЧ-радіометром, здатним поставляти інформацію про водність спостережуваних об'єктів і тим збільшувати вірогідність правильного прогнозування їх подальшого розвитку.

1.2.8 Експлуатація мережі

При обґрунтуванні концепції МАРС необхідно враховувати експлуатаційні витрати й порядок експлуатації МРЛС [6, 7, 52].

Регламентні роботи повинні проводитися регулярно відповідно до рекомендацій виготовлювача й розроблювача МРЛС. Це дозволяє на ранній стадії виявити зміни, що починаються, характеристик МРЛС або відмова.

Механічні роботи (не рідше двох разів у рік) полягають в основному в чищенні кілець струмознімача й змащенню моторів антеною системи.

Контроль над роботою приймача повинен проводитися щотижня, поки не буде досягнута стабільність і точність, передбачені технічними умовами на МРЛС.

Критерієм належної експлуатації МРЛС є досягнення й перевищення середнього наробітку на відмову для даного типу радіолокаційної апаратури.

Технічний ресурс МРЛС при цілодобовій і безперервній роботі становить 15 років. NEXRAD проектована на 20 років. Досвід показує, що 20 років – це досяжний строк для більшості грамотно експлуатованих МРЛС.

На усунення технічної несправності на МРЛС, укомплектованої запасним майном, іде не більше трьох годин, на заміну механічних деталей – не більш трьох днів.

На МРЛС без обслуговуючого персоналу необхідний автоматичний моніторинг технічного стану. Самий надійний моніторинг досягається включенням невеликих сенсорів у контрольовані системи МРЛС. Надійність будь-якої системи автоматичного моніторингу повинна бути на порядок вище надійності апаратури, яку вона контролює.

Найбільш прогресивний спосіб технічного обслуговування автоматизованої МРЛС полягає в найманні спеціалізованої фірми. Працезатрати на обслуговування автоматизованої МРЛС, що працює в безперервному режимі, оцінюються міжнародними експертами в 0,5-1 кваліфікованого працівника.

Незважаючи на відносно невеликі працезатрати на технічне обслуговування МРЛС треба мати в розпорядженні не менше п'яти людей. По вимогах техніки безпеки на МРЛС повинно перебувати не менше двох фахівців, особливо якщо потрібна незвичайна перевірка технічних параметрів, а виконання робіт, пов'язаних з високою напругою.

Щорічні експлуатаційні витрати на автоматизовану МРЛС слід планувати виходячи з 0,06-0,20 його заводської вартості.

1.2.9 Висновки

1) МАРС утвориться, коли економічні умови в країні вимагають оперативного застосування та виробничої діяльності споживачів радіолокаційної метеорологічної інформації про небезпечні явища й опади. МАРС повинна повністю задовольняти вимогам державних і приватних споживачів.

2) МАРС доцільно створювати на базі метеорологічного радіолокатора з допплерівським режимом роботи в смугах частот C і S, що не

обслуговується в місці установки, й має повністю дистанційно-контрольовані технічні параметри за рахунок застосування вбудованих у системи МРЛС датчиків.

3) При плануванні національних МАРС у проекті COST-73 рекомендується для розміщення МРЛС по території країни розглядати 300-кілометрову трикутну сітку (або більш щільну).

4) При створенні МАРС і центру збору її даних визначаються:

– її фізична й логічна структура;

– гарантований споживачам каталог продуктів мережі;

– перелік загальносітьових функцій.

5) При адміністративному управлінні МАРС у національному (регіональному) центрі збору необхідно передбачити програми конфігурації, контролю, статистики, керування радіолокаторами, ведення каталогів продуктів.

6) Для збору й поширення інформації МАРС повинна використовувати високошвидкісні канали зв'язку, єдині формати повідомлень і протоколи передачі з урахуванням рекомендацій ВМО.

7) Географічна сітка для стикування інформації МАРС для більшості споживачів повинна бути заснована на полярній стереографічній проекції.

8) Для розробки методів моніторингу в реальному масштабі часу, складання поточного прогнозу, і сполучення в єдиному центрі даних різнорідних методів спостережень за погодою повинні бути розроблені й перевірені в оперативному режимі роботи спеціальні програми для ЕОМ. Вони дозволять синоптику в інтерактивному режимі повністю використовувати для прогнозу потенціал усіх видів спостережень (супутникових, радіолокаційних, наземних, спеціальних), і в першу чергу радіолокаційних. У процесі створення МАРС обов'язкове сполучення радіолокаційної й супутникової інформації про хмарність і опади для заповнення супутниковою інформацією районів, де ще немає радіолокаційної

інформації.

9) Число приватних споживачів інформації МАРС в усьому світі стрімко зростає, незважаючи на її регулярне доведення до населення через засоби масової інформації.

1.3 Системний підхід до побудови інформаційної радіолокаційної системи моніторингу довкілля

1.3.1 Особливості системного підходу до побудови радіолокаційних систем

Ускладнення технічних засобів і інформаційних процесів при проведенні різностороннього моніторингу довкілля, а особливо радіолокації, вимагає уміння побудувати велику систему по заданих її функціях [55].

Існування системології як самостійної технічної дисципліни не оспорюється; більше того, є тенденції трактувати системологію як нової галузі науки. Проте її межі чітко не визначені; неясно також перспективний напрям її розвитку. Трактування і підходи широкі і різноманітні: стратегія, організаційна наука - тектологія, системний світогляд, система і цілі, складні системи, великі системи, системний підхід, системна методологія, синергетика, системна ідеологія, загальна теорія систем, теорія функціональних систем, моделювання систем, теорія складних систем, інваріантне моделювання, теорія самоорганізації, загальна теорія систем, аналіз систем, системотехніка, системологія [56, 57, 58].

Положення, яке утворилося на данний час, можна охарактеризувати таким чином.

1. Розробляється загальна теорія опису великих систем. Ця теорія має в основному гносеологічне і в якійсь частині математичне значення.

Прагнення вчених внести впорядкованість до своєї галузі науки, охопивши при цьому максимальне коло об'єктів, цілком зрозуміло. Проте існує широкий спектр категорій, які вживаються для викладу системних ідей, і існує відмінність в розумінні категорій, що мають часто однакову назву.

Частина вчених розвивають абстрактні описи, і прагнуть знайти загальні принципи. Саме в цьому напрямі досліджень, характерне найбільше узагальнення, спостерігається і найбільша відмінність в підходах і точках зору. Інша частина віддають перевагу функціональному опису, яким керуються у пошуках і аналізі закономірностей. Треті застосовують опис, найбільш зручний для спеціальних застосувань. Поки всі ці описи недостатньо конструктивні і знаходять обмежене застосування в техніці.

2. Видається чимале число праць, в яких викладаються загальні методи підходу до побудови великих систем і деякі розділи математики, що на думку авторів мають, відношення до проектування і оцінки великих систем (теорія масового обслуговування, теорія операцій, теорія надійності, теорія оптимізації і так далі). Подібні праці, безумовно, корисні. Але їх безпосередній вплив на проектування конкретних систем і на загальний розвиток системології як науки не дуже великий.

Існують роботи, присвячені аналізу систем. Це ще один, як було сказане вище, напрям системології, що претендує на самостійність. Аналіз систем включає постановку завдання, вибір шляхів рішення, дослідження ресурсів, складання моделі, вибір критеріїв оцінки, порівняння результатів і ухвалення рішення. Розглядаються також такі питання, як облік невизначеності, побудова конфліктних ситуацій, роль протидії зовнішнього середовища і облік вартості. Проте зважаючи на внутрішню складність великих систем побудувати універсальну методологію аналізу не вдається; численні приклади, що приводяться авторами, мало пов'язані між собою і являються не більше, ніж ілюстраціями.

Практично виходить так, що завдання створення кожної нової великої системи повинно ставитися як наукова проблема, що вимагає своєї

спеціалізованої методології, що включає не менш спеціалізований математичний апарат. Зрозуміло, які труднощі (посилювані великими матеріальними витратами) стояти перед творцями великих систем.

На підставі викладеного представляється, що для подолання цих труднощів слід рухатися двома шляхами:

1) розвиток і деталізація абстрактної теорії систем (дедуктивний метод);

2) розвиток і узагальнення досліджень конкретних систем (індуктивний метод).

Серед великих систем доцільно виділити клас радіотехнічних систем, до складу яких входять: системи радіозв'язку, радіолокаційні системи, радіонавігаційні системи, радіоастрономічні системи і подібні до них [59].

Є наступні підстави для віднесення цих систем до одного класу.

1. Призначенням радіотехнічних систем є одержання, передача або перетворення інформації (про положення і рух об'єктів в навігаційних і радіолокаційних системах, або про взаємодію потоку елементарних часток з речовиною в прискорювальних системах, що включають власне прискорювач, апаратуру реєстрації, кодування і обробки результатів фізичного експерименту).

2. Радіотехнічні системи використовують як робочий елемент електромагнітний сигнал, а необхідна інформація виходить в результаті взаємодії сигналу з деяким об'єктом (радіолокаційна ціль та ін.).

3. Радіотехнічні системи мають схожу структуру, яка містить: пристрої для створення сигналу, пристрої прийому і реєстрації сигналу (детектори), прилади передачі сигналу, прилади обробки сигналу.

У радіотехнічних системах застосовуються однакові або дуже схожі апаратурні елементи.

Можна чекати, що для класу радіотехнічних систем будуть застосовні однотипні методи опису, аналізу і синтезу. У такому разі і результати

дослідження радіолокаційних систем, які є частковим випадком радіотехнічних систем, можуть знайти більше застосування.

Засоби радіолокацій зайняли велике місце в різних областях людської діяльності.

Для збільшення зони спостереження було потрібно рознесення пристроїв радіолокацій на великій території; це привело до створення систем радіолокації, до складу яких входять радіолокатори, канали передачі даних і засобу обробки інформації. Радіолокаційна система - це щось більше, ніж просте об'єднання засобів радіолокації: функціональна взаємодія засобів всередині системи створює набагато ширші технічні можливості; по суті, створює нову якість. Практичне застосування (локація, метеорологія, управління космічними апаратами, управління повітряним рухом і так далі), наукові перспективи (радіоастрономія, планетарна радіолокація) і технічний рівень систем радіолокації дозволяють рахувати системотехніку радіолокації, яка бурхливо розвивається, самостійною дисципліною у рамках системологии.

Але, як не дивно, література бідна публікаціями в цій області. Нині є безліч описів конкретних систем, але немає роботи, в якій би системотехніка радіолокації викладалася з єдиних методичних позицій. Мізерні з методичної точки зору і опису конкретних систем радіолокацій; такі описи містять технічні подробиці і спеціальні характеристики, цікаві з точки зору практичного застосування і експлуатації, але в них немає узагальнювальних матеріалів, необхідних для проектування нових радіолокаційних систем.

Для створення методології ефективного дослідження в будь-якій області необхідно розробити певну схему та зрозуміти, що об'єднує різні аспекти явищ або процесів, об'єднати їх загальними закономірностями і побудувати програму навчання фахівців, здатних вести дослідження відповідно до нової методології.

Якщо системологія знаходиться на першій стадії, то для радіолокаційної системотехніки, систем управління і деяких інших

системотехнічних дисциплін наступила третя стадія, хоча перша і друга не завершені. Це створює складності для подальшого розвитку. Мабуть, єдиний правильний шлях подолання цих труднощів полягає в тому, щоб поглиблювати і розширювати методологію дослідження систем конкретного призначення, не чекаючи завершення загальної теорії великих систем.

Таким чином, радіолокаційні системи є важким об'єктом для математичного опису і дослідження як зважаючи на різнотипність структури і функціональних зв'язків, так і зважаючи на велику складність, а радіолокаційна системотехніка - технічна дисципліна, що вимагає, передусім методики і апарату техніко-економічного аналізу.

1.3.2 Побудова інформаційної радіолокаційної системи моніторингу довкілля на основі принципів радіолокаційної системотехніки

Практичні потреби господарювання викликають необхідність створення інженерних комплексів, що здійснюють одержання даних про довкілля, зокрема про атмосферу. Потрібно своєчасно виявляти атмосферні об'єкти і явища. Вимірювати просторові координати і параметри руху виявлених об'єктів і явищ і визначати деякі їх фізичні властивості. Одержані при цьому дані використовуються у великих технічних системах, які пов'язані з прогнозуванням погоди і мають велике громадське значення.

Такі інженерні комплекси включають безліч радіолокаційних станцій і пристроїв передачі та переробки інформації і носять назву радіолокаційних систем. При створенні подібних систем і при їх практичному використанні доводитися стикатися з великою кількістю спеціальних системних проблем, що сильно відрізняються від проблем, що виникають при конструюванні і експлуатації окремих елементів цих систем.

При побудові великої радіолокаційної системи найбільшу практичну цінність представляють роботи, пов'язані з розглядом конкретних систем, з

встановленням кількісних залежностей між їх параметрами і способів їх оптимального конструювання і використання. Проте не треба забувати питання розвитку або еволюції системи.

Системна ідея спрощення опису і еволюційного розвитку полягає в наступному. Первинний задум побудови системи формується виходячи з її цільового призначення, тобто місця і ролі в тій великій системі вищого порядку, усередині якої і на користь якої функціонуватиме створювана система. Це дає можливість сформулювати найбільш загальний опис створюваної системи за допомогою функцій (функціонала) ефективності. Ефективність служити вихідною позицією для подальшої деталізації опису. Деталізація полягає в розукрупненні, в розбитті системи на підсистеми і елементи і в складанні опису підсистем і елементів.

Критерій (показник) першого рівня опису має бути складений так, щоб звільнити створювану систему від залежності від системи вищого порядку. Це досягається шляхом включення у функціонал ефективності чинників, що виражають цю залежність. Далі утворюється оптимізація елементів, підсистем і системи в цілому з урахуванням конструктивних, економічних, організаційних і інших обмежень. Таким чином, спрощення полягає у виборі декількох рівнів опису, а еволюція - в послідовній оптимізації.

Для того, щоб на цій основі побудувати конструктивну методологію, яка використовується для вирішення практичних завдань, необхідно обгрунтувати математичну залежність між групами показників різних рівнів.

З позицій системотехніки можна сформулювати основний зміст висловленого вище визначення технічної системи. Для того, щоб система мала властивість цілеспрямованої діяльності, необхідно якісно і кількісно обгрунтувати поняття корисності, ефективності системи і розробити способи її визначення і прогнозування за різних умов функціонування системи. Треба навчитися визначати, що таке "хороша" система і що таке "краща" система, вміти відповісти на питання, чи "виживе" система, тобто чи впорається вона з своїми завданнями в тих або інших умовах, включаючи умови боротьби за

існування проти сил природи. Вимога орієнтованості і взаємозв'язку елементів викликає необхідність вирішувати проблему обгрунтування структури системи, що забезпечує її функціонування в умовах зовнішнього середовища, що змінюється. Нарешті, необхідність забезпечити властивість конструктивності примушує вирішувати проблему реалізованості системи в технічному і економічному сенсі.

Послідовність конструювання системи повинна забезпечити таке рішення цих проблем, яку призводило б до створення якщо не оптимальною (найкращою) в деякому розумінні, то, в усякому разі, працездатної (досить хорошою) системи з необхідним часом існування. На підставі досвіду можна стверджувати, що цю послідовність можна розбити на наступні чотири етапи:

– обгрунтування функції ефективності системи, що описує її основну мету, її функціонування і взаємозв 'язок з зовнішнім середовищем;

– складання структурної схеми системи, тобто визначення складових її підсистем і елементів, розподіл функцій між ними, визначення взаємозв'язків між ними з зовнішнім середовищем і встановлення внутрішніх потоків інформації;

– розробка алгоритмів функціонування системи і її елементів, в тому числі алгоритму управління системою;

– обгрунтування технічних вимог до елементів системи.

Процес конструювання системи може містити декілька циклів, кожен з яких повинен завершуватися розробкою чергового послідовного наближення до оптимального рішення. Мабуть, така циклічність (еволюційність) процесу конструювання оптимальних систем має своєю причиною не лише недостатній розвиток методів конструювання, математичного апарату і методів обчислень, але і специфічні внутрішні властивості систем, зокрема складність, про які йшла мова.

Це міркування призводить до такої циклічності розгляду кожної з проблем, коли система спочатку розукрупнюється, тобто розчленовується на

підсистеми, потім завдання вирішується для кожної з підсистем окремо з наступним укрупненням системи, уточненням результатів і повторенням циклів послідовного наближення до бажаного оптимуму.

В принципі така поетапна оптимізація не рівносильна оптимізації системи в цілому. Проте після досить великого числа циклів оптимізація може привести до отримання цілком працездатного (і навіть близького до оптимального) варіанту побудови системи і організації її функціонування.

Всяку цілеспрямовану систему, що взаємодіє з середовищем, зовнішнім відносно неї, можна умовно розбити за функціональною ознакою на наступні три складові частини: сумлінну, інформаційну, таку, що управляє.

Взаємозв'язок цих частин і їх взаємодія можуть бути описані таким чином. Старанна частина має в розпорядженні деякі можливості або ресурси, які витрачаються відповідно до цільового призначення системи. Інформаційна частина доставляє в систему всю інформацію про стан зовнішнього середовища і про результати взаємодії з нею, а також виводить інформацію, що зовні управляє, є результатом функціонування системи. Частина, що управляє, перепрацьовує інформацію, що доставляється їй інформаційною частиною, і розподіляє можливості і ресурси старанної частини відповідно до одержаної інформації. Вусі ці три частини цілеспрямованої системи діють в тісній взаємодії між собою і з зовнішнім середовищем, і з цієї точки зору дослідження системи вимагає загального підходу до усіх трьох складових частин.

З іншого боку, у функціональному, а, отже, і в конструктивному відношенні кожна з цих частин зазвичай є самостійним закінченим пристроєм з своїми входами і виходами і з своїми внутрішніми зв'язками. Якщо вхід і вихід деякої частини системи зафіксувати, то ця частина може бути розглянута певною мірою автономно від інших частин системи. Подібні субоптимальні методи широко застосовуються в системотехніці.

Все сказане відноситься і до радіолокаційних систем.

Відповідно до прийнятого визначення технічної системи під радіолокаційною системою ми розуміємо конструктивну сукупність радіолокаційних засобів, певним чином розміщених на території і функціонально пов'язаних між собою для вирішення інформаційного завдання за зовнішніх умов, що змінюються [59].

Систему радіолокації доцільно розділити на три підсистеми: підсистему радіолокаційних каналів, тобто передавальних і приймальних пристроїв, підсистему обробки радіолокаційних даних і підсистему передачі даних. Кожна з цих підсистем є досить "великою" системою, що виконує самостійний комплекс завдань і у відомих межах функціонально незалежної від інших підсистем.

Будь-яка система радіолокації у свою чергу є підсистемою більшої системи - системи управління, яку можна вважати системою вищого порядку відносно радіолокаційної системи. У нашому випадку це державна система моніторингу довкілля. Результат дії останньої значною мірою залежить від функціонування обслуговуючої її радіолокаційної системи.

На рис. 1.27 представлені варіанти включення радіолокаційної системи в більшу систему вищого порядку. Видно, що можуть мати місце три варіанти взаємодії радіолокаційної системи з споживачами інформації:

– без управління з боку споживача інформації;
– з управлінням споживачами радіолокаційною системою;
– з дією на зовнішнє середовище.

Вибір того або іншого з цих варіантів визначається призначенням і структурою конкретної системи вищого порядку. Перший варіант - простий - в ньому МРЛС є просто інформаційними датчиками, вони відразу повинні видавати всю необхідну інформацію. Другий варіант передбачає управління інформаційними потоками, встановлення пріоритетів, відбір необхідної в даний момент інформації. Третій варіант побудови забезпечує споживачеві можливість здійснювати активну дію на атмосферні процеси відповідно до їх

фізики, тим самим вимагаючи безперервного контролю за метеорологічною обстановкою для управління процесом дії.

Рисунок 1.27 - Схема включення радіолокаційної системи в систему вищого порядку

Радіолокаційні системи дозволяють вирішувати завдання, які не взмозі вирішувати одиничні засоби радіолокації. Це обумовлено, передусім, відсутністю геометричних обмежень розмірів зони огляду, викликаних кривизною земної кулі. Та обставина, що елементи радіолокаційної системи можуть бути рознесені на території, дозволяє уникнути принципових труднощів, які виникають, якщо необхідно отримувати дані у великій по розмірах зоні повітряного простору над заданою територією.

Можливість адаптації системи радіолокації при змінах обстановки дозволяє досягти високої завадостійкої системи в цілому.

Експлуатаційна надійність і функціональна живучість системи також можуть бути зроблені досить високими.

Головною перевагою радіолокаційної системи є те, що вона дозволяє одержувати інформацію з дуже високими характеристиками, які практично недосяжні для радіолокаційних станцій. Дальність дії, точність визначення параметрів руху об'єктів і явищ і роздільна здатність, що досягаються радіолокаційними системами, істотно вище, ніж у засобів радіолокації, що працюють автономно. В цьому сенсі радіолокаційна система є переходом в нову, вищу якість, яка і визначає її важливість при вирішенні складних завдань.

1.4 Оптимізація побудови радіолокаційної системи моніторингу навколишнього середовища

1.4.1 Варіант побудови радіолокаційної системи з мінімальною кількістю метеорологічних РЛС

Мінімальною кількість метеорологічних РЛС в системі моніторингу являється тоді, коли вона всього одна. Логічно зрозуміло, що цей крайній випадок для цілей побудови системи моніторингу на Україні є недоцільним через розміри її території. Але для цілей подальшого використання отриманого результату аналізу розглянемо цей варіант побудови системи моніторингу.

Для побудови радіолокаційного поля для вказаного варіанту системи скористаємося раніше розробленим програмним комплексом WW_CEEM_Radar [2]. Результат моделювання приведений на рис. 1.28.

В цьому випадку радіолокаційна станція одна. Для забезпечення покриття радіолокаційним полем усієї території країни географічно її

вимагається розташувати в районі метеостанції 150-Первомайск Миколаївської області. Потрібна дальність виявлення для цієї МРЛС складе, наприклад, для роботи в режимі "відбиваність" в S -діапазоні хвиль (10 см) приблизно 670 км.

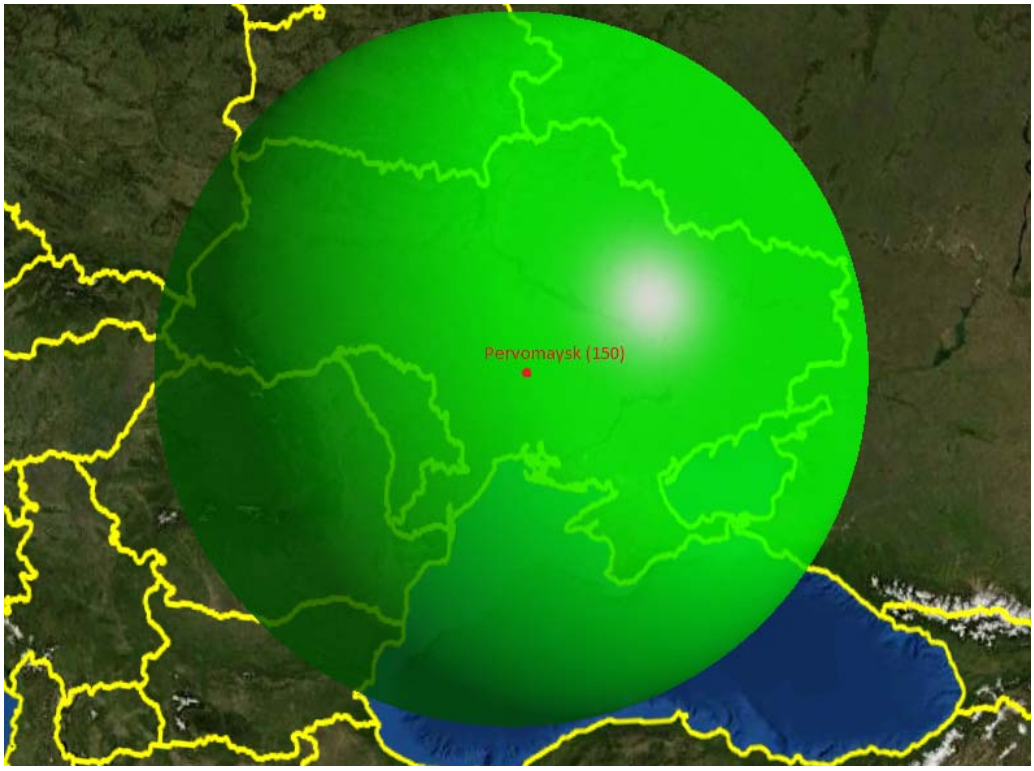


Рисунок 1.28 - Варіант побудови радіолокаційної системи з мінімальною кількістю метеорологічних РЛС (одна МРЛС з дальністю дії 670 км)

В світі існують метеорологічні РЛС великої потужності. Прикладом може бути допплерівська метеорологічна РЛС DWSR - 10001С виробництво фірми ЕЕС (США). Її передавач має імпульсну потужність 1 МВт. При цій потужності заявлена максимальна дальність дії, у вказаному вище режимі, складає 480 км. В нашому випадку потрібно 670 км або в 1,4 разу більше. Враховуючи, що при локації метеоцілей дальність пропорційна квадрату потужності, буде потрібна МРЛС з імпульсною потужністю в 1,96 разів більшою або з майже 2 МВт випромінюваної потужності. Така метеорологічна РЛС буде аналогом радіолокаційного комплексу далекого

виявлення, наведення і цілевказівки бойового режиму 5Н87 виробництва Правдинського заводу радіорелейної апаратури (РФ). Це складна і дорога станція. При таких потужностях випромінювання передавач будується за схемою задаючий генератор - підсилювач потужності, що призводить до різкого збільшення массогабаритных характеристик. Тому надійність передавального пристрою буде невисокою і станція вийде дорогою в експлуатації. Будь-яка відмова такої МРЛС призводить до зриву одержання інформації у межах усієї країни, що говорить про низьку живучість подібної системи.

Але при подібній побудові радіолокаційного поля вирішальним негативним чинником, що примушує відкинути цей варіант побудови, є кривизна Землі. Вважаючи, що ці дальності реалізуються при куті місця антенної системи ε = 0° (тобто на рівні радіогоризонту), можемо скористатися відомим з [51] рівнянням радіогоризонту:

$$D_{\Gamma} = 4{,}11 \cdot \left(\sqrt{H_{З}} + \sqrt{h_{а}} \right), \tag{1.3}$$

де D_{Γ} - горизонтальна дальність в кілометрах;

$H_{З}$ - поправка висоти на кривизну Землі в метрах;

$h_{а}$ - висота електричного центру антени в метрах.

Підставивши в (1.3) вказані вище значення дальностей і поклавши $h_{а}$=0, набудемо значення нижньої межі безпровального радіолокаційного поля (фактично це і є поправка висоти на кривизну Землі):

$$H_{З} = \frac{D_{\Gamma}^{2}}{16{,}9}. \tag{1.4}$$

При нормальній рефракції кривизна траєкторії поширення радіохвиль менша кривизни Землі. Це призводить до того, що при дальності, наприклад,

200 км не спостерігатимуться метеооб'єкти на висотах менше 2,5 км, на дальності 400 км не буде видно об'єкти на висотах нижче 9 км, на дальності 670 км не буде видно об'єкти на висотах нижче 26,5 км (рис. 1.29). Крім того, на великих дальностях погіршується роздільна здатність МРЛС за просторовими координатами (рис. 1.30).

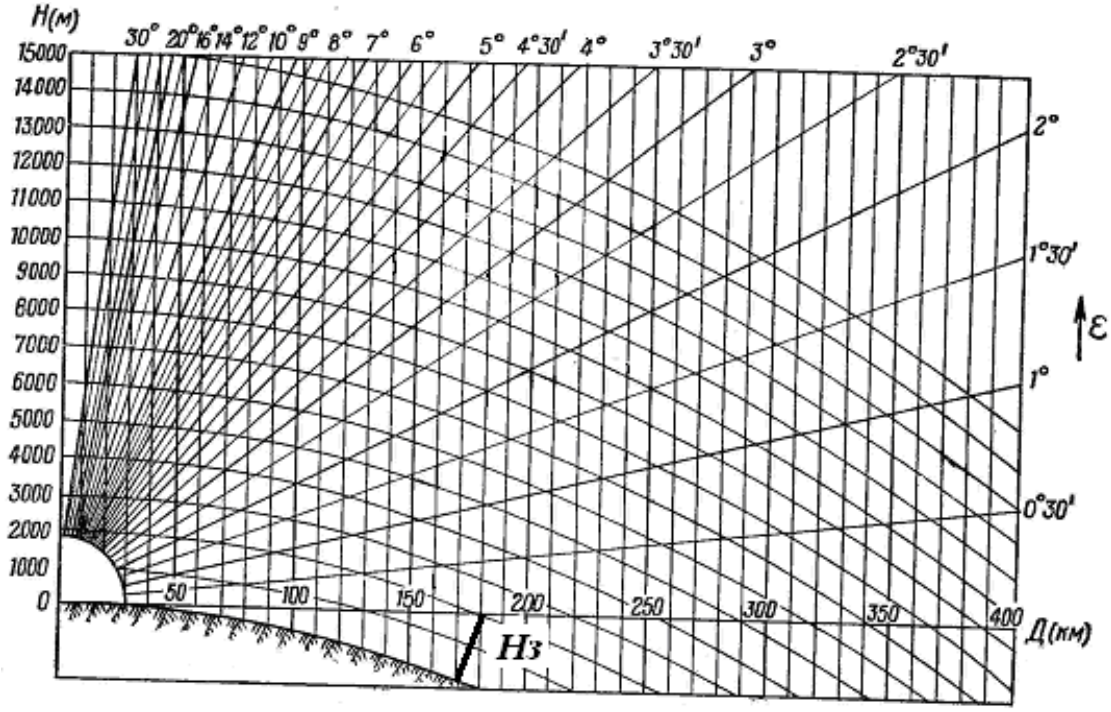


Рисунок 1.29 - Мірна сітка для визначення параметрів зони спостереження метеорологічної РЛС при нормальній рефракції атмосфери

При проведенні моніторингу радіолокації атмосфери потрібна висота нижньої межі радіолокаційного поля, принаймні, 0,3…1 км. Така висота нижньої межі поля пред'являє вимоги до потрібної відстані між метеорологічними РЛС в 150...250 км (рис. 1.30). А це, у свою чергу, вимагає дальності дії МРЛС приблизно 70...130 км.

Таким чином, подібний варіант побудови радіолокаційного поля для цілей моніторингу забезпечить одержання інформації до максимальної дальності 130 км з площі приблизно 53100 км², що складає 9% від площі

території України приблизно в 577 тис. км². Тому варіант побудови радіолокаційного поля для гідрометеорологічного моніторингу на основі використання однієї потужної метеорологічної РЛС не забезпечує необхідного покриття і тому немає сенсу.

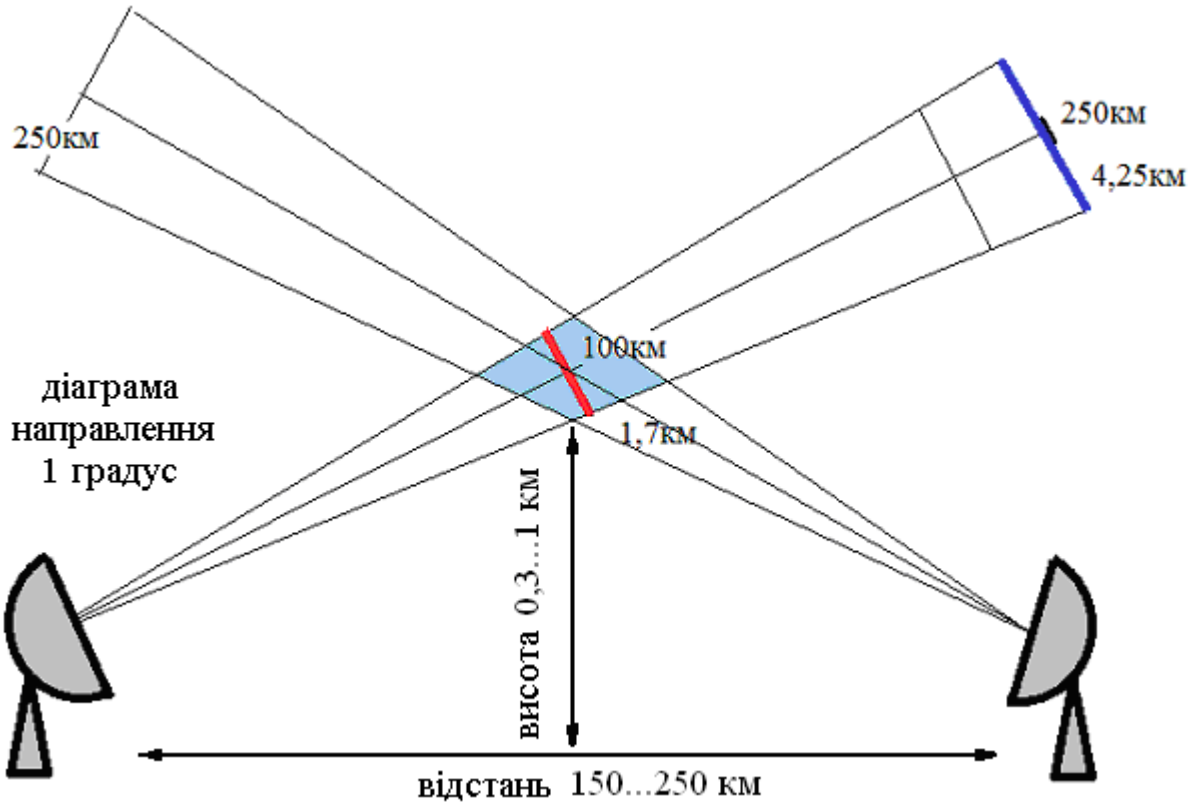


Рисунок 1.30 - Ілюстрація погіршення просторової роздільної здатності МРЛС із збільшенням дальності і потрібної відстані між МРЛС через кривизну Землі

1.4.2 Варіант побудови радіолокаційної системи при мінімальній потрібній випромінюваній потужності метеорологічної РЛС

Мінімальна потрібна потужність випромінювання метеорологічної радіолокаційної станції досягається у разі, коли її антена направлена вгору і не застосовується її сканування за кутовими координатами, тобто антена нерухома. В цьому випадку товщина атмосфери мінімальна по відношенню

до шляху поширення зондуючого сигналу і потужність випромінювання буде потрібно мінімальна. При такому застосуванні метеорологічних РЛС при побудові системи для одержання моніторингової інформації уся територія країни має бути заставлена такими МРЛС з антенами, направленими вертикально вгору. Відстань між МРЛС визначатиметься необхідною просторовою роздільною здатністю інформації. При площі території України, яка дорівнює приблизно 580 тис. км2 і при просторовій дискретності інформації радіолокації 1 км знадобиться 580000 таких метеорологічних РЛС. Можна сказати, що уся поверхня території країни випромінюватиме сигнал вгору кожним своїм елементом, і приймати відбитий сигнал також кожним своїм елементом (рис. 1.31).

