

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

О. С. Лімонов, Т. М. Пустовіт, К. О. Дяченко

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Конспект лекцій

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2015

ББК 32.95
Л 58
УДК 55.58.85

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 5 від 26. 02. 2015 р.)

О. С. Лімонов, Т. М. Пустовіт, К. О. Дяченко

Автоматизовані системи моніторингу навколишнього середовища: конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2015. 127 с.

В конспекті лекцій представлені автоматизовані метеорологічні радіолокаційні станції, їх основні параметри, автоматизований метеорологічний комплекс «Метеоячейка», доплерівські метеорологічні радіолокатори, автоматизований метеорологічний радіолокатор «Метеор – Метеоячейка», способи обробки радіолокаційної метеорологічної інформації, експлуатація та калібрування апертури метеорологічних радіолокаторів.

Конспект лекцій призначений для магістрів, що навчаються за спеціальністю «Метеорологія», а також може бути корисним для фахівців в галузі технічних систем моніторингу навколишнього середовища комп'ютерного, гідрометеорологічного та екологічного профілю.

ISBN 978-966-186-003-1

© Лімонов О. С., Пустовіт Т. М., Дяченко К. О., 2015
© Одеський державний екологічний університет, 2020

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
1 АВТОМАТИЗОВАНІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ РАДІОЛОКАЦІЙНІ СТАНЦІЇ.....	7
1.1 Основні параметри метеорологічних радіолокаторів.....	7
1.1.1 Загальні вимоги до метеорологічних радіолокаторів.....	7
1.1.2 Автоматизація некогерентних метеорологічних радіолокаторів.....	8
1.2 Допплерівський (когерентний) метеорологічний радіолокатор...	11
1.2.1 Обов'язкові етапи автоматизованої обробки.....	11
1.2.2 Допплерівський метеорологічний радіолокатор.....	12
1.3 Загальні параметри метеорологічного радіолокатора.....	16
1.3.1 Таблиці параметрів метеорологічного радіолокатора.....	16
1.3.2 Аналіз таблиць.....	18
2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС «МЕТЕОЯЧЕЙКА».....	20
2.1 Загальні відомості про автоматизований метеорологічний комплекс «Метеоячейка».....	20
2.1.1 Призначення та склад.....	20
2.1.2 Пристрої автоматизованого метеорологічного комплексу.....	22
2.2 Функціональні можливості автоматизованого метеорологічного комплексу «Метеоячейка».....	23
2.2.1 Загальні можливості.....	23
2.2.2 Додаткові можливості.....	27
2.3 Розрахунок метеорологічного потенціалу МРЛ-5.....	32
2.3.1 Розрахунок потенціалу за керуючим документом (Керівництво за проведенням спостережень з метеорологічного радіолокатора).....	32
2.3.2 Розрахунок за вказівкою.....	33
2.4 Калібрування автоматизованого метеорологічного комплексу...	35
2.4.1 Перевірка автоматизованого метеорологічного комплексу.....	35
2.4.2 Задача «Калібрування АРМ-ІН».....	37
2.5 Зіставлення даних гідрометеостанції з даними автоматизованого метеорологічного комплексу.....	43
2.5.1 Виправданість.....	43
2.5.2 Достовірність.....	44
3 ДОППЛЕРІВСЬКІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ РАДІОЛОКАТОРИ.....	46
3.1 Оглядний доплерівський метеорологічний радіолокатор WSR-88D Nexrad.....	46
3.1.1 Загальні відомості.....	46

3.1.2	Основні технічні характеристики.....	48
3.1.3	Алгоритми.....	53
3.2	Метеорологічний доплерівський радіолокатор METEOR 500C	55
3.2.1	Загальна структура та основні характеристики.....	55
3.2.2	Процесор.....	59
4	АВТОМАТИЗОВАНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС «МЕТЕОР-МЕТОЯЧЕЙКА».....	61
4.1	Особливості доплерівських метеорологічних радіолокаційних вимірювань.....	61
4.1.1	Принцип вимірювання доплерівської швидкості.....	61
4.1.2	Обмеження радіолокаційних доплерівських вимірювань.....	64
4.2	Когерентний прийом радіолокаційних сигналів.....	67
4.2.1	Когерентність.....	67
4.2.2	Когерентний прийом радіолокаційних сигналів.....	72
4.3	Первинна доплерівська обробка.....	74
4.3.1	Мета первинної обробки.....	74
4.3.2	Розрахунок параметрів спектру.....	75
4.3.3	Метод комплексної автоковаріації (пульспарний).....	79
4.4	Вимірювання відбиваності порогів обробки.....	81
4.4.1	Відбиваність.....	81
4.4.2	Пороги обробки.....	83
4.5	Фільтрація первинних даних.....	85
4.5.1	Фільтри придушення сигналів від местників.....	85
4.5.2	Видалення спеклів.....	87
4.6	Режими обробки.....	89
4.6.1	Фіксований і стандартний режими.....	89
4.6.2	Завершення процесу первинної обробки.....	91
4.7	Характеристики автоматизованого метеорологічного комплексу «Метеор-Метеоячейка».....	93
4.7.1	Склад комплексу.....	93
4.7.2	Вбудовані системи автоматизованого метеорологічного комплексу.....	96
4.8	Принципи роботи автоматизованого метеорологічного комплексу.....	98
4.8.1	Сканування об'єму простору.....	101
4.9	Технічні характеристики.....	101
4.9.1	Зведення робочих характеристик і оцінка метеорологічної ефективності.....	103
4.10	Метеорологічний потенціал МРЛ-5.....	105
4.10.1	Розрахунок потенціалу.....	106
4.11	Обробка інформації цифрових приймачів GDRX.....	108
4.11.1	Схема руху даних, що опрацьовуються.....	108

4.11.2	Режими обробки.....	110
4.12	Вторинна обробка.....	112
4.12.1	Режим «Вимірювання відбиваності».....	112
4.12.2	Режим «Допплерівська швидкість».....	113
4.12.3	Ймовірнісний характер прийняття рішення про небезпечні явища.....	114
4.13	Калібрування приймально-вимірювальних трактів автоматизованого метеорологічного комплексу «Метеор-Метеоячейка».....	115
4.13.1	Калібрування приймально-передавальної системи.....	115
4.13.2	Калібрування процесора сигналів.....	117
4.13.3	Розрахунок радіолокаційної постійної.....	120
	ЛІТЕРАТУРА.....	125

ПЕРЕДМОВА

Під терміном моніторинг навколишнього середовища розуміється комплекс заходів, які передбачають спостереження за порушенням екологічного стану.

Автоматизована система моніторингу навколишнього середовища забезпечує повну програму спостережень, має ієрархічну дворівневу структуру. На нижньому рівні розташовані прилади і датчики, а також передавальна апаратура програмно-апаратних засобів. Верхній рівень утворений центральним комп'ютером системи і приймальною апаратурою (центральний пункт збору і обробки інформації). Зв'язок між рівнями системи здійснюється по комутованих телефонних дротах. Передачу інформації зі стаціонарних постів здійснює комплекс програмно-апаратних засобів для збору та видачі вихідної інформації в зручному вигляді для оператора центрального пункту.

Автоматизовані системи моніторингу навколишнього середовища широко використовують в радіолокаційній метеорологічній системі для одержання та обробки гідрометеорологічної інформації.

В конспекті лекцій розглядаються автоматизовані метеорологічні радіолокаційні станції, автоматизований метеорологічний комплекс «Метеоячейка», доплерівські метеорологічні радіолокатори, способи одержання та обробки радіолокаційної та метеорологічної інформації.

Конспект лекцій призначений для магістрів та аспірантів.

1 АВТОМАТИЗОВАНІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ РАДІОЛОКАЦІЙНІ СТАНЦІЇ

1.1 Основні параметри метеорологічних радіолокаторів

1.1.1 Загальні вимоги до метеорологічних радіолокаторів

Метеорологічний радіолокатор (МРЛ) призначений для визначення метеорологічних цілей та оперативного представлення кількісної інформації про них споживачу. Саме тому метеорологічні радіолокаційні станції (МРС) є одночасно і інформаційно-вимірювальними системами.

Як метеорологічні цілі, хмари та опади мають такі особливості:

- значні вертикальні та горизонтальні розміри (просторове продовження цілі);
- мала швидкість переміщення (від 1 до 70 км/хв), на відміну від літаків;
- значна просторово-часова мінливість внутрішньої та зовнішньої структури купчасто-дощових хмар (наприклад, зміна над площею 5x5 км висоти верхньої межі радіолуни S_b складає у 80% випадків $\pm 0,1$ км/хв, а у 20% випадків більше $\pm 0,2$ км/хв; зміна відбиття у 85% випадків ± 2 дБз/хв, у 15% випадках $> \pm 2$ дБз/хв);
- великий діапазон вимірювань відбиття при одному циклі спостережень в радіусі максимального огляду (в межах до 100 дБз).

В процесі оперативної роботи потрібен постійний контроль функціонування таких систем та моніторинг їх основних параметрів: імпульсної потужності передавача, чутливості приймача, збереження каліброваних характеристик (стабільності) приймально-вимірювального тракту.

В радіусі свого огляду МРЛ здійснює:

- виявлення хмар та зв'язаних з ними небезпечних явищ;
- їх розпізнавання до заданих алгоритмів та за необхідними споживачу класифікаціям або загальноприйнятими типами явищ;
- визначення для кожного явища місцезнаходження, геометричних розмірів, інтенсивності, швидкості та напрямку руху, тенденції розвитку;
- вимірювання інтенсивності та кількості опадів в оптимальних умовах (тобто в радіусі огляду, при якому верхня межа зони огляду МРЛ знаходиться нижче висоти рівня нульової ізотерми) і неоптимальних умовах;
- визначення висоти нульової ізотерми всередині потужних хмар і в купчасто-дощових хмарах на стадії розпаду;
- визначення доплерівських швидкостей в хмарах та опадах;
- визначення фазового стану відбиваючих об'єктів.

Періодичність відновлення інформації МРЛ в радіусі огляду змінюється в широких межах, але для переважної більшості споживачів вона складає від 3 до 15 хвилин.

Точність вимірювання висоти верхньої межі хмар визначається потенціалом МРЛ та шириною променя антени [1].

1.1.2 Автоматизація некогерентних метеорологічних радіолокаторів

Фізичні основи. Для автоматизованої обробки відбитих сигналів необхідно аналогову інформацію перевести в цифрову. З цією метою весь сканований МРЛ обсяг простору ділять на елементарні лунки (біни, або інакше дискрети дальності). Нижня межа біна дорівнює імпульсному об'єму, тобто він обмежений шириною діаграми направленості антени (ДНА) МРЛ і половиною тривалості зондуючого імпульсу. Для зменшення кількості цифрових даних за декількома елементами дальності можна побудувати осередок дальності. На рис. 1.1 показано, як сектор в 1° ділиться на елементи дальності, об'єднані в осередки дальності, що в загальному утворює полярний осередок дальності, розмір якого визначає початковий дозвіл. Чим більше віддалення від МРЛ, тим крупніші осередки. Це має значення при переході від полярних координат до прямокутних, в яких осередки мають однаковий розмір на всіх видаленнях від МРЛ.

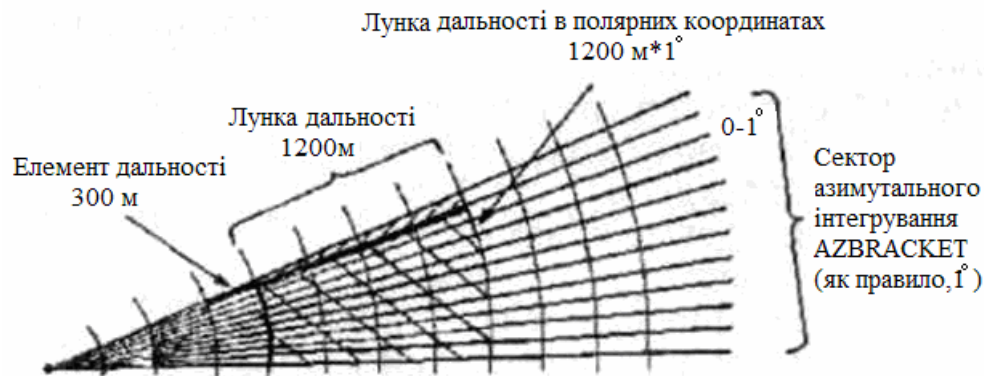


Рисунок 1.1 - Лунка дальності та азимутальний сектор

Прийнятий сигнал усереднюється за дальністю в декількох послідовних елементах дальності і утворює лунку дальності. Отриманий результат для лунки з усередненням за дальністю знову усереднюється за азимутом шляхом послідовних вимірювань при русі антени приблизно на одну ширину променя антени. Первісне усереднення за дальністю може здійснюватися апаратурою або комп'ютерною програмою, а осереднення за азимутом (тобто за часом) - комп'ютерною програмою.

Типова функціональна схема системи автоматизації МРЛ наведена на рис. 1.2.

Прийнятий на антену МРЛ високочастотний сигнал від метеоутворень після перетворень в приймальному тракті МРЛ осереднюється за дальністю та за азимутом при обертанні антени МРЛ. Осереднення відображених сигналів і розрахунок відбиття Z відбуваються на елементі дальності ΔR за площею, яка дорівнює:

$$\Delta R\theta = \Delta R(\omega t / 360), \quad (1.1)$$

де θ - ширина променя антени;
 ω - швидкість обертання антени.

Потім ці результати вимірювання Z переводяться з полярних координат в декартові, при цьому сторона квадрата може встановлюватися на 1, 2, 4 або 5 км, а дозвіл за вертикаллю приймається таким, що дорівнює 0,5, 1 або 2 км. Виміряне за викладеним алгоритмом відбиття Z над квадратом обраних розмірів переводиться за заданим співвідношенням $Z - 1$ в інтенсивність опадів, яка і потрібна споживачам.

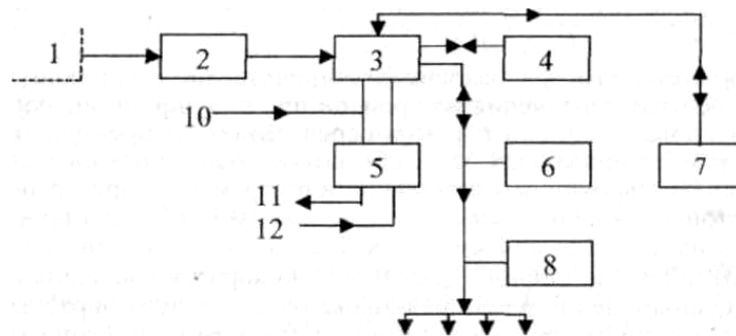


Рисунок 1.2 - Типова функціональна схема системи автоматизації МРЛ:

1- вихід логарифмічного приймача МРЛ; 2 - блок попереднього інтегрування і осереднення; 3 – електронна обчислювальна машина ЕОМ; 4 - блок запису даних для архівації; 5 - блок сполучення ЕОМ (інтерфейс) з системою управління антеною МРЛ; 6 - телетайп або відеоконтрольний пристрій; 7 - мережа дистанційних плевіографів для калібрування радіолокаційної інформації; 8 - дисплей; 9 - до дисплеїв, друкуючих пристроїв або інших ЕОМ; 10 - сигнал від блоку синхронізації МРЛ; 11, 12 - сигнали від антени і для управління антеною МРЛ

У всьому динамічному діапазоні відбитих сигналів (до 100 дБ) необхідна точність оцінки радіолокаційного відбиття Z повинна становити 1 дБ. Розглянемо на конкретному прикладі, як ця точність досягається.