Рисунок 1.31 - Варіант побудови радіолокаційної системи на основі РЛС з мінімальною випромінюваною потужністю
(випромінювання напрямлено вгору)

Якщо взяти до уваги, що потрібна висота верхньої межі радіолокаційного поля складе приблизно 20 км, то на підставі рівняння радіолокації метеорологічних цілей (1.5) [60] для МРЛС типу МРЛ- 5 для 10-

см каналу дальність скоротиться з 250 км до 20 км, що складе 12,5 раз. Значить, для збереження незмінних відносин сигнал/шум, потенціал МРЛС можна зменшити пропорційно квадрату зменшення дальності дії РЛС, тобто приблизно в 160 разів.

$$\frac{\bar{P}_r}{P_ш} = C_\lambda \frac{\eta}{R^2}, \qquad (1.5)$$

де $\bar{P}_r$ - середня потужність радіовідлуння, Вт;

$P_ш = P_0$ - рівень власних шумів приймального пристрою МРЛС, Вт;

$C_\lambda = 4{,}36 \cdot 10^{-9} \frac{P_\tau \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \tau \cdot \theta^2}{P_ш \cdot 10^{0{,}1\xi}}$ - енергетичний потенціал (постійна) МРЛС, см³;

η - відбиваність радіолокації метеоцілей, см- 1;

R - відстань до метеоцілі, см;

$P\tau$ - імпульсна потужність передавального пристрою, кВт;

G - коефіцієнт посилення антени;

λ - довжина випромінюваної хвилі, см;

c - швидкість світла у вакуумі, м/з;

τ - тривалість зондуючого імпульсу, мкс;

θ - ширина діаграми направленості антени на випромінювання або на прийом, град.;

ξ - сумарне загасання, що вноситься хвильоводним трактом на прийом і на передачу, дБ.

Як видно з приведеної формули енергетичний потенціал МРЛС пропорційний випромінюваній потужності, тому потрібна імпульсна потужність передавача при цьому скоротиться з 850 кВт до 5,3 кВт. Застосування складних сигналів з коефіцієнтом стискування у сотні і тисячі разів дозволить понизити випромінювану потужність до одиниць Вт в

імпульсі, а массогабаритні характеристики МРЛС, окрім антени, зменшаться багаторазово. Цілком можна зменшити і габарити антенної системи при цьому дещо збільшивши ширину діаграми направленості антени, але у такому разі потрібно дещо збільшити потужність випромінювання.

Описаний підхід є другим крайнім випадком побудови системи радіолокації моніторингу. Загальна випромінювана потужність усіма МРЛС в цьому випадку може виявитися навіть меншою, ніж у разі побудови системи моніторингу на основі поодинокої потужної МРЛС. Але велику складність складає питання збору інформації в подібній системі та питання розміщення такої системи на місцевості і організації її експлуатації.

1.4.3 Варіант побудови радіолокаційної системи з просторовою прив'язкою позицій метеорологічних РЛС до існуючої мережі метеорологічних станцій

Існуюча мережа метеорологічних станцій за станом на 2014 рік представлена в таблиці 1.10 і на рис. 1.32 [61].

Таблиця 1.10 - Перелік метеорологічних станцій України

Область	Метеорологічні станції
Чернігівська	1 - Семенівка, 2 - Щорс, 3 - Покошичи, 4 - Чернігів, 5 - Ніжин, 6 - Остер, 7 - Прилуки
Сумська	8 - Дружба, 9 - Глухів, 10 - Конотоп, 11 - Білопілля, 12 - Суми, 13 - Ромни, 14 - Лебедин
Волинська	15 - Любешів, 16 - Світязь, 17 - Маневичі, 18 - Ковель, 19 - Володимир-Волинський, 20 - Луцьк
Ровенська	21 - Сарни, 22 - Рівне, 23 - Дубно
Житомирська	24 - Овруч, 25 - Олевськ, 26 - Коростень, 27 - Новоград-Волинський, 28 - Житомир
Київська	29 - Чорнобиль, 30 - Поліське, 31 - Тетерів, 32 - Київ, 33 - Баришівка, 34 - Бориспіль, 35 - Яготин, 36 - Фастів, 37 - Біла Церква, 38 - Миронівка
Львівська	39 - Рава-Руська, 40 - Кам'янка-Бузька, 41 - Броди, 42 - Яворів, 43 - Львів, 44 - Мостиська, 45 - Дрогобич, 46 - Стрий, 47 - Турка, 48 - Славське
Хмельницька	49 - Шепетівка, 50 - Ямпіль, 51 - Хмельницький, 52 - Нова Ушиця, 53 - Кам'янець- Подільський
Полтавська	54 - Гадяч, 55 - Лубни, 56 - Веселий Поділ, 57 - Полтава, 58 - Кобеляки

Продовження таблиці 1.10

Область	Метеорологічні станції
Харківська	59 - Золочів, 60 - Богодухів, 61 - Приколотне, 62 - Харків, 63 - Коломак, 64 -Куп'янськ, 65 - Комсомольське, 66 - Красноград, 67 - Ізюм, 68 - Лозова
Тернопільська	69 - Кременець, 70 - Тернопіль, 71 - Бережани, 72 - Чортків
Черкаська	73 - Канів, 74 - Золотоноша, 75 - Черкаси, 76 - Жашків, 77 - Сміла, 78 - Звенигородка (Озерна), 79 - Чигирин, 80 - Умань
Луганська	81 - Сватове, 82 - Біловодськ, 83 - Луганськ, 84 - Дар' ївка
Вінницька	85 - Білопілля, 86 - Хмільник, 87 - Вінниця, 88 - Жмеринка, 89 - Гайсин, 90 - Могилів - Подільський
Івано - Франківська	91 - Долина, 92 - Івано - Франківськ, 93 - Коломия, 94 - Яремче, 95 - Пожежевська
Кіровоградська	96 - Світловодськ, 97 - Новомиргород, 98 - Знам'янка, 99 - Кіровоград, 100 - Гайворон, 101 - Помічна, 102 - Долинська, 103 - Бобринець
Дніпропетровська	104 - Губиниха, 105 - Павлоград, 106 - Дніпродзержинськ, 107 - Дніпропетровськ, 108 - Комісарівка, 109 - Синельникове, 110 - Чаплине, 111 - Лошкарівка, 112 - Кривий Ріг, 113 - Нікополь
Донецька	114 - Артемівськ, 115 - Дебальцеве, 116 - Красноармійськ, 117 - Донецьк, 118 - Амвросіївка, 119 - Велико-Анадоль, 120 - Волноваха, 121 - Маріуполь
Закарпатська	122 - Великий Березний, 123 - Нижні Коміра, 124 - Нижній Студений, 125 - Ужгород, 126 - Плай, 127 - Міжгір 'я, 128 - Берегове, 129 - Хуст, 130 - Рахів
Чернівецька	131 - Чернівці, 132 - Селятин
Одеська	133 - Любашівка, 134 - Затишшя, 135 - Сербка, 136 - Роздільна, 137 - Одеса, 138 - Білгород - Дністровський, 139 - Сарата, 140 - Болград, 141 - Вилкове, 142 - Ізмаїл
Запорізька	143 - Запоріжжя, 144 - Гуляйполе, 145 - Кирилівка, 146 - Прибив, 147 - Мелітополь, 148 - Бердянськ, 149 - Ботієво
Миколаївська	150 - Первомайськ, 151 - Вознесенськ, 152 - Баштанка, 153 - Миколаїв, 154 - Очаків
Херсонська	155 - Велика Олександрівка, 156 - Нижні Сірогози, 157 - Нова Каховка, 158 - Херсон, 159 - Асканія -Нова, 160 - Бехтери, 161 - Генічеськ, 162 - Хорли, 163 - Стрілкове
Автономна республіка Крим	164 - Ішунь, 165 - Роздольне, 166 - Джанкой, 167 - Клепиніно, 168 - Чорноморське, 169 - Нижньогірський, 170 - Мисове, 171 - Керч, 172 - Небезпечне, 173 - Євпаторія, 174 - Владиславівка, 175 - Білогірськ, 176 - Сімферополь, 177 - Феодосія, 178 - Караби-яйла, 179 - Поштове, 180 - Алушта, 181 - Севастополь, 182 - Херсонеський маяк, 183 - Никитський Сад, 184 - Ангарський Перевал, 185 - Ялта, 186 - Ай- Петрі, 187 - Орлине

Мережа нерівномірна у зв'язку з різним просторово-часовим розмахом і різними характеристиками метеорологічних явищ, що відбуваються в різних регіонах і процесах. Мінімальну відстань між метеостанціями складає

декілька кілометрів (гірські райони), максимальна відстань - 210 кілометрів (станції № 90 і 134).

Рисунок 1.32 - Метеорологічна мережа України за станом на початок 2014 року

Розставляння метеорологічних РЛС на позиціях існуючої мережі метеорологічних станцій приведе до того, що буде потрібна велика кількість радарів з енергетичними характеристиками, що істотно розрізняються, і системами обробки інформації. Це не раціональне рішення, воно приведе до істотного подорожчення системи радіолокації. Бажання використовувати однотипну метеорологічну РЛС з дальністю дії 105 км, по максимальній відстані між метеостанціями 210 км, дозволить створити беспровальное поле радіолокації по всій території країни (рис. 1.33).

Проте, енергетична структура радіолокаційного поля буде вкрай нерівномірною (рис. 1.34). Місцями буде надлишок енергії (на рис. 1.34 найбільш світлі ділянки), місцями щільність потоку енергії буде в необхідних межах (темніші ділянки на рис. 1.34).

Рисунок 1.33 - Конфігурація нижньої межі радіолокаційного поля при розміщенні МРЛС на території існуючих метеостанцій

Рисунок 1.34 - Структура радіолокаційного поля при накладенні зон спостереження МРЛС з різною дальністю дії при розміщенні їх на території існуючих метеостанцій

Подібне положення призводить до низької внутрішньосистемної енергетичної ефективності. Енергетична неефективність приводить і до інформаційної неефективності. Гостро постає питання ототожнення інформації, що отримується від джерел, що перекриваються, яка буде багаторазово дубльована. Якщо уникати процедури ототожнення і користуватися інформацією одного джерела, нехай і найнадійнішого і точнішого, то виникає природне питання про необхідність генерування і випромінювання в простір величезної кількості надмірної енергії.

Аналіз цього варіанту побудови радіолокаційної системи призводить до висновку про те, що він неефективний практично з будь-якої точки зору. Або потрібно радари з істотно різними характеристиками, що дорого, або при однотипних радарах виникають проблеми енергетичної ефективності і обробки інформації.

1.4.4 Оптимізація геометричного розташування метеорологічних РЛС за мінімумом перекриття зон спостереження

Варіант побудови радіолокаційного поля на основі оптимального геометричного розташування радіолокаторів з метою найбільшої економії енергетичних ресурсів МРЛС вимагає рішення геометричної задачі наступного вигляду.

Контрольована площа розбивається на багатокутники, у вершинах яких встановлюються МРЛС. При рішенні задачі оцінюється загальна обслуговувана системою площа ($S_{обс}$) і площа ділянок зон спостереження, які перекриваються ($S_{пер}$). Співвідношення площ перекритих ділянок зон спостереження окремих МРЛС і загальна площа обслуговувана системою покритою полем радіолокації дасть уявлення про міру енергетичної економічності радіолокаційного поля.

На підставі простого геометричного аналізу можна припустити, що радіолокатори можуть бути розставлені на вершинах правильних трикутників, квадратів, п'ятикутників, шестикутників і так далі

Для розташування МРЛС по вершинах перших чотирьох вказаних багатокутників завдання в графічному вигляді виглядає таким чином (рис. 1.35).

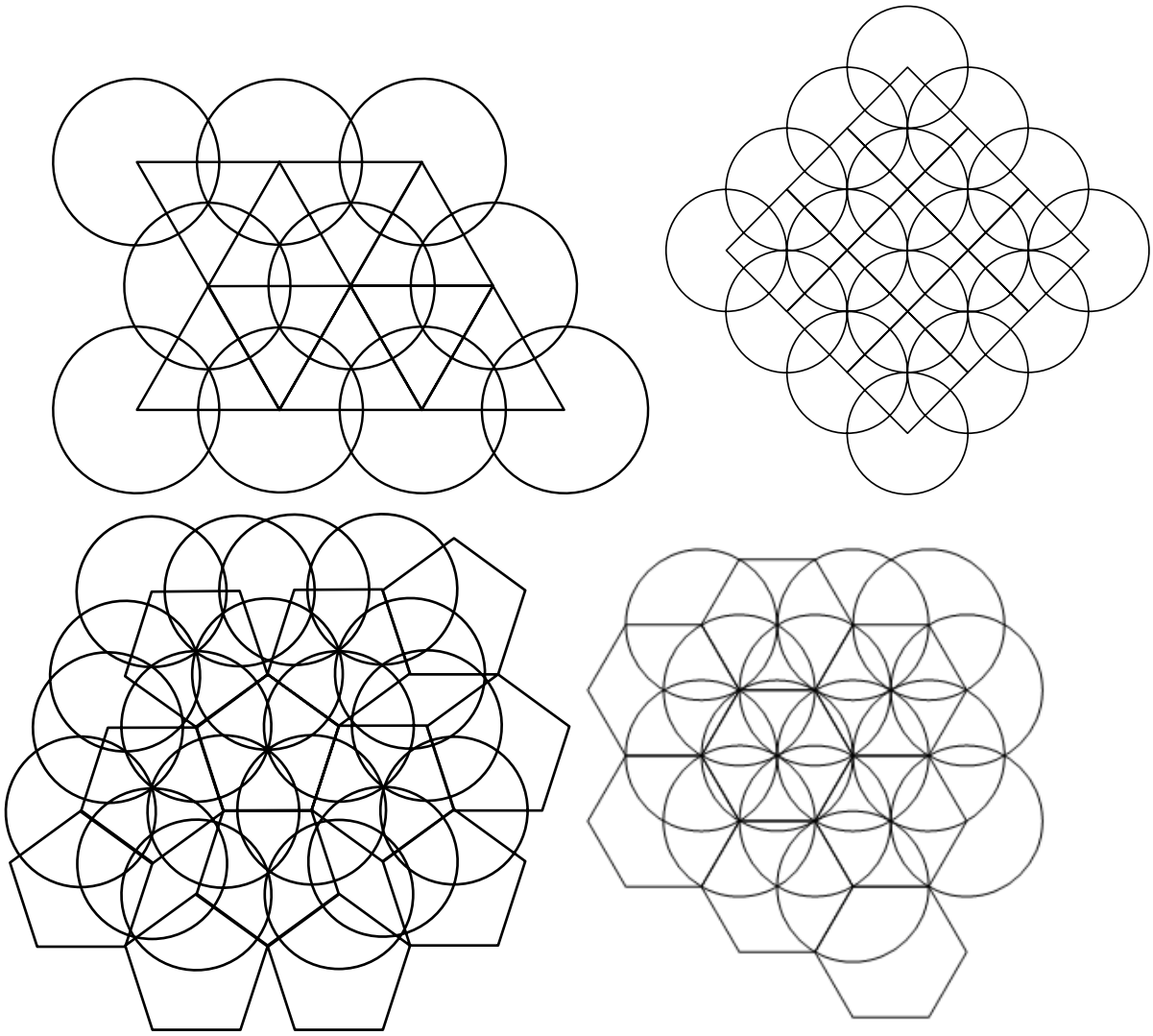


Рисунок 1.35 - Варіанти розташування радіолокаційних станцій системи у вершинах різних багатокутників

Таким чином, необхідно з приведених вище геометричних побудов знайти для кожного випадку загальні обслуговувані системою площі ($S_{обс}$) і площі ділянок зон спостереження, які перекриваються ($S_{пер}$). Після чого за

співвідношенням площ перекритих ділянок зон спостереження окремих МРЛС і загальній площі обслуговуваної системою покритою радіолокаційним полем визначити міру енергетичної економічності радіолокаційного поля.

З геометрії відоме [62], що площа сегменту (рис. 1.36) знаходиться за формулою (1.6).

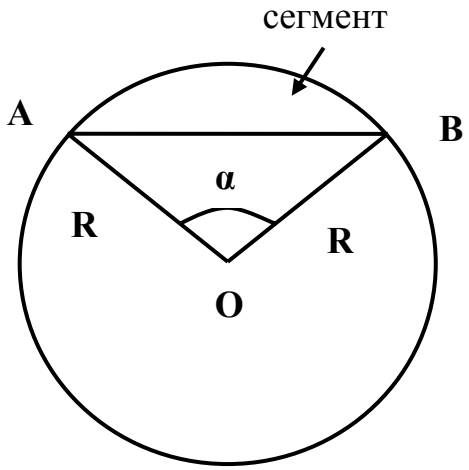


Рисунок 1.36 - Ілюстрація до завдання знаходження площі сегменту кола

$$S_{\text{сегм}} = \frac{R^2}{2}\left(\pi\frac{\alpha^\circ}{180^\circ} - \sin\left(\alpha^\circ\right)\right). \qquad (1.6)$$

При розташуванні МРЛС у вершинах трикутника (рис. 1.37) загальна обслуговувана системою площа Sобс=S1+S2+S3 або Sобс=3·π·R2=9,42·R2.

Сегментів при перетині кругів - 6. Вони однакові в силу рівносторонності трикутника і спираються на кут α = 60°. Їх сумарна площа Sпер = 6(π - 1,5√3) R2 = 0,54·R2 .

Коефіцієнт перекриття $K_п$ раціонально представити у вигляді відношення $S_{пер}/S_{обс}$. Він характеризуватиме міру накладення зон спостереження один на одного, тобто те, яка доля загальної зони спостереження обслуговується більш ніж на одній МРЛС. Межою цього

значення може бути тільки одиниця, коли всі три круги накладуться один на одного. Для даного випадку розташування МРЛС у вершинах трикутника $K_п$= 0,057 (або ≈ 6%).

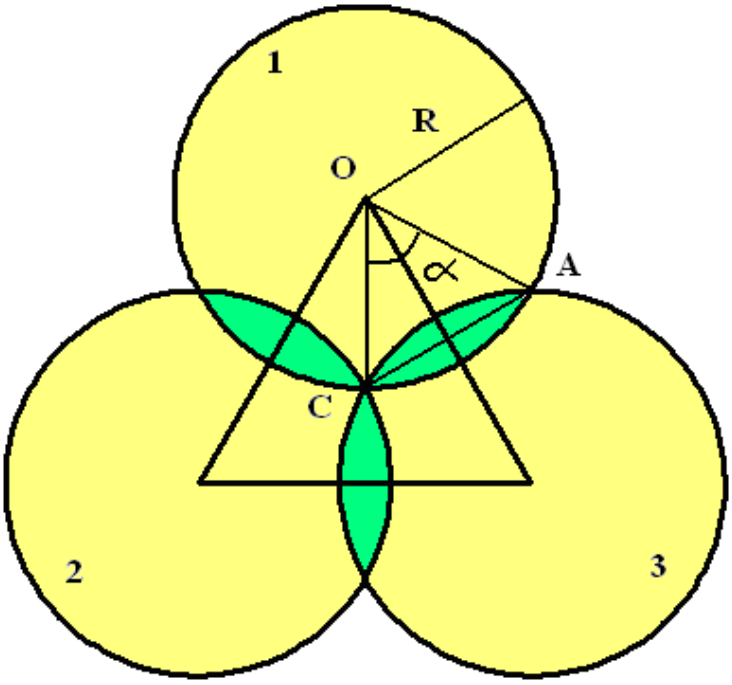


Рисунок 1.37 - Ілюстрація до завдання знаходження площ при розташуванні МРЛС у вершинах трикутника

Говорячи про економію енергетичних ресурсів МРЛС, раціональним представляється введення коефіцієнта енергетичної економічності K_{ee}. Його можна визначити як різниця 1 і $K_п$, тобто як величину дзеркальну коефіцієнту перекриття K_{ee}=1-$K_п$. Таким чином, збільшення перекриття зон спостереження окремих МРЛС погіршує енергетичні характеристики поля радіолокації, підкреслюючи неекономний розподіл енергії в просторі. У даному випадку K_{ee}= 0,94 (або 94%).

При накладенні на карту трикутників (рис. 1.38) і розставлення радіолокаторів в їх вершинах за допомогою раніше розробленого

програмного комплексу WW_CEEM_Radar [2] радіолокаційне поле набере вигляду, показаного на рис. 1.39.

Рисунок 1.38 - Накладення на карту трикутників з вибраною стороною, відповідною заданій відстані між МРЛС

Рисунок 1.39 - Структура радіолокаційного поля при розставленні радіолокаторів у вершинах вибраних трикутників

При розташуванні МРЛС у вершинах квадрата (рис. 1.40) загальна обслуговувана системою площа $S_{обс}=S_1+S_2+S_3+S_4$ або $S_{обс}=4\cdot\pi\cdot R^2=12{,}57\cdot R^2$.

Сегментів при перетині кіл - 8. Вони однакові в силу рівносторонності квадрата і спираються на кут α=90°. Їх сумарна площа $S_{пер}=8(2\pi4)R^2=2{,}28\cdot R^2$.

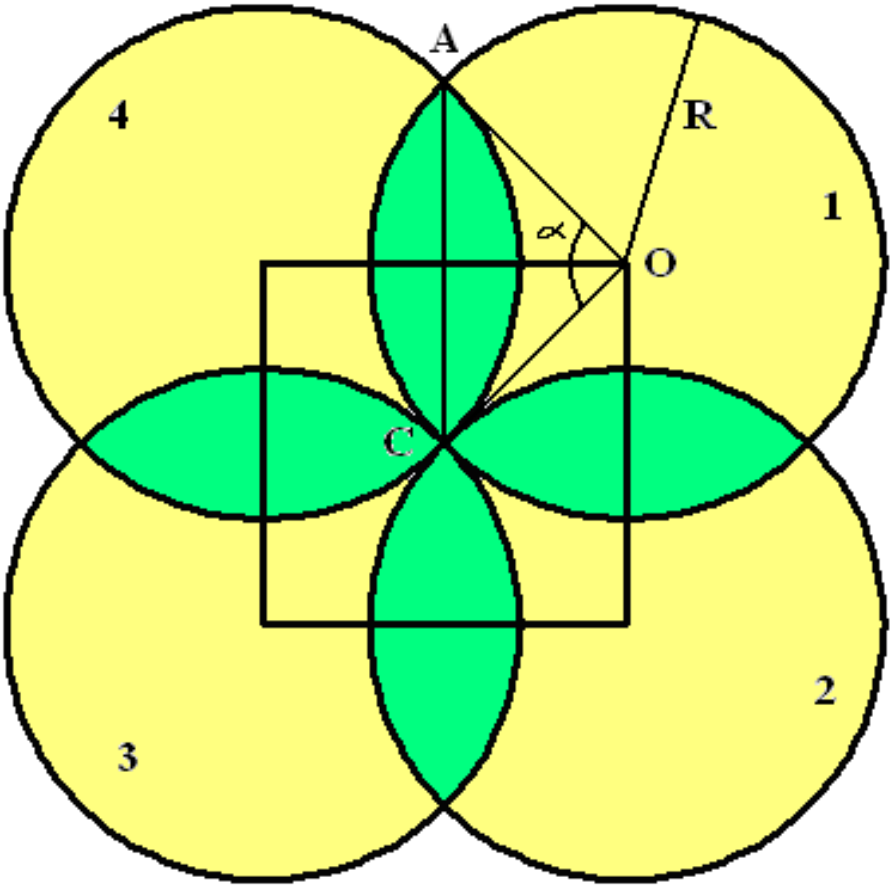


Рисунок 1.40 - Ілюстрація до завдання знаходження площ при розташуванні МРЛС у вершинах квадрата

Коефіцієнт перекриття для даного випадку розташування МРЛС у вершинах квадрата $K_п$=0,181 (або≈18%). Коефіцієнт енергетичної економічності в даному випадку K_{ee}=0,82 (або≈82%).

При накладенні на карту чотирикутників (рис. 1.41) і розставлянні радіолокаторів в їх вершинах за допомогою раніше розробленого

програмного комплексу WW_CEEM_Radar [2] радіолокаційне поле набере вигляду, показаного на рис. 1.42.

Рисунок 1.41 - Накладення на карту чотирикутників з вибраною стороною, відповідною заданій відстані між МРЛС

Рисунок 1.42 - Структура радіолокаційного поля при розставлянні радіолокаторів у вершинах вибраних чотирикутників

Розгляд розташування МРЛС у вершинах п'ятикутника нераціонально, оскільки сукупність з дванадцяти п'ятикутників утворює об'ємну фігуру у вигляді одного з п'яти можливих правильних многогранників, званих додекаедром, і на площині вона не може бути розгорнута. З'являються розриви в плоскій поверхні (затемнені області на рис. 1.43), і структура поля радіолокації виходитиме нерегулярною (це добре видно на рис. 1.35). Все це ускладнить аналіз структури поля, в якому немає особливої необхідності. Доцільно перейти до розгляду розташування МРЛС у вершинах шестикутника.

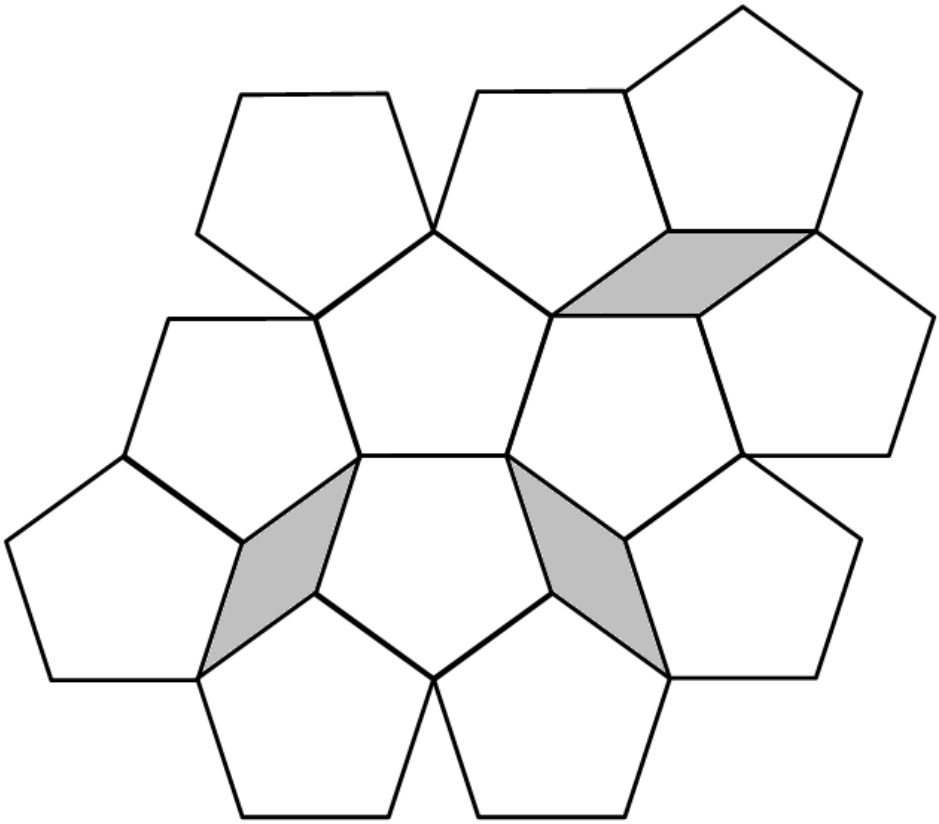


Рисунок 1.43 - Ілюстрація до завдання розташування МРЛС у вершинах п'ятикутників

При розташуванні МРЛС у вершинах шестикутника (рис. 1.44) загальна обслуговувана системою площа $S_{обс}=S_1+S_2+S_3+S_4+S_5+S_6$ або $S_{обс}=6\cdot\pi\cdot R^2=18{,}85\cdot R^2$.

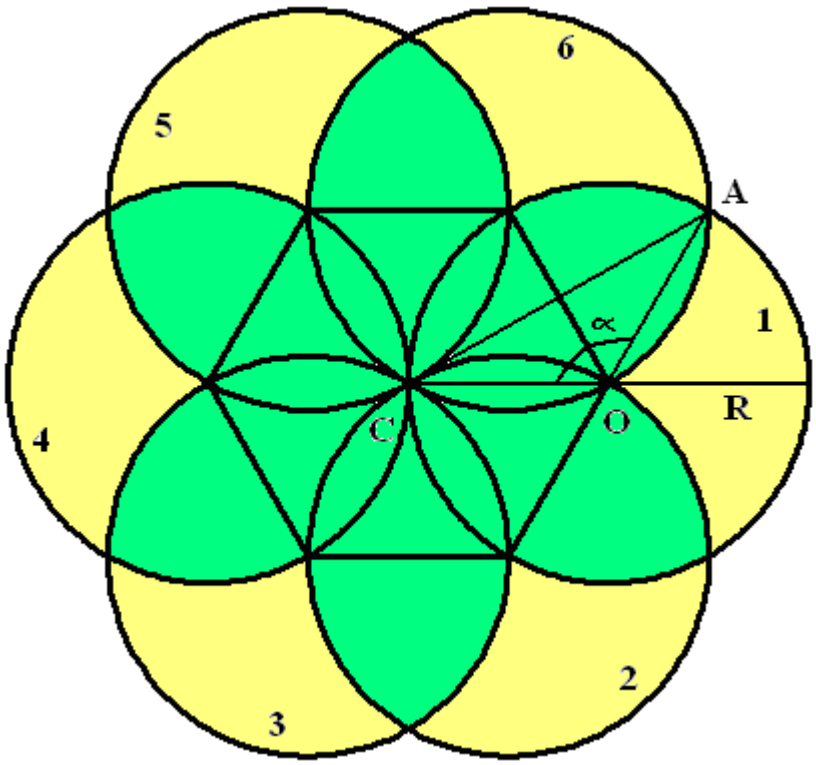


Рисунок 1.44 - Ілюстрація до завдання розташування МРЛС у вершинах шестикутників з урахуванням перекриття суміжних кіл

Сегментів при перетині суміжних кіл - 12. Вони однакові в силу рівносторонності шестикутника і спираються на кут α = 120°. Їх сумарна площа $S_{пер}=12\cdot(R^2/2(2\pi/3 - \sqrt{3}/2)) = (4\pi - 3\sqrt{3})\, R^2=7{,}37\cdot R^2$.

Коефіцієнт перекриття для даного випадку розташування МРЛС у вершинах шестикутника $K_п$=0,391 (або≈39%). Коефіцієнт енергетичної економічності в даному випадку K_{ee} = 0,61 (або 61%).

Але для цього випадку існує особливість. З'являється перекриття несуміжних кіл (рис. 1.45). Звичайно, ці області входять в області перекриття суміжних кіл, але фактично з'являється ще більша енергетична неекономічність.

При накладенні на карту шестикутників (рис. 1.46) і розставлянні радіолокаторів в їх вершинах за допомогою раніше розробленого

програмного комплексу WW_CEEM_Radar [2] поле радіолокації набере вигляду, показаного на рис. 1.47.

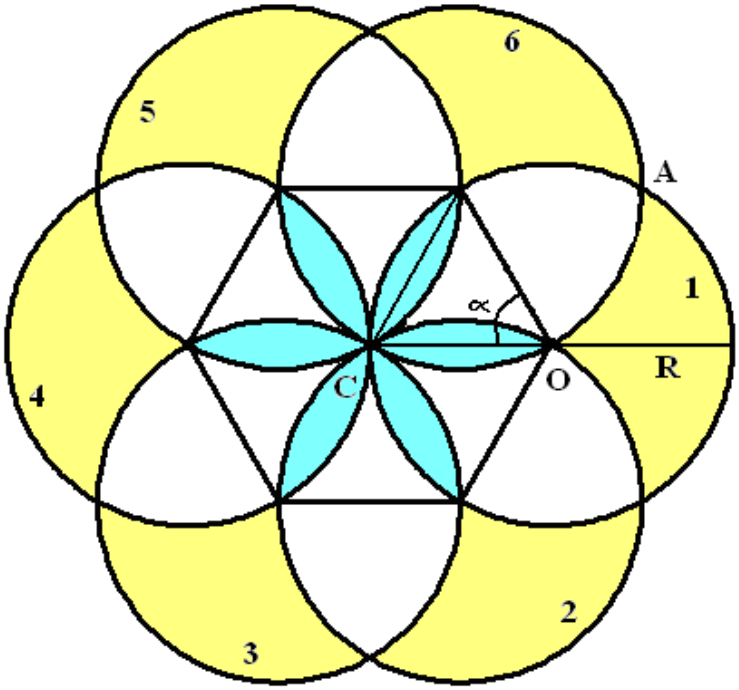


Рисунок 1.45 - Ілюстрація до завдання розташування МРЛС у вершинах шестикутників з урахуванням перекриття несуміжних кіл

Рисунок 1.46 - Накладення на карту шестикутників з вибраною стороною, відповідною заданій відстані між МРЛС

Розгляд представлених вище варіантів побудови радіолокаційного поля дозволяє оцінити зміну коефіцієнта перекриття поля радіолокації і узагальнити енергетичну економічність у вигляді графіку коефіцієнта енергетичної економічності K_{ee}. Їх вид приведений на рис. 1.48.

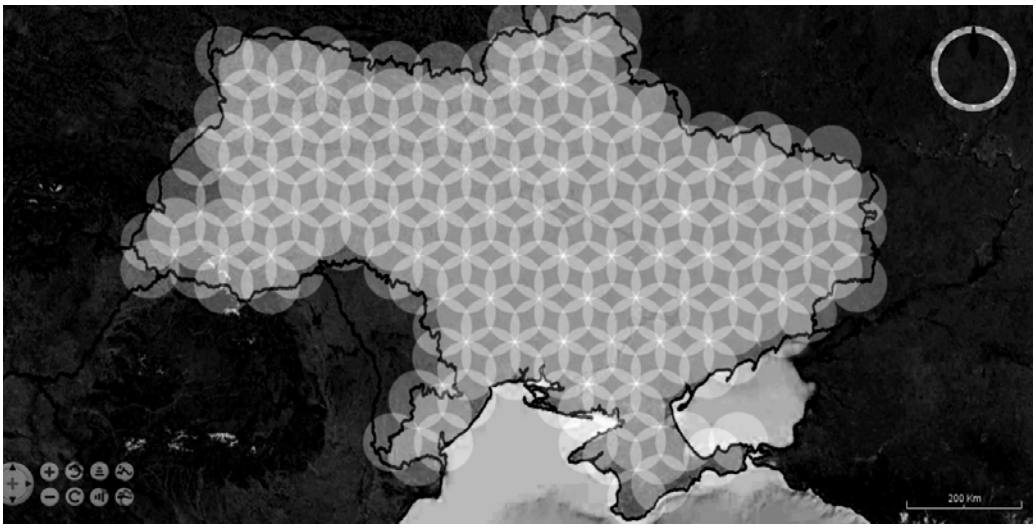


Рисунок 1.47 - Структура радіолокаційного поля при розставлянні радіолокаторів у вершинах вибраних шестикутників (контрастне зображення, яскраві білі кола - області подвійного перекриття зон спостереження несуміжних радіолокаційних станцій)

В результаті аналізу отриманих результатів можна зробити висновок про те, що радіолокаційні станції системи моніторингу довкілля необхідно розташовувати у вершинах трикутників, побудованих топографічно так, щоб їх вершини спиралися на метеорологічні станції існуючої мережі. Такий підхід дозволить уникнути проблем з відчуженням нових земель під майданчики для радіолокаторів, що істотно здешевить побудову радіолокаційної системи моніторингу. Цей же підхід забезпечить найкращу просторову економію енергії радіолокаційного поля системи моніторингу довкілля.

а) б)

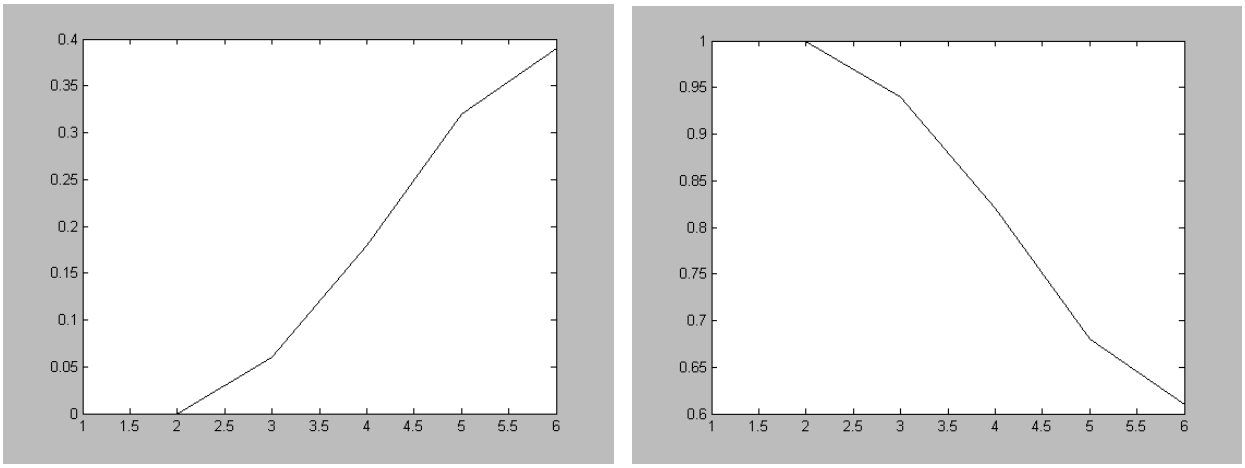


Рисунок 1.48 - Характеристики енергетичної економічності радіолокаційного поля при різних варіантах розташування радіолокаційних станцій:
а) - коефіцієнт перекриття $K_п$; б) - коефіцієнт енергетичної економічності K_{ee}

1.4.5 Забезпечення стійкості радіолокаційного поля системи моніторингу довкілля

Під стійкістю радіолокаційного поля в першу чергу слід розуміти безперебійність видачі моніторингової інформації споживачам з заданими показниками якості.

Безперебійність видачі інформації забезпечується організаційними і технічними заходами.

На етапі створення радіолокаційної системи моніторингу довкілля вимагається побудувати поле так, щоб забезпечити його стійкість при зміні структури радіолокаційної системи. Незначні зміни структури системи (її реконфігурація), а можливо і значні, за бажанням замовника, не повинні погіршувати безперебійність видачі інформації і задані показники її якості. Під структурними змінами тут можна розуміти переривання отримання або неможливість отримання, по яких або причинам, інформації від частини МРЛС, що становлять систему. В результаті виходу з ладу частини МРЛС

походить деградація радіолокаційного поля. Структура радіолокаційного поля в цьому випадку має бути такою, щоб це проріджування МРЛС не позначилося на безперебійності і якості видаваної інформації. Досягти вказаної стійкості можливо за рахунок певного розміщення радіолокаторів на місцевості.

При розташуванні МРЛС по вершинах трикутників вихід з ладу приблизно половини радарів приведе до значних провалів в полі (рис. 1.49) радіолокації. Приблизно половина поля буде втрачена з усіма витікаючими наслідками.

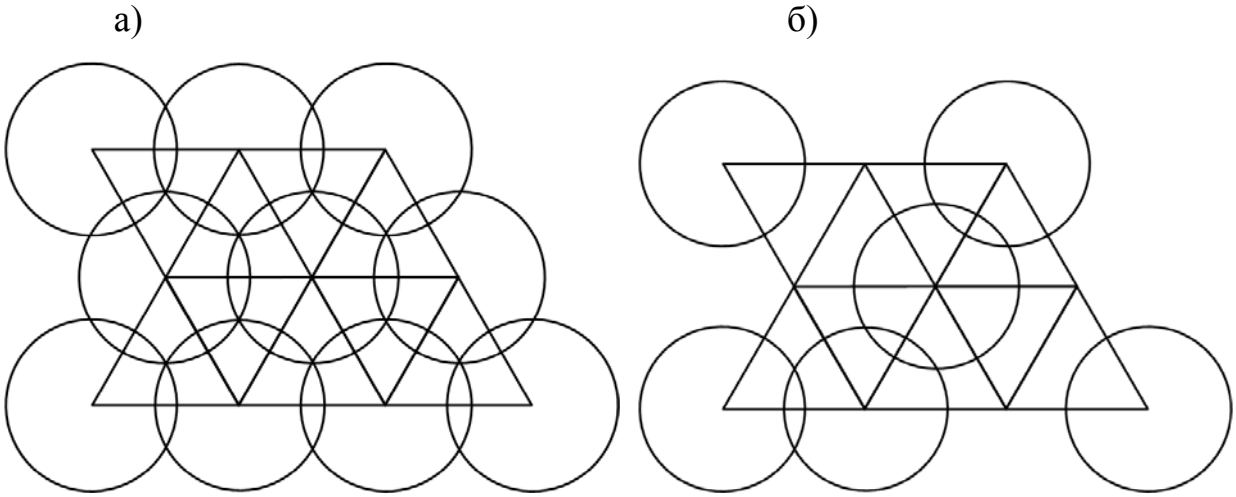


Рисунок 1.49 - Ілюстрація втрати частини радіолокаційного поля при розташуванні радарів у вершинах трикутників:
а) - при всіх працездатних радарах; б) - при виході з ладу приблизно половини радарів

Значно менші втрати поля вийдуть при розташуванні МРЛС по вершинах квадратів і у разі виходу з ладу приблизно половини радарів (рис. 1.50). При розташуванні МРЛС по вершинах шестикутників таке ж значне проріджування радарів практично не призводить до втрат в радіолокаційному полі. Воно практично залишається беспровальним, що

забезпечить безперебійність видачі моніторингової інформації з заданими показниками якості (рис. 1.51).

а) б)

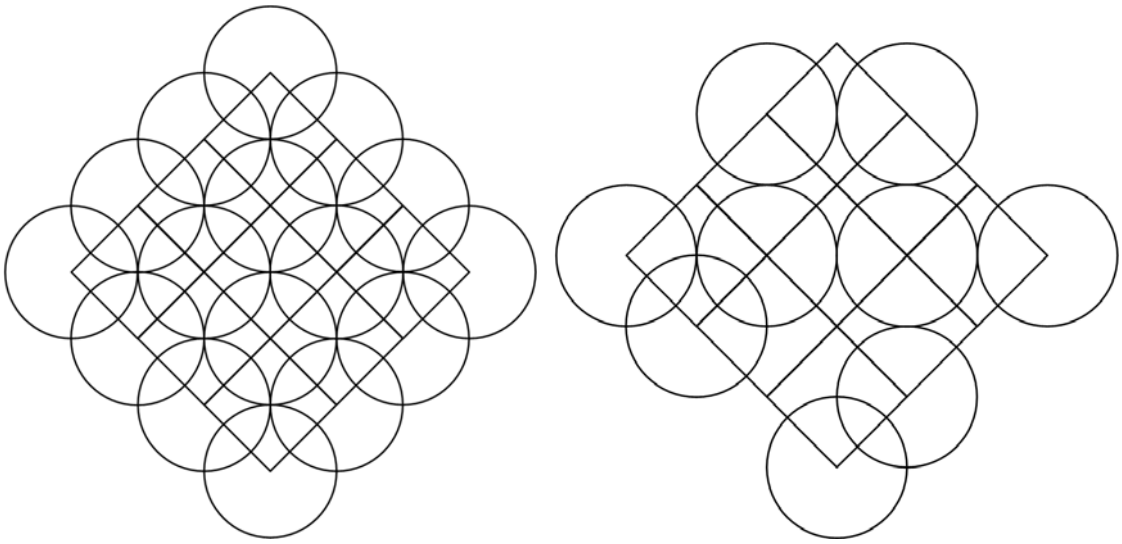


Рисунок 1.50 - Ілюстрація втрати частини радіолокаційного поля при розташуванні радарів у вершинах квадратів: а) - при всіх працездатних радарах; б) - при виході з ладу приблизно половини радарів

а) б)

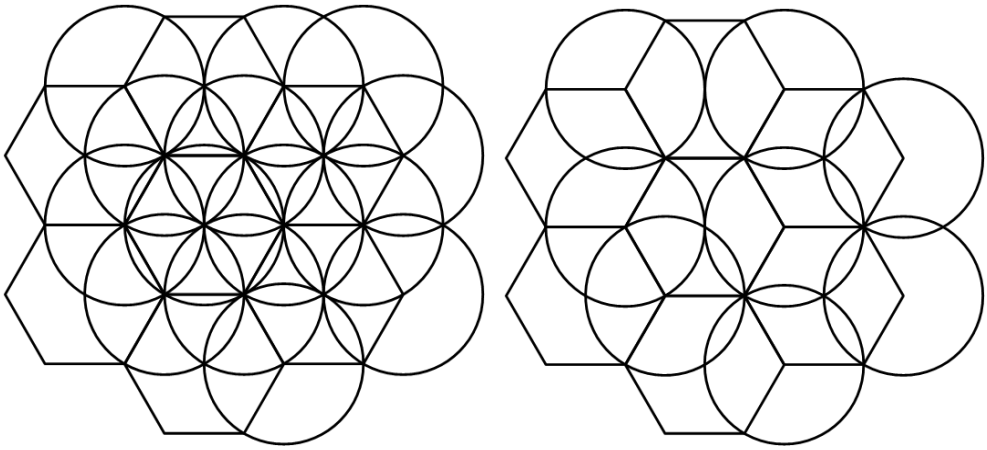


Рисунок 1.51 - Ілюстрація втрати частини радіолокаційного поля при розташуванні радарів у вершинах шестикутників: а) - при усіх працездатних радарах; б) - при виході з ладу приблизно половини радарів

Таким чином, розробник повинен прагнути створити стійке і малочутливе до втрат МРЛС поле радіолокації. Але вимоги економії енергії і стійкості радіолокаційного поля є суперечливими. Тому розробник повинен спільно з замовником знаходити компроміс відповідно до заданих критеріїв ефективності.

1.4.6 Варіант побудови радіолокаційної системи з рівнем випромінювання, безпечним для людей

Норми безпечних рівнів електромагнітних випромінювань.

Електромагнітні випромінювання в місці існування людей створюються як природними, так і штучними джерелами.

До природних джерел відносяться:

– електромагнітне випромінювання сонця, яке створює щільність потоку потужності над атмосферою Землі 1400 Вт/м^2 в широкому спектрі радіочастот, а на поверхні Землі - не більше 100 Вт/м^2;

– електростатичне (до декількох В/м) і магнітне поля (до 40 А/м), що випромінюються земними джерелами;

– електромагнітні випромінювання, що викликаються природними явищами на Землі, наприклад, розряди блискавок, турбулентні течії в іоносфері і ін.

Природні випромінювачі створюють впродовж усього існування людства на Землі електромагнітний фон (менше мкВт/см^2), до якого людство давно пристосувалося. За останні 120 років спостерігається зростання рівня електромагнітного фону за рахунок бурхливого розвитку штучних джерел електромагнітних випромінювань. Їх можна розділити на дві великі групи:

– радіотехнічні системи: радіо і телевізійні мовні станції, радари, радіонавігаційні системи, радіорелейні лінії зв'язку, системи мобільного зв'язку, технологічні установки в промисловості, фізіотерапевтичні установки і ін.;

– пристрої, не призначені для випромінювання електромагнітної енергії в простір, але в яких протікають електричні струми, що є джерелами паразитного електромагнітного поля: трансформаторні підстанції, високовольтні лінії електропередач, електроплити, електронагрівачі, холодильники, телевізори, мікрохвильові печі і так далі.

Електромагнітні поля різних діапазонів довжин хвиль біологічно активні і можуть по-різному впливати на живий організм, у тому числі і на людину.

Людський організм усвідомлено реагує лише на електромагнітні хвилі оптичного діапазону, тоді як для інших діапазонів хвиль у людей відсутні чутливі органи. Проте, як показує практика і дослідження, найбільш чутливі до електромагнітних випромінювань наступні органи: очі, центральна нервова система, серцево-судинна, гормональна і репродуктивна системи. Незважаючи на численні дослідження дії електромагнітних полів на здоров'ї людини, до теперішнього часу існують лише розрізнені відомості про вплив відповідних діапазонів електромагнітних хвиль при відповідних потоках потужності і часу експозиції. Тому для забезпечення безпеки в усіх країнах світу були розроблені і прийняті стандарти норм безпечної дії електромагнітних випромінювань.

Як параметри, за допомогою яких оцінюється дія електромагнітного поля на людський організм, використовуються:

– щільність потоку потужності П (мВт/см^2) - Power Density (PD);

– питома поглинальна здатність(мВт/г, Вт/кг) - Specific Absorption Rate (SAR);

– максимально можлива експозиція (зазвичай виразима в одиницях PD (мВт/см^2) - Maximum Permissible Exposure (MPE);

– час експозиції t (хв).

В разі імпульсно-модульованих коливань оцінка проводиться за середній період наслідування імпульсу потужність джерела випромінювання і, відповідно, за середню інтенсивність випромінювання.

Можливе використання стандартних параметрів величин PD і SAR, проте, величина SAR більше підходить при оцінках рівнів дії електромагнітного поля, які викликають процеси нагрівання тканин, тоді як величина PD дозволяє проводити оцінки дії слабких і сильних за інтенсивності електромагнітних полів.

Стандартні норми безпеки діляться на дві групи:

– норми безпеки для персоналу, що працює з установками, випромінюючими електромагнітні поля;

– норми безпеки для населення.

При створенні системи моніторингу радіолокаційні станції розміщуються на місцевості. Необхідність може змусити їх розташовувати поблизу населених пунктів і навіть в самих населених пунктах. Тому далі розглянемо стандартні норми безпеки, прийняті в деяких країнах по другій групі, а саме для населення, оскільки ці норми є жорсткішими порівняно з нормами для персоналу.

1. CENELEC (Committee European de Normalization Electro - technique) ES 59005, October 1998, Євросоюз.

За величиною SAR в діапазоні частот від 30 Мгц до 6 ГГц:

– для тканин ніг, рук та ін. середнє значення SAR за час t<6 хв не повинне перевищувати значення SAR<4 мВт/г (при масі m=10 г);

– для інших тканин (м'язи та ін.) середнє значення SAR за час t<6 хв не повинне перевищувати значення: SAR<2 мВт/г (при масі m=10 г);

– для усього тіла людини при t<6 хв середнє значення SAR<0,08 мВт/г, тобто в 5 разів менше (0,4/5 мВт/г), ніж для персоналу.

2. ANSI/IEEE C95.1 - 1992(IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers), США у діапазоні частот 300..3000 МГц величина PD при часі експозиції t=30 хв П=f/1500 (Мгц) = 900/1500 = 0,6 мВт/см^2.

3. FCC (Federal Communication Commission), 1996, США МРЕ для населення при неконтрольованій радіоапаратурі - П=[f/1500 (Мгц)] - 900/1500= 0,6 мВт/см^2 при t=30 хв.

4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96, Російська Федерація при безперервному випромінюванні і постійному знаходженні населення в електромагнітному полі в діапазоні частот 300 МГц..300 ГГц величина PD не повинна перевищувати П<10 мкВт/см^2.

5. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів (Наказ Міністра охорони здоров'я України 18.12.2002 № 476, зареєстрований в Мінюсті України 13.03.2003 за № 203/7524) гранично допустима величина енергетичного навантаження (добуток щільності потоку енергії падаючого випромінювання і часу його впливу в годиннах і виражається в мкВт·г/см^2) електромагнітного поля в діапазоні частот 300 МГц - 300 ГГц складає 200 мкВт·г/см^2.

Аналіз приведених вище значень призводить до висновку про те, що для населення безпечним рівнем електромагнітного випромінювання в діапазоні частот використовуваних в станціях радіолокацій є:

– за SAR: <80 мкВт/г;
– за PD: П<10 мкВт/см^2 (Російська Федерація);
– за PD: П в межах 400..1000 мкВт/см^2 (Євросоюз, США).

Слід зазначити, що величини PD від 400 до 1000 мкВт/см^2 за нормами Євросоюзу і США досить великі для постійного знаходження населення в зоні електромагнітного випромінювання. Вони мають бути зменшені на два порядки, тобто до 4,10 мкВт/см^2. Слід також відмітити, що в Італії рівень безпечного фону для населення повинен складати 1,5 мкВт/см^2.

Побудова радіолокаційної системиї з рівнем випромінювання, безпечним для людей.

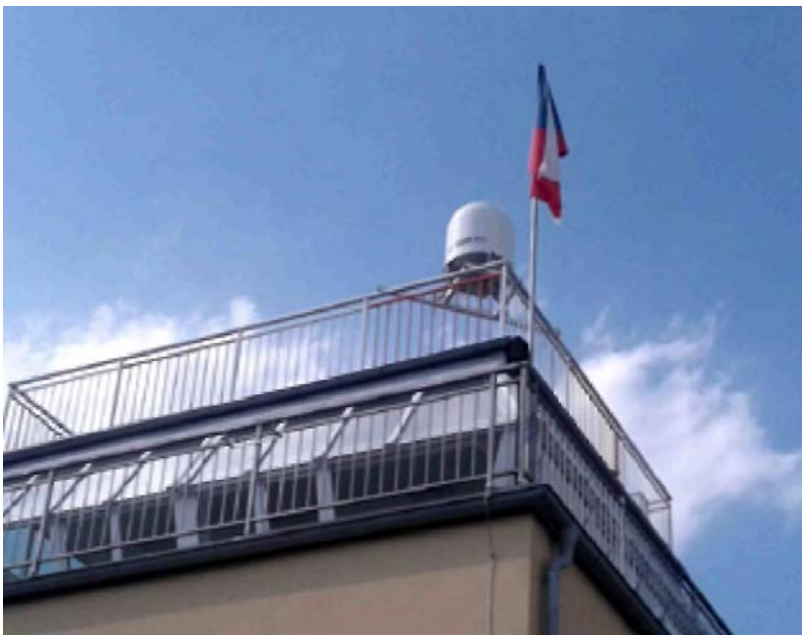
Яке вибрати значення параметра електромагнітного випромінювання? Значення щільності потоку потужності встановлені для Євросоюзу і США сильно завищені, італійські норми істотно занижені. Норми Російської Федерації і України, відповідно до 10 мкВт/см^2 і 8,3 мкВт/см^2 (енергетичне навантаження 200 мкВт·г/см^2 при 24 годинному опроміненні відповідає щільність потоку потужності 8,3 мкВт/см2) представляються найбільш

прийнятними. Орієнтуватимемося на державні нормативи безпечного фону радіочастотного випромінювання 8,3 мкВт/см2.

При необхідності установки метеорологічних РЛС в населених пунктах їх установка можлива на вишках, аналогічно системам стільникового зв'язку, оскільки при невеликих потужностях випромінювання радіолокатори будуть компактними і легкими. Прикладом може служити МРЛС ММР-50 виробництв Словацької республіки (рис. 1.52 - 1.54).

При такому розміщенні МРЛС допустима щільність потоку потужності в 8,3 мкВт/см2 повинна досягатися на відстані від антенної системи, яка дорівнює приблизно 50 метрів при будь-якому напрямі діаграми направленості антенної системи МРЛС. За цими межами рівень тривалого опромінення буде безпечним.

Рисунок 1.52 - Зовнішній вигляд метеорологічної радіолокаційної станції ММР-50



Русунок 1.53 - Метеорологічна радіолокаційна станція ММР- 50, встановлена на даху будівлі

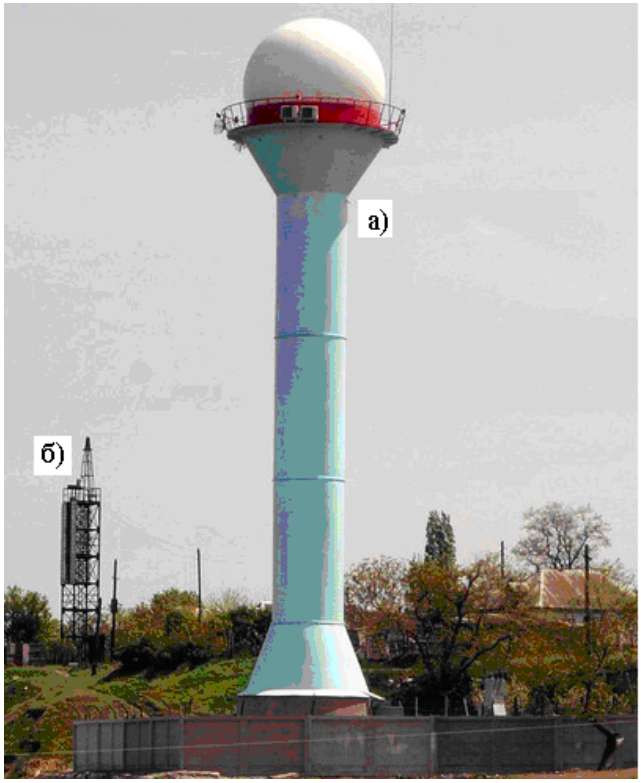


Рисунок 1.54 - Метеорологічна радіолокаційна станція, встановлена: а) - на опорі; б) - на щоглі

Якщо антена випромінює електромагнітну високочастотну енергію рівномірно на всі боки, тоді щільність потоку потужності *П* на одиницю поверхні сфери в точці, що знаходиться від випромінювача на відстані *R*, буде дорівнювати $П = \frac{P_{випр}}{4\pi R^2}$ (рис. 1.55).

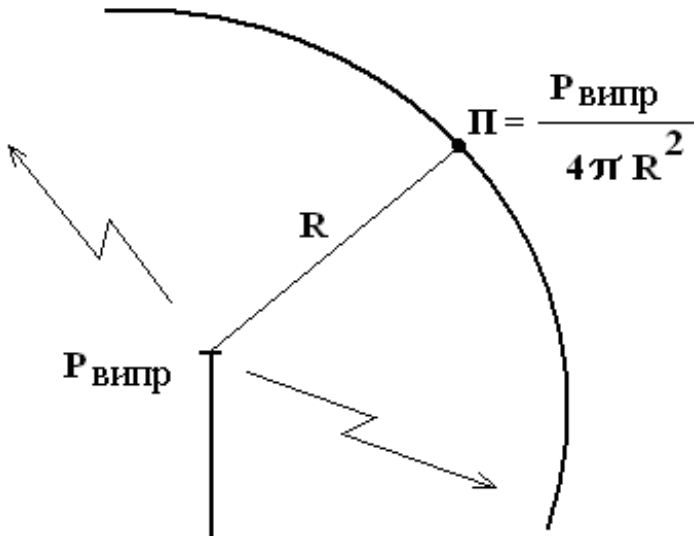


Рисунок 1.55 - Щільність потоку потужності у видаленій точці при ненапрямленій антені

Радіолокатори мають гостронаправлені антени, що необхідно для підвищення дальності виявлення і точного визначення поточних координат об'єктів. Направленість антени характеризується коефіцієнтом направленої дії (КНД). Ця величина показує міру концентрації електромагнітної енергії в певному напрямку. КНД визначається як відношення потужностей, що створюються в одній і тій же точці простору направленої і ненаправленої антенами при однаковій випромінюваній потужності. Точка вибирається у напрямі максимального випромінювання направленої антени. В цьому випадку щільність потоку потужності $П = \frac{КНД \cdot P_{випр}}{4\pi R^2}$ (рис. 1.56).

Якщо врахувати втрати в антені, то можна від випромінюваної потужності перейти до потужності на виході опромінювача дзеркала антени $П = \frac{G \cdot P_{\text{вих опром}}}{4\pi R^2}$, де G=η_A· КНД, G - коефіцієнт посилення антени, η_A- коефіцієнт корисної дії антени. А якщо ще врахувати втрати в антенно-хвильоводному тракті, тоді можна перейти до потужності передавального пристрою радіолокаційної станції $П = \frac{G \cdot P_\tau}{4\pi R^2 \cdot 10^{0,1\varsigma}}$, де P_τ - імпульсна потужність передавального пристрою, ζ - загасання, що вноситься хвильоводним трактом на передачу (3 дБ).

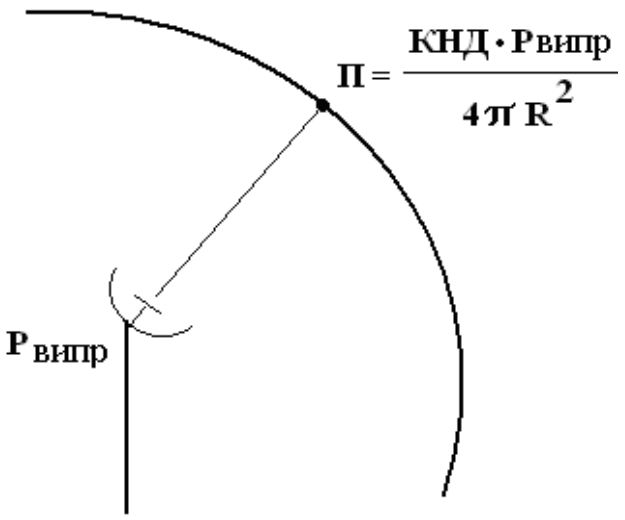


Рисунок 1.56 - Щільність потоку потужності у видаленій точці при направленій антені

Тепер легко визначити потрібну імпульсну потужність передавального пристрою МРЛС:

$$P_\tau = \frac{П \cdot 4\pi R^2 \cdot 10^{0,1\varsigma}}{G}. \qquad (1.7)$$

Підставивши вказані вище дані ($П$=8,3 мкВт/см^2 повинна досягатися на відстані приблизно 50 метрів від антенної системи, типовий коефіцієнт посилення антени приблизно 104, загасання вважаємо рівними 3 дБ) і привівши їх до однакових одиниць вимірювання, отримаємо результат P_τ=0,52 Вт.

Ця розрахована потужність передавального пристрою МРЛС дасть зменшення енергетичного потенціалу радара, відповідного 2 каналу МРЛ-5, приблизно в $1{,}64 \cdot 10^6$ разів. Значить, дальність його дії скоротиться в корінь квадратний з цього числа, тобто в 1280 разів, що зменшить дальність виявлення в режимі "відбиваність" за шарувато-купчастою хмарністю приблизно до 200 метрів з 250 км. Слід зазначити, що віддалення межі безпечного опромінення людей понад 50 метрів істотно картину не змінює, дальність може досягти декількох сотень метрів, 1 кілометра, але не більше того.

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки. Побудувати абсолютно безпечну для людей з точки зору електромагнітного випромінювання систему радіолокації моніторингу довкілля не представляється можливим. Для ефективної її роботи необхідно дуже істотно збільшувати зону сильного опромінення людей, що вимагає вживання заходів для їх захисту. У разі побудови системи з використанням порівняно малопотужних радарів для забезпечення безпеки людей необхідно ставити радари на вишки (високі будівлі) і вводити обмеження у випромінюванні за кутом місця для головної пелюстки діаграми направленості антени МРЛС. У такому варіанті побудови опромінення людей здійснюватиметься по першому бічному, а то і взагалі за дакількома пелюстками діаграми направленості антени радара, що в 500 і більше разів ослабить небезпечне випромінювання. Це питання повинно вирішуватись для кожного конкретного випадку розташування радара. Зниження загальної потужності випромінювання метеорологічної РЛС істотно спростить рішення задачі підвищення безпеки радіолокаційної системи моніторингу.

1.4.7 Варіанти побудови радіолокаційної системи з застосуванням однотипних метеорологічних радіолокаційних станцій з різною дальністю дії

Для побудови радіолокаційної системи скористаємося згаданим вище програмним комплексом WW_CEEM_Radar [2].

Здійснимо моделювання декількох варіантів побудови радіолокаційної системи моніторингу. Кожну з модельованих систем будуватимемо з однотипних метеорологічних РЛС з дальностями дії 50, 80, 100 і 120 км. Всі побудови здійснюватимуться при розташуванні метеорологічних РЛС з різними дальностями дії у вершинах пов'язаних трикутників на поверхні Землі, з тим, щоб виникаюча, з яких-небудь міркувань, необхідність збільшення висоти підйому антени МРЛС позначалася лише у бік поліпшення параметрів радіолокаційного поля, а саме на зменшенні його нижньої межі.

При дальності дії метеорологічної РЛС рівною 50 км відстань між локаторами складе 87,65 км (рис. 1.57). При цьому висота нижньої межі радіолокаційного поля дорівнюватиме приблизно 30 метрам (рис. 1.29).

Рисунок 1.57 - Порядок розташування метеорологічних радіолокаційних станцій на місцевості при відстані між ними 87,65 км

Топографія розташування радіолокаторів і структура радіолокаційного поля приведені на рис. 1.58. При такому варіанті побудови радіолокаційного поля знадобиться 100-110 радарів.

Рисунок 1.58 - Розташування радіолокаторів з дальністю дії 50 км і відстанню між ними 87,65 км, а також структура радіолокаційного поля утворюваного ними

При дальності дії метеорологічної РЛС рівною 80 км відстань між локаторами складе 138,34 км (рис. 1.59). При цьому висота нижньої межі радіолокаційного поля дорівнюватиме приблизно 400 метрам (рис. 1.29).

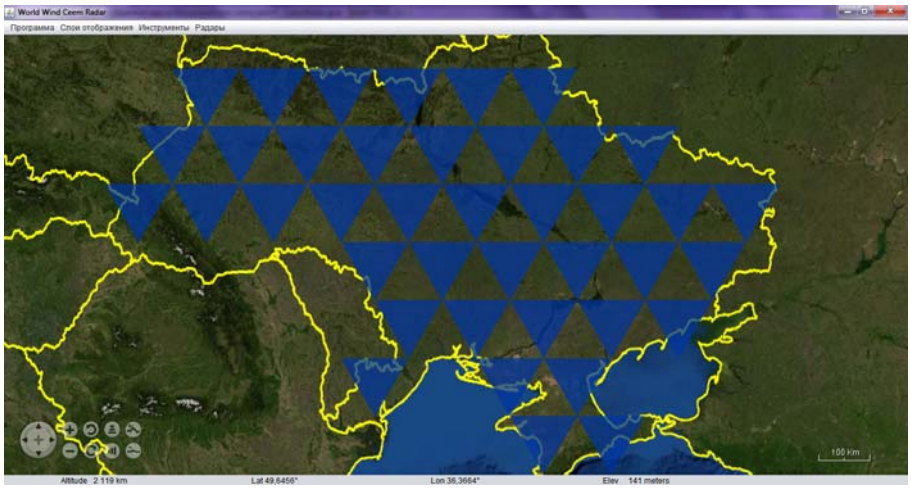


Рисунок 1.59 - Порядок розташування метеорологічних радіолокаційних станцій на місцевості при відстані між ними 138,34 км

Топографія розташування радіолокаторів і структура радіолокаційного поля приведені на рис. 1.60. При такому варіанті побудови радіолокаційного поля знадобиться 45 - 50 радарів.

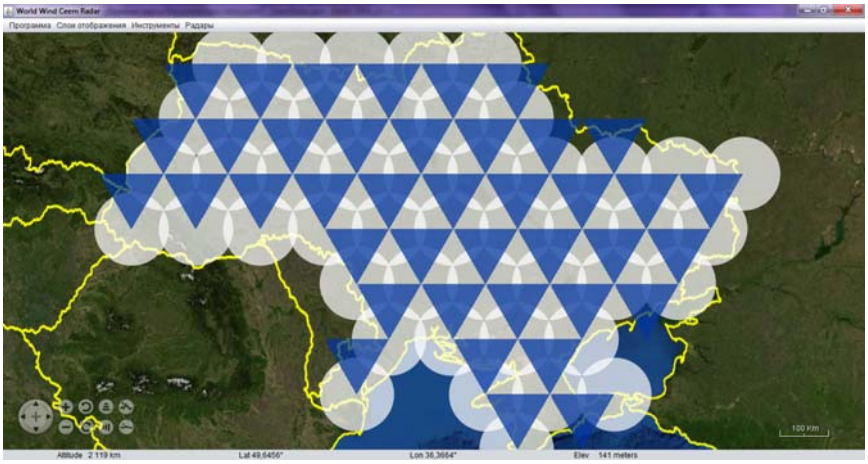


Рисунок 1.60 - Розташування радіолокаторів з дальністю дії 80 км і відстанню між ними 138,34 км, а також структура радіолокаційного поля утворюваного ними

При дальності дії метеорологічної РЛС рівною 100 км відстань між локаторами складе 173,32 км (рис. 1.61). При цьому висота нижньої межі радіолокаційного поля дорівнюватиме приблизно 500 метрам (рис. 1.29).

Рисунок 1.61 - Порядок розташування метеорологічних радіолокаційних станцій на місцевості при відстані між ними 173,32 км

Топографія розташування радіолокаторів і структура радіолокаційного поля приведені на рис. 1.62. При такому варіанті побудови радіолокаційного поля знадобиться 30 - 35 радарів.

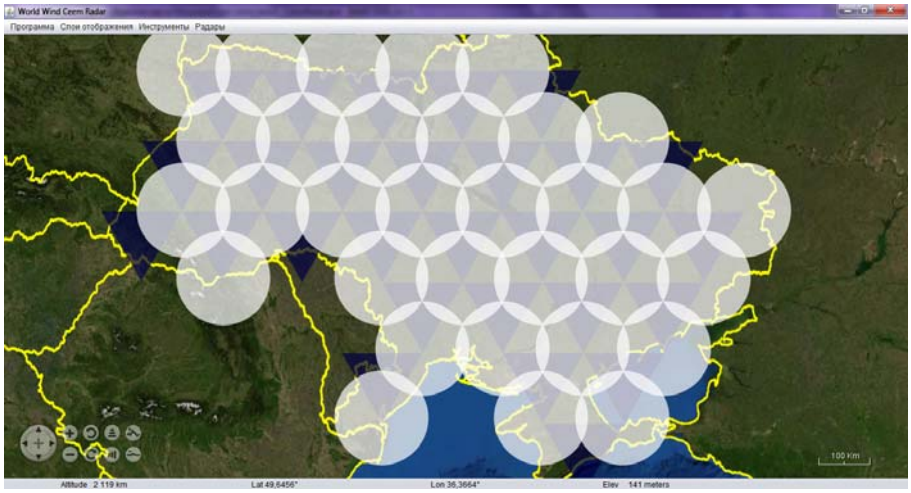


Рисунок 1.62 - Розташування радіолокаторів з дальністю дії 100 км і відстанню між ними 173,32 км, а також структура радіолокаційного поля утворюваного ними

При дальності дії метеорологічної РЛС рівною 120 км відстань між локаторами складе 207,97 км (рис. 1.63). При цьому висота нижньої межі радіолокаційного поля дорівнюватиме приблизно 900 метрам (рис. 1.29).