В достатньому для практичного застосування наближений відбитий від метеоутворень радіолокаційний сигнал являє собою стаціонарний

нормальний випадковий процес , $Z(t) = X(t) + iY(t)$, де $X(t)$ та $Y(t)$ - його квадратурні складові, $\bar{X} = \bar{Y} = 0$, $X^2 = Y^2 = \sigma^2$.

Після логарифмічного перетворення в приймачі МРЛ математичне очікування $10 \lg \bar{P} = -2,5$ дБ, де $\bar{P} = 2\sigma^2$ - середня потужність відбитого сигналу, а середньоквадратичне відхилення σ_{1g} , не залежить від потужності сигналу та дорівнює 5,6 дБ.

Точність вимірювання відбивання та доплерівських швидкостей визначається прийнятими системами обробки та калібрування приймально-вимірювальних трактів МРЛ.

Ймовірність радіолокаційного виявлення хмар і опадів залежить від потенціалу МРЛ, фізико-географічних умов та величини вузлів закриття антени МРЛ в місці установки.

За результатами досліджень радіус дії МРЛ-2 та МРЛ-5 при ймовірності виявлення метеооб'єктів не менше 95% становить:

- 150-200 км – C_b з грозою й градом (C_b – купчасто-дощовий);
- 90-120 км C_b і зливовим дощем та снігом;
- 50 км C_k (купчасті) без опадів (C_{ukong});
- 120 км – шарувато-дощові хмари влітку;
- 60 км – шарувато-дощові хмари взимку;
- до 60 км – облогові дрібні опади влітку;
- до 30 км – облогові дрібні опади взимку;
- до 20 км – хмари всіх форм без опадів.

Ці дані одержані для рівнинних районів Росії. Вимірювання кліматичної повторюваності хмар та опадів в інших фізико-географічних районах може призвести до збільшення або зменшення радіуса дії МРЛ.

При збільшенні потенціалу МРЛ його радіус дії збільшується. Максимальний радіус виявлення МРЛ-2 та МРЛ-5 визначається радіусом розгортки індикатора колового огляду 300 км.

Обмежувальними факторами виявлення є ефект кривизни Землі (збільшення з віддаленням від МРЛ зони радіотіні), збільшення з відстанню послаблення електромагнітних хвиль.

Дисперсія оцінки середнього рівня сигналу на виході логарифмічного приймача пропорційна величині $10 \lg |z|$, при усередненні за K_1 незалежними відліками визначається як

$$\sigma_z^2 = \sigma_{1g}^2 / K_1. \quad (1.2)$$

Реально послідовні відліки – частково корельовані.

Величину K_1 слід розуміти як еквівалентне число незалежних відліків в межах часової реалізації відбитого сигналу, що складається з K

відліків ($K_1 < K$). Час декореляції відбитих від метеоутворень сигналів складає від 3 до 15 мс. При потрібній точності оцінки $\sigma_z = 1\ddot{a}A'$ отримаємо $K_1 = 30 \dots 32 = 5.6 / \sqrt{K_1} \approx 1\ddot{a}A'$.

Загально визнано, що за умови просторової однорідності радіолуни недолік усереднення за часом при визначенні оцінки Z компенсується додатковим усередненням за простором.

Розглянемо, з якою точністю величина $10\lg|z|$ характеризує відбиття на площі 4×4 км в шарі поверхні 1-2 км за вертикаллю при частоті посилянть МРЛ 250 Гц, ширина променя $0-1^\circ$ та швидкості обертання антени 6 об/хв. Одночасно уздовж радіолокаційного променя оброблюється 1000 бінів дальності з протяжністю кожного біна (строба) 250 м. Кількість посилок у стробі (усереднення за часом) складає 8. Уздовж променя на відстані 4 км знаходяться 16 стробів, що дає $16 \times 8 = 128$ незалежних відліків, з урахуванням ширини променя їх загальна кількість у квадраті 4×4 км складає $128 \times 4 / \theta R$. Оцінка σ_z за квадратом 4×4 км в залежності від віддалення R квадрату від МРЛ наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Оцінювання σ_z

	$R, \text{ км}$							
	1	10	20	50	100	150	200	250
$(\theta, R) \text{ км}$	0,017	0,17	0,34	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25
$M = 4 \text{ км} / \theta, R$		23,5	11,8	4,7	2,35	1,56	1,18	0,94
$K = 128M$		3008	1510	600	300	200	150	120
$\sigma_2 = 5,6$		0,1	0,14	0,23	0,33	0,4	0,43	0,51

Таким чином, в усьому діапазоні дальності R величина $K_1 > 32$, що забезпечую потрібну точність оцінки $10\lg|z|$ на площі 4×4 км.

1.2 Доплерівський (когерентний) метеорологічний радіолокатор

1.2.1 Обов'язкові етапи автоматизованої обробки

Існує три обов'язкові етапи обробки при автоматизації радіолокаційних метеоспостережень, які можуть бути реалізовані як технічними, так і програмними засобами:

1) режим огляду простору, первинна обробка сигналів, що забезпечує вимірювання параметрів радіолуни і подальшу обробку за алгоритмом;

2) формування за допомогою алгоритмів оптимального об'єму радіолокаційних характеристик метеоутворень шляхом метеорологічної інтерпретації первинних (базових) радіолокаційних даних, вимірювання інтенсивності та кількості опадів;

3) представлення вихідної інформації (продуктів) споживачам, сумісництво її з іншими видами метеоінформації та збереження радіолокаційних даних протягом заданого строку.

В кожній конкретній апаратурі ці обов'язкові етапи виконуються по-різному, але вони повинні гарантувати результат з точністю, значно не погіршуючи технічні характеристики неавтоматизованих МРЛ.

Для обладнання автоматизації обов'язковою вимогою є наявність дистанційної системи вбудованого контролю загальних параметрів МРЛ та системи калібрування. Задачею калібрування є одержання кількісних співвідношень між рівнем вихідних сигналів та відбитих метеоцілей. При калібруванні приймально-вимірювального тракту автоматизованої МРЛ за допомогою каліброваного сигнал-генератора встановлюється співвідношення між потужністю сигналів на вході приймального обладнання МРЛ і кодом на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Окрім такого калібрування, необхідним є абсолютне калібрування МРЛ за великою сферою та за Сонцем.

Відомо багато схем автоматизації МРЛ. Можливість автоматизації зі зростанням швидкодії та об'єму пам'яті ЕВМ. Як наслідок зараз і первинна, і вторинна обробка, як правило, виконується на ЕВМ.

1.2.2 Допплерівський метеорологічний радіолокатор

Реалізація оперативної можливості одержання інформації на основі доплерівського зсуву частот дозволяє застосувати цю інформацію для рішення прогностичних задач. Сформовані вимоги щодо точності вимірювань діапазону вимірювальної величини та вторинної обробки.

Параметри доплерівського спектра метеоутворень необхідно вимірювати у кожній дискретній дальності протяжністю 50-250 м. Вимірювання швидкості повинно перекривати інтервал ± 50 м/с, в якому знаходиться більшість значень швидкості вітру в метеоутвореннях. Динамічний діапазон вимірювальних відбитих сигналів, як і при некогерентній обробці досягає 100.

На віддаленнях до 100 км від МРЛ та при відношенні сигнал/шум більше 3 дБ , помилка визначення радіальної швидкості не перевищує 0,25 м/с, а помилка вимірювання ширини спектра доплерівських швидкостей – не більша за 1 м/с при $\sigma_z = 1 \text{ дБ}$, тобто $\sigma_V \leq 1 \text{ м/с}$.

Як в некогерентних МРЛ, первинна обробка сигналів у доплерівському радіолокаторі здійснюється в кожному дискреті дальності

променя та виконується з метою вимірювання параметрів доплерівського спектру радіолуни від хмар та опадів. В процесі обробки усувається неоднозначність вимірювань дальності і швидкості, виникаюча при роботі радіолокатора в імпульсному режимі, а також накладання сигналів від різних дальностей, виникаючих в протилежних метеоутвореннях. Але в першу чергу необхідно вилучити відбиття від місцевих предметів.

Параметри доплерівського спектра, отримані в дискретній дальності, опрацьовуються в полярній лунці (як і в некогерентнім МРЛ), а потім переводяться в прямокутні координати для подальшого аналізу.

Для забезпечення точності визначення доплерівського сектора повинні задовольнятися такі вимоги до частотної стабільності приладів в МРЛ: стабільність магнетрона $\frac{\Delta f_m}{f_m} = 10^{-6} \div 10^{-5}$; стабільність місцевого

гетероїду $\frac{\Delta f_{m\dot{a}}}{f_{m\dot{a}}} = 10^{-9} \div 10^{-8}$. Довгострокові відхилення частоти можуть корегуватися системою автоналаштування частоти (АНШ). В цей час на доплерівських радіолокаторах забезпечується стабільність частот $\frac{\Delta f}{f} \leq 10^{-9}$.

Схеми забезпечення когерентності. Існує дві схеми, які забезпечують когерентність в доплерівських радіолокаторах. Одна з них передбачає використання в якості передавача посилювача клістрона. При цьому початкова фаза випромінювальних імпульсів відома, а стабільність забезпечується високо-стабільним кварцовим генератором в складі збудника (схема з істиною когерентністю). Друга схема включає магнетронний передавач, формуючий імпульси з випадковою початковою фазою. Ця фаза нав'язується когерентному гетероїду, коливання якого запам'ятовують її до приходу відбитого сигналу. Це схема з внутрішньою когерентністю.

Перша схема забезпечує кращу стабільність всієї когерентної системи та більший динамічний діапазон у спектральній області, що зменшує похибку вимірювань швидкості, дозволяє ефективно заглушати відбиття від місцевості.

В другій схемі частотні параметри дещо гірші, але вона є більш простими та дешевими в реалізації. Окрім того, випадковість початкової фази випромінюючих імпульсів сприяє усуненню неоднорідностей за дальністю в режимі вимірювання швидкостей, оскільки сигнали, які відповідають другому інтервалу дальності, тобто які приходять з відстані від $C/2F$ до C/F (де C - швидкість світла, F - частота повторення) та накладений на сигнал з першого інтервалу дальності $0 \div C/2F$, є некогерентними по відношенню до них. Також паразитне накладення тільки зменшує відношення сигнал/шум, але не зменшує оцінку

швидкостей. В варіанті з клістроном для усунення неоднозначності за дальністю передбачається модуляція початкової фази випромінених імпульсів за випадковим законом, наприклад, у коло клістрона вмикається фазообертач з набором фіксованих фазових затримок, які перемикаються за випадковим законом.

Приймач доплерівського МРЛ. Приймач радіолокатора будується за двоканальною схемою з логарифмічним посилювачем в каналі вимірювання відбиття та лінійним посиленням в каналі вимірювання швидкості. На вході лінійної частини передбачена ступінчата аттенуація вхідного сигналу для того, щоб уникнути обмежень сигналів та пов'язаних з ними спотворень спектральних оцінок. Керуючий сигнал для атенюатора формується колом ШАРП (швидкого автоматичного регулювання посилення) з постійним часом затримки ~ 1 мкс за середнім рівнем потужності відбитого сигналу на виході логарифмічного приймача в кожній стробі дальності. Необхідний динамічний діапазон логарифмічного приймача дорівнює 90 дБ , а лінійного 80 дБ .

Найбільш поширеним методом оперативної оцінки доплерівської швидкості є автоковаріаційний метод, або метод парних імпульсів (pulse-pair).

Процесор парних імпульсів (пульспарний процесор) виконує розрахунок двох перших моментів доплерівського спектра на основі оцінки значень автокореляційної функції при величині запізнення T . Для прямих розрахунків середньої доплерівської швидкості використовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ або FFT) для дискретних відбитих сигналів в елементі дозволу дальності. Порівняння цих двох методів показує, що метод парних імпульсів дає незміщену оцінку середньої доплерівської частоти. При широких спектрах точність методу Фур'є вища, а при вузьких спектрах кращі оцінки дає метод парних імпульсів. В сучасних доплерівських МРЛ використовують обидва методи.

Для приглушення сигналів, відбитих від «местників», широко використовують фільтрацію. Найбільш розповсюдженим є еліптичний (Коїна) фільтр третього порядку. Рівень приглушення «местників» таким фільтром досягає 50 дБ , якщо передавач - клістроном, $25 \div 30 \text{ дБ}$ - з магнетронним передавачем. Можливі й інші методи боротьби з відбиттям від інших предметів. Вимірювання відбиття та швидкості може проводитися при мінливій роботі на двох частотах повторення. На низькій частоті посилюють вимірюють відбиття, на високих частотах - швидкість.

На рис. 1.3 наведена схема приймача доплерівського радіолокатора Plessey-45С: високочастотний сигнал (ВЧ) ($5,625 \text{ ГГц}$); проміжна частота (ПЧ) (30 МГц); змішувач - вихід ПЧ представляє різницю частот двох входів ПЧ; відгалужувач - дільник ВЧ сигналу; циркулятор - направляє випромінюваний імпульс на антену й відбиті сигнали на приймач, AFC - автоматичне регулювання частоти (АРЧ) - підтримує частоту гетеродина

на 30 МГц нижче частоти передавача; АЦП АРЧ (АРЧ) - аналого-цифровий перетворювач (АЦП) - перетворює вхідні дані про напругу помилки для налаштування стабілізованого гетеродина на точну ПЧ, пароль цифрового виходу задає частоту стабілізованого гетеродина; стабілізований гетеродин (STALO) або ВЧ генератор із цифровим управлінням; СОНО - когерентний гетеродин, який використовується як генератор опорного сигналу для детектора I й Q , I і Q - фазова й квадратурна складові за відношенням до опорного сигналу СОНО.

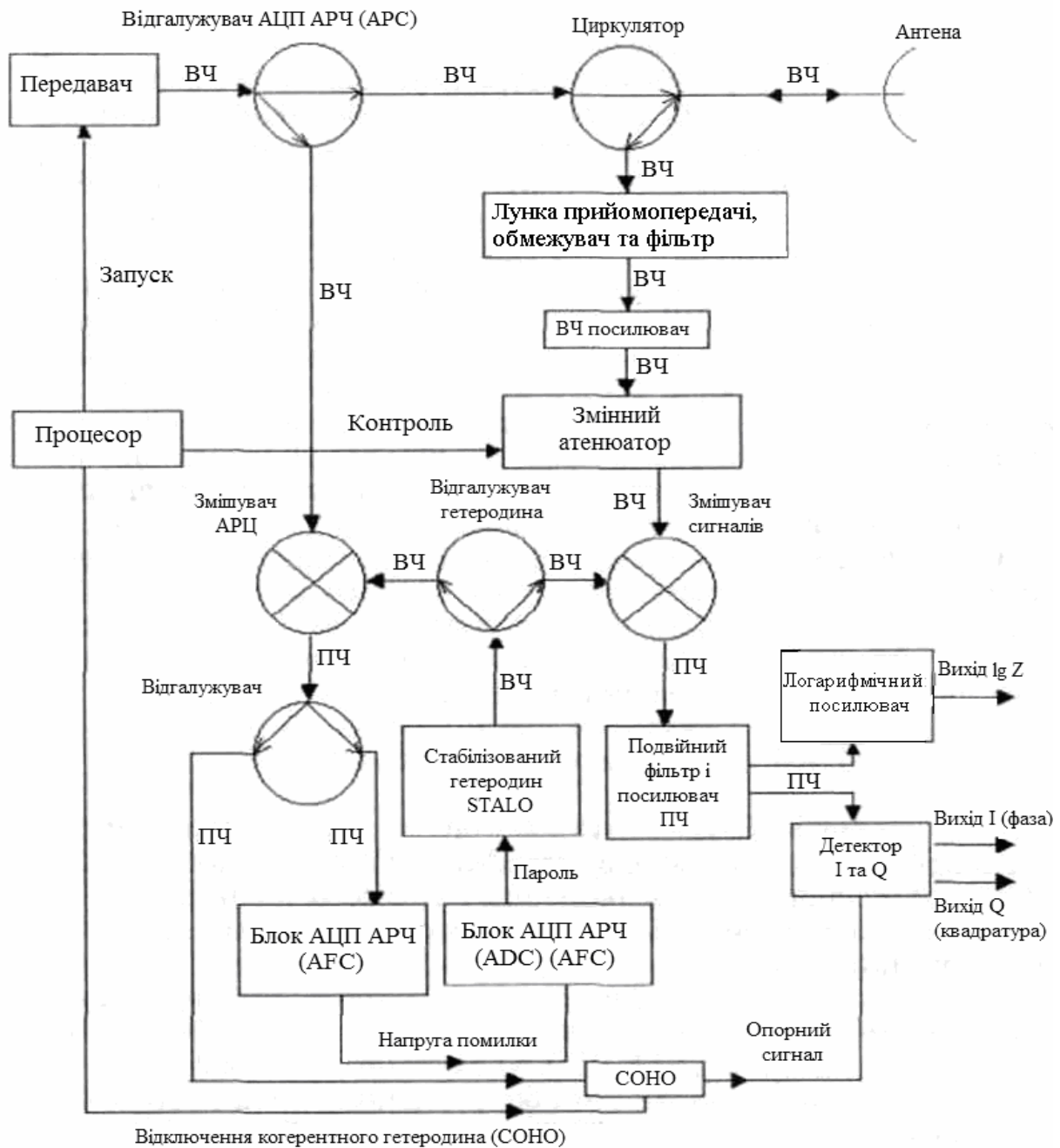


Рисунок 1.3 - Схема приймально-вимірального тракту доплерівського метеорологічного радіолокатора Plessey-45C

1.3 Загальні параметри метеорологічного радіолокатора

1.3.1 Таблиці параметрів метеорологічного радіолокатора

В табл. 1.2 – 1.4 наведені загальні параметри найбільш широко застосованих в світі МРЛ. Саме ці МРЛ складають основу національних мереж, за даними їхніх спостережень розроблені та перевірені алгоритми метеорологічної інтерпретації радіолокаційної інформації [2].

Таблиця 1.2 – Допплерівські метеорологічні радіолокатори, розроблені в період з 1980 по 1990 р.

Загальні параметри	WSP-88D* (EEC,USA)		WSP-82D (EEC,USA)		Ericsson Radar (Electronics AB, Sweden)		TDWR **(EEC, USA)	Mitsubishi (Japan)
	S	C	X	C	C	S		
Смуга частот	S	C	X	C	C	S	C	C
Імпульсна потужність, кВт	550	250	180	250	250	250	250	250
Мінімальна потужність, яка приймається, дБ/Вт	-136	-136	-136	-138	-136	-136	-136	-136
Частота повторення зондуючих пристроїв (Гц) в режимі: інтенсивність швидкість	250 600-934	250 700- 1200	250 1500- 2000	250 1200	250 900, 1200	250 900, 1200	250 1000, 1900	280 1120
Тривалість зондуючого імпульсу (мкс) в режимі: інтенсивність швидкість	2 0,8-0,9	2 0,8- 0,9	2 0,25- 0,5	2 0,5	2 0,5	2 0-5	2 0,8-0,9	2 0,52
Робочий радіус (км) в режимі: інтенсивність швидкість	450 120(230)	450 120	256 60	400 125	300 125	480 120	480 120	400 128
Діаметр антени, м	3,7-8,2	1,8- 6,1	0,9-2,4	4,3	4,2	4,2	6	3
Ширина діаграми направленості на рівні 3 дБ, град.	2,1-1,0	2,1- 0,7	2,5-1,0	1	0,8	1,6	0,55	1,4-1,5
Однозначно розрахована доплерівська швидкість, м/с	±50(120км) ±32(230км)	±32	±32	±48	±48	±48	±40	±16
Динамічний діапазон приймача, дБ	-8							

Таблиця 1.3 – Допплерівські метеорологічні радіолокатори, розроблені після 1990 р.

Загальні параметри	Вимоги COST-73 на ДМРЛ малої потужності (1989 р.)	Meteor 500 C (Gematron, Germany)	DWSR 8500 S	DWSR 2500 C		DWSR 2500 C/K	Вимоги до нового покоління ДМРЛ в Канаді (1998р.)
				S	C		
Смуга частот	C	C	Enterprise Electronic Corporation, USA				
Імпульсна потужність, кВт	250	250	850	250	250	250	250
Мінімальна потужність, яка приймається, дБ/Вт	-144	-142(2,0мке) -138(0,8мке)	-143(2,0мке) -140(0,8мке)	-143(2,0мке) -140(0,8 мке)	-143(2.0мке) -140(0,8мке)	-143(2.0мке) -140(0,8мке)	-140
Частота повторення зондуючих пристроїв (Гц) в режимі:							
інтенсивність	-	250	250,	250	250	250	50
швидкість	900, 1200	1200	623, 700, 934	786, 885, 1180	786, 885, 1180	786, 885, 1180	1200
Тривалість зондуючого імпульсу (мкс) в режимі:							
інтенсивність	0,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0; 5; 10
швидкість		0,83	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Робочий радіус (км) в режимі:							
інтенсивність	120	500	480	480	480	480	
швидкість		125	120	120	120	120	120
Діаметр антени, м	4,2	4,2	8,2	4,2	4,2	4,2	6,1
Ширина діаграми направленості на рівні 3 дБ, град.	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,65
Однозначно розрахована доплерівська швидкість, м/с	±48	±48	±25, ±50, ±75	±16, ±32, ±48	±16, ±32, ±48	±16, ±32, ±48	±48
Динамічний діапазон приймача, дБ	>85	80	90	90	90	90	80
Рівні першої бокової пелюстки за відношенням до головної, дБ	-27	-28...-30	≥-25	≥-25	≥-25	≥-25	≥-27
Z _{min} (дБZ) на віддаленні 50 км		-13,6	-10,5	-11,4	-11,4	-12,56	-15,4

Таблиця 1.4 – Метеорологічні радіолокатори, розроблені до 1980 р.

Загальні параметри	МРЛ-2	МРЛ-5		WSR -74C	WSR -74S	Siemens Plessey 45C	Melody	Rodin
		Канал I	Канал II					
Смуга частот	X	X	S	C	S	C	S	C
Імпульсна потужність, кВт	215	250	800	250	500	250	700	250
Мінімально прийомна потужність, дБ/Вт	-132	-137	-140	-134	-134	-138	-136	-142
Частота повторення зондуючих пристроїв, Гц	300	250	250	259	162	300	250	330
Довжина зондуючих імпульсів, мкс	1;2	1; 2	1; 2	3	1; 4	2	2	2
Робочий радіус, км	300	300	300	400	400	256	300	300
Діаметр антени, м	3,0	4,5	4,5	2,7	3,6	3,7	4	3
Ширина діаграми направленості на рівні 3 дБ, град.	0,8	0,45	1,5	1,5	2,0	1	1.8	1,3

1.3.2 Аналіз таблиць

Аналіз таблиць показує, що основна тенденція при розробці нового покоління МРЛ – підвищення роздільної здатності за кутовими координатами (ширина променя $\leq 1^\circ$), збільшення мінімального відбиття, тобто підвищення ймовірності визначення хмар будь-якої форми і навіть зон турбулентності атмосфери при ясному небі, а також забезпечення доплерівського режиму роботи МРЛ в радіусі 100-120 км. Застосування МРЛ в метеорології, при якому їх інформація не спотворює площу опадів і висоту радіолуни C_b , починається з потенціалу $267 \partial A$, розрахованого в одиницях СІ. $Z_{\min}(\partial A z)$ на віддаленні 50 км складає не менше $5 \partial A z$. На рис. 1.4 наведена залежність $Z_{\min}(R)$ для цього значення потенціалу.

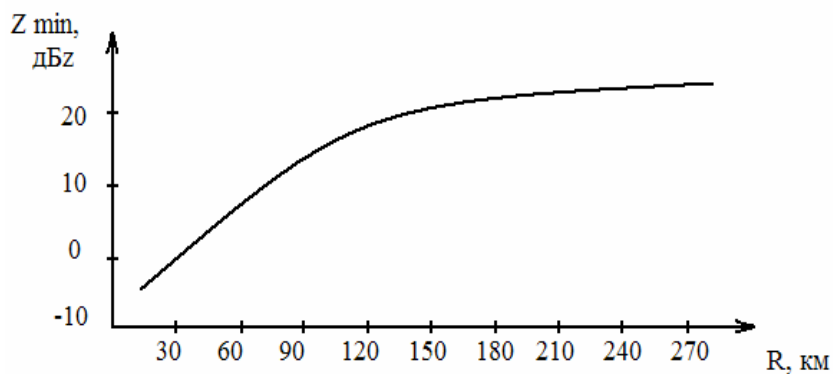


Рисунок 1.4 – Залежність Z_{\min} від віддалення R при метеорологічному потенціалі $\dot{I}_i = 267 \partial A$, $Z_{\min} = 5 \partial A z$ на $R=50$ км

Легко побачити, що всі МРЛ, параметри яких наведені в табл. 1.2 - 1.4, задовольняють цим вимогам.

Максимальна дальність виявлення атмосферного явища розраховується з урахуванням ширини променя, залежності Z_{\min} від віддалення R і висоти явища над поверхнею Землі. При цьому задаються або обираються фізичні характеристики атмосферних явищ (висота радіолуни, розміри ядра радіолокаційного відбиття, горизонтальні розміри явищ та шарів рідких та твердих опадів).

З врахуванням мінливості радіолокаційних характеристик явищ, супроводжуваних \tilde{N}_b , при аналізі враховується періодичність відновлення інформації МРЛ.

В відповідності з просторовою та часовою мінливістю радіолокаційних характеристик купчасто-дощових хмар і опадів (найбільш мінливих метеооб'єктів) в якості оптимального інтервалу часу між послідовними радіолокаційними оглядами простору в режимі колового огляду обирається інтервал, який дорівнює 5-10 хвилинам. В будь-якому випадку цей інтервал не повинен перевищувати 15 хвилин. Для огляду окремого \tilde{N}_b оптимальний інтервал буде складати 2-3 хвилини. Збільшення інтервалу більш ніж на 15 хвилин призводить до пропусків виявлення \tilde{N}_b .

Дискретність площі для вимірювання радіолокаційних характеристик хмар та опадів в радіусі огляду МРЛ не повинна перевищувати розмірів квадрата 5x5 км. В автоматизованих МРЛ, як буде показано далі, всі ці вимоги виконуються. Стабільність технічних характеристик МРЛ легко перевіряється при оперативних спостереженнях: середня площа радіолуни \tilde{N}_b скорочується приблизно в 10 разів при збільшенні порогу Z_e на зовнішньому контурі радіолуни \tilde{N}_b приблизно на $15 \partial Az$.

В наведених таблицях не відображена важлива особливість нового покоління МРЛ – наявність програми інтерпретації радіолокаційних вимірювань, в якій використані останні досягнення з радіолокаційної метеорології. Ринок таких програм реально існує та впливає на уніфікацію продуктів автоматизованих МРЛ.

Всі МРЛ нового покоління забезпечують доплерівський режим вимірювань, хоча практичне застосування доплерівської інформації поки що відстає від закладених в обробку можливостей.

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС «МЕТЕОЯЧЕЙКА»

2.1 Загальні відомості про автоматизований метеорологічний комплекс «Метеоячейка»

2.1.1 Призначення та склад

Автоматизований метеорологічний комплекс (АМРК) «Метеоячейка» призначений для автоматизації метеорологічного радіолокатора МРЛ-5 з метою забезпечення аеропортів і автоматизованих систем управління повітряним рухом (СУПР) інформацією про хмарність та пов'язаних з нею небезпечних явищ погоди (сильні зливи, град, шквал) з високою надійністю й оперативністю в найбільш зручному для споживача вигляді. АМРК має підвищену перешкодостійкість і надає змогу експлуатувати МРЛ при дистанційному режимі управління з використанням звичайних кабельних ліній зв'язку.

АМРК «Метеоячейка» складається з хвильового МРЛ-5 і засобів автоматизації одержання, обробки та передачі радіолокаційної інформації. Типова схема АМРК показана на рис. 2.1. До складу обладнання АМРК «Метеоячейка» входять:

- метеорологічний радіолокатор МРЛ-5;
- комплект технічних засобів автоматизації одержання інформації;
- центральна система АМРК (ЦС);
- спеціалізовані робочі станції споживачів інформації.

АМРК є просторово розповсюдженою системою управління МРЛ. Центральна системи за командою оператора при роботі в штатному режимі, та за таймером при роботі в автоматичному режимі формує комплексні управляючі команди, які по каналу зв'язку передаються в дистанційний пристрій попередньої обробки (ППО-ДМ).

ППО-ДМ встановлюється в апаратній кабіні МРЛ. ППО-ДМ є спеціалізованою ЕВМ, яка безпосередньо управляє МРЛ і виконує всю попередню обробку і стиснення інформації. Одержані в процесі обробки дані передаються на центральну систему, де відбувається їхній аналіз, архівація, візуалізація і передача споживачам.

В процесі роботи АМРК постійно контролює всі пристрої, які входять в його склад, при необхідності формує попереджуюче повідомлення для оператора. Такий розподіл функцій управління і обробки даних дозволяє розміщувати центральну систему АМРК на будь-якому віддаленні від МРЛ. Такий розподілений варіант на практиці являється типовим. Загальна вимога – забезпечення швидкості передачі інформації по лінії зв'язку не менше 4800 біт/с.