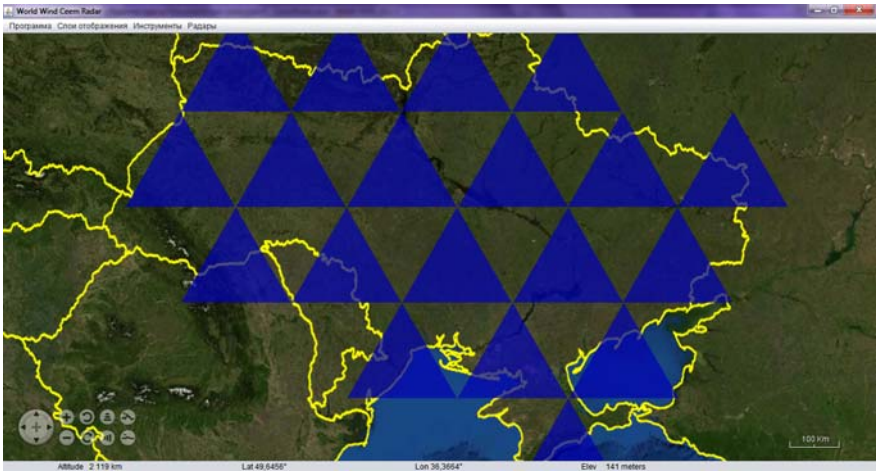


Рисунок 1.63 - Порядок розташування метеорологічних радіолокаційних станцій на місцевості при відстані між ними 207,97 км

Топографія розташування радіолокаторів і структура радіолокаційного поля приведені на рис. 1.64. При такому варіанті побудови радіолокаційного поля знадобиться 15 - 20 радарів.

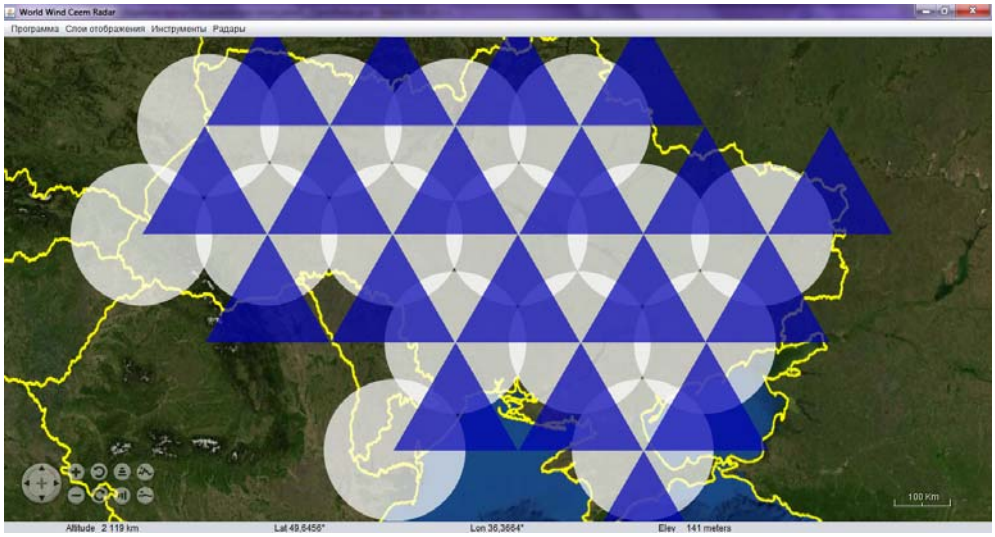


Рисунок 1.64 - Розташування радіолокаторів з дальністю дії 120 км і відстанню між ними 207,97 км, а також структура радіолокаційного поля утворюваного ними

1.4.8 Варіант побудови радіолокаційної системи з двохярусним радіолокаційним полем

Ярусність радіолокаційного поля виходить за рахунок багатократного перекриття зон спостереження окремих радіолокаторів. Перекриті зони спостереження суміжних РЛС утворюють нижній ярус радіолокаційного поля, зони спостереження РЛС що знаходяться через один локатор утворюють вищий другий ярус поля радіолокації, зони спостереження РЛС що знаходяться через два локатори утворюють ще вищий третій ярус радіолокаційного поля, і так далі. В результаті структура радіолокаційного поля набере вигляду, показаного на рис. 1.65.

Рисунок 1.65 - Структура багатоярусного радіолокаційного поля з радарами з дальністю дії 250 км при відстані між ними 200 км

Подібний варіант побудови радіолокаційного поля дає дуже високу його стійкість. Проте, для побудови радіолокаційної системи моніторингу довкілля такий варіант небажаний через декілька головних причин. Перша - украй низька енергетична економічність. Друга - серйозні труднощі, пов'язані з обробкою отримуваною у рамках подібного радіолокаційного поля інформацією, особливо при її ототожненні. Третя - наявність потужних РЛС приведе до екологічних проблем, пов'язаних з опроміненням людей.

Тому за бажання будувати ярусне радіолокаційне поле найдоцільніше створювати два яруси. Під двохярустністю радіолокаційного поля розуміється така його структура, коли верхній ярус зони спостереження створюється потужними далеко розташованими одна від одної радіолокаційними станціями з утворюваним при цьому за рахунок кривизни Землі провалом в нижньому ярусі зони спостереження. А нижній ярус зони спостереження створюється порівняно малопотужними радіолокаційними станціями, розташованими в районі провалу верхнього ярусу радіолокаційного поля (рис. 1.66).

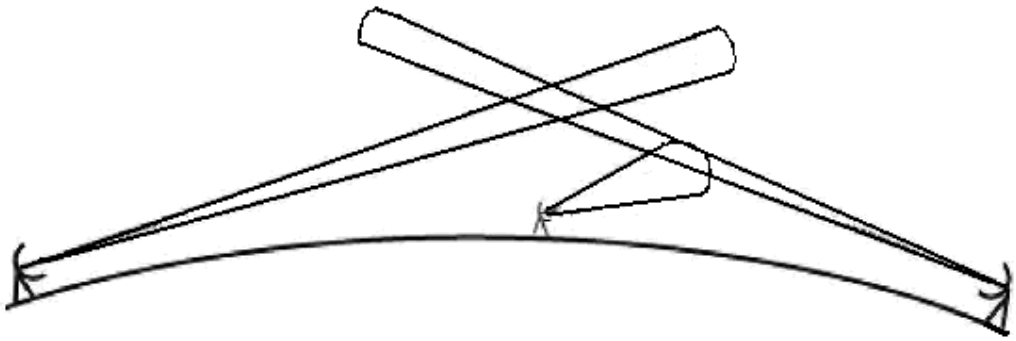


Рисунок 1.66 - Ілюстрація формування метеорологічними радіолокаційними станціями двохярусного радіолокаційного поля

Здійснимо моделювання двох'ярусного радіолокаційного поля, побудованого на основі радіолокаторів з дальностями дії 250 і 120 км. Відстань між потужними радарами, що утворюють верхній ярус, покладемо рівним 400 км, а радарами нижнього ярусу перекриватимемо провали, що утворюються у верхньому ярусі поля. Результат моделювання приведений на рис. 1.67 - 1.70.

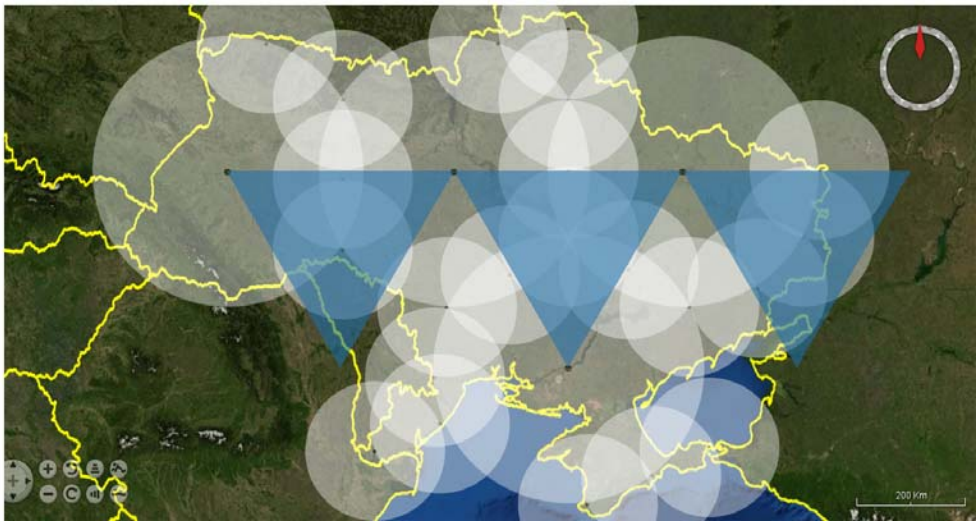


Рисунок 1.67 - Розставляння радарів з дальністю дії 250 км, що утворюють верхній ярус радіолокаційного поля на вершинах трикутників з стороною 400 км і радарів з дальністю дії 120 км в проміжках, в яких є провали поля верхнього ярусу

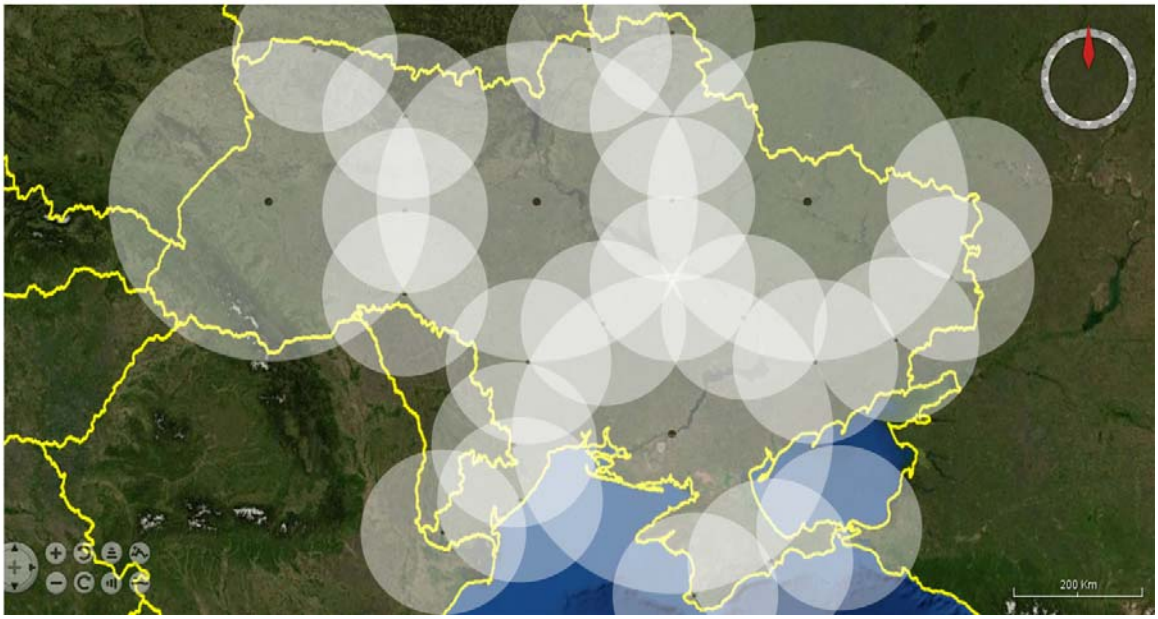


Рисунок 1.68 - Структура двохярусного радіолокаційного поля з радарами з дальністю дії 250 км при відстані між ними 400 км з радарами з дальністю дії 120 км, розставленими в місцях провалів в полі верхнього ярусу

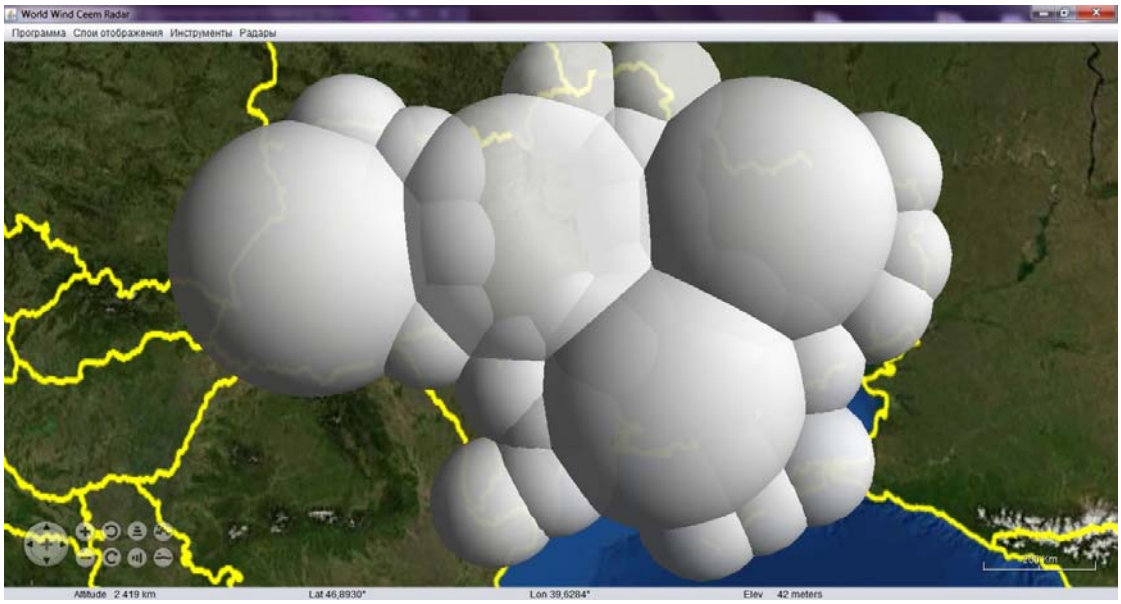


Рисунок 1.69 - Тривимірна структура двох'ярусного радіолокаційного поля з радарами з дальністю дії 250 км при відстані між ними 400 км і з радарами з дальністю дії 120 км, розставленими в місцях провалів в полі верхнього ярусу (вигляд зверху)

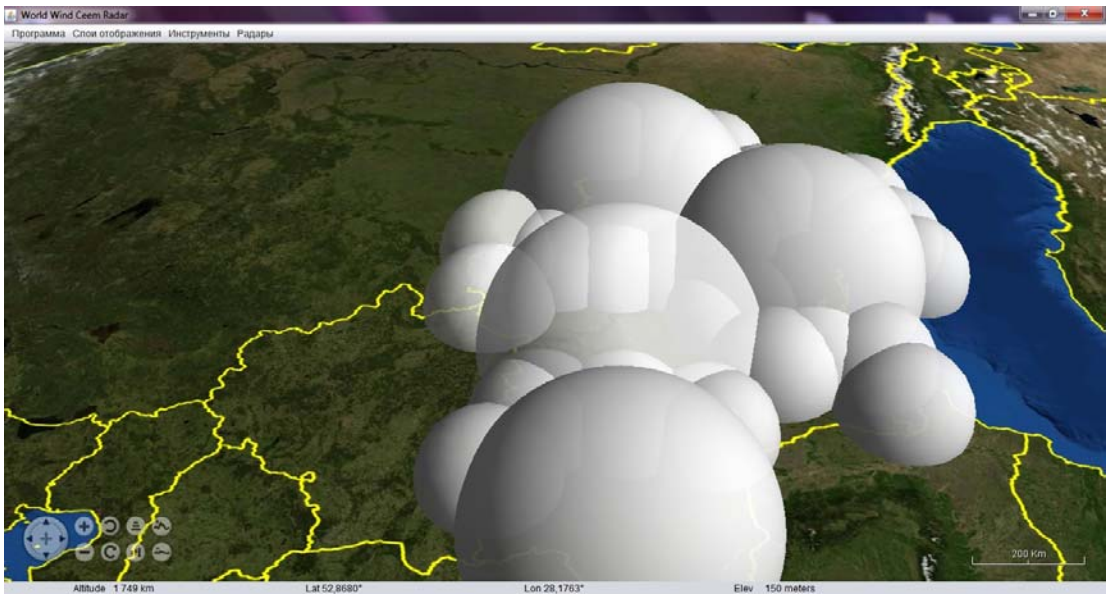


Рисунок 1.70 - Тривимірна структура двохярусного радіолокаційного поля з радарами з дальністю дії 250 км при відстані між ними 400 км і з радарами з дальністю дії 120 км, розставленими в місцях провалів в полі верхнього ярусу (вигляд з заходу)

Аналіз результатів моделювання подібного варіанту побудови радіолокаційного поля показав, що він цілком має право на існування. Недоліками його є необхідність як мінімум двох типів метеорологічних радіолокаційних станцій і загальне зниження стійкості системи моніторингу через зменшення кількості складників.

1.4.9 Варіант побудови радіолокаційної системи, адаптований до небезпечних явищ погоди

Створення національної метеорологічної радіолокаційної системи моніторингу передбачає повноцінне дослідження атмосферного простору у рамках кліматичного і синоптичного моніторингу, метою якого є оперативне гідрометеорологічне забезпечення [63, 64]. Постійний радіолокаційний моніторинг тропосфери над територією країни представляється, безумовно,

бажаним процесом, а своєчасне попередження про стихійні явища погоди є необхідним і обов'язковим для стійкого розвитку економіки країни. Для побудови метеорологічної радіолокаційної мережі необхідно чітко представляти просторово-часовий розподіл стихійних явищ погоди на території країни. Стихійні метеорологічні явища часто спостерігаються в комплексі (зливові опади теплого періоду року супроводжуються грозами і градом і штормовим вітром, завірюхи-снігопадами, сильним вітром, обмерзаннями), це значно збільшує збиток від цих явищ.

Враховуючи, що підпорядкування будь-якої мережі (наземних метеорологічних станцій і постів, аерологічних станцій) відбувається за принципом адміністративного ділення, доцільне районування небезпечних явищ погоди провести також з урахуванням адміністративного ділення країни. В цьому дослідженні використані наступні небезпечні явища погоди: дуже сильний дощ - випадання опадів з кількістю більше 30 мм за 12 год - для гірських районів; 50 мм - для рівнинної території; дуже сильні снігопади (кількість опадів 20 мм і більше за 12 год і менш); великий град - діаметр більше 20 мм; грози; шквали і туман з горизонтальною видимістю 50 м і менше, протягом 12 годин і більше. В Україні практично щорічно спостерігаються небезпечні метеорологічні явища, які в окремих випадках набувають катастрофічного характеру і завдають збитку сільському і міському господарству, населенню.

Нижче представлена повторюваність небезпечних явищ погоди в (%): дуже сильного дощу, дуже сильного снігопаду, великого граду, шквалу за період 1986-2005 рр., а також число днів з грозою і з туманом за період 1970-2012 рр. (табл. 1.11). У таблиці жирним шрифтом виділені значення, відповідні максимуму досліджуваного параметра.

Як показали дослідження [65 - 68], дуже сильні дощі 30 мм і більше на території України відзначаються щорічно. Найчастіше, як показують ці таблиці, дуже сильні дощі відзначаються в Українських Карпатах і на півдні

Одеської області. У Закарпатській і Івано-Франківській областях найчастіше відзначаються сильні снігопади.

Таблиця 1.11 - Повторюваність небезпечних явищ погоди в (%), число днів з явищем

Області України	Градації повторюваності небезпечних явищ					
	дуже сильний дощ(%)	дуже сильний снігопад (%)	великий град (%)	шквал (%)	число днів з грозою	число днів з туманами
Вінницька область	61-80	11-20	11-20	21-30	15-20	51-60
Волинська область	61-80	≤ 10	11-20	31-40	15-20	41-50
Дніпропетровська область	61-80	21-30	21-30	**> 40**	21-25	51-60
Донецька область	**81-100**	11-20	≤ 10	21-30	15-20	**> 60**
Житомирська область	≤ 60	≤ 10	11-20	31-40	15-20	31-40
Закарпатська область	**81-100**	**≥ 60**	0	< 10	**> 25**	20-30
Запорізька область	61-80	21-30	31-40	21-30	**> 25**	51-60
Івано-Франківська область	**81-100**	**≥ 60**	11-20	21-30	**> 25**	51-60
Київська область	**81-100**	21-30	11-20	**> 40**	21-25	41-50
Кіровоградська область	**81-100**	11-20	11-20	< 10	21-25	**> 60**
Луганська область	≤ 60	11-20	≤ 10	11-20	21-25	31-40
Львівська область	**81-100**	≤ 10	≤ 10	**> 40**	21-25	51-60
Миколаївська область	61-80	21-30	21-30	21-30	15-20	41-50
Одеська область	**81-100**	21-30	**≥ 40**	**> 40**	**> 25**	**> 60**
Полтавська область	≤ 60	≤ 10	≤ 10	11-20	15-20	51-60
Рівненська область	≤ 60	≤ 10	0	21-30	15-20	31-40
Сумська область	61-80	11-20	≤ 10	11-20	15-20	41-50
Тернопільська область	**81-100**	11-20	21-30	11-20	15-20	41-50
Харківська область	61-80	21-30	11-20	31-40	21-25	41-50
Херсонська область	61-80	≤ 10	21-30	21-30	15-20	41-50
Хмельницька область	**81-100**	11-20	21-30	**> 40**	21-25	41-50
Черкаська область	61-80	21-30	11-20	31-40	15-20	41-50
Чернігівська область	≤ 60	11-20	11-20	11-20	< 15	41-50
Чернівецька область	**81-100**	≤ 10	11-20	< 10	21-25	51-60

Динаміка небезпечних явищ погоди теплого півріччя, пов'язана з розвитком конвективної хмарності. Повторюваність гроз і граду на території України пов'язана зі сходженням повітряних потоків в гірських районах, а також із стимулюванням підйому вологого прогрітого повітря над

акваторіями причорноморських лиманів. Тому градобиттям найбільш схильна територія Одеської області. Грози частіше фіксуються в Одеській, Запорізькій, Івано-Франківській і Закарпатській областях.

Шквали виникають в будь-яких районах України, але частіше - в степовій, лісостеповій зоні і Поліссі. У гірських масивах Карпат, західних і північно-західних областях країни швидкість вітру досягає 40 м/с. Шквалонебезпечна ситуація може виникнути на всій території України.

Через складні умови утворення просторово-часового розподілу туману характеризується значною мінливістю. Найчастіше туман виникає на гірських районах Українських Карпат за рахунок орографічного чинника: підняття повітря схилами, що призводить до його адіабатичного охолодження.

За період 1986-2005 рр. зафіксовано 149 випадків з сильним туманом. На території України можна виділити декілька типів річного ходу туману. На більшій частині країни максимум утворення туману доводиться на зимові місяці (грудень-січень), а мінімум - на весняні (квітень-травень) і літні (червень-серпень). Тривалість періоду з туманом залежить в першу чергу від потужності адвективних процесів. Сильний туман зазвичай утримуються протягом 10-20 годин. Найбільш туманонебезпечними являються Донецька, Івано-Франківська і Одеська області.

Проведеним районуванням території України по небезпечних явищах погоди, показало, що для більшості явищ територія Одеської, Запорізької областей і українських Карпат є активними зонами. Моніторинг в різних районах країни необхідно здійснювати за допомогою радіолокаційних станцій різних частотних діапазонів.

Для забезпечення потреб в інформаційному продукті цивільної і відомчої авіації необхідно оснастити всі діючі аеропорти радіолокаційними станціями з трьома довжинами хвиль λ=0,8 см (виявлення кристалічних утворень і зсувів вітру в тропосфері над аеропортом), λ=5.6 см (загальне зондування тропосфери) і λ=10,0 см (локалізація небезпечних конвективних

явищ). Враховуючи проведене районування небезпечних явищ погоди, в областях з найбільшою їх повторюваністю рекомендується встановлювати станції з двома довжинами хвиль : λ=5.6 см і λ=10,0 см. Іншу територію країни досить оснастити станціями, що працюють в автоматичному режимі з робочою довжиною хвилі λ=5.6 см.

Тому в трьох районах: в районі Карпат, на сході України і в прибережжі північно-західної частини Чорного моря бажана установка багатодіапазонних потужних метеорологічних РЛС з дальністю дії 250 км. На іншій території можуть бути встановлені, як зазначено вище, менш потужні метеорологічні РЛС одного діапазону хвиль.

На рис. 1.71 - 1.78 відображені результати моделювання подібної структури радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними РЛС з дальністю дії 250 км і малопотужними РЛС з дальностями дії 80 і 120 км. Потужні метеорологічні РЛС розташовані в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних явищ погоди, а інші розташовані відповідно до розроблених раніше в цій роботі принципами.

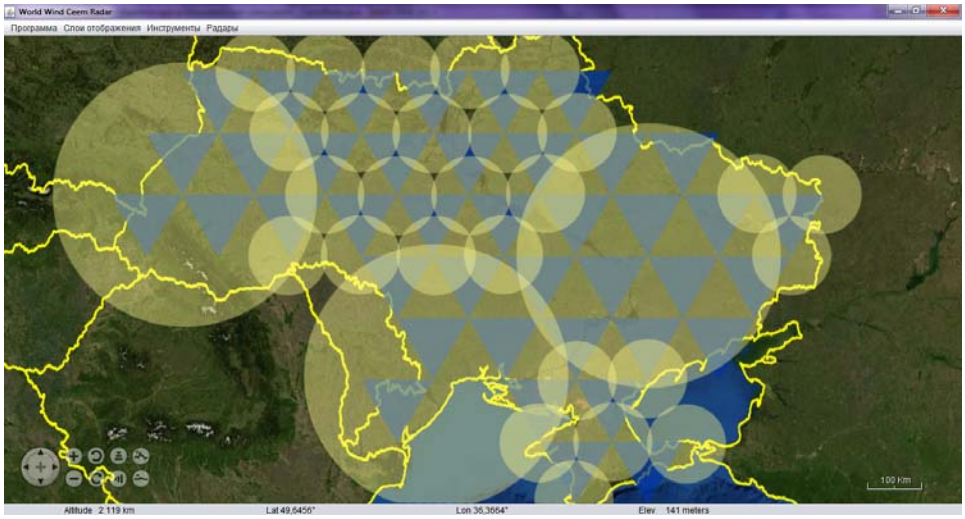


Рисунок 1.71 - Двовимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 80 км

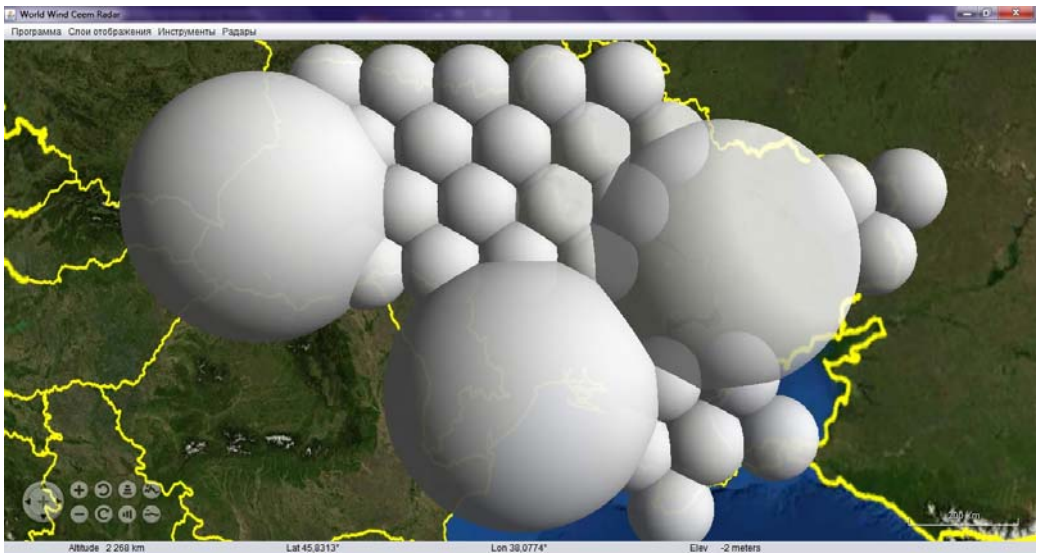


Рисунок 1.72 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 80 км (вигляд зверху)

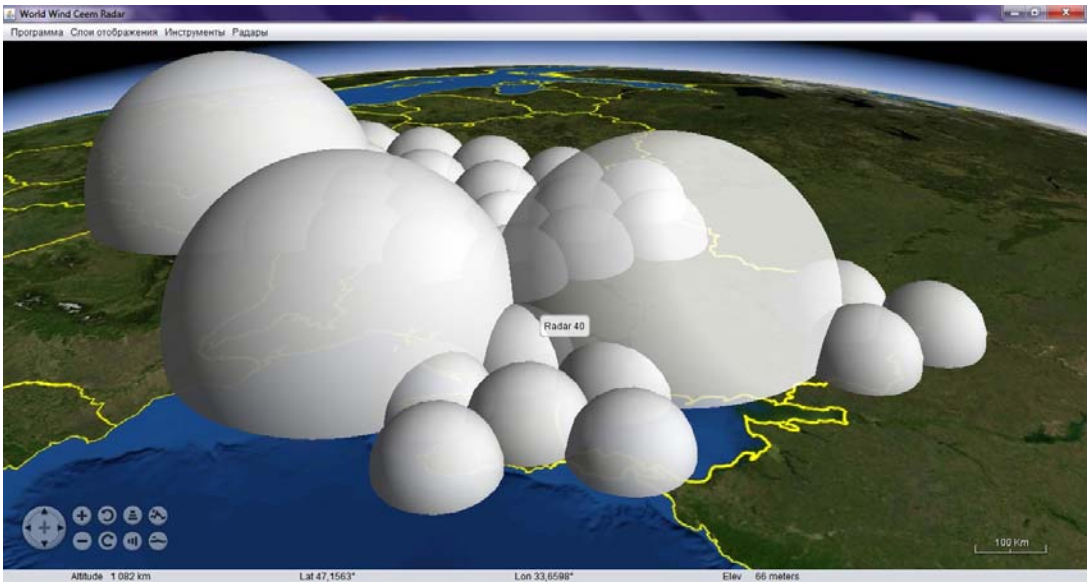


Рисунок 1.73 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 80 км (вид з південного сходу)

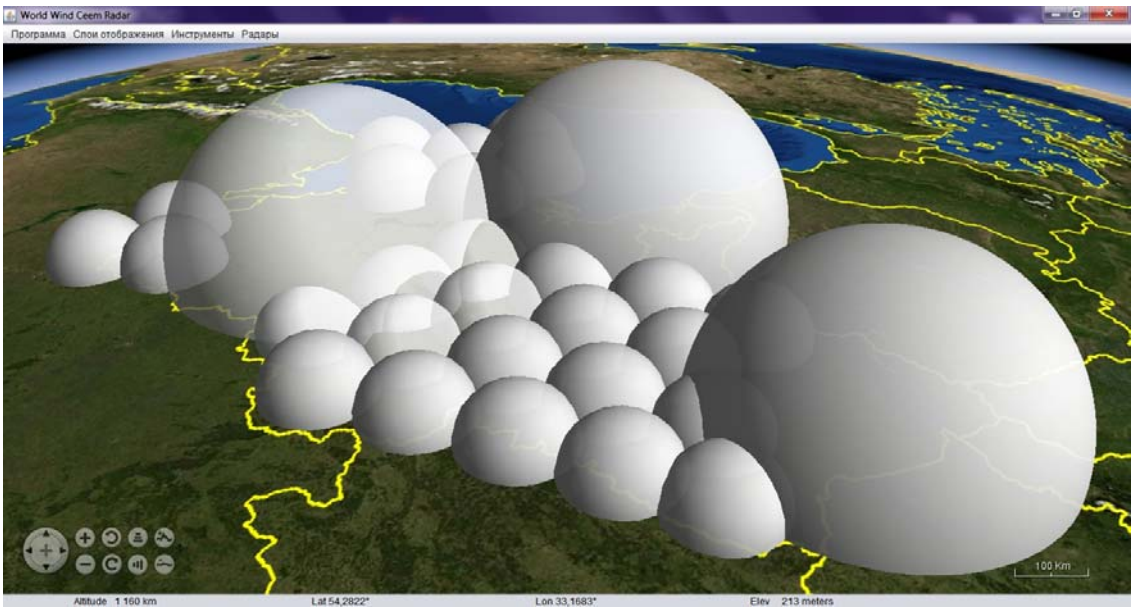


Рисунок 1.74 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 80 км (вигляд з північного заходу)

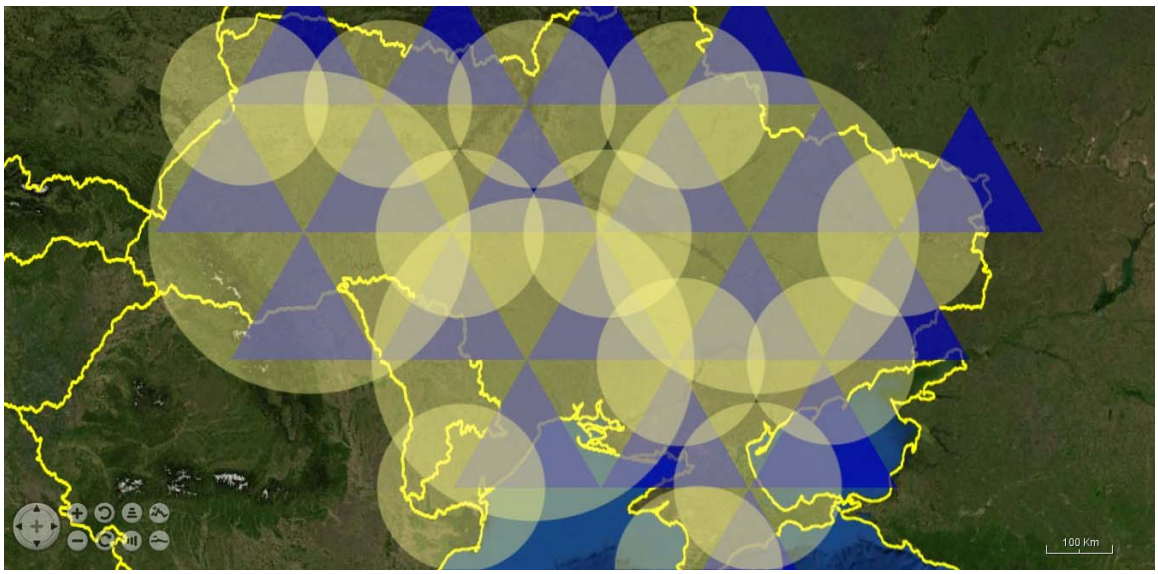


Рисунок 1.75 - Двовимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 120 км