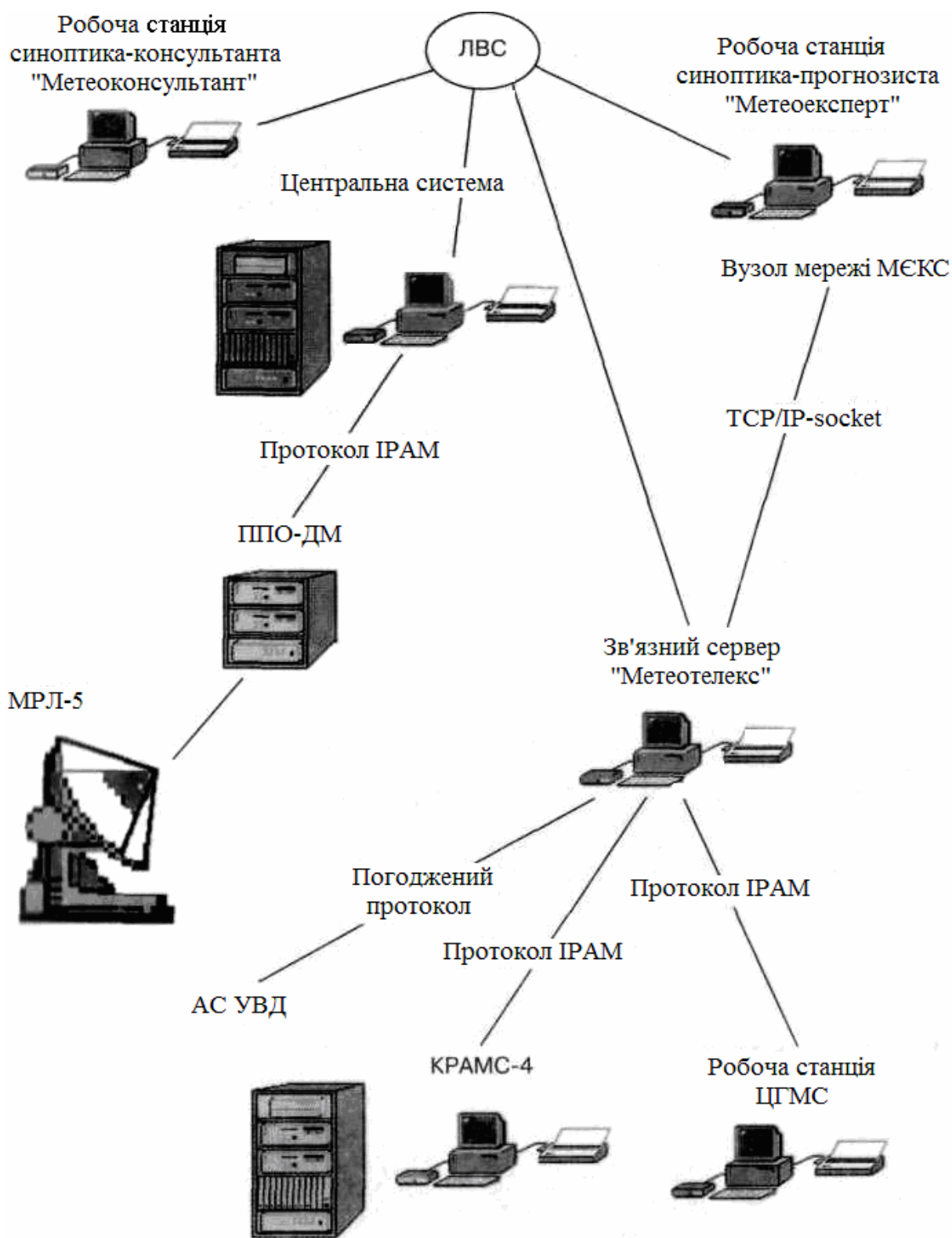


Рисунок 2.1 – Структурна схема АМРК «Метеоячейка»

Спеціальне програмне забезпечення АМРК «Метеоячейка» реалізоване у вигляді 32-розрядних прикладних програм, працюючих під управлінням ОС Windows 95/98/2000.

Інформація з будь-якого АМРК може передаватися в будь-яку організацію Укргідромета по мережі МЕКОМ з використанням протоколу TCP/IP-socket в коді BUFR, в тому числі в будь-які центри об'єднання радіолокаційної інформації. Рішення про передачу даних конкретному споживачу приймає власник інформації.

2.1.2 Пристрої автоматизованого метеорологічного комплексу

1) Пристрої попередньої обробки.

Пристрій попередньої обробки сигналів ППО-ДМ, є складовою частиною АМРК «Метеоячейка», що забезпечує виконання наступних функцій:

- дистанційне управління і контроль МРЛ-5 по телефонній лінії зв'язку;
- реєстрацію, обробку і поповнення даних, які поступають з приймачів I і II каналів МРЛ-5;
- передачу накопиченої інформації по лініям зв'язку на центральну систему;
- діагностику всіх пристроїв, які входять до складу ППО-ДМ.

2) Центральна система АМРК.

Основною задачею центральної системи є управління роботою МРЛ, аналіз та інтерпретація одержаних результатів вимірювання та передача даних споживачам в необхідному об'ємі.

Програмне забезпечення центральної системи виконане на основі Windows NT4.0. Комплект технічних засобів центральної системи включає основну та резервну ПЕВМ, пристрій безперебійного живлення, комутатор каналів, модемну стійку і комунікаційну систему з захистом від розрядів блискавки, розміщений в стандартній стійці.

3) Спеціалізовані робочі станції.

До складу АМРК може входити різний набір спеціалізованих станцій. Конфігурація визначається замовником. Передача даних від центральної системи на робочі станції може утворюватися по широкій мовній мережі або телефонним каналам зв'язку. Робочі станції розрізняються об'ємами та формою представлення інформації. В даний час на мережі АМРК працюють такі спеціалізовані робочі станції (РС):

- РС синоптико-консультаційна літнього складу;
- РС синоптико-консультаційна диспетчерського складу;
- РС синоптико-прогнозна АМСГ (АМЦ);
- РС синоптико-прогнозна ЦГМС;
- РС керівника польотів АСУВД;
- РС техніка-метеоролога АМСГ;
- РС оперативного чергового МНС.

При великій кількості робочих станцій передача даних виконується через зв'язковий сервер «Метео Телекс». Спеціальне програмне забезпечення сервера АМРК дає змогу одночасно працювати з 18 каналами зв'язку, включаючи швидкісні канали з протоколами TCP/IP-socket. На рис. 2.1. зображена структурна схема АМРК «Метеоячейка» [3].

2.2 Функціональні можливості автоматизованого метеорологічного комплексу «Метеоячейка»

2.2.1 Загальні можливості

1. АМРК «Метеоячейка» забезпечує просторову роздільну здатність 128x128 елементів за горизонталлю та 15 шарів за вертикаллю. Роздільна здатність в стандартному режимі шквалооповіщення – 100x100 елементів по горизонталі з розміром елементу 4x4 км та 11 шарів по вертикалі з товщиною шару 1 км.

2. Згідно з технічними умовами на АМРК, стандартний режим роботи АМРК автоматичний, з інтервалом від 10 до 180 хв.

3. Інтенсивність опадів на АМРК вимірюється в кожен строк спостережень і відображується для споживачів за площиною 4x4 км. Стандартна градація інтенсивності опадів наведена в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Стандартна градація інтенсивності опадів

Рідкі опади		Тверді опади	
мм/г	Інтенсивність	мм/г	Інтенсивність
0,5-2,9	Слабкі	0,02-0,1	Слабкі
3,0-25,0	Помірні	0,11-1,0	Помірні
25,1-140,0	Сильні	>10	Сильні
>140,0	Дуже сильні		

4. Передбачено розрахунок кількості опадів за різний обраний інтервал часу. 15 градацій кількості опадів (мм) задані в наступних інтервалах:

≤0,5_0,6-1,0_1,1-2,0_2,1-3,0_3,1-5,0_5,1-10,0_10,1-20,0_20,1-30,0_30,1-40,0_40,1-50,0_50,1-60,0_60,1-70,0_70,1-100,0_100,1-150,0_>150,0

Програмне забезпечення передбачає можливість використання будь-яких варіантів градацій як за інтенсивністю, так і за кількістю опадів у відповідності до вимог споживачів інформації АМРК. Сума опадів розраховується за будь-який заданий інтервал часу за вказаними вище градаціям для елементів площі 4x4 км, наприклад за 1, 3, 6, 12 і так далі. Функція розрахунку кількості опадів передбачена як на центральній системі АМРК «Метеоячейка», так і на робочих станціях.

5. Визначається максимальна для кожної лунки уявлення висота верхньої межі радіолуни з дискретністю 250 м в діапазоні 0-20 000 м.

6. На кожній робочій станції АМРК «Метеоячейка», користувач має змогу одержати розподілені радіолокаційні відбиття за 11 горизонтальними розрізами з відстанню 1 км для кожної лунки 4x4 км для території 400x400 км.

7. Явище погоди та форми хмарності визначаються на АМРК «Метеоячейка» за заданими алгоритмами розпізнавання. Алгоритми налаштовуються окремо для кожного пункту установки за результатами зіставлення радіолокаційної й наземної інформації.

Загальне налаштування алгоритмів виконується під час першого року експлуатації. В процесі подальшої експлуатації щорічно оцінюється якість розпізнавання і при необхідності виконується корегування алгоритму.

Контроль виправдання розпізнавання загрозових явищ погоди виконує інженер-радіометеоролог АМРК шляхом зіставлення радіолокаційної і наземної інформації.

В результаті застосування алгоритмів розпізнавання інформація про загрозові явища та про форми хмарності відображається на екрані ПЕВМ в вигляді карти метеоявищ.

Метеоявища відображаються 16 градаціями й залежать від сезону спостережень та видів опадів. Наприклад, для літнього сезону спостережень та рідких опадів використовуються такі градації метеоявищ:

- хмарність верхнього та середнього ярусів С-А;
- шарувато подібна хмарність;
- слабкі опади;
- помірні опади;
- сильні опади;
- купчаста хмарність;
- слабка злива;
- помірна злива;
- гроза з вірогідністю 30-70 %;
- гроза з вірогідністю до 90 %;
- гроза з вірогідність більше ніж 90 %;
- слабкий град;
- помірний град;
- сильний град;
- відсутність радіолуни.

При виведенні карти метеоявищ виділяються зони шквального посилення вітру зі швидкістю більше 15 м/с.

8. Після кожного циклу спостережень на основі одного з варіантів кросс-кореляційного методу виконується розрахунок швидкості та напрямку переміщення хмарної системи. Для достовірного розрахунку цих

характеристик період між строками спостережень не повинен перевищувати 30 хв.

9. Велике різноманіття вимог споживачів інформації АМРК до форм її представлення і засобів доставки обумовлене великою кількістю форматів представлення даних МРЛ.

В даний час данні можуть бути передані споживачам в таких формах:

- код RADOB для передачі в центр збору з метою складання стикованих карт МРЛ;
- код BUFR для передачі мережою УКРГІДРОМЕТУ споживачам;
- код, погоджений з заказником, для передачі в автоматизовані системи керування повітряним рухом;
- код ИРАМ для передачі на робочі станції АМРК.

Графічний формат представлення даних для виведення на друк.

Будь-які форми представлення інформації як на екран центральної системи АМРК «Метеоячейка», так і на екрані робочої станції АМРК можуть бути надруковані на принтері в такому вигляді:

- поле відповідно до типу інформації (метеоявищ, відбиття висоти верхньої межі радіолуни, інтенсивність опадів);
- бланк-карта МРЛ.

Графічний формат представлення даних для перегляду на екрані ПЕВМ. Будь-які форми представлення інформації на екрані робочої станції АМРК можуть бути передані споживачам в вигляді зображень в одному із таких форматів:

- формат BMP для передачі та подальшого перегляду даних АМРК «Метеоячейка», будь-якими стандартними програмними засобами середовища ОС Windows 95/98/NT/2000;
- формат T4 для передачі на перегляд при наявності спеціального програмного забезпечення.

Для передачі даних споживачу використовують такі протоколи даних:

- внутрішній протокол ИРАМ, який забезпечує передачу інформації по телефонним лініям зв'язку з гарантованою доставкою даних. Швидкість передачі визначається якістю ліній зв'язку. Цей протокол використовується при передачі радіолокаційної інформації з центральної системи АМРК на робочі станції користувачів;
- телеграфний протокол, який забезпечує передачу інформації по телеграфним лініям зв'язку. Швидкість передачі складає 50 або 100 бод. Цей протокол використовується при передачі радіолокаційної інформації в кодї RADOB з ЦС АМРК в мережі АСПД Укргідромету;
- протокол TCP/IP-socket, який використовується для передачі даних по мережі відомостей МЕКОМ Укргідромету;

- протоколи для передачі даних в автоматизовані системи керування повітряним рухом (АСКПР);

- циркулярна передача даних і передача даних за запитом (режим «запит-відповідь») використовується для передачі даних на робочі станції споживачів;

- розроблене програмне забезпечення для побудови «скованих карток» МРЛ на спеціалізованій робочій станції АМРК «Метеоячейка», яка призначена для одержання радіолокаційних даних від різних МРЛ та їх послідовного об'єднання;

- вся інформація АМРК «Метеоячейка» може бути використана для проведення контролю за активними впливом в районі установки МРЛ-5 (наприклад, противоградової служби);

- АМРК «Метеоячейка» забезпечує дистанційне керування роботою МРЛ з використанням аеродромних кросових ліній зв'язку при віддаленні ЦС від МРЛ на будь-яку необхідну відстань.

Згідно вимогам НМО ГА-95, в АМРК реалізовано режим архівації радіолокаційних даних на жорсткому диску ПЕВМ за період від 30 діб і більше. Архів використовується інженером – радіометеорологом АМРК «Метеоячейка» для подальшої роботи (наприклад, для співвідношення даних наземних метеостанцій про небезпечні явища з даними АМРК з метою виявлення виправдання небезпечних явищ АМРК для оцінки роботи комплексу). Режим архівації реалізовано також на робочих станціях АМРК «Метеоячейка», для того, щоб споживач радіолокаційної інформації сам приймав рішення про необхідність використання даних в своїх конкретних задачах.

Як на ЦС АМРК, так і на її робочих станціях (РС) реалізовано режим видалення архівів за необхідністю. Строк зберігання архівів реально обмежений тільки об'ємом жорсткого диску ПЕВМ.

На РС АМРК реалізована можливість перегляду поточного прогнозу та штормових попереджень, які надходять по каналам зв'язку. Окрім того, АМРК забезпечує:

- на РС (наприклад, у синоптика-консультанта або синоптика-прогнозіста) можливість одержання поточного прогнозу погоди для заданих пунктів в вигляді таблиці з переліком метеостанцій, які розташовані в радіусі 200 км.

В прогнозі вказується час початку та кінця опадів різної інтенсивності або інших небезпечних явищ погоди (злива, шквал, гроза) за потреби споживачів;

- побудову таблиці «Шквалооповіщення», яка в полярних координатах вказує місцезнаходження зосереджених небезпечних явищ погоди в радіусі 200 км від МРЛ;

- виведення тексту штормових попереджень за даними АМРК для синоптиків АМСГ;

- виведення тексту прогнозів, штормових попереджень та попереджень в кодових форматах TAF, SPECI, WAREP, SIGMET, AIREP.

На РС синоптика-прогнозіста реалізована можливість перегляду поточного штормового стану регіону в вигляді карти, яка оновлюється в режимі надходження штормової інформації по каналах зв'язку, і дані штормового кільця в вигляді текстів телеграм. Ця інформація доповнює радіолокаційні дані та забезпечує необхідну повноту і оперативність штормової інформації.

Для розрахунку виправданості ряду розрахункових методів прогнозу використовуються радіолокаційні дані разом з іншими доступними видами інформації.