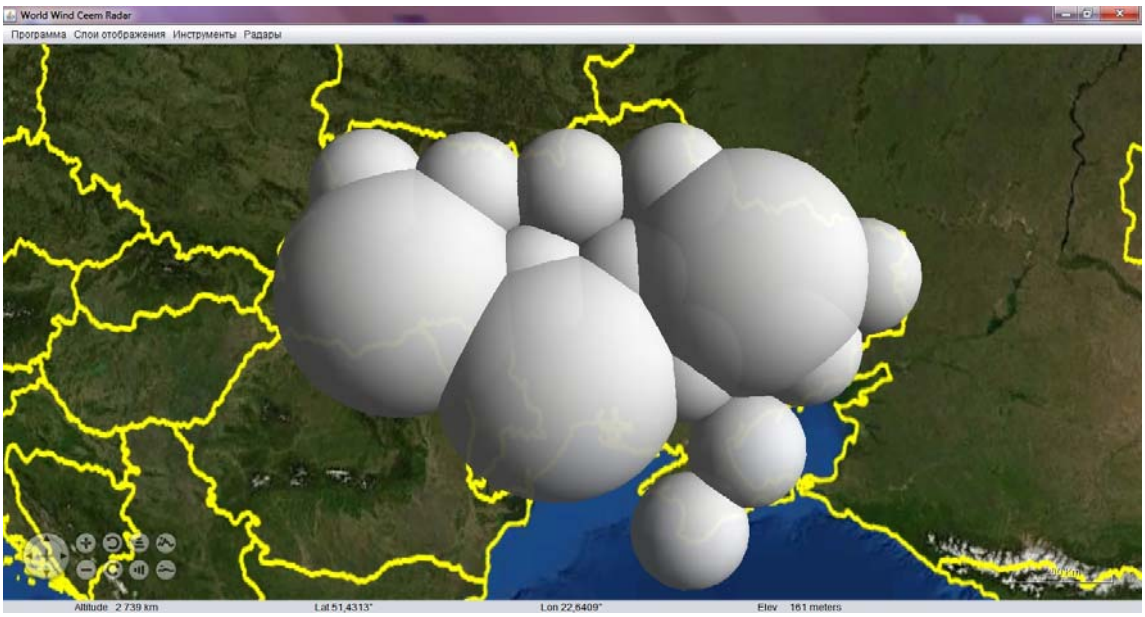


Рисунок 1.76 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 120 км (вигляд зверху)

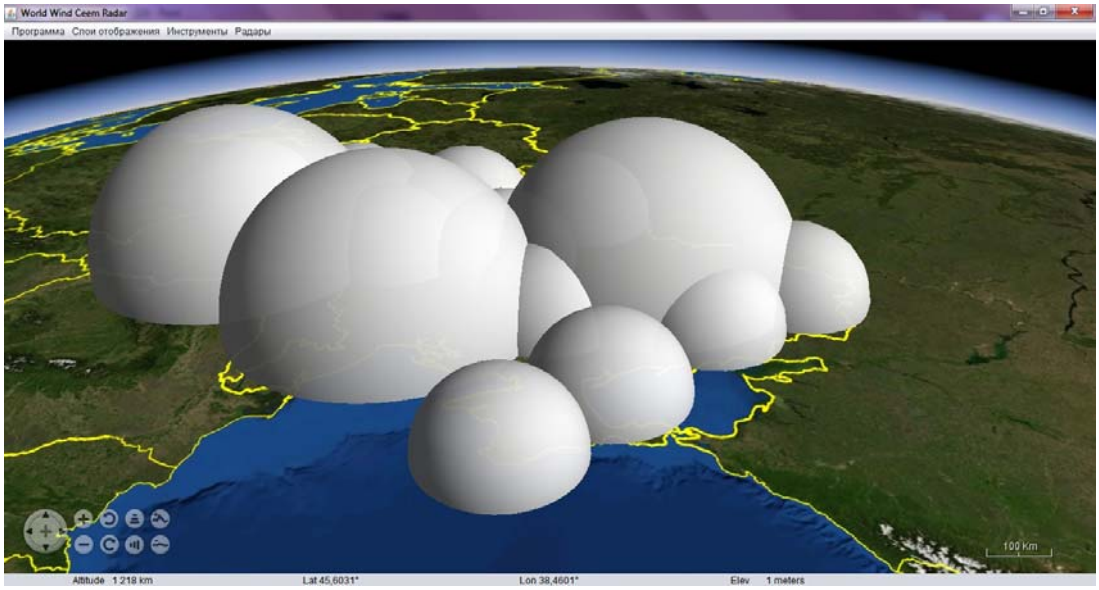


Рисунок 1.77 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою повторюваністю небезпечних погодних явищ, і станціями з дальністю виявлення 120 км (вигляд з південного сходу)

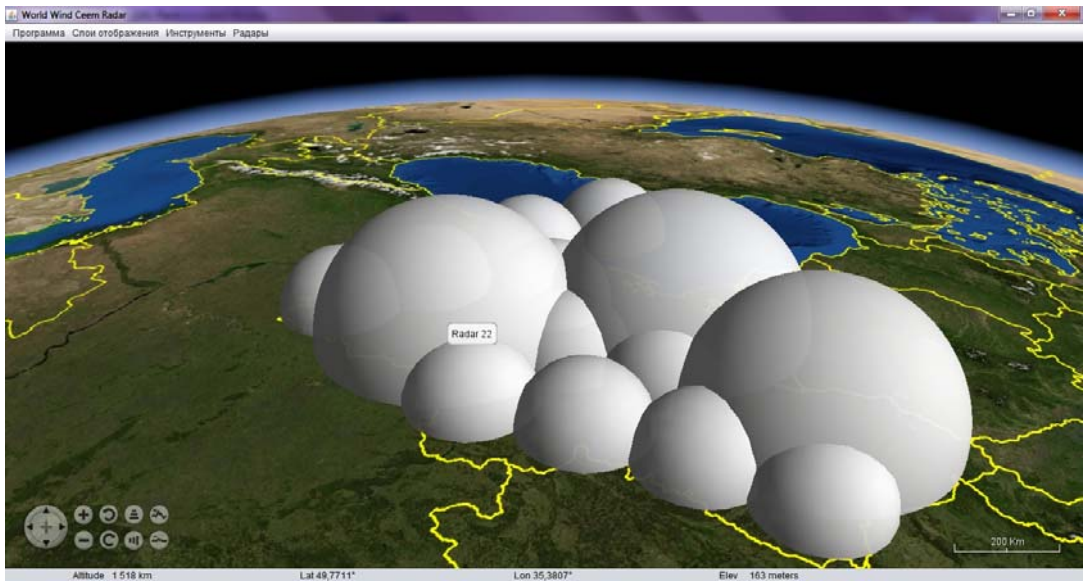


Рисунок 1.78 - Тривимірна структура радіолокаційного поля утворюваного трьома потужними метеорологічними радіолокаційними станціями, встановленими в районах з найбільшою частотою небезпечних грозоградових явищ, і станціями з дальністю виявлення 120 км (вигляд з північного заходу)

Аналіз адаптованої до небезпечних явищ погоди побудови радіолокаційного поля дозволяє зробити деякі висновки.

При подібній побудові радіолокаційного поля треба врахувати наступні виникаючі чинники. Потужні метеорологічні радіолокаційні станції при частому і тривалому включенні мають нижчу надійність, в порівнянні з менш потужними РЛС. Збільшення випромінюваної потужності збільшує небезпеку для персоналу і жителів регіону, в якому розташована станція.

Тому має сенс залишати структуру радіолокаційного поля побудовану на основі застосування однотипних РЛС, і у вказаних регіонах радари укомплектовувати потужним каналом *S*-діапазону (10 см), який включатиметься у разі виникнення небезпечного явища погоди на порівняно нетривалий час.

2 ОСОБЛИВОСТІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ МЕТЕООБ´ЄКТІВ І ВИМІРЮВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОМЕТЕООБ´ЄКТІВ

2.1 Коваріаційна матриця розсіяння метеооб´єктів

Матриця розсіяння $\dot{\widehat{S}}$ повністю визначає поляризаційні властивості стабільного кола, яка являється проміжною ланкою при переході до флуктуючого об’єкта, звичайними представниками яких є метеорологічні утворення.

Різні випадки поляризаційної обробки флуктуючих сигналів зручно розглядати за допомогою коваріаційної матриці розсіяння [69] складеної з статистичних параметрів – інших моментів елементів $\dot{S}_{ij}$ матриці $\dot{\widehat{S}}$

$$\widehat{W} = \begin{pmatrix} \overline{|S_{11}|^2} & \overline{S_{11}S_{12}^*} & \overline{S_{11}S_{22}^*} \\ \overline{S_{11}^*S_{12}} & \overline{|S_{12}|^2} & \overline{S_{22}S_{12}^*} \\ \overline{S_{11}^*S_{22}} & \overline{S_{22}^*S_{12}} & \overline{|S_{22}|^2} \end{pmatrix}, \tag{2.1}$$

Якщо моделювати гідрометеори сфероїдами, тоді матриця розсіяння одиничного гідрометеора в базисі горизонталь – вертикаль (умовно назвемо його HV - базисом) при довільній орієнтації гідрометеора може бути записана в вигляді [60]

$$\dot{\widehat{S}} = \begin{pmatrix} \left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi\sin^2\psi + \dot{S}_b, & \left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi\sin\psi\cos\psi. \\ \left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi\sin\psi\cos\psi, & \left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi\cos^2\psi + \dot{S}_b. \end{pmatrix}, \tag{2.2}$$

або еквівалентна форма [69]

$$\dot{\hat{S}} = \frac{e^{i\varphi 0}}{2}\tilde{\sigma}^{1/2}\begin{pmatrix} 1+\dot{v}\cos 2\psi & -\dot{v}\sin 2\psi \\ -\dot{v}\sin 2\psi & 1-\dot{v}\cos 2\psi \end{pmatrix}, \qquad (2.3)$$

де

$$\frac{e^{i\varphi 0}}{2}\tilde{\sigma}^{1/2} = \left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi + 2\dot{S}_b,$$

$$\dot{v} = \frac{\left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi}{\left(\dot{S}_a - \dot{S}_b\right)\sin^2\chi + 2\dot{S}_b}.$$

В формулах (2.1-2.3) кути ψ і χ характеризують орієнтацію осі обертання сфероїда $\vec{N}$ ψ - це кут між проекцією вертикалі і проекцією вектора $\vec{N}$ на площину фазового фронту хвилі; χ кут між віссю обертання сфероїда $\vec{N}$ і напрямом поширення хвилі $\vec{k}$ (напрям вектора $\vec{k}$ визначається кутом місця антени γ_0); $\dot{S}_a - \dot{S}_b$ - комплексні амплітуди зворотного розсіяння при орієнтації електричного вектора хвилі вздовж $\left(\dot{S}_a\right)$, та поперек $\left(\dot{S}_b\right)$ осі обертання сфероїда; $\pi\tilde{\sigma}/k^2$ повна ефективна поверхня розсіяння (ЕПР) гідрометеора параметр $\dot{v}$ характеризує форму і тривалість електричної проникності частки.

Перехід від матриці розсіяння одиничного гідрометеора $\dot{S}$ до коваріаційної матриці $\hat{W}$ ансамблю гідрометеорів передбачає усереднення в розмірах, формах і орієнтації відбиваючих часток Здійснивши таке усереднення, з (2.1) можна отримати наступні вирази для елементів

коваріаційної матриці $\widehat{W}$ в HV - базисі [70]:

$$\left\langle \left|S_{HH}\right|^2 \right\rangle = \frac{N}{4}\langle\tilde{\sigma}\rangle\left[1+2\,\mathrm{Re}\,I_2 r\cos 2\bar{\psi}+\frac{I_1}{2}\left(1+r^4\cos 4\bar{\psi}\right)\right],$$

$$\left\langle \left|S_{HH}\right|^2 \right\rangle = \frac{N}{4}\langle\tilde{\sigma}\rangle\left[1-2\,\mathrm{Re}\,I_2 r\cos 2\bar{\psi}+\frac{I_1}{2}\left(1+r^4\cos 4\bar{\psi}\right)\right],$$

$$\left\langle \left|S_{HH}\right|^2 \right\rangle = \frac{N}{8}\langle\tilde{\sigma}\rangle I_1\left(1-r^4\cos 4\bar{\psi}\right),$$

$$\left\langle S_{HH}S_{HV}^* \right\rangle = -\frac{N}{4}\langle\tilde{\sigma}\rangle\left(I_1^* r\sin 2\bar{\psi}+\frac{I_1}{2}r^4\sin 4\bar{\psi}\right), \tag{2.4}$$

$$\left\langle S_{VV}S_{HV}^* \right\rangle = -\frac{N}{4}\langle\tilde{\sigma}\rangle\left(I_1^* r\sin 2\bar{\psi}-\frac{I_1}{2}r^4\sin 4\bar{\psi}\right),$$

$$\left\langle S_{HH}S_{VV}^* \right\rangle = -\frac{N}{4}\langle\tilde{\sigma}\rangle\left[1-2i\,\mathrm{lm}I_2 r\cos 2\psi-\frac{I_1}{2}\left(1+r^4\cos 4\bar{\psi}\right)\right],$$

де N - число часток які розсіюються об'ємі;

$\langle\ \rangle$ - усереднення за ансамблем гідрометеорів;

[ ] - інтегральні параметри які враховують особливості розподілу гідрометеорів за розміром, форма та орієнтація за кутом χ;

параметр $r=\exp(-2\sigma_\psi^2)$ характеризує ступінь впорядкованості орієнтації часток і пов'язаний з середньоквадратичною шириною кутового розподілу $\sigma_\psi \sin\chi$.

$$I_1 = \frac{\left\langle \tilde{\sigma} |\dot{v}|^2 \right\rangle}{\left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle}, \; I_2 = \frac{\left\langle \tilde{\sigma} \dot{v} \right\rangle}{\left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle}. \tag{2.5}$$

Поляризаційні параметри відбитого сигналу в меншій мірі залежать від розподілу орієнтацій відбивача за кутом χ, ніж за кутом ψ.

З урахуванням вищезгаданих позначень найкомпактніша коваріаційна матриця ансамблю гідрометеорів виглядає в коловому поляризаційному базисі. Мають такий вигляд

$$\left\langle \left| S_{RR} \right|^2 \right\rangle = \left\langle \left| S_{LL} \right|^2 \right\rangle = \frac{N}{4} \left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle I_1,$$

$$\left\langle \left| S_{RL} \right|^2 \right\rangle = \frac{N}{4} \left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle,$$

$$\left\langle S_{RR} S_{RL}^* \right\rangle = -\frac{N}{4} \left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle r I_2 e^{-i2\overline{\psi}}, \tag{2.6}$$

$$\left\langle S_{LL} S_{RL}^* \right\rangle = -\frac{N}{4} \left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle r I_2 e^{i2\overline{\psi}},$$

$$\left\langle S_{RR} S_{LL}^* \right\rangle = -\frac{N}{4} \left\langle \tilde{\sigma} \right\rangle r^4 I_1 e^{-i4\overline{\psi}}.$$

У формулах (2.6) індекси R і L використовуються для позначення колової поляризації правого (right hand) і для лівого (left hand) обернення відповідно. З виразів (2.6) очевидний фізичний сенс параметра

$$I_1 = \frac{\left\langle \left| S_{RR} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| S_{RL} \right|^2 \right\rangle} = \frac{\left\langle \left| S_{LL} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| S_{RL} \right|^2 \right\rangle} = CDR,$$

та представляє деполяризацією відношення в коловому базисі (circular depolarization ratio).

2.1.1 Диференціальна відбиваність

На практиці вимірювання всіх елементів коваріаційної матриці розсіяння метеооб´єктів є дуже складним завданням, тому зазвичай при вимірюваннях обмежуються оцінкою лише деяких з них, а також їх відношень. Останні роки найбільша кількість експериментальних даних, які отримані за результатами вимірювання диференціальної відбиваності в HV - базисі.

Під диференціальною відбиваністю розуміється відношення потужностей відбитого сигналу на горизонтальній і вертикальній поляризаціях, виражене в децибелах:

$$Z_{DR}(\partial Б) = 10\lg(P_H / P_V) = 10\lg\left(\left\langle |S_{PP}|^2 \right\rangle / \left\langle |S_{VV}|^2 \right\rangle\right) = \frac{Z_Г}{Z_B} = \frac{Z_H}{Z_V}. \qquad (2.7)$$

Техніка вимірювань диференціальної відбиваності застосовується до завдань метеорології радіолокації уперше була запропонована Селігой і Брінгі в 1976 р. [71] для підвищення ефективності вимірювання радіолокації опадів. Широке поширення методу обумовлене відносною простотою його технічною реалізації, не дуже обтяжливими вимогами до поляризаційної розв'язки антенно-хвильоводного тракту і відсутністю енерговитрат на відміну від ситуації, коли вимірюється відношення деполяризації і один з компонентів відбитого сигналу значно менше другого. Для вимірювання диференціальної відбиваності зазвичай використовуються одноканальні МРЛ, що містять поляризаційний перемикач, як правило, феритовий, який забезпечує періодне перемикання ортогональної поляризації одночасно на передачу і прийом, тобто коли для кожної посилки імпульсів поляризації

відбитої хвилі, що випромінює і приймається, співпадають.

2.1.2 Лінійне відношення деполяризації

Іншим важливим поляризаційним параметром, вимірюваним в HV - базисі, є лінійне відношення (LDR) деполяризації, що є відношенням потужностей перехресного і компоненту який погоджує відбитий сигнал:

$$LDR(\partial Б) = 10\lg\frac{P_{HV}}{P_{HH}} = 10\lg\frac{\left\langle \left|S_{HV}\right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left|S_{HH}\right|^2 \right\rangle}. \qquad (2.8)$$

У відповідності до (2.7)

$$LDR \cong \frac{1}{2} I_1 (1 - r^4 \cos 4\bar{\psi}). \qquad (2.9)$$

З (2.9) видно, що деполяризація відбитого сигналу відсутня у тому випадку, коли частки сферичні $(I_1 = 0)$ або коли усі відбивачі орієнтовані вздовж напряму вектора електричного поля $(r = 1, \bar{\psi} = 0)$. При повністю хаотичній орієнтації розсіяння $(r = 0)$ LDR не перетворюється на нуль і повністю визначається ступенем несферичності відбиваючих часток.

Вимірювання ZDR і LDR можуть добре доповнювати один одного. Дійсно, дрібні водяні краплини, що мають практично сферичну форму, і хаотично орієнтовані тверді гідрометеори неможливо розрізнити за величиною диференціальної відображеності, оскільки для двох типів розсіювачів ZDR = 0 дБ. В той самий час для сферичних крапель деполяризація відсутня, а для твердих несферичних гідрометеорів вона може бути істотною.

2.1.3 Диференціальна фаза

Відбиті від метеооб´єктів сигнали на вертикальній і горизонтальній поляризації розрізняються не лише за потужністю, але і за фазою. Різниця фаз обумовлена тим, що в процесі відбиття від несферичних часток хвилі вертикальної і горизонтальними поляризації отримують різні фазові добавки (їх різницю позначимо δ), і постійні поширення горизонтально і вертикально поляризаційних хвиль в анізотропному середовищі також різні.

Таким чином, диференціальний фазовий зсув Φ_{DP} (в градусах) є сумою двох доданків:

$$\Phi_{DP} = \delta + \left[2\,\mathrm{Re} \int_0^R \left(k_H - k_V \right) dR_{TP} \right] \left(\sin^2 \chi \right) r, \qquad (2.10)$$

або

$$\Phi_{DP} = \arg\left(R_0^{HV} \right). \qquad (2.11)$$

де k_H і k_V - постійні поширення на горизонтальній і вертикальній поляризації відповідно за умови, що всі частки орієнтовані вертикально або горизонтально, а хвильовий вектор опромінюваної хвилі перпендикулярний осі обертання гідрометеора;

R_{TP} - довжина траси поширення;

$r = \exp(-2\sigma_\psi^2)$ - параметр, що характеризує ступінь впорядкованості орієнтації гідрометеорів (при хаотичній орієнтації гідрометеорів $r = 0$ та $\Phi_{DP} = \delta$);

$\left(\sin^2 \chi \right)$ описує зміну диференціальної фази з зміною кута місця антени;

R_0^{HV} - коефіцієнт кореляції між горизонтальними і вертикальними сигналами тимчасового ряду в інтервалі 0.

Величина $K_{DP} = \mathrm{Re}\left(k_H - k_V\right)$ називається питомим диференціальним фазовим зсувом і розраховується за формулою

$$K_{DP} = \mathrm{Im}\left\{\frac{2\pi}{k^2}\int_0^{D\max}\left[S'_H(D) - S'_V(D)\right]N(D)dD\right\}, \qquad (2.12)$$

або

$$K_{DP} = 0,5\frac{d}{dR_{TP}}\Phi_{DP} \text{ (град/км).} \qquad (2.13)$$

В (2.12) $S'_H(D)$ і $S'_V(D)$ - комплексні амплітуди розсіяння гідрометеорів в напрямку вперед для горизонтальної і вертикальної поляризації.

Для рідкокрапельных хмар і опадів при зондуванні під ковзаючими кутами співмножник $\left(\sin^2\chi\right)r$ зазвичай близький до одиниці, і його, як правило, не враховують при інтерпретації результатів вимірювань на горизонтальних трасах.

Диференціюючи Φ_{DP} за дальністю, неважко отримати оцінку диференціального фазового зсуву K_{DP} за умови, що величина δ або довільна $d\delta/dR$ малі (для довгохвильової частини сантиметрового діапазону ця умова виконується в більшості ситуацій). Величина K_{DP} представляє особливий інтерес, оскільки дуже жорстким чином пов'язана з водністю і інтенсивністю опадів на дорозі.

Зрнич і Сачидананда [71] встановили наступне регресійне співвідношення між I (мм/г) і K_{DP} з формули 2.12:

$$I \cong 20{,}35\left(K_{DP}\right)^{0{,}866}.$$

Цими ж авторами було показано, що для інтенсивних опадів оцінка *I* за величиною K_{DP} дає кращу точність, ніж оцінка в сумі Z і Z_{DP} і тим паче *Z*-*I*-співвідношення.

Іншою перевагою оцінювання інтенсивності опадів *I* за фазовим з K_{DP} є вища ефективність роботи алгоритму по опадам змішаного фазового складу (наприклад, дощ з градом). Важлива мета фазових вимірювань полягає в тому, що для їх проведення не потрібне абсолютне калібрування радіолокатора потужності.

Величину диференціального фазового зсуву можна використовувати для ідентифікації зон граду. Через те що для часток граду в порівнянні з водяними краплями характерна менш впорядкована орієнтація, менша їх концентрація і діелектрична проникність, при порівняні значення відбивання *Z* для дощу і граду величина K_{DP} для граду буде значно менше [72].

Фазові поляризаційні вимірювання дають можливість оцінювати за величиною K_{DP} значення повного послаблення *A* і диференціального послаблення A_{DP} радіохвиль по трасі поширення, які необхідно враховувати для корекції виміряних значень радіолокаційної відбиваності і диференціальної відбиваності.

Нижче наводяться прості співвідношення, що зв'язують фазовий зсув K_{DP} (град./км) з послабленням на горизонтальній поляризації (дБ/км) і диференціальним послабленням A_{DP} (дБ/км) [71].

$$A_H = 0{,}05K_{DP},\ A_{DP} = 0{,}0139K_{DP} \text{ при } \lambda = 5{,}5\,\text{см}.$$

2.1.4 Коефіцієнт взаємної кореляції

Коефіцієнт взаємної кореляції (крос-кореляції) приголосних компонентів відбитого сигналу на горизонтальній і вертикальній поляризації представляє собою по суті коефіцієнт взаємної кореляції діагональних елементів матриці розсіювання метеооб´єкта:

$$\rho_{HV} = \frac{\left\langle S_{HH} S_{VV}^{*} \right\rangle}{\left\langle \left| S_{HH} \right|^{2} \right\rangle^{1/2} \left\langle \left| S_{VV} \right|^{2} \right\rangle^{1/2}} = \frac{\left| R_0^{HV} \right|}{\sqrt{\left| R_0^{H} \right| \left| R_0^{V} \right|}}. \qquad (2.14)$$

Дослідження показали, що для більшості метеооб´єктів модуль коефіцієнта ρ_{HV} дуже близький до одиниці і відмінність його від одиниці тим більше, ніж більша дисперсія форм і дисперсія орієнтації відбиваючих несферичних часток. Наявність ефектів нерелевського розсіяння також сприяє зменшенню величини $\left|\rho_{HV}\right|$. Згідно з теоретичними оцінками і експериментальними даними, отриманими в S- діапазоні, величина $\left|\rho_{HV}\right|$ для дощів змінюється в межах від 0,9 до 1,0 з найбільш вірогідними значеннями порядку 0,96-0,98. Для граду коефіцієнт $\left|\rho_{HV}\right|$ може приймати істотно менші значення, що може служити важливою діагностичною ознакою наявності граду в хмарі. В нижній частині шару танення також відзначається добре виражений мінімум $\left|\rho_{HV}\right|$.

Іншою важливою особливістю використання поляризаційних параметрів є яскравий контраст між радіолокаційними сигналами від метеооб´єктів і підстилаючої поверхні в терміналах $\left|\rho_{HV}\right|$. Якщо для метеооб´єктів величина ρ_{HV} близька до одиниці, тоді для підстилаючої поверхні вона наближається до нуля [71]. Дуже важливо для вимірювання коефіцієнту ρ_{HV} є те, що на його величину не впливають ефекти поширення

в гідрометеорному середовищі, оцінки Z_{DP} і LDR, що спотворюють в загальному випадку.

2.1.5 Поляризаційні характеристики метеооб´єктів в коловому базисі

Інтерес до використання колової поляризації випромінювання виник у зв'язку з необхідністю пригнічення заважаючи відбиттів від гідрометеорів при радіолокаційному виявленні зосереджених цілей на тлі випадаючих з хмар опадів. Для гідрометеорів сферичної форми відбитий сигнал на приголосній коловій поляризації повністю відсутній, а вся потужність відбитого сигналу "перекотиться" в його перехресний компонент.

На практиці в силу несферичноті гідрометеорів і впливу деполяризації при поширені в анізотропному середовищі повного приглушення сигналу на приголосній поляризації не відбувається, особливо при значних віддаленнях від РЛС, коли ефекти поширення накопичуються.

Таким чином, рівень відбитого сигналу на приголосній поляризації або колове відношення деполяризації служать мірою несферичності відображених часток, що може бути використано для їх ідентифікації.

За допомогою некогерентних РЛС з будь-якою поляризацією, забезпечується випромінювання хвиль з коловою поляризацією лівого або правого обертання і одночасний прийом ортогональних компонентів відбитого сигналу, вимірювалися поляризаційні параметри радіолокаційних сигналів метеооб´єктів па хвилях 1,6; 3,1 і 10,3 см.

В якості оцінюючих поляризаційних параметрів слугують колові деполяризаційні відносини, тобто відношення потужностей приголосного і перехресного компонентів відбитого сигналу в коловому базисі (2.6):

$$CDR = \frac{\left\langle \left|S_{RR}\right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left|S_{RL}\right|^2 \right\rangle} = \frac{\left\langle \left|S_{LL}\right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left|S_{RL}\right|^2 \right\rangle} = I_1, \tag{2.15}$$

а також комплексний коефіцієнт взаємної кореляції ортогональних компонентів відбитого сигналу, дорівнює коефіцієнту взаємної кореляції діагональних і недіагональних елементів матриці розсіяння метеомети в коловому базисі:

$$\rho_R = \frac{\left\langle S_{RR} S_{RL}^* \right\rangle}{\left\langle \left|S_{RR}\right|^2 \right\rangle^{1/2} \left\langle \left|S_{RL}\right|^2 \right\rangle^{1/2}} = -r \frac{\left|I_2\right|}{\sqrt{I_1}} e^{i(\arg I_2 - 2\overline{\psi})}, \tag{2.16}$$

або

$$\rho_L = \frac{\left\langle S_{LL} S_{RL}^* \right\rangle}{\left\langle \left|S_{LL}\right|^2 \right\rangle^{1/2} \left\langle \left|S_{RL}\right|^2 \right\rangle^{1/2}} = -r \frac{\left|I_2\right|}{\sqrt{I_1}} e^{i(\arg I_2 + 2\overline{\psi})}.$$

Відповідно до визначення I_1 з формули (2.5) цей параметр характеризує головним чином форму відбиваючих часток і не залежить від характеру орієнтації гідрометеорів за кутом ψ. Дійсно, при $\chi = \pi/2$ для монодисперсної хмари часток $I_1 = \left|\left(S_a - S_b\right)/\left(S_a + S_b\right)\right|^2$. Для сферичних часток $\left(S_a = S_b\right)$ та $I_1 = 0$. Аналіз величин ρ_R і ρ_L показує, що їх модуль визначається головним чином величиною параметра r, що характеризує ступінь впорядкованості орієнтації часток.

Для реллєвських часток $\arg I_2$ близький до нуля, і фази коефіцієнтів взаємної кореляції визначаються величиною кута переважної орієнтації в площині фазового фронту хвилі. Звідси витікає важлива перевага вимірювання в коловому поляризаційному базисі: основні фізичні параметри хмари гідрометеорів - середня форма часток, міра впорядкованості орієнтації

і напрямок переважної орієнтації - можуть бути визначені окремо з незалежних вимірювань. В той же час на лінійній поляризації такого розподілу провести не вдається (2.9) для Z_{DP} і LDR.

Поляризаційні вимірювання в коловому базисі не набули широкого поширення головним чином через істотний паразитний вплив ефекту поширення в гідрометеорному середовищі.

Величина колового відношення деполяризації дуже чутлива до зміни медіанного діаметру D_0 чи інтенсивності дощу I. Розташування різних метеооб´єктів на площині $Z-CDR$ при різній впорядкованості орієнтації гідрометеорів r за даними експериментів представлено на рис. 2.1. З рисунка видно, що метеооб´єкти різних класів добре розділяються по сумі параметрів $Z-CDR$ і r. Звертають на себе увагу підвищенні значення CDR (більше 10 дБ) для великого граду.

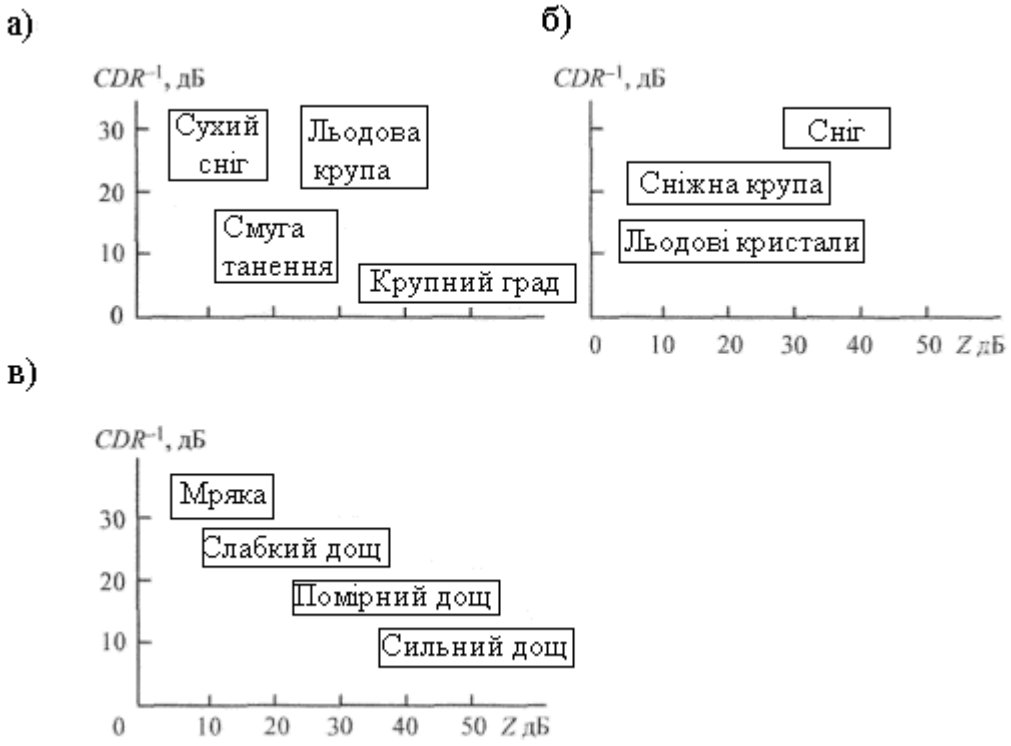


Рисунок 2.1 – Розташування різних метеооб´єктів па площині $Z-CDR$ при різному ступені впорядкованої орієнтації гідрометеорів r:

а) - $r<0,3$; б) - $r<0,6$; в) - $0,6<r<0,9$

2.2 Поляризаційні параметри радіолокаційних антен та їх вплив на прийом відбитих сигналів

Для випромінювання високочастотної енергії і прийому відбитих сигналів використовується одна і та ж антена метеорологічний радіолокатор (МРЛ). З точки зору поляризаційних властивостей антена відповідає принципу взаємності: вона повністю приймає хвилю такої поляризації, яку повинна випромінювати хвиля. Якщо на антену поступає хвиля, поляризована ортогональною випромінюваною, тоді антена являється "сліпою" і приймати таку хвилю не буде. Так, наприклад, антена вертикальної поляризації не приймає горизонтально поляризоване коливання; антена колової поляризації, випромінює хвилю з правим направленням обертання вектора поля, не зможе приймати таку ж хвилю лівого обертання. В разі антени еліптичної поляризації еліпс власної поляризації і еліпс "сліпої" поляризації орієнтовані ортогональні один до одного, а напрямок обходу векторів протилежний.

Якщо поляризація антени не погоджена з поляризацією електромагнітного поля (кут між лінійними поляризаціями складає $\delta/2$), то потужність, прийнята антеною, розраховується за формулою

$$P_{пр} = A\Pi \cos^2 \frac{\delta}{2}, \qquad (2.17)$$

де Π - щільність потоку потужності;

A - ефективна площа антени;

δ - кут, яким можна характеризувати відмінність не лише лінійних, але і будь-яка поляризація - називається кутом поляризаційної ефективності антени.

Оскільки щільність потоку потужності дорівнює векторна похідна до вектору напруги електричного і магнітного поля ($\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}$) і кожен з цих

векторів повернений на кут $\delta/2$ відносно відповідних поляризаційних осей антени, множник $\cos(\delta/2)$ входить у формулу (2.17) в квадраті.

З виразу (2.17) виходять розглянуті вище окремі випадки: при погодженій поляризації (δ=0) антена приймає максимальну потужність $P_{пр\max} = АП$, при невидимій поляризації ($\delta/2$= 90°) прийому немає.

Радіолокаційні сигнали, відбиті від метеорологічних цілей, є частково поляризованими. Вони містять складову з регулярною поляризацією і неполяризований компонент, який характеризується хаотичним обертанням вектора напруги поля. Співвідношення між поляризованою і неполяризованою складовою визначається мірою поляризації

$$m = \frac{П_П}{П_П + П_Н},$$

де $П_П$ і $П_Н$ щільність потоку потужності поляризованої і неполяризованої складової.

Хаотичний рух вектора напруги поля можна представити двома складовими: погодженою з поляризацією антени і не погодженою з нею. Тому будь-яка антена приймає лише половину потужності неполяризованої хвилі:

$$P_Н = \frac{1}{2} АП_В.$$

Частково поляризована хвиля створює на виході антени потужність

$$P_{пр} = АП\left[m\cos^2\frac{\delta}{2} + \frac{1}{2}(1-m)\right],$$

обумовлену обома вказаними складовими.

Потужність, яка визначається першим доданком, обумовлена повністю поляризованої складової і залежить від поляризаційних параметрів антени. Потужність, яка визначається іншим доданком, обумовлена неполяризованою складовою, завжди постійна для хвилі з певною мірою поляризації і не залежить від поляризаційних властивостей антени.

В окремому випадку, коли власна поляризація антени і поляризація хвилі, що приймається, співпадають (кут δ=0), потужність, що приймається, описується формулою

$$P_{пр} = \frac{1}{2} АП(1+m),$$

яка для повністю поляризованої хвилі набуває вигляд

$$P_{пр} = АП.$$

З зміною кута поляризаційної ефективності антени потужність, що приймається нею, змінюється (рис. 2.2).

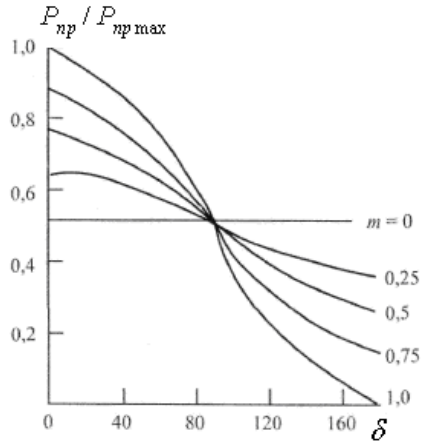


Рисунок 2.2 – Залежність відносної потужності $P_{пр} / P_{пр\max}$ частково поляризованої хвилі, відбитої від хмар і опадів, від кута поляризаційної ефективності антени δ при різній мірі поляризації хвилі m

Для кожного ступеня поляризації відлуння-сигналів мають місце максимум потужності, що приймається, при погодженій поляризації антени і хвилі (δ = 2), що приймається, і мінімум при ортогональній поляризації ($\delta/2$=90°). Частково, для повністю поляризованих сигналів (m=1) отримуємо $P_{пр\max} = АП$ та $P_{пр\min} = 0$. Для неполяризованих сигналів (m=0) та $P_{пр} = 1/2АП$ та приймаюча потужність не залежить від поляризаційних параметрів антени.

2.3 Фізична інтерпретація поляризаційних характеристик метеооб´єктів

На практиці радіометеорологічних досліджень добре зарекомендував себе метод диференціальної відбиваності, що передбачає вимірювання відношення потужностей відбитого сигналу на горизонтальній і вертикальній поляризації. Величина відношення потужностей Z_{DP} є важливою інформативною ознакою, яка дозволяє проводити розподіл несферичних добре орієнтованих часток і гідрометеорів, форма яких близька до сферичної або хаотичним чином орієнтованих в просторі.

При диференціальному відбиті Z_{DP} = 1 та виконується одна з трьох умов :

- частки є сферичними;
- несферичні частки мають хаотичну орієнтацію;
- напрямок переважної орієнтації несферичних часток складає 45° до вертикалі.

Як вже відзначалося, відмітною особливістю рідкокрапельних гідрометеорів є вища міра впорядкованості їх орієнтації і близькість напрямку переважної орієнтації до вертикалі. Величина Z_{DP} в цьому випадку визначається головним чином несферичністо крапель, які, у свою чергу, визначають їх середній розмір. За виміряним значенням Z_{DP} можна

оцінити середню форму крапель та їх середній розмір. Якщо величина Z_{DP} буде виміряна з точністю 0,1-0,2 дБ, це дозволить приблизно в 3 рази підвищити точність визначення інтенсивності опадів в порівнянні з вимірюванням лише *Z*.

Для метеооб´єктів Z_{DP} зазвичай змінюється в межах 0-3 дБ. Порівняно невеликий діапазон мінливості Z_{DP} накладає підвищення вимог до точності вимірювання Z_{DP}. Можна стверджувати, що необхідна точність оцінки Z_{DP}, при якій метод диференціальної відбиваності має практичне значення і складає 0,1-0,2 дБ. Реалізувати таку точність оцінки Z_{DP} можливо при порівняні невеликих годинах накопичення, використовуючи черезперіодне перемикання поляризації на передачу за умови хорошої корельованості двох послідовних відбитих імпульсів.

Наявність в ДМРЛ режиму поляризаційної селекції надає ряд переваг.

1. З'являється можливість розподілу рідкою і твердою фаз в хмарах і осіданнях за значенням Z_{DP}. Високі позитивні значення Z_{DP} характеризують крупнокрапельну рідку фазу [73]. Близькі до нуля або негативні значення Z_{DP} є ознакою твердих хаотично орієнтованих часток. Зони великих позитивних значень Z_{DP} вищі за нульову ізотерму можуть вказувати на локалізацію вихідних потоків з винесенням великих крапель у верхню частину хмари, а близькі до нуля або негативні значення Z_{DP} нижче за нульову ізотерму ймовірно обумовлені інтенсивними вихідними потоками.

2. Підвищується точність вимірювання опадів як за рахунок знання їх фази, так і за рахунок додаткової інформації про розподіл крапель за розміром, оскільки форма рідких крапель досить сильно пов'язана з їх розміром.

На рис. 2.3 представлені залежності Z_{DP} від інтенсивності опадів (мм/г) на проміжках хвиль 5,6; 3,2 і 0,86 см, розраховані для однопараметричного розподілу крапель за розміром типу Маршала-Пальмера. З рисунка видно, що

в міліметровому діапазоні довжин хвиль диференціальна відбиваність дощу значно менше, ніж в сантиметровому, і недуже залежить від медіанного діаметру та інтенсивності дощу.

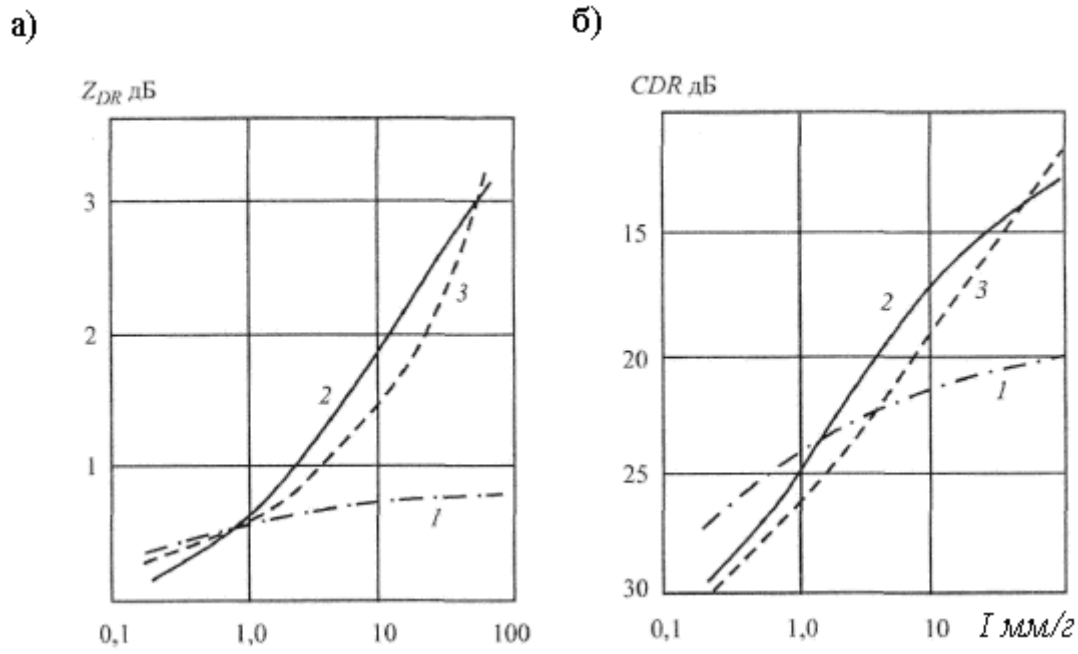


Рисунок 2.3 – Залежність диференціальної відбиваності Z_{DP}:
а)- колове деполяризаційне відношення *CDR*; б)- інтенсивність дощу *I* на довжині хвиль 1 - 0,86 см, 2 - 3,2 см, 3 - 5,6 см

3. Наявність інформації про висоту розташування нульової ізотерми дозволяє точніше оцінювати вклад гравітаційної швидкості гідрометеорів при вимірювані радіальної швидкості, а означати, сприяє точнішому оцінюванню швидкостей повітряних потоків.

4. Величина Z_{DP} є непоганим предиктором граду. Близькі до нуля або невеликі негативні значення Z_{DP} у поєднанні з високими значеннями відбиваності радіолокації *Z* досить надійно свідчать про наявність граду. Таким чином, результати поляризаційних вимірювань заповнюють відсутність цих вимірювань на іншій довжині хвилі.

За допомогою Z_{DP} можна ідентифікувати градові зони в *СЬ*. При

усереднюванні за ансамблем часток інтегральне значення Z_{DP} є позитивним для дрібного граду і негативним для великого. При одному і тому ж значенні Z для граду і дощу Z_{DP} для граду буде менше, ніж для дощу.

По виміряних значеннях Z та Z_{DP} в 10-сантиметровому діапазоні МРЛ висновок про наявність граду можна зробити при виконанні нерівності

$$Z - f\left(Z_{DR}\right) > 0,$$

де

$$f\left(Z_{DR}\right) = \begin{cases} 60 & при Z_{DR} < 1,74 дБ, \\ 19Z_{DR} + 27 & при 0 < Z_{DR} < 1,74 дБ, \\ 27 & при Z_{DR} \le 0,1 дБ. \end{cases}$$

Таким чином, якщо нерівність $\left(Z - f\left(Z_{DR}\right)\right) > 0,$ виконується, це свідчить про випадання граду, а якщо ні, тоді про випадання дощу.

Для кристалічних часток в області сильно переохолоджених вершин хмар $Z_{DP} \ge 5$ дБ за рахунок сильної анізотропії і високого ступеня впорядкованості орієнтації кристалів.

У снігопадах Z_{DP} менше, ніж в дощах, через маловпорядковану орієнтацію сніжинок і меншого показника заломлення. Приклад просторового розподілу Z та Z_{DP} в вертикальному перерізі купчасто-дощової хмари приведений на рис. 2.4.

5. За величиною Z_{DP} легко ідентифікуються потужні відбиття від місцевих предметів. Для місцевих предметів значення Z_{DP} найчастіше велике за модулем і негативною за знаком. Отже, поляризаційна селекція може допомогти в тих випадках, коли режекція сигналів місцевих предметів в частотній області, передбачена в допплерівський метеорологічний

радіолокатор (ДМРЛ), являється неефективною.

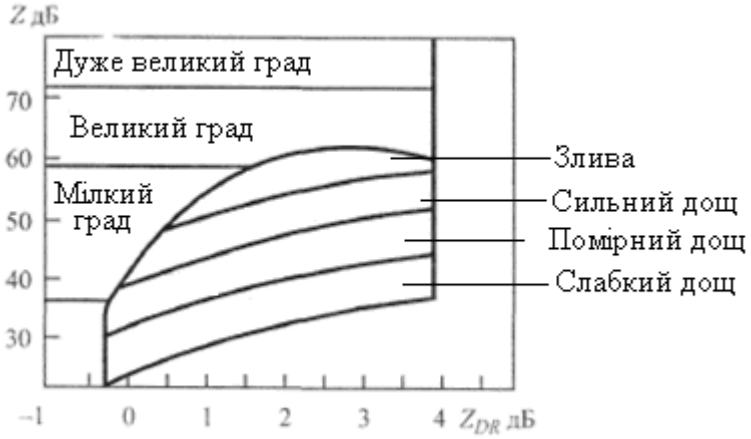


Рисунок 2.4 – Приклад просторового розподілу відбиття радіолокації Z і диференціального відбиття Z_{DP} в вертикальному перерізі купчасто-дощової хмари

Введення режиму поляризаційної селекції в ДМРЛ, тобто черезперіодного перемикання поляризації на передачу, не призводить до істотного ускладнення апаратури і системи обробки ДМРЛ. Для забезпечення необхідної точності оцінки Z_{DP} потрібні додаткові розрахунки сантиметрової діаграми направленості, що досягається спеціальною конструкцією опромінюючого рупора. Що стосується системи обробки, її незначне ускладнення зводиться лише до введення операції черезперіодного віднімання в амплітудному каналі на виході приймача.

Оцінимо статистичну точність вимірювання Z_{DP} при черезперіодному перемиканні поляризації в основному режимі роботи ДМРЛ.

Залежність середньоквадратичного відхилення оцінки Z_{DP} від довжини вибірки і коефіцієнта міжперіодної кореляції [74].

Можна зробити висновок про те, що при вимірювані ширини допплерівського спектру швидкостей для відбиваючого об'єкту в діапазоні від 0,5 до 4 м/с, що відповідає зміні коефіцієнта кореляції в *C*-діапазоні від

0,99 до 0,68, статистична помилка оцінювання Z_{DP} у вказаному циклі накопичення знаходиться в межах 0,2-0,6 дБ. Ця помилка може бути зменшена на етапі вторинної обробки в 1,5-3 рази при додатковому усереднені оцінок Z_{DP} в просторі в межах стандартних лунок представлення.

Вплив черезперіодного перемикання поляризації на роботу каналу вимірювання швидкості. Передусім, слід зазначити, що поляризаційна модуляція з частотою повторення імпульсів ніяк не відіб'ється на якості режекції сигналів, відбитих від місцевих предметів, оскільки спектральні скривлення, пов'язані з поляризаційною селекцією, являються високочастотними і не потрапляють в спектральну смугу відбиття від місцевих предметів.

Комплексні амплітуди відбитого від метеооб´кта радіолокаційного сигналу на горизонтальній і вертикальній поляризації можна записати у вигляді

$$H(t) = A\sum_j S_{HH}^{(j)} e^{2i\tilde{k}_H r_j(t)},$$

$$V(t) = A\sum_j S_{VV}^{(j)} e^{2i\tilde{k}_V r_j(t)}, \qquad (2.18)$$

де підсумок здійснюється в сумі відбивачів в межах розсіюючого об'єму;

A - коефіцієнт, який залежить від енергетичних параметрів РЛС і дальності зондованого об'єму;

r_j - відстань між МРЛ і j-м відбивачем;

$\tilde{k}_H$ і $\tilde{k}_V$ постійні поширення на горизонтальній і вертикальній поляризації, середовища поширення, що відрізняються один від одного внаслідок анізотропії;

$S_{HH}^{(j)}$ і $S_{VV}^{(j)}$ - діагональні елементи матриці розсіяння для j-го відбивача.

Якщо для простоти моделювати гідрометеори еліпсоїдами обертання, тоді матриця зворотного розсіяння гідрометеора, орієнтація осі обертання якого відносно напрямку поширення і вектора електричного поля при лінійній поляризації опромінення задається кутами α і θ (рис. 2.5), має аналогічний вигляд (2.2) [74].

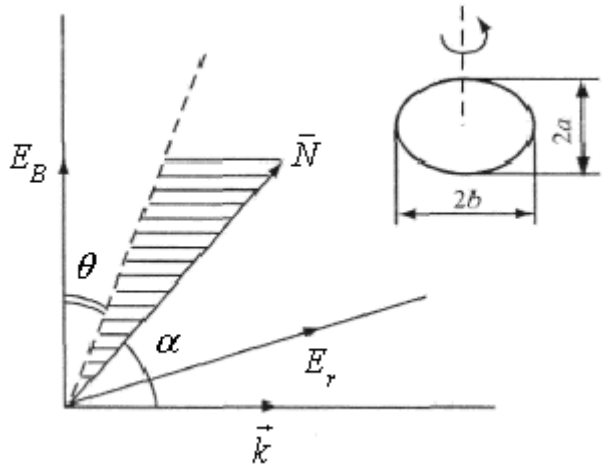


Рисунок 2.5 – Орієнтація осі обертання гідрометеора $\bar{N}$ відносно горизонталі, вертикалі і напрямку поширення хвилі

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} (S_a - S_b)\sin^2\alpha\sin^2\theta + S_b, & (S_a - S_b)\sin^2\alpha\sin\theta\cos\theta \\ (S_a - S_b)\sin^2\alpha\sin\theta\cos\theta, & (S_a - S_b)\sin^2\alpha\cos^2\theta + S_b \end{pmatrix}, \qquad (2.19)$$

де S_a - комплексна амплітуда розсіяння при опроміненні лінійно поляризованою хвилею з вектором $\vec{E}_0$, яка співпадає з віссю обертання еліпсоїда;

S_b - комплексна амплітуда розсіяння при опроміненні перехресним поляризованим нулем.

При черезперіодному перемиканні поляризації на передачу на виході приймача ДМРЛ ми маємо комплексний коефіцієнт міжперіодної кореляції вхідного сигнала ρ_0 в сукупності перекриваючих пар імпульсів, що, відповідно до алгоритму парних імпульсів.

При черезперіодному перемиканні поляризації на передачу на виході приймача ми маємо комплексну величину

$$\rho = \frac{B_{HV} + B_{VH}}{P_H + P_V}, \tag{2.20}$$

де

$$B_{HV} = \left\langle H^*(t) V(t+T) \right\rangle,\ B_{VH} = \left\langle V^*(t) H(t+T) \right\rangle, \tag{2.21}$$

$$P_H = \left\langle |H|^2 \right\rangle,\ P_V = \left\langle |V|^2 \right\rangle,$$

де T- період імпульсів,

$\langle\ \rangle$ - знак усереднення.

Підставивши в (2.18) та (2.21) отримаємо:

$$\rho = \gamma \rho_0, \tag{2.22}$$

$$\gamma \cong \frac{2R\left[\left\langle S_{HH} S_{VV}^* \right\rangle e^{-2\left(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V\right)R}\right]}{\left\langle \left|S_{HH}\right|^2 \right\rangle \left\langle \left|S_{VV}\right|^2 \right\rangle}, \tag{2.23}$$

де R - відстань до центру розсіюючого об'єму.

Множник γ, ефект поляризаційної модуляції, що описує, є дійсним числом, меншим одиниці. Послідовно, при формуванні оцінки коефіцієнта кореляції, які перекриваються, пара імпульсів поляризаційна модуляція не призводить до спотворення фази комплексного коефіцієнта кореляції та зміщення оцінки допплерівської швидкості. Має місце розширення спектру за рахунок того, що $\gamma < 1$.

У C- діапазоні помилки у визначенні ширини допплерівського спектру швидкостей за рахунок поляризаційної модуляції для рідкокрапельних хмар дуже малі, а для кристалічних хмар не перевищують 2 м/с. Таким чином, режим поляризаційної селекції в ДМРЛ не призводить до додаткових витрат часу, і інформація про Z_{DR} може бути отримана паралельно з інформацією про спектральні моменти.

Диференціальні характеристики поширення, визначає експоненціальним множником $\exp\left[2i\left(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V\right)\right]R$, можуть бути використані для витягання корисної фізичної інформації.

Різниця постійного поширення $\tilde{k}_H - \tilde{k}_V$ описується наступним чином:

$$\tilde{k}_H - \tilde{k}_V = \left(k_H - k_V\right)\left(1 - e^{-2\sigma_\alpha^2}\cos 2\bar{\alpha}\right)\frac{e^{-2\sigma_\alpha^2}}{2}, \qquad (2.24)$$

де величини k_H і k_V визначаються виразом

$$k_{HV} = k + \frac{2\pi}{k}\int_0^\infty f_{H,V}\, n(D)\, dD, \qquad (2.25)$$

де $f_{H,V}$ - амплітуди розсіяння гідрометеора для горизонтальної поляризації при умові, що напрям осі обертання частки співпадає з однією з

аортою поляризаційного базису.

Для реллевських часток амплітуда розсіяння вперед дорівнює амплітуді зворотного розсіяння і $f_{H,V} = (i/k)S_{a,b}$, а різниця k_H і k_V є комплексною величиною, причому уявна частина цієї різниці характеризує різницю коефіцієнтів послаблення ортогональних поляризацій при поширенні в середовищі з гідрометеорами ΔA (дБ/км) - диференціальне послаблення:

$$\Delta A = 8{,}686\,\mathrm{Im}\left(k_H - k_V\right), \tag{2.26}$$

а основна частина $\Delta\Phi$ (град/км) - диференціальне фазове зрушення між ортогональними поляризаціями:

$$\Delta\Phi = (180/\pi)\,\mathrm{Re}\left(k_H - k_V\right). \tag{2.27}$$

У першому наближенні можна вважати, що в сантиметровому діапазоні довжин хвиль величини ΔA і $\Delta\Phi$ прямопропорційні частоті випромінювання і інтенсивності опадів. Твердокрапельні частки з низьким вологовмістким фазозсувним середовищем, де величиною ΔA в порівнянні з $\Delta\Phi$ можна знехтувати.

У формулі (2.24) величина α представляє собою значний напрямок орієнтації осі обертання еліпсоїдних часток за кутом α; σ_α та σ_θ - середньоквадратичне значення ширини розподілення орієнтації гідрометеорів за кутом α і θ відповідно (рис. 2.4).

Для вертикально орієнтованих часток з $\bar{\alpha} = \pi/2$, а $\sigma_\alpha = \sigma_\theta = 0$ отримуємо $\tilde{k}_H - \tilde{k}_V = k_H - k_V$.

Для хаотично орієнтованих часток $\tilde{k}_H - \tilde{k}_V = 0$ і диференціальні ефекти поширення відсутні.

Відповідно до виразу (2.25) диференціальний фазовий зсув є

моментом ступеня m розподілу часток за розміром, де m набуває проміжного значення між 3 і 4. Це робить перспективним використання диференціального фазового зсуву для оцінки водності і інтенсивності опадів [73].

Диференціальний фазовий зсув може бути оцінений через відношення величин B_{VH} і B_{HV} (2.21), які легко вираховуються по тій же самій вхідній послідовності сигналу з використанням співвідношення

$$4\,\mathrm{Re}\left(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V\right)R + 2\arg\left(S_{HH}S_{VV}^*\right) = \arg\frac{B_{VH}(R)}{B_{HV}(R)}. \qquad (2.28)$$

В формулі (2.28) другий доданок в лівій частині близький до нуля, і ним в першому наближенні можна знехтувати. Величина $\mathrm{Re}\left(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V\right)$, віднесена до інтервалу дальності $R, R+\Delta R$, виходить при розрахунку правих частин співвідношення, відповідних елементам розв'язку, рознесеним променем на інтервал

$$\Delta R : \mathrm{Re}\left(\tilde{k}_H - \tilde{k}_V\right) \cong \frac{1}{4\Delta R}\left[\arg\frac{B_{VH}(R+\Delta R)}{B_{HV}(R+\Delta R)} - \arg\frac{B_{VH}(R)}{B_{HV}(R)}\right]. \qquad (2.29)$$

Величина ΔR, яка характеризує просторовий дозвіл при оцінці диференціального фазового зсуву, визначається точністю вимірювання фази коефіцієнта кореляції. Відповідно до вимог точності вимірювання допплерівської швидкості 1 м/с на довжині хвилі випромінювання λ=5,7 см при частоті посилання імпульсів 1 кГц дійсна точність вимірювання фази B_{VH} і B_{HV} складає 10-20°.

Для рідкокрапельних опадів при інтенсивності 12,5 мм/г і вертикальній орієнтації осі обертання крапель диференціальний фазовий зсув в C-діапазоні складає приблизно 1,5 (град/км). В цьому випадку

відповідно до виразу (2.29) просторовий дозвіл при оцінці $\Delta\Phi$ (а значить, і пропорційній $\Delta\Phi$ інтенсивності опадів) складає одиниці кілометрів.

2.4 Поляризаційна інформація в оперативному режимі роботи допплерівського метеорологічного радіолокатора

2.4.1 Постановка завдання

В світі використовується все більше ДМРЛ з двома поляризаціями, які можуть випромінювати і приймати як горизонтальні (*H*), так і вертикальні (*V*) електромагнітні хвилі. Такі ДМРЛ втратили статус винятковості. Подвійна поляризація в ДМРЛ технічно може реалізуватися як за рахунок швидкого поперемінного випромінювання і прийому вертикальної (*V*) і горизонтальної (*H*) поляризації, так і їх одночасного випромінювання і прийому.

Основне завдання застосування поляризаційних вимірювань в оперативних умовах роботи ДМРЛ - постійно отримувати додаткові продукти радіолокації з метою:

- підвищення точності методу радіолокаційного вимірювання інтенсивності опадів різного фазового стану;
- визначення характеру та фазового стану опадів в зимових штормових умовах (можливість розрізняти між дожем і снігом).

Вважається, що в оперативному режимі роботи ДМРЛ з двома поляризаціями (*H* і *V*) повинен в обов'язковому порядку вимірюються наступні величини:

- відбиття Z_N;
- відбиття Z_V;
- диференціальне відбиття Z_{DR} (2.7);
- коефіцієнт кросскореляції з нульовою затримкою $\rho_{HV}(0)$ (2.14);

- лінійний коефіцієнт деполяризації *LDR* (2.8);
- диференціальний фазовий зсув Φ_{DP} (2.10);
- допплерівські моменти (2.2), (2.3).

Для вирішення основного завдання пропонується використовувати головну перевагу поляриметричних ДМРЛ - можливість застосування для оцінки інтенсивності опадів I (мм/г) алгоритмів різного типу. Окрім класичного алгоритму $I(Z_H)$ можна застосовувати алгоритми, які включають два параметри $I(Z_H, Z_{DR})$ і $I(Z_{DR}, K_{DP})$.

Як показали експериментальні дослідження, поляризаційні вимірювання в *C*-діапазоні, на відміну від вимірювань в S- діапазоні, потребують корекції ефектів поширення радіохвиль [75]. Існує два ефекти: ослаблення в опадах і поява резонансних стрибків відбиваності в рідких опадах в середніх широтах.

Алгоритми з використанням K_{DP} несприйнятливі до ефектів послаблення в опадах радіохвиль *C*- діапазоні, але залежать від точності їх оцінки. Абсолютно очевидно, що і алгоритми, включаючи Z_N та Z_{DR}, тільки тоді будуть ефективні, коли абсолютні похибки їх вимірювання будуть не гірші за наступні: $\Delta Z_H < 1$ дБ, $\Delta Z_{DR} < 0,2$ дБ. Звідси витікають і підвищені вимоги до калібрування оперативних ДМРЛ.

2.4.2 Схема корекції послаблення в *C*-діапазоні

В *C*-діапазоні відношення α_H між питомим послабленням A_H і питомою диференціальною фазою K_{DP} може сильно змінюватися, а в загальноприйнятому поляриметричному методі корекції послаблення [64] вважається, що відношення α_H практично не змінюється.

Велика зміна коефіцієнта α_H в *C*-діапазоні приписується ефектам сильного резонансного розсіяння, які впливають на A_H і K_{DP} при розмірах

крапель дощу більше 5 мм. Залежності нормалізованих A_H і K_{DP} від діаметру крапель дощу рівного об'єму показані на рис. 2.6. В результаті резонансного розсіяння відношення A_H / K_{DP} швидко збільшується при діаметрі крапель більше 5 мм, а потім має тенденцію до зменшення на верхньому кінці спектра дощових крапель.

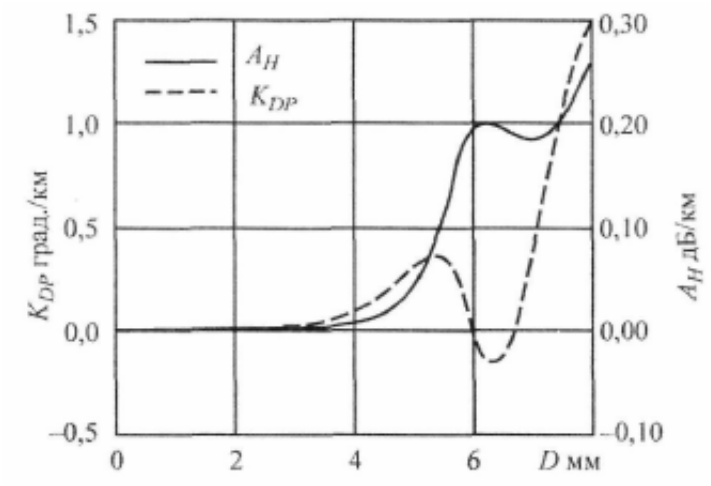


Рисунок 2.6 - Залежність A_H і K_{DP} від діаметру D рівно-об'ємних крапель дощу в C-діапазоні (T- 20 °C)

Для оцінки переміни відношення α_H моделювалися A_H і K_{DP} на основі 25 920 розподілень крапель але розмірам (drop size distributions, DSD), отриманих в Оклахомі. Оскільки вертикальний розмір великих крапель менший за горизонтальний, можна чекати, що резонансні ефекти при вертикальній поляризації менш помітні ніж при горизонтальній, і відношення α_V між питомим ослабленням A_V при вертикальній поляризації і K_{DP} менше і менш перемінлива, ніж α_H.

Графіки розкидання значень $A_{H,V}$ відносно K_{DP} для всіх DSD і для DSD з $Z_{DR} < 3$ дБ наведені на рис. 2.7. Більшість точок для DSD без великих крапель ($Z_{DR} < 3$ дБ) концентруються на прямих лініях, і це

означає, що стосунки $A_{H,V}/K_{DP}$ дуже стійкі для таких *DSD*. Точки поза цими "лінійними кластерами" приписуються резонансним ефектам, обумовленою наявністю великих крапель. Очевидно, що графіки розсіяння $A_V - K_{DP}$ менше піддаються резонансним ефектам, ніж графіки розсіяння $A_H - K_{DP}$, особливо для $Z_{DR} < 3$ дБ. Крім того, для цього K_{DP} послаблення при горизонтальній поляризації помітно більше, ніж при вертикальній, тобто диференціальне послаблення $A_{DP} = A_H - A_V$ позитивне.

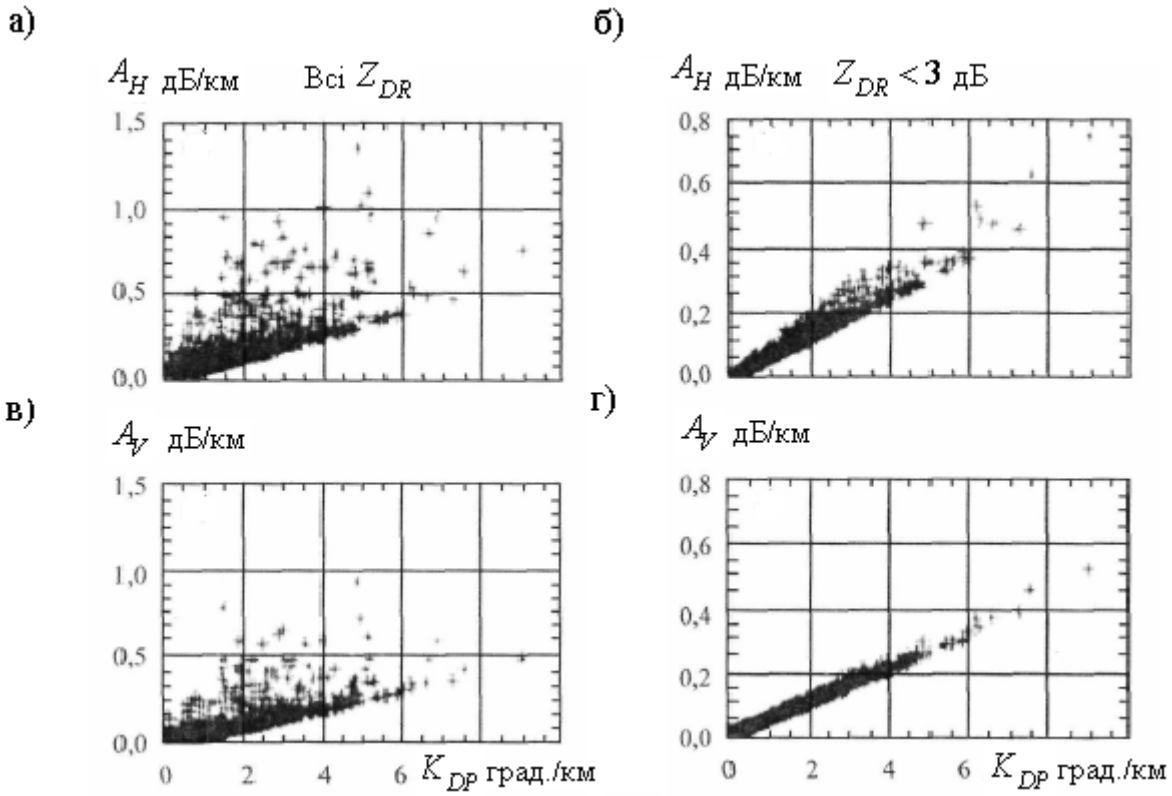


Рисунок 2.7 - Графіки розсіяння $A_H - K_{DP}$, побудовані за даними 25 920 *DSD*, виміряних в Центральній Оклахомі:
а і б - включені всі *DSD*, в і г- включені лише *DSD* з $Z_{DR} < 3$ дБ

Аналіз графіків розсіяння, представлених на рис. 2.7, показує, що головна проблема корекції послаблення в *C*-діапазоні - це випадкові

"гарячі точки" вздовж променя, де $Z_{DR} > 3$ дБ і коефіцієнти $\alpha_{H,V}$ дуже мінливі. Зазвичай такі зміни $\alpha_{H,V}$ відбуваються у відносно невеликому числі селекторів дальності, але загальний ефект цієї мінливості сильний, тому що інтенсивність опадів і послаблення там високі.

В запропонованому методі корекції приймається, що відношення $\alpha_{H,V}$ є величиною змінною і невідомою в середині "гарячих плям", тоді як за їх межами воно постійне і дорівнює своєму середньому кліматологічному значенню α_0, яке залежить лише від температури при залежності форми від розміру для крапель дощу.