Важливе місце в підвищенні ефективності гідрометеорологічного забезпечення займають короткострокові (до 6 годин) прогнозування. Радіолокаційні дані, які мають високу просторово-часову роздільну здатність, використовуються для вирішення задач виявлення та спостереження за полями опадів і небезпечними явищами погоди, пов'язаними з купчасто-дощовою хмарністю [4].

2.2.2 Додаткові можливості

АМРК «Метеоячейка» як метеобладнання аеропорту й одночасно система для єдиної багатофункціональної мережі автоматизованих МРЛ Укргідромету забезпечує:

- проведення автоматизованого калібрування вимірюваних трактів комплексу «Метеоячейка»;

- можливість постійного контролю параметрів АМРК в допущеному режимі, що є особливо актуально при дистанційному керуванні МРЛ;

- постійне інформування довідкової системи про збої при роботі комплексу, що дозволяє оперативно реагувати й усувати недоліки роботи АМРК «Метеоячейка»;

- при необхідності оперативна зміна параметрів огляду, таких, як кут місця при будь-якому обертанні, число обертів антени при огляді, швидкість за азимутом при огляді та багатьох інших;

- автоматичний розрахунок та введення поправок на послаблення радіохвиль в опадах і газах атмосфери;

- контроль з ЦС АМРК за передачею та надходженням радіолокаційних даних на абонентські пункти незалежно від їхнього віддалення від ЦС АМРК;

- реалізацію функцій виведення на друк бланк-картки МРЛ за будь-який строк спостереження з різноманітними «підкладками» (рельєф місцевості, метеостанції, адміністративна карта) на ЦС АМРК і на абонентських пунктах;

- архівацію телеграм у кодї RADOB;

- автоматичне заповнення «Журналу реєстрації подій АМРК «Метеоячейка», в якому фіксуються всі дії штату МРЛ та контрольна інформація функціонування комплексу; журнал, як і радіолокаційний архів, зберігається не менш ніж 30 днів; його можливо передивлятися при аналізі несправностей і для контролю роботи операторів АМРК;
- введення даних метеостанцій про небезпечні явища погоди та зіставлення даних ГМС про небезпечні явища з даними АМРК;
- виведення на друк результатів зіставлення;
- запис і доповнення файлу «местників» в реальному часі, його корегування за архівними даними;
- визначення видимості в зоні опадів, яка наближається до аеропорту;
- виведення контурів небезпечних явищ на екран ПЕВМ;
- виведення карти швидкості шквалів;
- виведення карти вертикального перетину радіолуни в заданому азимуті або за обраною повітряною трасою;
- виведення карти ожеледі в заданому азимуті або за обраною трасою;
- програмне забезпечення для виключення перешкод від наземних і літакових РЛС.

В табл. 2.2 наведені технічні характеристики АМРК «Метеоячейка».

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики АМРК «Метеоячейка»

Технічні характеристики	Одиниці вимірювань	Кордони вимірювань
Огляд простору		
Тривалість циклу огляду	хв	7
Швидкість обертання антени	об/ хв	6 ±0.5
Число кутів огляду в циклі (від 0 до 85°)		42
Точність установки вертикального кута	градус	За ТУ на МРЛ-5
Автоматичне вмикання й вимикання МРЛ-5 в режимі «Чергування»		Передбачено
Перетворення радіолокаційних сигналів		
Число розрядів АЦП		8
Рівень відеосигналу на вході АЦП	В	0.0 2.5
Амплітуда імпульсу синхронізації	В	4
Протяжність елементарних осередків дальності	м	250
Число інтервалів дальності		1024
Крок інтегрування за дальністю	м	1000
Число усереднених імпульсів в режимі 2 мкс		8
Точність вимірювання параметрів хмар		
Радіолокаційне відбиття не більше	дБ	±1
Точність вимірювань дальності	м	±250
Час вимірювання параметрів комплексу	с	1

Продовження таблиці 2.2

Технічні характеристики	Одиниці вимірювань	Кордони вимірювань
Вертикальний профіль вимірюваних параметрів в будь-якому азимуті та трасах		Передбачено
Відображення горизонтальних перерізів		
Число шарів за висотою		12 ($11+H_{max}$)
Число основних кольорових градацій		16
Масштаб зображення	км	200, 100
Час виведення матриці 100x100 лунки	с	1 ± 0.5
Відображення вертикальних перерізів		
Крок за азимутом	градус	1,0
Число кольорових градацій		16
Час виведення	с	1
Час переходу від одного перерізу до іншому	с	1
Розпізнання явищ погоди		
Число категорій (гроза, град, злива, помірні опади, хмари, шквал, смерч)		10
Час відображення мапи явищ погоди	с	1
Виправданість розпізнання явищ погоди в порівнянні з даними наземних метеостанцій	%	Не нижче 90
Визначення швидкості й напрямку переміщення зон небезпечних явищ		Передбачено
Накопичений шар опадів за інтервал	г	1, 3, 6, 12 ...
Можливість зміни алгоритмів вимірювань опадів		Передбачено
Контроль за ефективністю активних впливів		
Оцінка зміни радіолокаційних параметрів хмарності в районі й в процесі впливу		Передбачено
Документування й архівація інформації		
Архівація радіолокаційної інформації		Передбачено на строк не менше 30діб
Можливість роботи з архівом даних		Передбачено в будь-який зручний для оператора час
Висновок на друк необхідної інформації		Передбачено
Режим анімації		Передбачено за будь-який строк

Загальні технічні дані МРЛ-5 і АМПК «Метеоячейка» наведені в табл. 2.3 і табл. 2.4.

Таблиця 2.3 – Загальні технічні характеристики МРЛ-5

Параметр	Одиниці вимірювань	МРЛ-5	
		1 канал	2 канал
Несуча частота	МГц	9595 ± 15	2950 ± 15
Довжина хвилі	см	3, 14	10, 15
Імпульсна потужність на виході магнетрона	кВт	250	800
Тривалість імпульсу	мкс	1; 2	1; 2
Частота проходження імпульсів	Гц	500; 250	500; 250
Діаметр дзеркала (параболоїда обертання)			
в режимі градозахисту	м	1,4	4,5
в режимі шквалооповіщення	м	4,5	4,5
Ширина діаграми направленості випромінювання			
в режимі градозахисту	град	1,5	1,5
в режимі шквалооповіщення	град	0,5	1,5
Коефіцієнт підсилення антени			
в режимі градозахисту	дБ	40	39
в режимі шквалооповіщення	дБ	49	40
Рівень бічних пелюстків			
в режимі градозахисту	дБ	-23	-25
в режимі шквалооповіщення	дБ	-23	-25
за азимутом	об/хв	0 – 6	0 – 2
за кутом місця	Кількість сканувань/хв	0 – 6	0 – 2
Чутливість прийомного пристрою, не менше	дБ/Вт	-134	-136
Масштаби дальності	км		
індикатора колового огляду (ІКО)		25; 50; 100; 300	25; 50; 100; 300
індикатора дальність-висота (ІДВ)		6,25/12,5; 12,5/25; 25/50; 50/100	6,25/12,5; 12,5/25; 25/50; 50/100
Загальна споживана потужність від мережі 3 х 220 х 50	кВт	14	14
у тому числі для кондиціонерів		8	8
Точність позиційного режиму за кутом місця	град	±0,25	+0,25
Сумарне згасання, внесене хвильоводно-фідерним трактом в режимі прийому й передачі	дБ	6	5
Апертурна площа	м ²	16	16

Таблиця 2.4 – Загальні технічні характеристики АМРК «Метеоячейка»

Технічна характеристика	Одиниці вимірювань	Кордон вимірювань
Огляд простору		
Тривалість циклу огляду	хв	7
Швидкість обертання антени	об/хв	6 ± 0,5
Число кутів огляду в циклі (від 0 до 85°)		42
Точність встановлення вертикального кута	град	за ТУ на МРЛ-5
Автоматичне вмикання й вимикання МРЛ-5 в режимі «Чергування»		Передбачено
Перетворення радіолокаційних сигналів		
Кількість розрядів АЦП		8
Рівень відеосигналу на вході АЦП	В	0,0 – 2,5
Амплітуда імпульсу синхронізації	В	4
Довжина елементарних осередків дальності	м	250
Кількість інтервалів дальності		1024
Крок інтегрування за дальністю	м	1000
Кількість осереднених імпульсів в режимі 2 мкс		8
Точність вимірювань параметрів хмар		
Радіолокаційне відбиття, не більше	дБ	±1
Точність вимірювань дальності	м	±250
Час вимірювань параметрів комплексу	с	1
Вертикальний профіль вимірюваних параметрів в будь-якому азимуті та трасах		Передбачено
Відбиття горизонтальних перетинів		
Кількість шарів за висотою		12 (11+H _{max})
Кількість основних кольорових градацій		16
Масштаб зображення	км	200, 100
Час виведення матриці 100 x 100 лунок	с	1 ± 0,5
Відбиття вертикальних перетинів		
Крок за азимутом	град	1,0
Кількість кольорових градацій		16
Час виведення	с	1
Час переходу від одного перетину до іншого	с	1
Розпізнавання явищ погоди		
Кількість категорій (гроза, град, помірні опади, хмари, шквал, смерч)		10
Час відображення карти явищ погоди	с	1
Виправданість розпізнавання явищ погоди в порівнянні з даними наземних метеостанцій	%	Не нижче 90
Визначення швидкості та напрямку переміщення зон небезпечних явищ		Передбачено

Продовження таблиці 2.4

Технічна характеристика	Одиниці вимірювань	Кордон вимірювань
Режим вимірювання опадів		
Інтенсивність опадів за 19 градаціям		Кожен цикл огляду
Накопичений шар опадів за інтервал	г	-1, 3, 6, ...
Можливість зміни алгоритмів вимірювання опадів		Передбачена
Контроль за ефективністю активних чинників		
Оцінка зміни радіолокаційних параметрів в районі і в процесі впливу		Передбачена
Документування і архівація інформації		
Архівація радіолокаційної інформації		Передбачена на строк не менше 30 діб
Можливість роботи з архівом даних		Передбачена в будь-який зручний час для оператора
Виведення на друк необхідної інформації		Передбачено
Режим анімації		Передбачено на будь-який строк

2.3 Розрахунок метеорологічного потенціалу МРЛ-5

2.3.1 Розрахунок потенціалу за керуючим документом (Керівництво за проведенням спостережень метеорологічного радіолокатора)

У відповідності до керівництва розрахунок метеорологічного потенціалу МРЛ відбувається за формулою:

$$\dot{I}_i = \frac{0,1\pi^6 P_i A_p h K_{AB}}{P_\emptyset \lambda^4}, \quad (2.1)$$

де \dot{I}_i - метеорологічний потенціал ($\text{км}^2 / (\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3})$);

P_i - потужність зондуючого імпульсу (Вт);

A_p - апертура антени (м^2);

h - довжина зондуючого імпульсу (м);

K_{AB} - коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту;

λ - довжина хвилі (см);

P_\emptyset - чутливість приймального пристрою (Вт).

Розрахунок \dot{I}_i в децибелах ($10\lg \dot{I}_i$) відбувається за формулою:

$$10\lg \dot{I}_i = 10\lg A_p + 10\lg P_i + 10\lg h + 10\lg K_{AB} - 10\lg P_\emptyset - 40\lg \lambda - 110, \quad (2.2)$$

де P_i - в кіловатах;

A_p - в м²;

$K_{AB} = 0,16(-8\partial A)$;

P_\emptyset - в ватах;

λ - в см.

В разі застосування МРЛ для метеозабезпечення авіації потенціал $10\lg \dot{I}_i$, розрахований за формулою (2.2), повинен бути не менше $47\partial A$.

2.3.2 Розрахунок за вказівкою

Рекомендація для величини «метеорологічного потенціалу, яка в діапазоні хвилі від 0,03 до 0,11 м не менша ніж $270 \partial A/\text{м}$ » заснована на іншому виразі для розрахунку. Оцінка відбувається за рахунок визначення метеорологічного потенціалу за формулою:

$$\dot{I}_i = 10\lg \left(\frac{\pi^3 c P_i G^2 \theta_0 \varphi_0 \tau K_{AB}}{4^5 \ln 2 P_{i\delta\min}} \right), \quad (2.3)$$

де $c=3*10^8$ м/с – швидкість розповсюдження електромагнітних коливань в атмосфері.

Розрахунок \dot{I}_i в децибелах ($10\lg \dot{I}_i$) відбувається за формулою:

$$10\lg \dot{I}_i = 10\lg P_i + 20\lg G + 10\lg \theta_0 + 10\lg \varphi_0 + 10\lg \tau + 10\lg K_{AB} - 10\lg P_{i\delta\min} - 20\lg \lambda + 71,2, \quad (2.4)$$

де P_i – потужність зондуючого імпульсу МРЛ (Вт);

G – коефіцієнт посилення антени;

θ_0 і φ_0 – ширина діаграми направленості антени в обох взаємно перпендикулярних площинах, обмірювана на рівні 0,5 потужності (радіани);

τ – тривалість зондувального імпульсу (с);

$P_{i\delta\min}$ – мінімальна виявлена потужність відбитого сигналу (Вт).

Розрахунок \dot{I}_i (дБ) проводиться за формулою (2.4) в одиницях СІ.

Різниця між значеннями \dot{I}_i (дБ), розрахованими за формулами (2.4) та (2.2), становить:

- для 3-сантиметрового каналу $280,7 - 59,9 = 220,8$ дБ;

- для 10-сантиметрового каналу $272,5 - 49,5 = 223$ дБ.

Таким чином, потенціали \dot{I}_i обох каналів МРЛ-5, розраховані за формулою (2.4), свідомо перевищують 270 дБ/м, і вони можуть застосовуватися для метеозабезпечення авіації [5].

Якщо в штаті МРЛ-5 виникають сумніви в результаті розрахунку \dot{I}_i , їх можна легко перевірити, повторивши розрахунки, проведені за формулами (2.2) і (2.4), результати яких наведені в табл. 2.5 і табл. 2.6, для параметрів МРЛ-5, при яких він експлуатується.

Всі параметри МРЛ, що входять у формули (2.2) і (2.4), незмінні, потрібно тільки виміряти P_i і P_\emptyset .

Таблиця 2.5 – Розрахунки потенціалу МРЛ-5 для I каналу

Параметр (X)	Позначки	Значення X		10 lgX, дБ	
		Посібник з МРЛ	НКД (од. СІ)	Посібник з МРЛ	НКД (од. СІ)
Імпульсна потужність на виході магнетрона	P_i	250 кВт	250 000 Вт	+24	+54
Чутливість приймача	P_\emptyset	-134 дБ/Вт	-134дБ/Вт	-(-134)	-(-134)
Апертурна площа	$P_{i\delta\min}$	16 м ²	—	+12	—
Тривалість зондуючого імпульсу	τ	—	2*10 ⁶ с	—	-57
Довжина зондуючого імпульсу	h	600 м	—	+27,8	—
Довжина хвилі	λ	3,14 см	3,14*10 ⁻² м	-19,9	+30,1
Коефіцієнт посилення антени	G	—	49 дБ	—	98
Ширина діаграми направленості антени	φ_0	—	0,0087 рад.	—	-20,8
Коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту	K_{AB}	0,16	0,16	-8	-8
Постійні перекладу формул (2.2) і (2.4) 10 lg \dot{I}_i , дБ		—	—	-110	+71,2
		—	—	59,9	280,7

Таблиця 2.6 – Розрахунки потенціалу МРЛ-5 для II каналу

Параметр (X)	Позначки	Значення X		10 lgX, дБ	
		Посібник з МРЛ	КД (од. СІ)	Посібник з МРЛ	КД (од. СІ)
Імпульсна потужність на виході магнетрона	P_i	800 кВт	800 000 Вт	+29	+59
Чутливість приймача	P_\emptyset $P_{i\delta\min}$	-136 дБ/Вт	-136 дБ/Вт	-(-136)	-(-136)
Апертурна площа	A_p	16 м ²	—	+12	—

Продовження таблиці 2.6

Параметр (X)	Позначки	Значення X		10 lgX, дБ	
		Посібник з МРЛ	КД (од. СІ)	Посібник з МРЛ	КД (од. СІ)
Тривалість зондуючого імпульсу	τ	—	$2 \cdot 10^6$ с	—	-57
Довжина зондуючого імпульсу	h	600 м	—	+27,8	—
Довжина хвилі	λ	10,15 см	$1,015 \cdot 10^{-1}$ м	-40,3	+19,9
Коефіцієнт посилення антени	G	—	40 дБ	—	80
Ширина діаграми направленості антени	φ_0	—	0,026 рад.	—	-15,8
Коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту	K_{AB}	0,32	0,32	-5	-5
Постійні перекладу формул (2.2) і (2.4) $10 \lg \dot{I}_i$, дБ		—	—	-110	+71,2
		—	—	49,5	272,5

2.4 Калібрування автоматизованого метеорологічного комплексу

2.4.1 Перевірка автоматизованого метеорологічного комплексу

Перевірка АМРК проводиться в два етапи:

1) одержання каліброваної характеристики вимірювального тракту МРЛ-5 – АМРК за допомогою штатних засобів МРЛ-5 та спеціальної програми калібрування, що входить до складу автоматизованого робочого місця інженера радіолокації АМРК;

2) перевірка виправданості та оцінка вірогідності інформації АМРК «Метеоячейка» про небезпечні явища, пов'язані з хмарністю та опадами, за даними наземних гідрометеостанцій в радіусі 200 км від місця установки МРЛ-5, які регулярно проводяться штатом АМРК.

Автоматизована обробка сигналів, відбитих від метеоцілей, передбачає операції, які забезпечують вимірювання середньої потужності відбитих сигналів, їхню обробку за заданими алгоритмам, зберігання вимірних значень, а також видачу обробленої інформації для її подальшої обробки на ЕВМ.

Усереднення відбитих сигналів на МРЛ відбувається за елементом похилої дальності, кутового елементу й інтервалу часу.

До вимірювального тракту МРЛ-5 – АМРК входить надвисокочастотна (НВЧ) частина приймального пристрою МРЛ-5, логарифмічний підсилювач проміжної частоти (ЛППЧ), відеопідсилювач, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), пристрій попередньої обробки сигналів (ППО-Д) АМРК.

Для одержання наскрізних характеристик вимірювального тракту використовують штатні радіолокаційні іспитові прилади (РІП) - генератори

стандартних НВЧ сигналів типу Г4-83 (для 3-сантиметрового каналу МРЛ-5) і типу Г4-80 (для 10-сантиметрового каналу МРЛ-5). Ці генератори підключаються на вхід НВЧ трактів МРЛ-5 через направлені відгалужувачі хвилеводного тракту та запускаються в режимі зовнішньої імпульсної модуляції з частотою посилення МРЛ-5 за схемою вимірювання чутливості (рис. 2.2).

Калібрування вимірювальних трактів відбувається з метою встановлення відповідності між потужністю сигналів на вході приймального пристрою МРЛ-5 та кодом на виході АЦП блоку обробки секції ППО-Д.

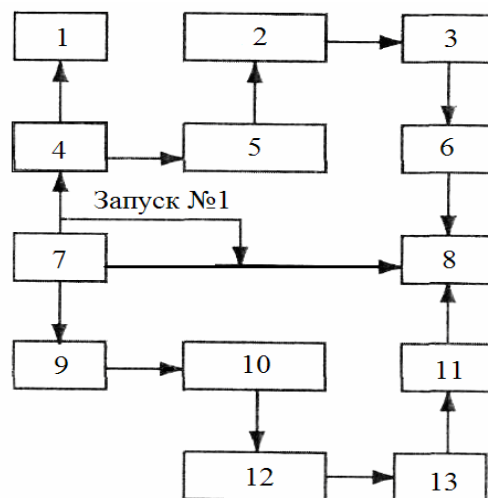


Рисунок 2.2 – Структурна схема підключення апаратури для вимірювання чутливості приймальних пристроїв, градування НВЧ атенуаторів, блоку обробки відео й системи корекції на квадрат відстані

1 - хвилезамірювач Ч2-37А; 2 - *p-i-p* діодні секції атенуаторів і системи корекції; 3 - пристрій прийому I каналу; 4 - генератор Г4-83; 5 - хвилевід ЄУ2.060.331; 6 - ділянка сигналу ЄУ2.208.260; 7 - генератор Г5-26; 8 - осцилограф СІ-55; 9 - генератор Г4-80; 10 - перехід ЄУ2.236.260; 11 - розподільувач сигналу ЄУ2.208.067; 12 - *p-i-p* діодні секції атенуаторів і системи корекції; 13 - пристрій прийому II каналу

Оцінка ступеня небезпеки метеорологічних явищ, пов'язаних з купчасто-дощовою хмарністю, виконується за даними вимірювань їхньої висоти та відбиття на певних рівнях за допомогою фізико-статистичних критеріїв. Вплив факторів, пов'язаних з особливостями поширення радіохвиль НВЧ діапазону, приводить до того, що оцінка ступеня небезпеки явищ має ймовірнісний характер. На підставі досвіду експлуатації мережі МРЛ встановлені ймовірності оцінки вірогідності й виправданості інформації МРЛ [6].

Штати МРЛ-5 утворюють регулярне зіставлення інформації наземних гідрометстанцій про грози з інформацією МРЛ-5. Результати

зіставлення разом з каліброваними характеристиками вимірювальних трактів дають об'єктивну оцінку надійності роботи АМРК та вірогідність одержуваної інформації.

Перевірка АМРК уповноваженими сторонніми організаціями виконується один раз на рік.

Всі прилади, які застосовуються для перевірки, повинні щорічно проходити метрологічний контроль. Калібрування АМРК виконується після вимірювання чутливості приймальних пристроїв МРЛ-5 та розрахунку метеорологічного потенціалу МРЛ-5. Калібрування АМРК розглянуте на прикладі калібрування АМРК «Метеоячейка».

2.4.2 Задача «Калібрування АРМ-ІН»

Кількість вимірювальних трактів визначається кількістю використовуваних каналів МРЛ-5 (один або два) і кількістю працездатних секцій ППО-ДМ. При використанні двох каналів МРЛ-5 і двох секцій ППО-ДМ загальна кількість вимірювальних трактів комплексу дорівнює чотирьом.

Калібрування кожного вимірювального комплексу «Метеоячейка» виконується з використанням контрольно-вимірювальної апаратури з комплекту МРЛ та задачі «Калібрування», яка викликається з головного меню АРМ-ІН за командою «Калібрування».

Задача «Калібрування» АРМ-ІН забезпечує:

- автоматичне (після установки каліброваного сигналу) визначення положення максимуму каліброваного сигналу;
- формування опорного каліброваного масиву, що включає зв'язані пари, значення каліброваного сигналу та усереднене значення сигналу на виході АЦП;
- розрахунок на основі опорного каліброваного масиву повної каліброваної характеристики, де для кожного рівня АЦП визначене значення потужності вхідного сигналу;
- документування каліброваної характеристики на диск в вигляді, зручному для автоматизованих розрахунків в процесі спостережень.

Управління задачею «Калібрування» виконується з меню «Калібрування» вибором необхідних функцій (рис. 2.3).

Завантаження завдання «Калібрування» виконується командою «Калібрування» з головного меню АРМ-ІН. Після введення команди на екрані виводиться меню «Калібрування».

Необхідну для калібрування контрольно-вимірювальну апаратуру варто підключити до МРЛ і налаштувати відповідно до інструкцій з експлуатації.

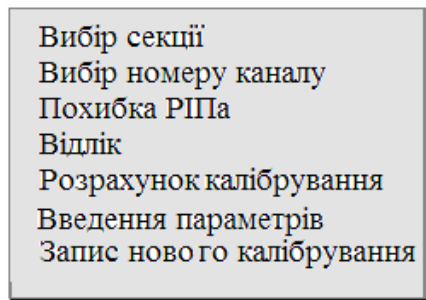


Рисунок 2.3 – Меню «Калібрування»

Встановлюють такі параметри каліброваного сигналу:

- затримка запуску каліброваного сигналу щодо запуску МРЛ в межах 30-400 мкс;
- тривалість каліброваного сигналу в межах 10-20 мкс;
- згасання на атенюаторі радіолокаційного іспитового приладу, відповідне значення сигналу на 40-60 дБ вище рівня чутливості.

Для вибору секції ППО-ДМ потрібно:

- задати (обрати) команду «Вибір» номера секції з меню «Калібрування» (рис. 2.3);
- при цьому на екран виводиться вікно «Вибір секції ППО» (рис. 2.4);

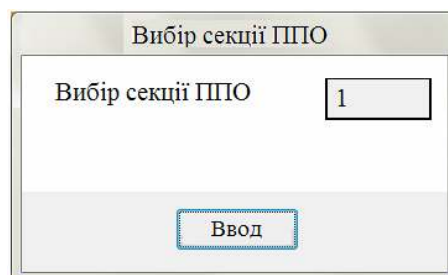


Рисунок 2.4– Вікно «Вибір секції ППО»

- змінити номер секції, якщо він не збігається з номером секції, обраної для роботи (номер 1 відповідає основній секції, номер 2 - резервній);

- натиснути кнопку «Ввод».

Для вибору номеру каналу (вимірювального тракту):

- обрати команду «Вибір номеру каналу» з меню «Калібрування» (рис. 2.3);

- при цьому на екран виводиться вікно «Вибір каналу МРЛ» (рис. 2.5);

- задати або підтвердити номер (номер 1 відповідає каналу МРЛ 3 см, номер 2 - каналу 10 см); натиснути кнопку «Ввод».

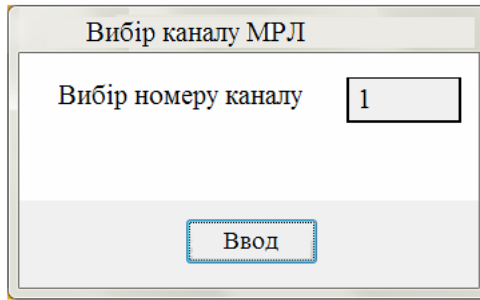


Рисунок 2.5 – Вікно «Вибір каналу МРЛ»

Для введення похибки РІПа потрібно:

- вибрати команду «*Похибка РІПа*» з меню «*Калібрування*» (рис. 2.3);
- при цьому на екран виводиться вікно «*Введення похибки РІПа*» (рис. 2.6);

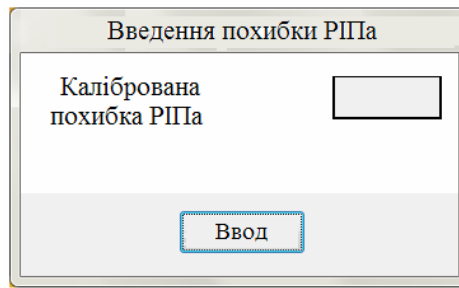


Рисунок 2.6 – Вікно «Введення похибки РІПа»

- ввести систематичну похибку РІПа та натиснути кнопку «*Ввод*».

Після виконання команди на екран виводиться вікно з контрольними й інформаційними повідомленнями, що містить такі інформаційні дані:

- дальність (відстань до) каліброваного сигналу;
- середнє значення сигналу АЦП;
- середнє значення шуму.

Крім того, на екран ПЕВМ виводиться графік опорної каліброваної характеристики за попередній строк калібрування зворотного тракту (рис. 2.7).

В процесі виконання команди виконується підготовка завдання до формування опорного масиву:

- очищення робочих масивів;
- визначення положення максимуму каліброваного сигналу;
- оцінка рівня шуму.

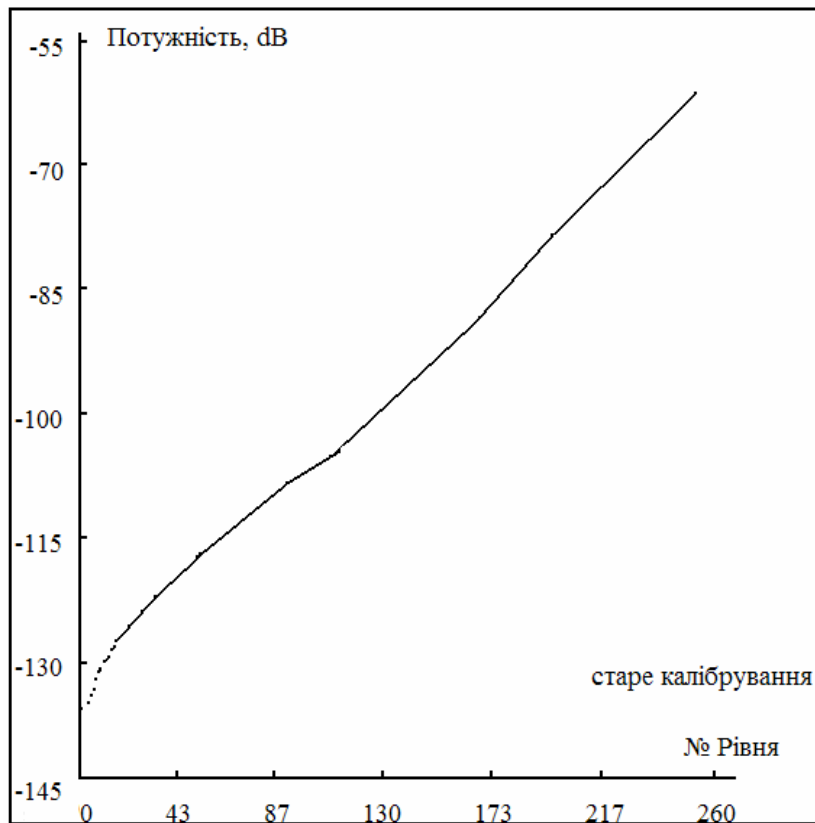


Рисунок 2.7 – Графік опорної каліброваної характеристики обраного тракту

Якщо рівень шуму менше чотирьох або більше десяти рівнів АЦП, варто зробити регулювання плати ПРВ у блоці обробки відеосигналу в МРЛ-5 з метою установки норми шуму, і тільки після цього проводити калібрування. Для цієї мети використовують два потенціометри, які регулюють зсув та амплітуду сигналу на виході «*Video АОМ*». Значення рівня шуму - від 4 до 10, а рівень сигналу при послабленні на РІПі 60 дБ повинен становити від 220 до 230 од АЦП.