Ідентифікація "гарячих плям" - критичний компонент алгоритму. Вони можуть бути виявлені при перевищені порогу $Z_{DR} = 3$ дБ за умови, що диференціальна відбиваність скоректована на диференціальне послаблення. Альтернативно можна використовувати поріг $Z_t = 45$ дБZ після наближеної корекції коефіцієнта радіолокаційної відбиваності на послаблення за формулою

$$\Delta Z = \alpha_0 \Phi_{DP} . \tag{2.30}$$

Дійсно, графік розсіяння $Z - Z_{DR}$ в *C*-діапазоні, змодельований за виміряним *DSD*, показує, що ці пороги виявлення Z і Z_{DR} цілком сумісні (рис. 2.8). Далі буде використовуватися поріг відбитої радіолокації $Z_t = 45$ дБZ.

Згідно з традиційним методом *ZPHI*, використовується схема Хітчфелда-Бордана з інтегральним обмеженням на основі повного приросту диференціальної фази в інтервалі дальності (r_0, r_m) з радіовідлунням:

$$\int_{r_0}^{r_m} A_H(s)\,ds = \int_{r_0}^{r_m} \alpha_H K_{DP}(s)\,ds = \frac{\alpha_H}{2} \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m), \tag{2.31}$$

де

$$\Delta\Phi_{DP}\left(r_0, r_m\right) = \Phi_{DP}\left(r_m\right) - \Phi_{DP}\left(r_0\right). \tag{2.32}$$

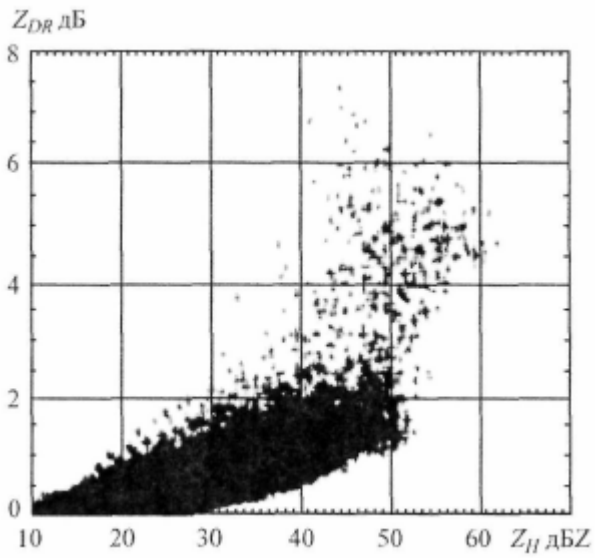


Рисунок 2.8 - Графік розсіяння $Z - Z_{DR}$ в *C*-діапазоні, змодельований за вимірюваннях *DSD* (T=20 °C)

Радіальний профіль $A_H(r)$ можна оцінити по ослабленій відбиваності радіолокації Z_a і $\Delta\Phi_{DP}$, використовуючи формулу

$$A_H(r) = \frac{\left[Z_a(r)\right]^b \left[10^{0,1ba_H \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m)} - 1\right]}{I\left(r_0, r_m\right) + \left[10^{0,1ba_H \Delta\Phi_{DP}(r_0, r_m)} - 1\right] I\left(r, r_m\right)}, \tag{2.33}$$

де

$$I\left(r_0, r_m\right) = 0,46b \int_{r_0}^{r_m} \left[Z_a(s)\right]^b ds, \tag{2.34}$$

та

$$I\left(r,r_m\right)=0,46b\int_r^{r_m}\left[Z_a\left(s\right)\right]^b ds\,. \qquad (2.35)$$

Параметр b - це показник ступеня в співвідношенні $A_H = aZ^b$.

В запропонованому вдосконаленому методі *ZPHI*

$$\alpha_H(r)=\alpha_0+\Delta\alpha\left(r\right), \qquad (2.36)$$

де α_0 - постійне кліматологічне значення;

$\Delta\alpha$ - довільна в селекторах, в середині яких відбиваність Z перевищує $Z_t = 45$ дБZ.

Оскільки величина $\Delta\alpha$ може змінюватися від променя до променя вона вважається постійною для всіх селекторів, в яких $Z > Z_t$ для будь-якого конкретного променя.

Відповідно з рівняння обмеження (2.31) можна переписати у вигляді

$$\int_{r_0}^{r_m} A_H\left(s\right)ds=\alpha_0\int_{r_0}^{r_m} K_{DP}\left(s\right)+\Delta\alpha\int_{Z>Z_t} K_{DP}\left(s\right)ds=$$

$$=\frac{\alpha_0}{2}\Delta\Phi_{DP}\left(r_0,r_m\right)+\frac{\Delta\alpha}{2}\Delta\Phi_{DP}\left(Z>Z_t\right). \qquad (2.37)$$

Тут інтеграція в другому інтегралі виконується в селекторах дальності, де $Z > Z_t$ і $\Delta\Phi_{DP}\left(Z>Z_t\right)$ є приріст Φ_{DP} в селекторах з $Z > Z_t$.

З рівняння (2.37) виходить, що в основній формулі (2.33) для традиційного методу *ZPHI* член $\alpha_H\Delta\Phi_{DP}\left(r_0,r_m\right)$ слід замінити на член $\alpha_H\Delta\Phi_{DP}\left(r_0,r_m\right)+\Delta\alpha\Delta\Phi_{DP}\left(Z>Z_t\right)$.

Це означає, що для процедури обмеження потрібно замість одного

використовувати два виміряні параметри диференціальної фази: $\Delta\Phi_{DP}\left(r_0, r_m\right)$ і $\Delta\Phi_{DP}\left(Z > Z_t\right)$. В результаті радіальний профіль A_H залежить від значення $\Delta\alpha$. Відповідний коефіцієнт $\Delta\alpha$ буде визначатися за ітераційним процесом прискорення $\Delta\alpha$ доки не буде виконана наступна умова:

$$\int_{Z>Z_t} A_H\left(s, \Delta\alpha\right) ds = \frac{\alpha_0}{2} \Delta\Phi\left(Z < Z_t\right), \tag{2.38}$$

де інтеграція виконується в селекторах з $Z < Z_t$ і

$$\Delta\Phi_{DP}\left(Z < Z_t\right) = \Delta\Phi_{DP}\left(r_0, r_m\right) - \Delta\Phi_{DP}\left(Z > Z_t\right). \tag{2.39}$$

Подібну процедуру можна виконати для корекції ослаблення відбитої радіолокації, яка вимірюється при вертикальній поляризації. Використання вертикально поляризованого компонента радіолокаційного сигналу особливо рекомендується для азимутів з істотним послабленням, де диференціальне послаблення також істотне і чутливість радіолокатора вище при вертикальній поляризації.

Вдосконалений метод корекції послаблення був застосований до даних *C*- діапазонна, отриманим влітку 2005 р. на півдні центрального Онтаріо на *C*- смуговому поляриметричному радіолокаторі, розробленим Environment Canada. Було досліджено п'ять штормів, які спостерігалися 9 і 14 червня, 14 липня, 2 і 19 серпня. Всі п'ять штормів були або з градом, або з істотними опадами, що створювали значне послаблення випромінювання в *C*- діапазоні. Максимальна диференціальна фаза, яка вимірювалася в кожному з п'яти штормів, коливалася від 100 до 300°. Відповідно максимальне послаблення в радіусі спостережень 250 км змінювалося при горизонтальній поляризації приблизно від 10 до 20 дБ.

Коефіцієнт відбиття радіолокації корегувався лише при

горизонтальній поляризації. На основі результатів моделювання A_H і K_{DP} в *C*-діапазоні для $Z_H < 45$ дБZ, *T*= 20°*C* і форми крапель дощу, визначених Brandes et al. (2002) для параметра α_0 в рівняннях (2.36) - (2.38) було використано значення 0,06 дБ/град. В рівняннях (2.33) -(2.35), слідуючи Bringi and Chandrasekar (2001), використовувалося *b*=0,8.

Погодженість між полями інтенсивності дощу, отриманими по K_{DP}, і скоректованою Z_H використовувалася для перевірки правильності роботи запропонованого методу корекції послаблення.

Інтенсивність дощу розраховується за формулами які виведені з 25 920 вибірки *DSD* для *C*- діапазонна. В формулах (2.40) і (2.41) K_{DP} виражено в град/км, а Z_H - в дБZ.

$$I\left(K_{DP}\right) = 25{,}1\left|K_{DP}\right|^{0{,}777} sign\left(K_{DP}\right), \tag{2.40}$$

і

$$I\left(Z_H\right) = 1{,}69 \cdot 10^{-2} 10^{0{,}0717 Z_H}. \tag{2.41}$$

Для прикладу на рис. 2.9 показані поля $I\left(K_{DP}\right)$ і $I\left(Z_H\right)$ для шторму, спостерігалося 19 серпня 2005 р., який викликав повінь в Торонто. Очевидно, що інтенсивність дощу, оцінена некоректована Z_H, сильно занижена в порівнянні з $I\left(K_{DP}\right)$ (рис. 2.9 б). Інтенсивність дощу залишається негативно зміщеною, якщо використовується традиційний алгоритм *ZPHI* з фіксованим $\alpha_0 = 0{,}06$ дБ/град. (рис. 2.9 в). Найкраще погодження між $I\left(K_{DP}\right)$ і $I\left(Z_H\right)$ досягається при використанні нового методу *ZPHI* (рис. 2.9 г). Середнє значення $\Delta\alpha$ в області зливових опадів з $Z > 45$ дБZ близько до 0,04 дБ/град. Отже, в ядрах дощових осередків на рис. 2.9 відношення $A_{H,V} / K_{DP}$ складає

приблизно 0,10 дБ/град.

Аналіз п'яти явищ з дощем показує, що відмінність між зсувами, пов'язаними з послабленням коефіцієнта радіолокаційного відбиття при стандартному і вдосконаленому методами *ZPHI* може досягати 4 дБ, що приведе приблизно до подвоєної різниці відповідних значень інтенсивності дощу.Таким чином, сильні ефекти резонансного розсіяння в *C*-діапазоні викликають високу мінливість відношення $A_{H,V}/K_{DP}$ для крапель дощу більше 5мм. Така невизначеність негативно впливає на якість корекції послаблення *ZPHI*, якщо не застосовувати замість стандартного алгоритму профілізації дощу запропонований алгоритм.

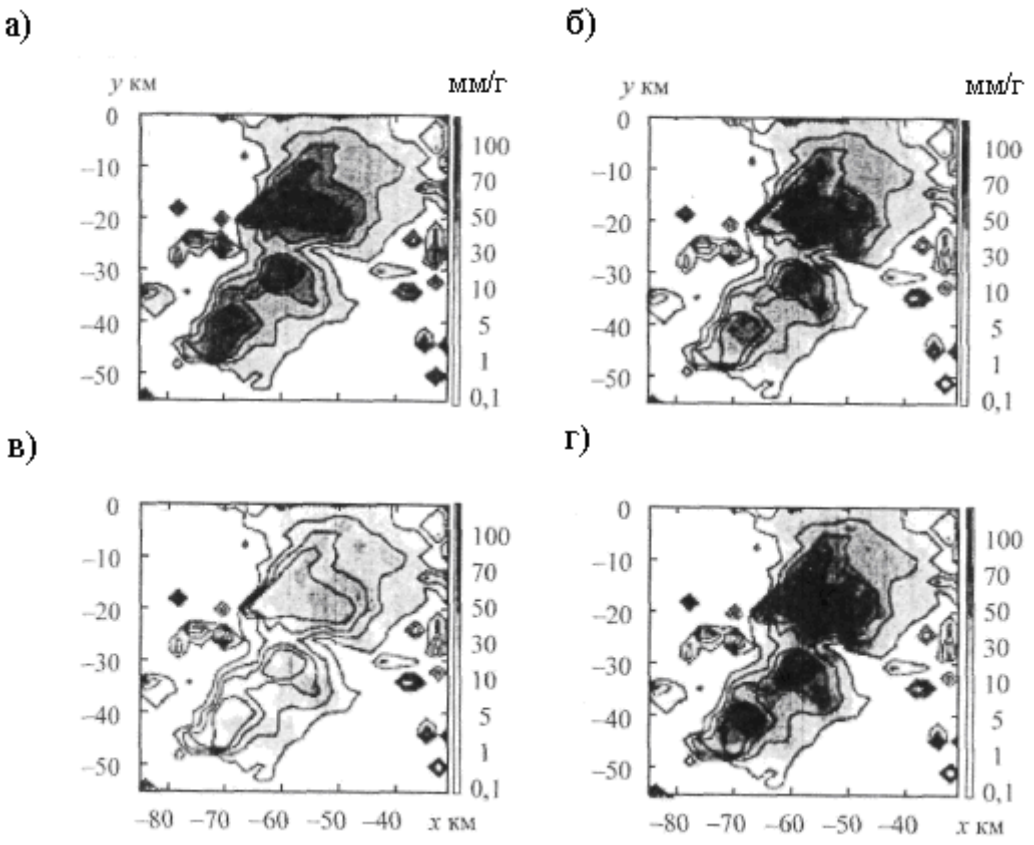


Рисунок 2.9 – Поля інтенсивності опадів, оцінені різними видами: а) - за K_{DP}; б) - за некорельованою Z_H; в) - за Z_H з корекцією на послаблення звичайним методом *ZPHI*; г) - за Z_H з корекцією на послаблення удосконаленим методом *ZPHI*

2.4.3 Оцінка точності алгоритмів інтенсивності опадів на базі поляриметричних вимірювань в *C*-діапазоні

Поляриметричні алгоритми оцінки інтенсивності опадів отримані в результаті обробки розподілу крапель за розміром (15000 вибірок), які вимірюються оптичним дисдрометром [75].

Для підтвердження поляриметричних оцінок радіолокаційної інтенсивності опадів використовувалася мережа з 73 дощомірів в басейні річки Медуей (південний схід Англії), розташованих в радіусі 50 км від ДМРЛ.

ДМРЛ Turnham (λ=5,5 см, одночасна передача і прийом горизонтально і вертикально поляризованих хвиль) виконаний за схемою з розподілювачем потужності і приймачем, розміщеним на антені. Така схема забезпечує максимальну якість даних при мінімізації джерел систематичної помилки від переходів, що обертаються.

Відбиття Z_{HH} і Z_{VV} розраховувалися за формулою (2.1), Z_{DR} - за формулою (2.7), а питома диференціальна фаза K_{DP} (град./км) - за формулою

$$K_{DP} = 10^3 \frac{180\lambda}{\pi} \int \mathrm{Re}\left(f_{\text{н}} - f_V\right) N(D)\, dD, \qquad (2.42)$$

де $f_{\text{н}}$ і f_V - амплітуди прямого розсіяння для горизонтально і вертикально поляризованих електромагнітних хвиль.

Інтенсивність опадів I (мм/г) розраховувалася за формулою

$$I = \frac{\pi}{6} D^3 v(D) n(D)\, dD, \qquad (2.43)$$

де v(м/с) - кінцева швидкість дощових крапель:

$$v(D) = 3,78D^{0,67}, \tag{2.44}$$

(вертикальні рухи повітря відсутні).

Розподіл крапель за розміром за вимірюванням на оптичному дисдрометрі розраховувався за формулою

$$N(D_i) = \frac{t_i}{TV_e \Delta D}\left(\text{мм}^{-3} \cdot \text{мм}^{-1}\right), \tag{2.45}$$

де D_i - середній розмір крапель в класі *i*;

t_i - - час падіння, яки вимірюється в класі розмірів крапель *i*;

T- період вибірки;

V_e - ефективний об'єм вибірки;

ΔD - інтервал діаметрів.

Останнє рівняння не залежить від швидкості падіння крапель.

Запропоновані поляриметричні алгоритми оцінки інтенсивності опадів отримані методом нелінійної регресії між відомою інтенсивністю опадів *I* і будь-якою комбінацією модельних радіолокаційних вимірювань.

Оберемо лише два алгоритми I_A і I_B, які в результаті випробувань дали найменші погрішності.

Алгоритм I_A має мінімальні теоретичні помилки (15 %) і відсутність шуму, а алгоритм I_B - при шумі 25-35 %, тобто з допускається наявність теоретичного білого гаусового шуму в поляриметричних спостереженнях радіолокації $\left(\sigma(Z_H) = 1,0 \text{ дБ}Z;\ \sigma(Z_{DR}) = 0,1 \text{ дБ та } \sigma(K_{DP}) = 0,35 \text{ град./км}\right)$:

$$I_A = 25,2598K_{DP}^{-0,9951}Z_{DR}^{-0,6383}, \tag{2.46}$$

$$I_B = 0,01583Z_H^{0,8349} \cdot 10^{-0,3732Z_{DR}}, \tag{2.47}$$

де I- в мм/г;

Z_H - в мм^6/мм^3;

Z_{DR} - в дБ;

K_{DP} - в град./км.

Алгоритм I_B дає найменшу помилку при порівнянні з рівнянням Маршала-Пальмера $\left(Z_H = 200I^{1,6}\right)$ у всьому діапазоні виміряної інтенсивності опадів (I до 50 мм/г).

Потрібно робити більш ніж обережні висновки про перспективність поляриметричних алгоритмів, відмічаючи лише той факт, що вони не мають недоліків рівняння Маршала-Пальмера, тобто не занижується значення інтенсивності, як це відбувається при використанні рівняння Маршала-Пальмера для $I > 25$ мм/г.

3 ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ

3.1 Постановка задачі та форма оброблюваного сигналу

Для вирішення завдання прийому сигналу радіозонда, необхідно визначити форму цього сигналу та межі зміни його характеристик. Розглянемо сигнал зонду ПАЗА-10 і його аналогів.

Передбачається що сигнал, прийнятий з зонду, уже підданий посиленню та частотній демодуляції в надвисокочастотному (НВЧ) модулі. На виході є сигнал на проміжній частоті. При цих припущеннях, типовий не зашумлений сигнал із зонда буде виглядати як показано на рис. 3.1.

Сигнал являє собою ланцюжок імпульсів, що проходять з опорною частотою близькою до 800 кГц (ця частота називається підпереносною).

Сигнал близький за формою до синусоїдального коливання, тобто має головну гармоніку на основній частоті з слабкими боковими складовими. Частота, в свою чергу, частотно-модульована сигналом телеметрії з глибиною модуляції ± 10 кГц.

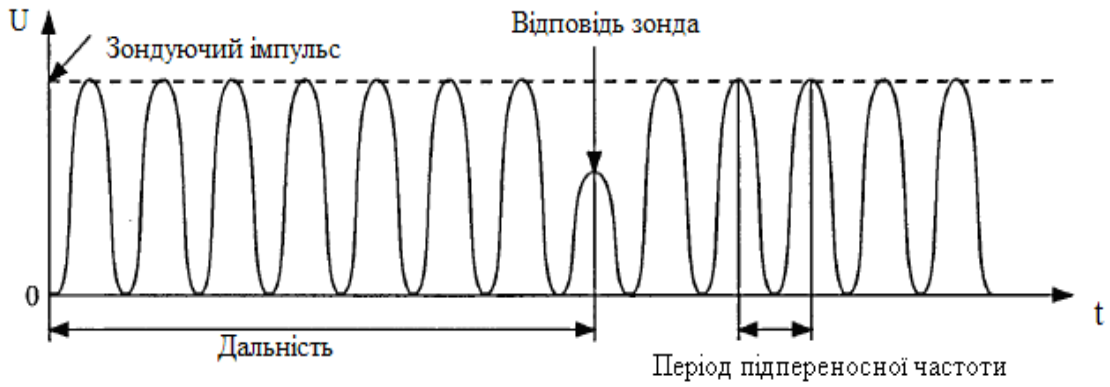


Рисунок 3.1 - Вид сигналу на проміжній частоті

Сигнал, крім частоти коливання, містить ще й віддалення від зонда.

Віддалення можна визначити за положенням ділянки сигналу з «завмиранням» або зменшеною амплітудою. Тривалість ділянки дорівнює тривалості зондуючого імпульсу і становить 2,5 мкс. Ця ділянка відповідає відповіді зонду на зондуючий імпульс, що випромінюється із землі. Чим більше віддалення, тим менше ослаблення відповіді, що робить задачу його виявлення тим складнішою, чим далі летить зонд. Демодуляція телеметрії та наступне вимірювання її періоду стає все більш важкою через те, що зменшується співвідношення сигнал / шум.

3.2 Існуючі методи демодуляції сигналів телеметрії та вимірювання дальності

3.2.1 Демодуляція сигналів телеметрії

Існуючі системи АВК використовують метод диференціальної демодуляції частотно-маніпульованого входу з використанням затриманої репліки сигналу. Аналогічні схеми використовуються в системах цифрової передачі та добре проаналізовані в [79-80]. У цих роботах показано, що при правильному виборі затримки репліки, можна максимізувати ефективність виявлення. Незважаючи на переваги в простоті реалізації, підхід має такі недоліки:

- як некогерентний, підхід має обмежену чутливість;
- використання репліки сигналу для перемноження робить нелінійними навіть лінійні перешкоди каналу;
- неможливість отримувати вимірювання під переносної фази 800 кГц.

Останній недолік суттєвий, тому що вимірювання підпереносної фази необхідні для когерентного виявлення відповіді зонду за дальністю.

Інший клас широко відомих алгоритмів демодуляції використовує схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), які теоретично мають підвищену чутливість і дозволяють отримати вимірювання фази сигналу.

Найбільш поширені алгоритми демодуляції, засновані на ФАПЧ [81-82], використовують лінійне наближення частотно-модульованого сигналу та містять лінійний фільтр першого, другого та третього порядку. До недоліків такого підходу слід віднести можливість наявності статичної помилки в оцінці фази. Залежно від закону за яким змінюється частота та фаза сигналу, ФАПЧ сходиться до значення фази, яка зміщена на деяку величину по відношенню до вихідного сигналу.

У той час як зміщеність оцінки фази не заважає правильній демодуляції ЧМ повідомлення для можливості виробляти когерентну фільтрацію відповіді сигналу зонду за дальністю, зсунення оцінки фази неприйнятна. Таким чином, алгоритми ФАПЧ з лінійним фільтром не є найкращим методом для цілей обробки сигналу від радіозонда.

Інший вид ФАПЧ заснований на теорії змінних стану та використовує так званий фільтр Калмана [83-84]. Незважаючи на поліпшену чутливість і кращі характеристики по захопленню несучої частоти, цей підхід застосовується лише для лінійної модуляції - АМ, КАМ, і не може застосовуватися для демодуляції ЧМ. Це обмеження є наслідком використання лінійної моделі сигналу, яка не може засосовуватись для ЧС.

Сучасні алгоритми ФАПЧ використовують результати нелінійного моделювання вхідного сигналу [85-86] і володіють перевагою незміщеної оцінки фази вхідного сигналу, і дозволяють побудувати когерентний фільтр відповіді зонда за дальністю. У зв'язку з цією властивістю, саме цей клас алгоритмів ФАПЧ розглядається в цій роботі.

3.2.2 Виділення сигналу зонду за дальністю

У системах АВК, виділення відповіді зонда за дальністю проводиться інтегруванням амплітуди сигналу. Для супроводу використовується система з двох прилеглих напівстробів, на яких відбувається інтегрування. Положення центру системи управляється різницею, накопичених на напівстробах,

значень. Даний підхід не використовує інформацію про внутрішню структуру сигналу, що обмежує чутливість. Крім того, у цього методу вимірювань є істотний недолік - його диференційний характер і дуже вузьке вікно супроводу. Це призводить до високої ймовірності зриву супроводу зонда за дальністю при часових завмираннях. Як тільки відповідь зникає з «поля зору» алгоритму, подальше вимірювання дальності стає неможливим, так як відповідь, що з'явилася, буде вже поза вікном стеження двох напівстробів. Детально алгоритм роботи вузла дальності описаний в [87].

3.2.3 Робота алгоритму виділення сигналу за дальністю в аерологічному обчислювальному комплексі (АОК) з малопотужним передавачем

Суттєвою мотивацією для пошуку алгоритмів виділення дальності з поліпшеними характеристиками є те, що генератор НВЧ (магнетрон) для потужного передавача в системах АВК, що подає на антену близько 1,5 кВт, промисловістю більше не виробляється. В той же час, при використанні малопотужного передавача з випромінюваною потужністю 100 Вт, дальність супроводу, за результатами проведених випробувань, становить не більше 70 км. Для зондування необхідні дальності не менше 150 км, а для деяких місцевостей необхідні дальності до 250 км.

Додатково існує проблема зриву супроводу. Система напівстробів не дозволяє знаходити втрачену відповідну паузу за дальністю, якщо її візуально не видно на осцилографі. Оператору необхідно власноруч виявити втрачену відповідну паузу та підвести напівстроби для успішного повторного виявлення. В таких умовах дальність надійного супроводу на малопотужному передавачі знижується до 20 км.

Все це показує, що потрібно використовувати вдосконалені методи обробки.

Перед розроблюваним алгоритмом поставлено завдання супроводу до 150 км з можливістю повторного виявлення при зриві супроводу на АВК.

3.3 Ймовірнісні алгоритми

3.3.1 Демодуляція сигналів телеметрії за допомогою максимального апостеріорного ймовірнісного демодулятора

Для усунення описаних вище недоліків, запропонований наступний поетапний процес:

1. Аналогова фільтрація НЧ фільтром для виключення вищих гармонік підпереносної частоти телеметрії - стандартна підготовка до переведення в цифрову форму з метою виключення можливості перевиборки.

2. Переклад сигналу в цифрову форму з частотою вибірки, як більша подвоєнню піднесеної частоти плюс глибина модуляції так, щоб задовольнялася умова теореми Котельникова.

3. Фільтрація цифровим ВЧ фільтром, виключення низьких частотних складових для ослаблення стаціонарних перешкод, які отримали назву местники.

4. Демодуляція послідовності імпульсів телеметрії, закодованої ЧС.

Завдання демодуляції частотно-маніпульованого сигналу може вирішуватися безліччю існуючих схем, розроблених для аналогових кіл. Як показано в [88-89], найбільш стійкі до зовнішнього шуму демодулятори, засновані на системі фазової ФАПЧ. Для цілей описуваної системи, пристрої ФАПЧ є найбільш придатними, тому що для когерентного виявлення відповіді зонда за дальністю необхідна оцінка піднесеної фази. ФАПЧ таку оцінку надає. Для форми модулюючого сигналу телеметрії, що представляє собою імпульси фіксованої амплітуди, ФАПЧ 2-го порядку буде давати незміщену оцінку фази [91]. Однак, оскільки обчислювальна потужність мікропроцесора оброблюваного сигналу в АВК-1 досить висока, можна

використовувати більш складні та оптимальні алгоритми нелінійної оцінки параметрів, заснованих на критерії максимальної апостеріорної ймовірності (МАЙ).

МАЙ-демодулятор в разі ЧС володіє вищою завадостійкістю, в порівнянні з класичним пристроєм ФАПЧ [86].

Одним з найбільш розроблених методів в теорії оцінок, є метод змінних стану. Апарат змінних стану добре розроблений як для безперервних у часі оцінок, так і для дискретних [93]. Загальна ідея методу полягає в моделюванні вихідного повідомлення, що підлягає модуляції, пофарбованим білим шумом, що пропускається через фільтр, описуваний диференціальним (безперервний випадок) або різницевим (дискретний випадок) рівнянням першого або вищого порядку. В нашому випадку, так як обробка буде вестися в цифровому вигляді, будемо використовувати дискретну модель.

У формальному вигляді, дискретна модель сигналу виглядає так:

Модель повідомлення: $x(k + 1) = \varphi [x(k), k] + \Gamma[x (k), k] w (k),$

Модель спостереження: $z(k) = h [x (k), k] + v(k).$

Тут використовуються такі позначення:

k - номер відліку;

$z (k)$ - спостережуваний сигнал;

$h (k)$ - моделююча функція;

$v (k)$ - адитивний білий шум каналу передачі;

$x (k)$ - повідомлення, яке підлягає модуляції (в нашому випадку послідовність імпульсів телеметрії);

$\varphi []$ - вектор-функція, що описує фільтр повідомлення;

$w (k)$ - білий шум, модулюючий повідомлення;

$\Gamma []$ - матриця трансформації шуму $w (k)$;

Для наших цілей розглянемо однополюсний лінійний фільтр повідомлення з незабарвленим білим шумом на вході.

Перед обробкою з прийнятого із зонду сигналу, віднімається несуча частота, в результаті чого отримуємо дві квадратурні складові, які і будемо

вважати спостережуваним сигналом. Тобто модель спостереження буде мати вигляд

$$z(\mathrm{k}) = \sqrt{2a}\begin{pmatrix}\cos\theta(\mathrm{kT})\\ \sin\theta(\mathrm{kT})\end{pmatrix} + v(\mathrm{k}), \tag{3.1}$$

де T - часовий крок дискретизації;

$\theta(\mathrm{t}) = \mathrm{c}\int_{t_0}^{t} x(\mathrm{u})\,\mathrm{du}$ - фаза частотно-модульованого сигналу;

$v\ (k)$ - адитивний двомірний вектор білого шуму з дисперсією $I\sigma^2$.

Маючи в розпорядженні фазу, її можна використовувати для опису частотної модуляції в термінах безперервних змінних стану

$$\begin{pmatrix}\dot{x}(\mathrm{t})\\ \dot{\theta}(\mathrm{t})\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-\alpha & 0\\ c & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x(\mathrm{t})\\ \theta(\mathrm{t})\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}u(\mathrm{t})\\ 0\end{pmatrix}. \tag{3.2}$$

Точка над змінною позначає похідну за часом t.

Як бачимо, в моделі задіяні дві змінні стану: повідомлення та поточна фаза сигналу. Нами були використані наступні позначення:

$u(t)$ - білий шум сигналу з варіацією v^2;

α - частота зрізу фільтра повідомлення за рівнем -3 дБ;

c - ширина спектра ЧМ.

При переході до еквівалентної дискретної моделі, рівняння будуть виглядати як

$$\begin{pmatrix}x(\mathrm{k}+1)\\ \theta(\mathrm{k}+1)\end{pmatrix} = \Phi\begin{pmatrix}x(\mathrm{k})\\ \theta(\mathrm{k})\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}u(\mathrm{t})\\ 0\end{pmatrix}. \tag{3.3}$$

Тут

$$\Phi = \begin{bmatrix} e^{-\alpha T} & 0 \\ \frac{c}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) & 1 \end{bmatrix}, \tag{3.4}$$

так звана перехідна матриця системи,

T - період вибірки сигналу.

Таким чином, (3.1) і (3.2) разом дають модель частотно-модульованого сигналу. Функція спостереження в нашому випадку нелінійна, так що класичне рішення у вигляді фільтра Калмана, що використовується для лінійних систем, не підійде.

В загальному вигляді, для отримання оптимального рішення максимальної апостеріорної ймовірності необхідно максимізувати ймовірність оцінки сигналу при відомих спостереженнях. У монографії Сейджа [94] для наближеного рішення використаний метод «впровадження варіацій».

Більш докладно про теорію оцінок за допомогою методу змінних стану можна прочитати в монографіях Сейджа і Ван-Тріса [95].

Детальний висновок демодулятора ЧМ, зроблений у більш загальній формі, можна знайти в статті [96]. Слід зауважити, що виведений в загальній формі алгоритм обчислювально нестійкий, тому що містить обчислення зворотної матриці.

Обчислення зворотної матриці з детермінантом близьким до нуля призводить до насичення значень з плаваючою точкою, що веде до суттєвих обчислювальним помилок.

На рис 3.2 представлені результати вимірювань характеристик МАЙ-демодулятора з роботи [86]. Для порівняння, на графіку зображені криві для аналогового ФАПЧ представленого в Ван-Тріс [99-100], для різних значень коефіцієнта розширення спектра $\beta = \frac{c}{a}$.

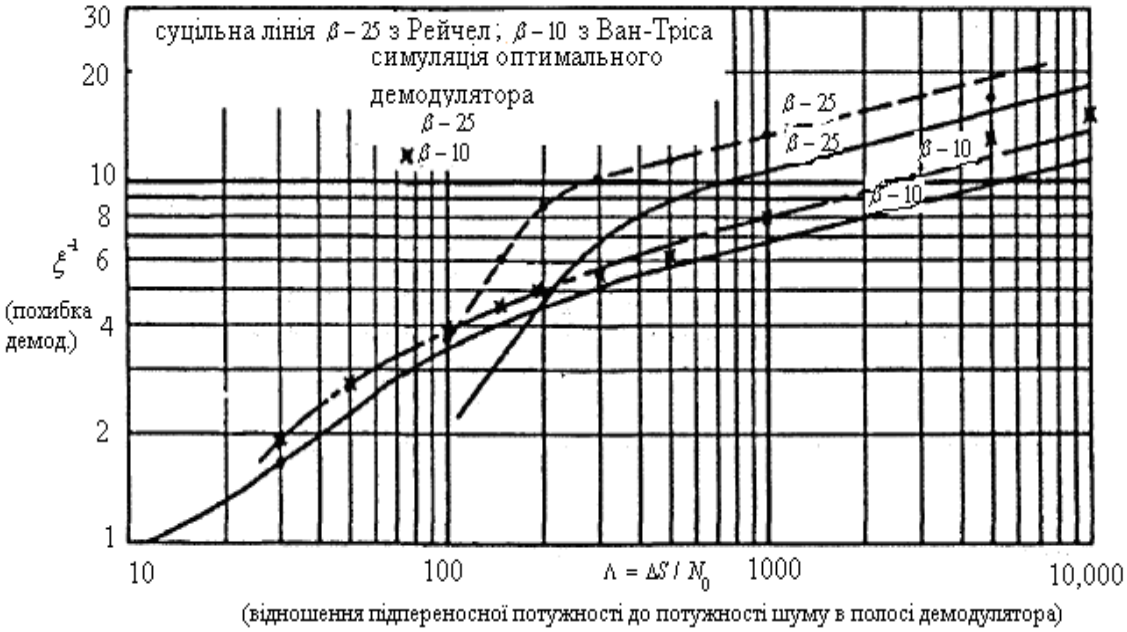


Рисунок 3.2 - Похибка демодуляції МАЙ-демодулятора

3.3.2 Оптимальне виділення сигналу радіозонда за дальністю

Відповідь радіозонда на зондуючий імпульс радара являє собою завмирання підпереносної частоти сигналу телеметрії. Завдання виявлення такого сигналу зводиться до класичної задачі бінарного виявлення частоти в радіолокації та описана детально Ван-Тріс в [97-101].

Завдання розглядається в наступному формулюванні бінарного завдання виявлення:

$$\begin{cases} H_1 : r(\mathrm{t}) = \sqrt{2}E_r A\cos(\omega_c t + \Phi(\mathrm{t}) + \theta) + \\ +w(\mathrm{t}), 0 \le \mathrm{t} \le \mathrm{T} & \text{відповіді немає ,} \\ H_2 : r(\mathrm{t}) = \mathrm{w}(\mathrm{t}), 0 \le \mathrm{t} \le \mathrm{T} & \text{відповідь є} \end{cases} \qquad (3.5)$$

r(t) – спостережуваний сигнал;

ω_c – підпереносна частота;

Φ(t) – оцінка фазової модуляції сигналу, яку в нашому випадку отримуємо з демодулятора ЧМ;

Θ – похибка оцінки фази *Φ(t)*;

T – тривалість відповіді радіозонду;

E_r – потужність приймаючого сигналу;

ω(t) – адитивний білий шум з двосторонньою щільністю $\frac{N_0}{2}$.