Для формування одного елемента опорного каліброваного масиву потрібно: обрати команду «*Відлік*» з меню «*Калібрування*» (рис. 2.3), при цьому на екран виводиться вікно «*Відлік*» (рис. 2.8) для встановлення значення сигналу на РІПі, після появи запиту дати в апаратну кабінку МРЛ команду встановити на РІПі необхідне значення згасання на атенюаторі в децибелах; після отримання з апаратної кабінки МРЛ підтвердження про те, що необхідне значення згасання на РІПі встановлено, тоді сигнал налаштований, ввести із клавіатури ПЕВМ значення згасання на РІПі та натиснути кнопку «*Ввод*».

За виконанням команди на екран виводиться інформаційне повідомлення, що містить такі дані:

- значення встановленого на РІПі згасання з обліком введеної раніше систематичної похибки РІПу;

- середнє значення сигналу АЦП щодо шуму;
- середнє значення шуму.

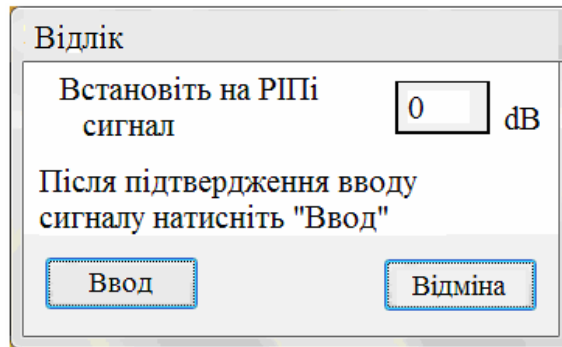


Рисунок 2.8 – Вікно «Відлік»

Кожен елемент опорного масиву після одержання аналізується на переповнення АЦП. Якщо переповнення АЦП мало місце, на екран виводиться попередження «Переповнення» АЦП, а елемент опорного масиву виключається. Переповнення АЦП констатується, якщо 25 % миттєвих відліків інтенсивності каліброваного сигналу рівні 255 рівням АЦП.

Кожен елемент опорного масиву представляється на графіку каліброваної характеристики в вигляді окремої точки, що дозволяє проводити візуальний контроль формування опорного масиву (рис. 2.9).

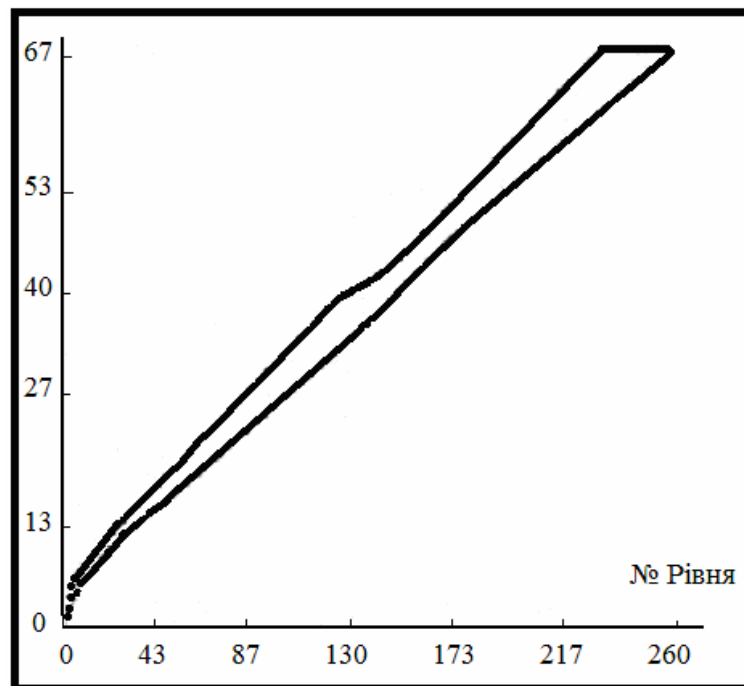


Рисунок 2.9 – Графік калібрувальної характеристики зворотного тракту

Рекомендується проводити формування опорного масиву в діапазоні згасання на РІПі від 55 до 145 дБ за шкалою атенюатора з дискретністю 5 дБ.

Варто звернути увагу на таке. Однією з умов придатності опорного масиву для подальшої обробки є наявність в ньому елемента, в якому усереднене значення сигналу на виході АЦП менше 1. Наявність такого елемента відстежується в процесі формування опорного масиву, і як тільки він з'явиться, на екран виводиться повідомлення «*Мінімальний сигнал одержали*».

Відсутність зазначеного повідомлення при проходженні всього наведеного вище діапазону згасання на РІПі свідчить про можливу несправність контрольно-вимірювальної апаратури МРЛ-5.

Для розрахунку калібрувальної характеристики варто обрати команду «*Розрахунок калібрування*» з меню «*Калібрування*» (рис. 2.3).

При візуальному контролі варто звернути увагу на такі відхилення:

- порушення монотонності калібрувальної характеристики, тобто наявність «провалів» або «плечей» (ділянок рівновеликих значень довжиною більше двох рівнів АЦП);
- значні, більші за 3 дБ, розбіжності між попередніми й новими характеристиками.

При виявленні описаних вище відхилень варто повторити калібрування вимірювального тракту.

Порушення монотонності калібрувальної характеристики при повторному калібруванні вказує на несправність в вимірювальному тракті МРЛ-5-АМРК. Спостереження з використанням несправного вимірювального тракту не повинні виконуватись до з'ясування та усунення причин несправності. Збереження значних розбіжностей характеристик при повторному калібруванні вказують на стійкість вимірювань в вимірювальному тракті, та нова калібрувальна характеристика може бути використана в процесі спостережень з відповідним записом в журналі експлуатації.

Для введення параметрів потрібно: обрати команду «*Введення параметрів*» з меню «*Калібрування*» (рис. 2.3), при цьому на екран виводиться вікно «*Введення параметрів*» (рис. 2.10), змінити при необхідності значення чутливості, ввести значення потужності; ввести значення втрат в тракті - нажати кнопку «*Ввод*».

Після введення параметрів автоматично виконується розрахунок значення потенціалу [7].

Якщо нова калібрувальна характеристика, за візуальною оцінкою, може бути використана в процесі спостережень, варто зробити заміну попередньої характеристики в задачі АРМ-ОР на нову.

Введення параметрів	
Чутливість	129
Потужність	150
Втрати у тракці	5
Ввод	

Рисунок 2.10 – Вікно «Введення параметрів»

Заміна виконується за командою «*Запис нового калібрування*» з меню «*Калібрування*».

Вихід з задачі виконується за командою «*Закінчити роботу*» з меню «*Калібрування*» (рис. 2.3).

Калібрування використаних при спостереженнях вимірювальних трактів проводиться в наступних випадках:

- контрольна перевірка калібрувальних характеристик (один раз в квартал), після проведення ремонтних і налагоджуваних робіт на прийомо-передавальних пристроях МРЛ;
- після ремонтних і налагоджуваних робіт в ППО-ДМ, якщо при цьому проводилася заміна або регулювання плати АЦП;
- за вказівкою інженера-радіометеоролога при погіршенні якості радіолокаційної метеорологічної інформації.

2.5 Зіставлення даних гідрометеостанції з даними автоматизованого метеорологічного комплексу

2.5.1 Виправданість

Зіставлення метеорологічних даних наземних гідрометстанцій (ГМС) про небезпечні явища (НЯ) з радіолокаційними даними АМРК «Метеоячейка» виконується для оцінки виправданості НЯ за даними АМРК. Виправданість є основним показником якості інформації АМРК та оцінки його роботи.

При зіставленні даних ГМС із даними АМРК відношення числа випадків деякого класу НЯ за даними АМРК (n_{My}), що збіглися з НЯ цього ж класу за даними ГМС, до числа випадків НЯ цього ж класу за даними ГМС ($N_{\hat{A}i \hat{N}}$), виражене у відсотках, є виправданість (P_0) цього класу НЯ за даними АМРК:

$$P_0 = \frac{n_{M\check{y}}}{N_{\check{A}\check{i}\check{N}}} 100\% . \quad (2.5)$$

Виправданість - характеристика, що враховує об'єктивні обставини, за якими даний АМРК може не виявити будь-які НЯ.

При зіставленні даних АМРК з даними ГМС відношення числа випадків деякого класу НЯ за даними ГМС ($n_{\check{A}\check{i}\check{N}}$), які збіглися з НЯ цього ж класу за даними АМРК, до числа випадків НЯ цього ж класу за даними АМРК ($N_{M\check{y}}$), виражене у відсотках, є достовірністю цього класу НЯ за даними АМРК:

$$P_0 = \frac{n_{\check{A}M\check{N}}}{N_{\check{i}\check{y}}} 100\% . \quad (2.6)$$

2.5.2 Достовірність

Достовірність - характеристика, що враховує об'єктивні обставини не виявлення АМРК будь-яких НЯ, властивих даних місцевості, а також особливості радіолокаційних умов спостережень. До таких обставин можуть відноситися:

- великі кути закриття в азимуті (секторі) місцезнаходження НЯ через наявність радіусу огляду АМРК високих «местників» (дерев, веж, будинків, споруд, як правило, на невеликій відстані від АМРК; пагорбів, гірських масивів, хребтів), що перешкоджають спостереженню за метеооб'єктами, які знаходяться за ними, з місця установки антени МРЛ;

- рідкі (змішані) опади в ближній зоні, особливо безпосередньо в місці розташування антени МРЛ, екрануючи той або інший метеооб'єкт через послаблення ними радіохвиль з різним ступенем від зменшення класу явища до повного зникнення радіолуні;

- часова або територіальна невідповідність даних ГМС і АМРК через неузгодженість антени МРЛ.

До зіставлення залучаються відомості гідрометеостанції штормового кільця, розташованих в радіусі 200 км від МРЛ, про небезпечні явища погоди різного класу (шквал зі швидкістю вітру більше 20 м/с град, гроза, потужні опади) та дані АМРК «Метеоячейка», які пов'язані з хмарністю.

Оцінка якості інформації АМРК «Метеоячейка» проводиться інженером-радіометеорологом АМРК щомісяця, як правило, в першій декаді наступного місяця [8].

Оцінка проводиться за допомогою спеціальної програми, що входить до складу програмного забезпечення (ПЗ) автоматизованого робочого місця інженера-радіометеоролога (АРМ-РМ).

Програма оцінки якості інформації даних ГМС і АМРК «Метеоячейка» складається з двох частин:

- створення архіву наземних даних, що розміщується на диску С в розділі SOP;

- розрахунок відсотку збігу інформації про НЯ за даними метеостанцій за даними АМРК в радіусі 200 км від місця установки МРЛ.

Архів даних ГМС створюється інженером-радіометеорологом з використанням розділу ПО (підменю головного меню АРМ-РМ) «Введення даних штормового кільця». В архів заносяться всі НЯ, що відзначалися ГМС, за період спостережень на АМРК.

Виправданість НЯ $> 95 \%$ вважається для АМРК відмінною.

Представниками ГМС періодично виконується перевірка роботи АМРК «Метеоячейка». Результати перевірки оформлюються актом довільної форми. В акті повинно бути зазначено, ким і коли була проведена перевірка й при необхідності юстировка, а також представлені результати перевірки, виправданість інформації АМРК «Метеоячейка» між перевірками та оцінка роботи АМРК методистами.

На підставі результатів перевірки робиться висновок про відповідність або невідповідність інформації АМРК вимогам, що ставляться.

3 ДОПЛЕРІВСЬКІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ РАДІОЛОКАТОРИ

3.1 Оглядовий доплерівський метеорологічний радіолокатор WSR-88D Nexrad

3.1.1 Загальні відомості

WSR-88D-S (weather surveillance radar - 1988 Doppler) розробляється і виготовляється фірмою Enterprise Electronic Corporation (EEC) в США. WSR-88D з довжиною хвилі 10,7 см (смуга S) є основним радіолокатором оперативної мережі, створеної за національною програмою США NEXRAD. Він поставляється на мережу NEXRAD з 1991 р.

На відміну від інших МРЛ, розроблених до 1988 р., WSR-88D призначений для спостережень при ясному (безхмарному) небі. Таким чином, його можна назвати першим МРЛ [9].

Енергетичні параметри WSR-88D його розробники визначали виходячи з вимог реєстрації відбитих сигналів від ясного неба в ближній зоні від радіолокатора в межах прикордонного шару.

WSR-88D для зондування ясного неба використовується зондуючий імпульс тривалістю 2 мкс. Така тривалість разом зі звуженням смуги приймача забезпечує енергетичний вигравш порядку 10 дБ, а з урахуванням тривалого когерентного накопичення в процесі повільного сканування антени сумарний вигравш складає 20-25 дБ в порівнянні з основним режимом роботи WSR-88D.

Відбиття в зворотному напрямку відбувається на турбулентних неоднорідностях показника заломлення повітря з просторовим масштабом, який дорівнює половині довжини хвилі випромінювання. Якщо половина довжини хвилі випромінювання менше внутрішнього масштабу турбулентності, тоді зворотне розсіювання на цій довжині хвилі практично не відбувається. Таким чином, для пояснення відбиття від ясного неба притягується відомий в оптиці принцип Вульфа-Брегга (принцип дифракційних решіток).

Питома ефективна площа розсіювання (ЕПР) η турбулентних неоднорідностей виражається формулою:

$$\eta(\lambda) = 0,38 C_n^2 \lambda^{-1/3}, \quad (3.1)$$

де λ – довжина хвилі;

C_n^2 – структурна постійна показника заломлення повітря ($\lambda^{-2/3}$).

Оцінка величини для $\lambda = 10,7$ см наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 –Характерні значення питомої ЕПР η та відображення Z для турбулізованих зон різної інтенсивності на $\lambda = 10,7$ см

Інтенсивність турбулентності	$C_{nM}^2 m^{-2/3}$	ηm^{-1}	$Z(\text{дБЗ})$
Слабка	$6 \cdot 10^{-17}$	$4,79 \cdot 10^{-17}$	-46,4
Помірна	$2 \cdot 10^{-15}$	$1,60 \cdot 10^{-15}$	-31,2
Сильна	$3 \cdot 10^{-13}$	$2,39 \cdot 10^{-13}$	-9,4

З таблиці видно, що відображеність зон сильної турбулентності ясного неба по порядку відповідає відбиваній слаборозвинених хмар без опадів.

Проте досвід практичного вживання WSR-88D показав, що в теплий сезон в чистому повітрі домінує розсіяння, обумовлене комахами, які переносяться вітром. В цих ситуаціях відбитий сигнал знаходиться в діапазоні від -5 до 20 дБЗ, а іноді в лініях конвергенції перевищує 30 дБЗ. Для денного часу та температури повітря вище 10 °С, при якій починається активність комах, відбитий сигнал від ясного неба можна використовувати для оцінки вітру. Вектори вітру виходять приблизно через кожні 7 км.

Структура WSR-88D складається з трьох основних складових частин: метеорологічної станції (МРЛ) радіолокації, командно-диспетчерського пункту (КДП) і абонентних пунктів віддалених користувачів (АПВК) (рис. 3.1).