В реальному сигналі зонда, крім шумів можуть бути присутні стаціонарні перешкоди - так звані местники. Для того, щоб формулювання завдання 3.5 було коректним, буде потрібна додаткова фільтрація з метою видалення местника.

Так як за своєю формою местники являють собою відносно повільну мінливу адитивну перешкоду, їх спектр буде зосереджений в нижніх частотах. У цьому випадку, для того щоб відфільтрувати такий сигнал, досить застосувати фільтр високих частот з частотою зрізу, близькою до піднесеної частоти або смуговий фільтр з центральною частотою, яка дорівнює підпереносній частоті. Смуговий фільтр дозволить додатково позбутися високих гармонік перешкоди. Після застосування одного із зазначених фільтрів, отримаємо більш вузько смуговий під переносний сигнал з великим співвідношенням сигнал/перешкода. Далі, будемо припускати, що *r(t)* - це відфільтрований сигнал.

Зауважимо додатково, що оскільки застосування фільтра змінює фазу сигналу залежно від частоти, то оцінку фази *Φ(t)* необхідно проводити на відфільтрованому сигналі.

Припустимо, що помилка вимірювання фази сигналу *Θ* має центровану в нулі функцію розподілу запропоновану в [98]

$$p(\theta:\Lambda_m)=\frac{\exp[\Lambda_m\cos\theta]}{2\pi I_0(\Lambda_m)},$$

де $I_0(\Lambda_m)$ - модифікована функція Беселя першого роду;

Λ_m - параметр, що визначає розсіювання розподілу.

Чим точніші доступні вимірювання фази, тим більше значення Λ_m. При $\Lambda_m = 0$, розподіл стає рівномірним, тобто це випадок, коли про фазу ніякої інформації немає.

При такому припущенні про фазу можна показати, що оптимальною вирішальною функцією в сенсі максимальної апостеріорної ймовірності буде ліва частина нерівності

$$\left(\frac{2\sqrt{E_r}}{N_0}\right)^2 (L_c^2 + L_s^2) + 2\Lambda_m \frac{2\sqrt{E_r}}{N_0} L_c = \gamma, \tag{3.6}$$

де

$$\begin{aligned} L_c &= \int_0^T \sqrt{2} r(\mathrm{t}) \cos[\omega_c t + \Phi(\mathrm{t})]\,\mathrm{dt}, \\ L_s &= \int_0^T \sqrt{2} r(\mathrm{t}) \sin[\omega_c t + \Phi(\mathrm{t})]\,\mathrm{dt}. \end{aligned} \tag{3.7}$$

У рівнянні 3.6 перший доданок являє собою опис квадратурного некогерентного корелятора, в той час як другий є когерентною частиною. Таким чином, чим більше знань про фазу модельованої під переносної, тим більшу вагу має когерентна частина знаходжувача. Відповідно, за відсутності інформації про фазу ($\Lambda_m = 0$), залишається тільки некогерентна частина. Значення порога γ встановлюється залежно від необхідної достовірності виявлення.

Застосування формули 3.6 на практиці досить важке у зв'язку з наявністю залежності від важко оцінюваного параметра Λ_m. Крім того, бажано позбутися залежності від потужності сигналу E_r і рівня шуму N_0. Один із способів подолати цю перешкоду - розглянути два екстремальних випадки.

1. Некогерентний знаходжувач.

У цьому випадку передбачається, що $\Lambda_m = 0$, тобто немає ніякої інформації про підпереносну фазу. Вносячи залежно від E_r і N_0 в значення порогу, формула 3.6 буде:

$$\psi_{nc}(t) = \frac{1}{2}(L_c^{\ 2} + L_s^{\ 2}) = \gamma_{nc}\,. \tag{3.8}$$

Отриманий знаходжувач є квадратурним корелятором, який описаний в [97]. Зауважимо, що в силу того що Θ є рівномірно-розподіленою величиною на інтервалі [-π, π], початкова фаза в модуляції сигналу $\Phi(t)$ може бути взята довільно, тобто якщо позначити миттєву частоту частотно-модульованого сигналу $\omega(t) = \Phi(t) + \omega c$, то формулу для знаходжувача можна переписати як

$$\Psi_{nc}(t) = \left(\int_0^T r(t)\cos[\omega(t)\cdot t)]\,dt\right)^2 + \left(\int_0^T r(t)\sin[\omega(t)\cdot t]\,dt\right)^2.$$

У такому вигляді формула показує, що функція залежить тільки від частоти детектованого сигналу, але не від значення його фази.

2. Когерентний знаходжувач.

У цьому випадку передбачається що $\Lambda_m \to \infty$, тобто це випадок, коли інформація про фазу нам доступна з нескінченною точністю. В цьому випадку формула 3.6 напряму непридатна, однак потрібно врахувати, що завдання фактично стає задачею виявлення повністю відомого сигналу. В цьому випадку, знаходжувач буде мати наступний вигляд:

$$\Psi_c(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}L_c = \int_0^T r(t)\cos[\omega_c t + \Phi(t)]\,dt \gtrless \gamma_c,$$

тобто знаходжувач є лінійним корелятором з коливанням, синхронізований з детектованим сигналом.

Неважко помітити, що в обох випадках пороги γ_{nc} і γ_c вже не фіксовані, а залежать від рівня сигналу та шуму. Один з простих методів, що дозволяє цю залежність подолати - оцінити дисперсію шумовий складової детектуючої функції як середнє квадрата відхилення $\sigma^2(t)$ значень самих функцій $\Psi_{nc}(t)$ і $\Psi_c(t)$ на ділянці, на якій проводиться пошук відповіді зонда.

За правилом трьох сігм поріг можна буде записати так:

$$\gamma_{nc} = 3\sigma_{\Psi_{nc}}(t)\ , t \in [T_1, T_2],$$
$$\gamma_c = 3\sigma_{\Psi_c}(t)\ , t \in [T_1, T_2],$$

де T_1 і T_2 – границі ділянки пошуку.

Знаючи, що відповідь зонда добре локалізована, при малих співвідношеннях сигнал/шум, коли шумова складова порівняна з відповіддю зонда, внесок відповіді в значення $\sigma^2(t)$ буде незначним. При великих співвідношеннях сигнал-шум внесок вже буде відчутний, однак, при ширині відрізка аналізу як мінімум в три ширини відповіді, навіть завищена оцінка дисперсії дасть нам точку відсікання нижче рівня відповіді зонда.

Із загальних міркувань очевидно, що когерентний знаходжувач повинен мати кращі показники, так як він використовує додаткову інформацію про сигнал - інформацію про фазу. Однак необхідно зауважити, що інформація про фазу на практиці не точна, а значить припущення $\Lambda_m \to \infty$ взагалі кажучи не виконується. Більше того - чим менше співвідношення сигнал/шум, тобто чим більше ми переходимо в область, де когерентний корелятор має перевагу, тим менш точно виконується ця умова. А раз вихідні умови виконуються погано, то треба чекати деградацію характеристик знаходжувача. Таким чином, ми маємо ефект, який може нейтралізувати

перевагу когерентного детектора при низьких співвідношеннях сигнал/шум або навіть перетворити перевагу в відставання.

Аналогічні міркування застосовані до некогерентного знаходжувача, оскільки детектуюча функція залежить від поточної частоти сигналу, оцінка якої стає чим менш точною, тим менше співвідношення сигнал/шум.

Для з'ясування впливу описаного ефекту, був проведений обчислювальний експеримент, в ході якого обчислювалися нормовані значення усереднених функцій Ψ_{nc} і Ψ_c. Нормування вироблялося так, щоб обидві функції приводилися до виду, де мінімум відповідає одиниці, а максимум - нулю. При такому приведенні, значення 1,0 буде відповідати найбільшій відповідності гіпотези H_1, тобто наявності відповіді зонда, в той час як нульове значення відповідає H_1, тобто відсутності відповіді. Усереднення обох функцій Ψ_{nc} і Ψ_c вироблялося протягом певної кількості експериментів.

Експеримент проводився з використання ЕОМ. Обидва знаходжувачі - когерентний і некогерентний - використовували вихід МАЙ-ФАПЧ як джерело оцінки фази сигналу та його поточної частоти. З метою отримання достовірного порівняння, обидва алгоритми обробляли абсолютно ідентичні вхідні дані, змодельовані на ЕОМ з використанням штатного генератора псевдовипадкових чисел для моделювання шуму.

Результати експерименту представлені на рис. 3.3. Кількість експериментів, за які було вироблено усереднення функцій виявлення вказано на заголовках.

Як видно з графіків, когерентний знаходжувач виділяє відповідь зонда краще при низьких співвідношеннях сигнал-шум. При -8 дБ некогерентний знаходжувач дає неправдиві значення відповіді зонда (у правому кутку графіка), у той час як когерентний алгоритм видає чіткий пік. Схожа картина повторюється і при меншому співвідношенні сигнал / шум в -11 дБ. У ході експериментів, був відзначений стабільний відрив порогу виявлення когерентного детектора на 3-4 дБ.

Для порівняння, був так само проведений експеримент, в якому некогерентний знаходжувач працював на фіксованій частоті, відповідній модульованому сигналу між імпульсами телеметрії. Таким чином забирається залежність від ω у формулі 3.8, а значить робота некогерентного алгоритму не буде залежати від ефективності МАЙ-демодулятора.

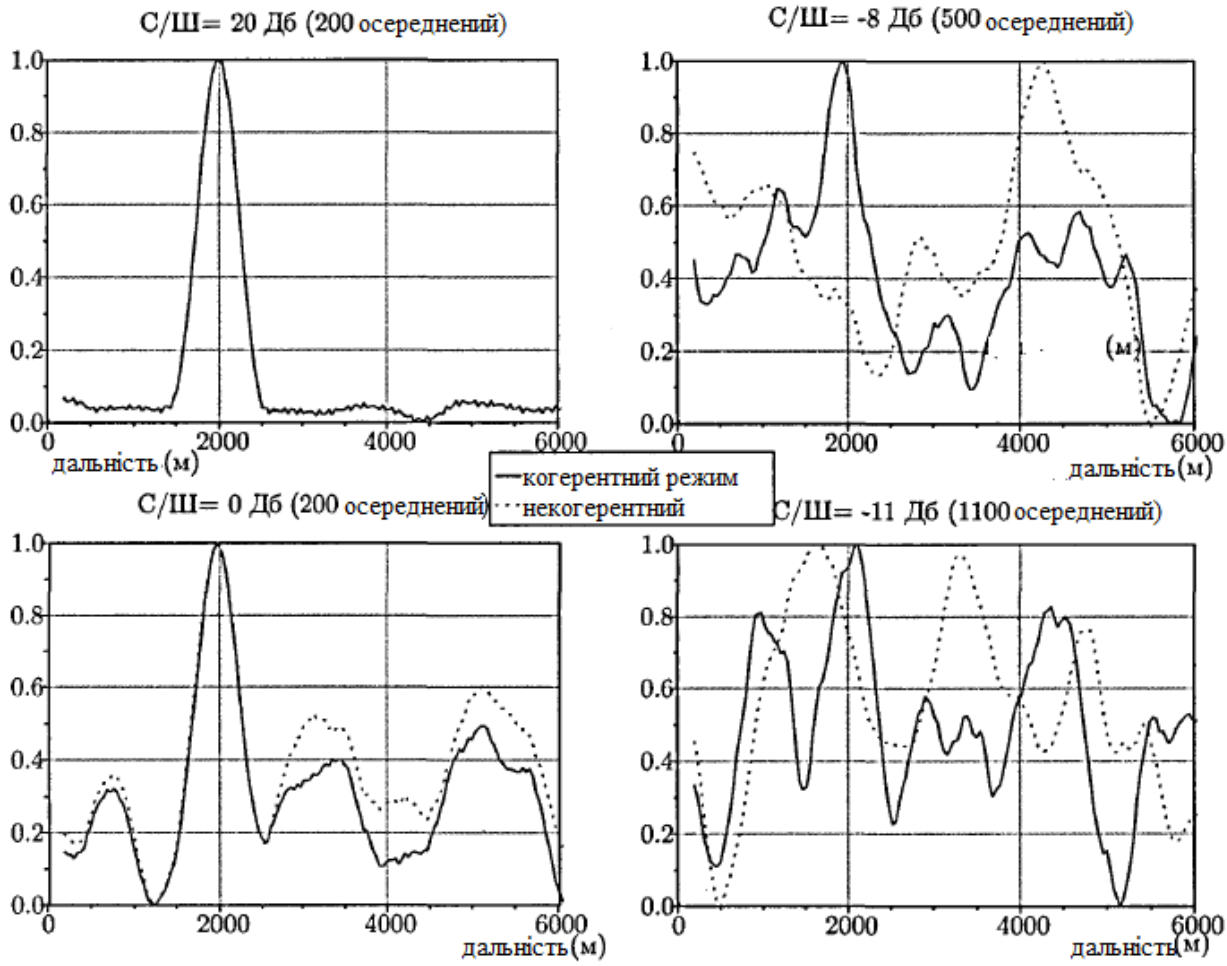


Рисунок 3.3 - Порівняння когерентного та некогерентного знаходжувачів (відповідь зонда на 2000 м)

В той же час, знаходжувач більшу частину часу, тобто між відносно короткими імпульсами телеметрії, буде синхронізований по частоті з сигналом, що теоретично призведе до найкращого можливого для

некогерентного знаходжувача порогу виявлення. Результати відображені на рис. 3.4.

З графіка видно, що результат суттєво не змінився, в порівнянні з першим експериментом. Це показує, що навіть виключення впливу помилки визначення частоти сигналу не послабляє переваги когерентного детектора, що остаточно підтверджує перевагу вибору саме когерентного алгоритму для практичної реалізації.

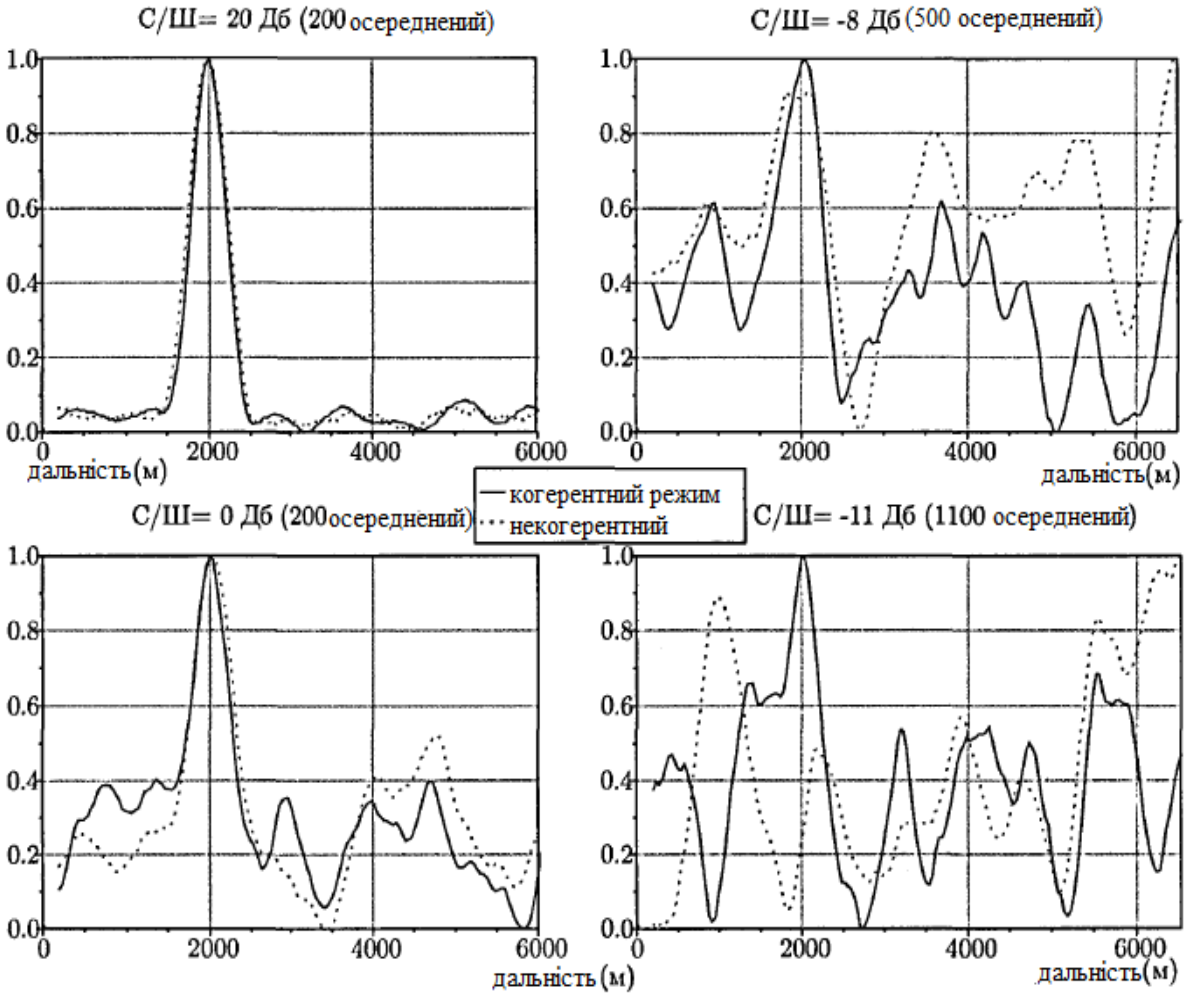


Рисунок 3.4 - Порівняння когерентного та некогерентного знаходжувачів у випадку фіксованої частоти (відповідь зонда на 2000м)

ВИСНОВКИ

Запропонована концепція побудови метеорологічної автоматизованої радіолокаційної системи (МАРС) для України. Визначені задачі, шляхи їх розвитку.

Зформований системний підхід для побудови інформаційної радіолокаційної системи моніторингу повітря.

Виконана оптимізація побудови системи моніторингу за кількістю метеорологічних РЛС, за їх потужністю, за просторовою прив'язкою, за мінімумом перекриття зон спостереження, щільностю радіолокаційного поля.

МАРС треба будувати, коли економічні умови в країні вимагають оперативного застосування у виробничій діяльності споживачів радіолокаційної метеорологічної інформації про небезпечні явища й опади. МАРС повинна повністю задовольняти вимогам державних і приватних споживачів.

Проаналізована можливість використання допплерівських РЛС для вимірювання метеорологічних параметрів гідрометеооб´єктів.

Визначення поляризаційної характеристики відбитих сигналів для вимірювання параметрів метеооб´єктів.

Виконана оцінка точності алгоритмів інтенсивності опадів на базі поляризаційних вимірювань.

Проведений аналіз можливості цифрової обробки сигналів на проміжній частоті.

Розглянуті існуючі методи демодуляції сигналів телеграми.

Розроблений алгоритм виділення сигналу за дальністтю. Проведена оптимізація сигналу радіозонду за дальністтю.

МАРС доцільно створювати на базі метеорологічного радіолокатора з доплеровским режимом роботи в смугах частот C і S, що не обслуговується в місці установки, має повністю дистанційно контрольовані технічні параметри

за рахунок застосування вбудованих у системи МРЛС датчиків.

При плануванні створення національної МАРС рекомендується для розміщення МРЛС по території країни розглядати трикутну або шестикутну сітку різної мірності.

При створенні МАРС і центру збору її даних визначаються:

– її фізична й логічна структура,
– гарантований споживачам каталог продуктів мережі,
– перелік загальносітьових функцій.

При адміністративному керуванні МАРС у національному (регіональному) центрі збору необхідно передбачити програми конфігурації, контролю, статистики, керування радіолокаторами, ведення каталогів продуктів.

Для збору й поширення інформації МАРС повинна використовувати високошвидкісні канали зв'язку, єдині формати повідомлень і протоколи передачі з урахуванням рекомендацій ВМО.

Географічна сітка для стикування інформації МАРС для більшості споживачів повинна бути заснована на полярній стереографічній проекції.

Для розробки методів моніторингу в реальному масштабі часу, складання поточного прогнозу, і сполучення в єдиному центрі даних різнорідних методів спостережень за погодою повинні бути розроблені й перевірені в оперативному режимі роботи спеціальні програми для ЕОМ. Вони дозволять синоптику в інтерактивному режимі повністю використовувати для прогнозу потенціал усіх видів спостережень (супутникових, радіолокаційних, наземних, спеціальних), і в першу чергу радіолокаційних. У процесі створення МАРС обов'язкове сполучення радіолокаційної й супутникової інформації про хмарність і опади для заповнення супутниковою інформацією районів, де ще немає радіолокаційної інформації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Звіт про НДР «Визначення вимог щодо побудови системи одержання і обробки вимірювальної інформації з метою моніторингу довкілля» каф. АСМНС м. Одеса: ОДЕКУ. – 2013р. – 299с.

2. Звіт про НДР «Оцінка енергетики та геометрії радіолокаційної інформаційної системи моніторингу навколишнього середовища » каф. АСМНС м. Одеса: ОДЕКУ. – 2014 р. – 249с.

3. Durand R.L. Weather radar systems: Radar compositing now makes the big picture even bigger. – COST 73, 1989, p. 153 – 162.

4. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 321 с.

5. Брылёв Г.Б., Николаев П.Н., Фогель И.А. Применение метеорологических радиолокаторов (МРЛ) штормооповещения в СССР. – Л: Гидрометеоиздат, 1979, с. 1 – 15.

6. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 РД52.04.320.91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1993. – 360 с.

7. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 344 с.

8. Код для сообщения данных метеорологических наблюдений, проводимых с помощью наземных радиолокаторов (международная форма FM20-V RADOB). – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 24 с.

9. Федоров Ю.К. Программная реализация алгоритмов стыковки данных МРЛ. – Труды ГГО, 1976, вып. 383. – с. 39 – 44.

10. Федоров Ю.К. Способ автоматической стыковки данных метеорологических радиолокаторов. – Труды Гидрометцентра СССР, 1973, вып. 102. – с. 62 – 74.

11. Брылёв Г.Б., Завдовьев А.В. Методические аспекты обработки информации комплексов МРЛ-ААОМ с помощью ЭВМ. – В сб.: Радиолокационная метеорология. – Гидрометеоиздат, 1981. – с. 15 – 23.

12. Collier C.G. United Kingdom weather radar status report. Measurement of precipitation by radar. – COST Project 72 – Proceedings of a final seminar, 1985.

13. Collier C.G., Fair C.A., Newsome D.H. International weather radar networking in Western Europe. – Boston, AMS, 1988, v. 69, p. 16 – 21.

14. Collier C.G., James P.K. On the development of an integrated weather radar processing system. Proc. 23d Conference on radar meteorology. – Boston, AMS, 1986, p. 95 – 97.

15. Smith A.H., Kitchen M. A review of the quality evaluation of radar rainfall measurements carried out by the UK Mel Office. – COST 75, 1999, p. 68 – 81.

16. Fair C.A., James P.K., Larke P.R. The United Kingdom weather radar network. – COST 73, 1989, p. 145 – 152.

17. Working group on regional procedures for the transmission of digitized meteorological radar data on the GTS. – COST 72, Final Report, 1986, p. 26.

18. Browning K.A. Weather radar and FRONTIERS. – Weather, 1986, v. 41, p. 9 – 16.

19. Edwards M.R.A., Lissaman V.A. Weather radar performance optimization carried out by the UK Met Office. – COST 75, 1999, p. 165 – 178.

20. Brownscombe J.L., Hems B.D. Comparison of radar precipitation measurements with a dense network of daily rain gauges – Application to radar network. – COST 73, 1989, p. 433 – 442.

21. Anderson T., Lindstrom B., Ullerstig A. Operative experience of a development plans for SMHIs Doppler weather radar. – COST 72, 1985, p. 199 – 221.

22. Berglund T., Aberg P. Flight weather forecasts based on modern radar

presentation. – COST 72, 1985, p. 107 – 109.

23. Gustafsson S.G., Ekengreen B. Weather radar networking. – COST 72, 1985, p. 124 – 131.

24. Isaksson B. Design of radar signal processors for operational Doppler weather radar. – COST 73, 1989, p. 293 – 299.

25. King R. Weather radar status report. – COST 72, 1985, p. 173 – 174.

26. King R. Operational experience with the Finnish weather radar network. – COST 73, 1989, p, 87 – 96.

27. Koistinen J., King R., Harju A. Monitoring and assessment of systematic measurements errors in the NORDRAD network. – COST 75, 1999, p. 62 – 67.

28. Nilsson S., Brunsberg J.O. Promis 600: an operational system for very short range weather forecasting in Sweden. – COST 73, 1989, p. 393 – 402.

29. Overgaard S. A Nordic weather radar network. – COST 73, 1989, p. 47 – 58.

30. Overgaard S., Wienberg E. Distribution of weather radar images to agricultural end users. – COST 73, 1989, p. 567 – 580.

31. Meischner P. The potential of advanced weather radars in Europe. – COST 75, 1999. p. 24 – 34.

32. Martinez C. The Spanish weather radar network project. – COST 72, 1986, p. 191 – 199.

33. Austin G.L., Kilambi A., Biron H.-P. The operational use of a high speed interactive radar data processing system (RDPS). Part I. A technical description. – COST 73, 1989, p. 229 – 236.

34. Biron H.-P., Austin G.L., Kilambi A. The operational use of a high speed interactive radar data processing system. Part II. – COST 73, 1989, p. 415 – 421.

35. Camacho Ruiz J.L. Weather radar observations in Spain: operational limitations. – COST 75, 1999, p. 593 – 601.

36. Svabik O. Documentation of severe weather: thunderstorm and hail

frequency in Europe. – COST 75, 1999, p. 357 – 363.

37. Goddard D.M., Conway B.J. Near-real-lime precipitation analysis ever Europe. – COST 73, 1989, p. 331 – 340.

38. Collier C.G. The development of a weather radar network in Western Europe. – COST 73, 1989, p. 3 – 16.

39. Кольер К.Г. Создание сети метеорологических радиолокаторов в Европе – проект COST-73 Комиссии европейского сообщества. – Бюллетень ВМО, 1991, т. 40, № 4, с. 445 – 451.

40. Yoshino F., Ichimya K., Kanbayashi Y., Yamaguchi T., Shirakawa N. Overview of radar networking by MOC. Japan and its data dissemination system (FRICS). – COST 73, 1989, p. 123 – 132.

41. Serafin R.J., Wilson J.W. Operational weather radar in the U.S.: Progress and Opportunity. – COST 75, 1998, p. 35 – 61.

42. Curtis J., Brodzik S., Edmon H., House R., Yuter S. Mountain Zebra: real-lime archival and 4D visualization of radar volumes over complex terrain. – COST 75, 1998, p. 297 – 306.

43. Golden J.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. – COST 73, 1989, p. 17 – 36.

44. Ahnert P.R., Hudlow M.D., Johnson E.R., Greeve D.R., Dias M.P.R. Proposed «on-site» precipitation processing system for NEXRAD. – Preprints 21st Conf. Radar Meteorology, AMS, 1983, p. 378 – 385.

45. Schlatter T.W. An integrated approach to the display of Doppler radar and other meteorological data. – COST 73, 1989, p. 317 – 330.

46. Keeler R.J. Data quality enhancements for an open system NEXRAD. –COST 75, 1998, p. 124 – 135.

47. Абшаев М.Т., Вовшин Б.М. Вылегжанин И.С. и др. Доплеровский метеорологический радиолокатор с поляризационной селекцией сигнала для исследования облаков и осадков. Сборник докладов 23-й Всероссийской научной конференции „Распространение радиоволн”, Йошкар-Ола, 2011, Т. 1. – с.107 – 110.

48. Ryzhkov A., Diederich M., Zhang P., Simmer C. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. Submitted to the Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, February 13. 2013.

49. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации // Под ред. Г.Г.Щукина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 375 с.

50. Newsome D.H. Practical applications of weather radar data in Europe. –COST 73, 1979, p. 445 – 458.

51. Мищенко Ю.А. Зоны обнаружения. – М.: Воениздат, 1963. – 96 с.

52. Clift G.A. Use of radar in meteorology. – WMO technical note, 1985, No. 625, 90 p.

53. Жуков В.Ю., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Результаты опытной эксплуатации малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» // Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля окружающей среды». – СПб.: 2012, Т. 1, с. 387 – 394.

54. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы. – Муром.: ИПЦ МИВлГУ, 2009. – 166 с.

55. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

56. Флейшман Б.С. Основы системологии. – М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.

57. Черняк Ю.И. Системный аналих в управлении экономикой. – М.: Экономика, 1975. – 192 с.

58. Квейд Э. Анализ сложных систем: Пер. с англ. // Под. ред. И.И. Ануреева, И.М. Верещагина. – М.: Сов. радио, 1969. – 520 с.

59. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971. – 367 с.

60. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф.

Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 231 с.

61. Браузер метеостанций [Электронный ресурс] – Режим доступа: http:// meteo.geofaq.ru/synop_map.php.

62. Геометрия: Учебник для 7 – 9 классов общеобразовательных учреждений. / Л.С. Атанасян, В.Ф. Бутузов, С.Б. Кадомцев и др. – 5-е изд. – М.: Просвещение, 1995. – 335 с.

63. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т.А. Базлова, Н.В. Бочарников, Г.Б. Брылёв [и др.]; под ред. Г.Б. Брылёва. – С.П-б.: Гидрометеоиздат, 2002. – 332 с.

64. IPCC. 2007. Climate change. 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers). Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. – 2007. – 996 p.

65. Данова Т.Е. Пространственно-временное распределение осадков на территории Украины в условиях современного изменения климата / Т.Е. Данова, Т.Л. Касаджик // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (серія: географія, екологія, геологія), Харків – 2013. – Вип. 38 – с. 101 – 109.

66. Опасные явления погоды на Украине / Логвинов К.Т., Бабиченко В.Н., Кулаковская М.Ю. / Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 236 с.

67. Данова Т.Е. Влияние современных климатических изменений на динамику мезомасштабных процессов // «Известия вузов. Северо-Кавказский регион». Естественные науки. Метеорология. Экология. №3. 2013. с. 79 – 83.

68. Данова Т.Е., Перелыгин Б.В. Повторяемость стихийных явлений погоды в районе Северного побережья Черного моря. Сборник трудов второй международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». Ставрополь, 21-25 сентября 2015 г. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. с. 153 – 156.

69. Павлов И. Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. -— 432 с.

70. Рыжков А. В. Поляризационная селекция в доплеровких метеорологических РЛС.— Труды П О, 1991, вып. 535, с. 118—124.

71. Рыжков А. В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации. - Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4, с. 18—28.

72. Ryzkov A., Hydak D., Scott J. A new polarimetric scheme for attenuation correction at C-band. — ERAD 2006, p. 29 -32.

73. Stagliano J., Helvin J., Alford J., Nelson D. Measuring the linear depolarization ratio simultaneously with the other polarimetric variables. — ERAD 2006, p. 80—83.

74. Hubbert J. C., Pratte F., Ellis, Dixon M. Differential power calibration for weather radar. — ERAD 2006, p. 102—104.

75. Baldini L., Gorguccil E., Chandrasekar V. Hydrometeor classification methodology for C-band polarimetric radars. — ERAD 2004, p. 62—65.

76. С. Л. Марпл-мл., Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1990. – 123 с.

77. Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory, Prentice Hall PTR March 26, 1993. – 254 c.

78. Monson H. Hayes, Statistical Digital Signal Processing and Modeling, Wiley, March 1, 1996. – 67 p.

79. R. R. Anderson, W.R. Bennett, J. R. Davey, and J. Salz. Differential detection of binary FM, Bell Sysr. Tech. J., vol. 44, 1965. - pp. 111-170.

80. T. Masamura, S. Samejima, Y. Morihiro, and H. Fuketa, Differential detection of MSK with nonredundant error correction. IEEE Trans. Conimun., vol. COM-26, 1978. - pp. 912-918.

81. Heinrich Meyr, Gerd Ascheid, Digital Communication Receivers, Phase-, Frequency-Locked Loops, and Amplitude Control, Wiley-Interscience, March 1990. – pp. 245-301.

82. C. N. Kelly and S. C. Gupta, The Digital Phase-Locked Loop as a Near-Optimum FM Demodulator, IEEE Transactions on Communications, June 1972. – pp. 120-189.

83. Ara Patapoutian, On Phase-Locked Loops and Kalman Filters, IEEE Transactions on Communications, vol 47, no. 5, May 1999. – pp. 34-65.

84. D. R. Polk, S. C. Gupta, Quasi-Optimum Digital Phase-Locked Loops, IEEE Transactions on Communications, Jan 1973. – pp. 76-81.

85. A. P. Sage and C. C. I. White. Optimum system control. Prentice-Hall Inc., Englewood Clis, N.J., 2nd edition edition, 1977. – pp. 25-36.

86. Alan L. McBride, On Optimum Sampled-Data FM demodulation, IEEE Transactions on Communications, no. 1, January 1973. - pp. 40-50.

87. Ефимов А. А., Принцип работы аэрологического информационно-вычислительного комплекса АВК-1, Московский гидрометеорологический техникум, 1989. – 76 с.

88. H. Meyr, G. Ascheid, Synchronization in Digital Communications, vol 1, Wiley, New York, 1990. – pp. 56-78.

89. F. M. Gardner, Phaselock Techniques, Wiley, New York, 1979. – pp. 145-201.

90. John L. Stensby, Phase-Locked Loops: Theory and Applications, CRC, June 19, 1997. – pp. 245-265.

91. P. V. Brennan, Phase-Locked Loops: Principles and Practice, McGraw-Hill Professional, May 1, 1996. – pp. 45-67.

92. Katsuhisa Furuta, State Variable Methods in Automatic Control, John Wiley & Sons, October 26, 1988. – pp. 89-120.

93. Sage, Andrew P., and Melsa, Estimation Theory with Applications to Communications and Control, McGraw-Hill Book Co., 1971. – pp. 89-112.

94. Harry L. Van Trees, Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I, Wiley-Interscience, Reprint edition, September 27, 2001. – pp. 34-46.

95. Г. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1, «Сов. радио», М., 1972. – 167 с.

96. Г. Ван Трис. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 2, «Сов. радио», М., 1975. – 78 с.

97. Alain Blanchard, Phase-Locked Loops: Application to Coherent Receiver Design, Krieger Pub Co, June 1, 1976. – pp. 127-135.

98. Heinrich Meyr, Gerd Ascheid, Digital Communication Receivers, Phase, Frequency-Locked Loops, and Amplitude Control, Wiley-Interscience, March 1990. – pp. 154-176.

99. Randy A. Freeman, Petar V. Kokotovic, Robust Nonlinear Control Design : State-Space and Lyapunov Techniques (Systems & Control: Foundations & Applications), Birkhauser, July 30, 1996. – pp. 87-105.

100. Horacio J. Marquez, Nonlinear Control Systems : Analysis and Design, Wiley-Interscience, April 25, 2003. – pp. 56-76.

101. John J. D'Azzo, Linear Control System Analysis and Design: Fifth Edition, (Control Engineering, 14), CRC, August 1, 2003. – pp. 78-111.