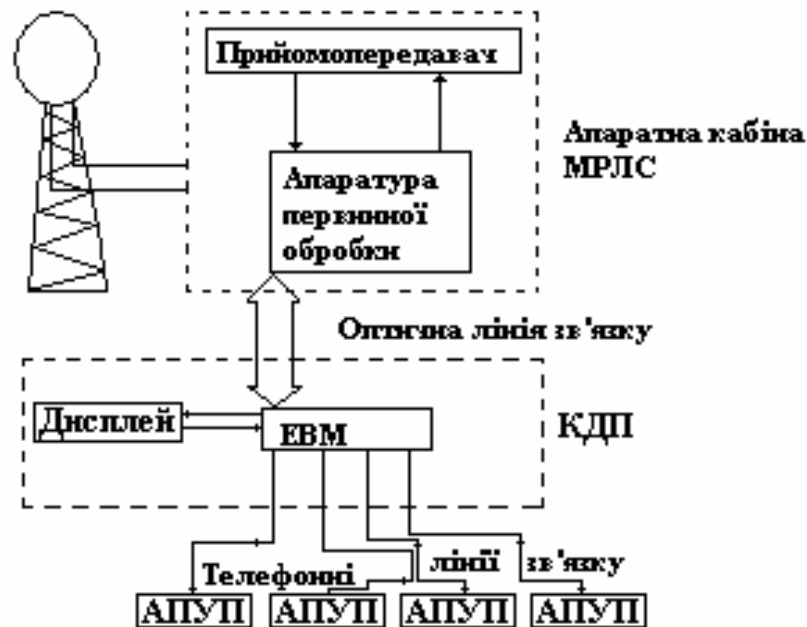


Рисунок 3.1 – Функціональна схема доплерівського автоматизованого радіолокаційного комплексу

У свою чергу до складу МРЛС входять антенно-хвильоводна система, приймач-передавач, а також апаратура первинної обробки інформації радіолокації. МРЛС є повністю автоматизованою не обслуговуваною складовою частиною комплексу, керованою дистанційно з КДП. Антена з радіопрозорим укриттям може вмонтовуватися на вежі, башті або даху будівлі. Приймач-передавач з апаратурою первинної обробки розміщується в спеціальному контейнері, який може транспортуватися і переміщатися на відкритій місцевості зовні приміщення. КДП МРЛС розміщується в будівлі і з'єднується з МРЛС високошвидкісною лінією зв'язку, який може бути використаний високочастотний кабель, оптоволоконна або радіорелейна лінія. Основною складовою частиною КДП є ЕОМ у функції якої входять управління радіолокатором і тестування роботи комплексу, прийом і вторинна обробка інформації радіолокації, представлення результатів обробки на кольорових індикаторах, архівація й передача інформації віддаленим користувачам. Віддалені користувачі, оснащені персональними комп'ютерами, можуть одержувати інформацію, що цікавить їх, в інтерактивному режимі з КДП по телефонній лінії зв'язку.

3.1.2 Основні технічні характеристики

Режим роботи та схеми обробки. Дальність дії SR-SSD в режимі вимірювання радіолокаційної відбиваності складає 450 км, хоча термін «вимірювання» на таких віддаленнях, коли просторовий дозвіл складає 8 км, а інтервал висот до 16 км знаходиться в зоні геометричної тіні за рахунок кривизни Землі, не цілком відповідає дійсності. Більш правильно було б говорити про виявленні дуже потужних гроз. Про кількісні виміри можна говорити в діапазоні дальності 256 км. Дальність дії в режимі вимірювання швидкості становить 120 км. Точність вимірювання швидкості в межах 1 м/с гарантується лише на відстані до 110-120 км, а на більших відстанях вірогідність інформації, одержуваної в каналі швидкості, істотно нижче.

Інтервал однозначного вимірювання швидкості становить ± 50 м/с, що цілком достатньо для виявлення найдужчих шквалів і переважної більшості смерчів.

Середньоквадратична погрішність визначення відбиваності $a/1$ дБ. Середньоквадратична погрішність визначення радіальної швидкості й ширини спектра швидкостей при відношенні сигнал/шум більше 3 дБ дорівнює 1 м/с.

Апаратура первинної обробки (АПО) забезпечує обробку сигналу в наступних трьох режимах радіолокаційного огляду:

– в режимі вимірювання відбиваності при швидкому темпі огляду простору (~ 6 об/хв);

– в режимі вимірювання відбиваності, середньої швидкості й ширини спектра при помірному темпі огляду (~ 2 об/хв);

– в режимі вимірювання відбиваності, середньої швидкості й ширини спектра при повільному темпі огляду (~ 0,1.. 0,2 об/хв) день роботи зі слабких сигналів від гідрометеорів і ясного неба.

У всіх випадках може відбуватися як азимутальне, так і кутомістні сканування антенним променем з вищевказаними швидкостями.

АПО призначена для оцінки радіолокаційної відбиваності Z , середньої доплерівської швидкості y , і середньоквадратичної ширини доплерівського спектра швидкостей a_v у сферичній системі координат з дозволом $250 \text{ мх}1^\circ$ у темпі надходження інформації. Вимірювання відбиваності відбувається в інтервалі дальності до 256 км із дозволом по промені 0,25 км і в інтервалі дальності 512 км із дозволом по промені 0,5 км; таким чином, число оброблюваних елементів дальності по промені при вимірюванні відбиваності становить 1024. Вимірювання V_L і σ_V здійснюється до віддалень 128 км із дозволом 0,25 км, тобто в 512 каналах дальності. В АПО забезпечується розрахунок відносин сигнал/шум, усунення неоднозначності але швидкості, придушення сигналів місцевих предметів, формування керуючого сигналу швидкодіючого АРУ.

До складу АПО входять як апаратні, так і програмні засоби обробки. До апаратних засобів ставляться цифровий інтегратор, що здійснює осереднення, що обгинає відбитий сигнал на виході логарифмічного приймача в каналі вимірювання відбиваності, і модифікований пульсарний процесор, що діє в каналі вимірювання швидкості й призначений для оцінки компонентів комплексного міжперіодного коефіцієнта кореляції у відповідності зі схемою методу парних імпульсів, а також для оцінки декількох гармонік доплерівського спектра поблизу кульової частоти. До програмних засобів ставиться сукупність мікропроцесорів, що забезпечують розрахунок моментів доплерівського спектра на основі комплексного коефіцієнта кореляції з урахуванням реакції сигналів від місцевих предметів і усунення неоднозначності за швидкостями.

Обчислювальний комплекс КДП забезпечує прийом, нагромадження й вторинну обробку метеорологічної радіолокаційної інформації, класифікацію метеоявищ по типах, контроль за режимом огляду простору, архівацію результатів класифікації метеоявищ, документування результатів класифікації, перевірку працездатності й тестування комплексу, видачу метеорологічної інформації зовнішнім споживачам.

Всю сукупність інформаційних продуктів, що утворюються на виході системи вторинної обробки, можна умовно підрозділити на базові й похідні.

До базових продуктів відносяться карти радіолокаційної відбиваності, радіальної швидкості й ширини спектра в будь-якому заданому горизонтальному, вертикальному або конічному перетинах. Це той мінімальний обсяг інформації, яка потрібна на виході автоматизованого доплерівського метеорологічного радіолокатора. Одержання базового інформаційного продукту передбачає перетворення сферичних координат у декарті, розфасовку інформації, що надходить із АПО, у стандартні осередки подання, осереднення Z , v , σ_v , в межах комірок представлення та формування з об'ємного масиву первинних даних кожного розтину, відображуваного на кольоровому індикаторі КДП.

Похідні продукти - це інформація, одержувана шляхом обробки об'ємного масиву даних про відбиваність, радіальну швидкість і ширину доплерівського спектру з метою формування критеріїв небезпеки явищ і оцінки метеорологічних параметрів, призначених безпосередньо для використання споживачем. Перелік похідних інформаційних продуктів і обсяг відповідного математичного забезпечення можуть нарощуватись залежно від конкретних потреб споживача, можливостей ЕОМ КДП, ступеня пропрацьованості алгоритмів, конкретних кліматичних особливостей регіону та інше.

Процес вторинної обробки радіолокаційної доплерівської інформації розділяють на кілька стадій. У найбільш інтенсивному по потоку інформації доплерівському режимі огляду інформація на КДП надходить порціями – приблизно 2 Кбайт кожні 90 мс, що відповідає накопичуванню даних на одному промені з просторовим дозволом за дальністю 250 м та за азимутом 1° . Огляд простору здійснюється послідовно при 14 кутах місця (0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 8; 9,5; 11,5; 13,5; 15,5; 17,5 и $19,5^\circ$), що займає 7 хв при швидкості обертання 2 об/хв.

На першій стадії вторинної обробки відбувається перетворення сферичних координат у декарті й розфасовка інформації в стандартні декартового осередку подання, а також розрахунок радіальних і азимутальних градієнтів радіальних доплерівських швидкостей $\partial v/\partial r$ та $\partial v/\partial \theta$ як різниці значень V в сусідніх елементах дозволу за дальністю та за азимутом. Аналогічні операції утворюються для другого променя і так далі в міру огляду простору. Таким чином, в процесі огляду здійснюється поточне осереднення величин Z , v , σ_v , $\partial v/\partial r$, $\partial v/\partial \theta$ по елементах вирішення, які опинилися у межах стандартних декартових осередках дозволу. При цьому частину первинної інформації про радіальні швидкості зберігають у сферичній системі координат, принаймні для одного з азимутальних розрізів, оскільки згодом для реалізації деяких алгоритмів, наприклад, VAD зручніше працювати в сферичній системі координат.

На другій стадії вторинної обробки формуються похідні інформаційні продукти. Карти висоти радіолуни, максимальної

відбиваності, опадів виходять шляхом обробки об'ємного масиву даних про радіолокаційну відбиваність на декартовій сітці аналогічно тому, як це робиться в системах автоматизованої обробки даних некогерентного метеорологічного радіолокатора [10].

Режекція сигналів місцевих предметів у каналі швидкостей, здійснювана в WSR-88D у другому й третьому режимах, дозволяє помітно підвищити точність вимірювання опадів при використанні відомого співвідношення $Z-1$ (де 1 – інтенсивність осадів), принаймні в тих елементах дозволу, де відношення потужності сигналу від місцевих предметів до потужності сигналу, відбитого від метеоб'єкта, не перевищує 20 дБ. Швидкість та напрямок переміщення зон радіолуни визначається за об'ємним масивом даних про відбиваність шляхом кореляційного аналізу зображень, знятих в послідовні моменти часу. При цьому наявність інформації про доплерівські швидкості може підвищити якість діагнозу та надто короткострокового прогнозу переміщення хмар або зон, пов'язаних з небезпечними явищами.

Особливості WSR-88D. Оглядовий доплерівський метеорологічний радіолокатор WSR-88D розроблений з урахуванням оперативного досвіду успішної роботи з серійними метеорологічними радіолокаторами WSR-74 і WSR-81, які були установлені більш ніж в 60 країнах світу. Він зроблений повністю на напівпровідниках, за винятком магнетрона, тиратрона та ЕЛТ, і забезпечує надзвичайно високу надійність та працездатність. Радіолокатор WSR-88D відрізняється такими особливостями:

- доплерівський режим та режим вимірювання інтенсивності;
- автоматичне тестування роботи;
- докладне діагностичне тестування робочих характеристик, програмувальна чутливість до дощу, льоду та снігу;
- придушення «местників» до -27дБ ;
- шість каліброваних інтенсивностей дощу з вибором кольору за бажанням користувача;
- дев'ять каліброваних значень швидкості від 0 до ± 50 м/с в режимі вобуляції або від 0 до ± 16 м/с на одній частоті посилок;
- шість каліброваних значень турбулентності.

Прийомо-передавач. В передавачі використано довговічний коаксіальний магнетрон, який виробляє мікрохвильову енергію великої потужності, випромінювану радіолокатором. Частота випромінювання легко встановлюється кнопкою налаштування.

Процесор відеосигналу. Відеопроцесор у цифровому вигляді опрацьовує логарифмічні відеосигнали й сигнали з виходу прийомо-передавача з визначенням фази I й квадратури Q . Для одержання сигналів інтенсивності дощу в логарифмічний відеосигнал уводиться виправлення на дальність (тимчасове автоматичне регулювання посилення, ТАРП).

Відеосигнали I і Q обробляються методом пульспарної обробки імпульсів, у результаті чого виходить середня швидкість і ширина спектра швидкостей у потрібних районах. При цьому виробляється придушення местників за принципом нульової швидкості шляхом вибору фільтрів споживачем.

Вузол управління. Вузол управління складається з індикатора АД (амплітуда-дальність), блоку управління радіолокатором і блока живлення. У блоці управління радіолокатором розміщена вся електронна схема управління антеною, прийомо-передавачем і контролю за сигналами системи, а саме струму магнетрона, високої напруги, тиску у хвилеводі, блокування й обробки відеосигналу. Робота вузла управління контролюється за допомогою меню процесором радіолокаційного зображення.

Для підвищення чутливості приймач має підсилювач проміжної частоти (30 МГц) з низьким рівнем шуму, змішувач, стабілізований і когерентний гетеродини для обробки доплерівських сигналів, двоканальні підсилювачі проміжної частоти з логарифмічною й лінійною характеристиками. Система може бути укомплектована модулем ВіТЕ (Built-in Test Equipment) для моніторингу стану системи з генераторами стандартних сигналів.

Процесор радіолокаційного зображення. Цей процесор являє собою настільний блок з кольоровим ТВ монітором 19 дюймів. Прості панелі управління забезпечують простоту роботи й мінімум обслуговування. Цей зручний для користувача дисплей є основним робочим місцем на WSR-88D. За допомогою джойстика оператор може встановлювати курсор на екранне меню й вибирати будь-який робочий режим і необхідну функцію дисплея. Цей блок має максимальну гнучкість і забезпечує будь-який необхідний режим роботи.

Інтерактивна система обробки радіолокаційної інформації (IRIS). У більшості випадків метеорологіві потрібне об'ємне сканування простору зі спеціальною обробкою зображення. Для цього на радіолокаторах WSR-88D може застосовуватися система IRIS. Модульна структура програмних засобів IRIS дозволяє комбінувати програмні засоби за бажанням користувача. IRIS управляє радіолокатором, забезпечує інтерфейс і реально-тимчасове подання інформації. Такі базові параметри, як середня швидкість, відбиваність і ширина спектра, автоматично виводяться на екран і записуються на диск. Для аналізу інформації може застосовуватися режим відтворення. Модуль генератора продуктів видає на екран користувача необхідну для роботи інформацію. Апаратні й програмні засоби системи IRIS створені за принципом вузлів радіолокаційної мережі.

Антенна і радіопрозоре укриття. З метою підвищення надійності та економії антени WSR-88D закривається відлитим зі скловолокна

ковпаком. Ковпак захищає від вітрового й крижаного навантаження, а також від різних речовин, що втримуються в навколишньому середовищі. Для забезпечення легкості та довговічності антени, колонка зроблена з анодированого литого алюмінію. Це зменшує навантаження на привід, на вишку, а виходить, підвищує надійність і знижує вимоги до розміщення.

Технічні характеристики WSR-88DS (які не ввійшли в табл. 3.1):

- поляризація - лінійна горизонтальна;
- рух за азимутом від -2 до 90° при швидкості 0-15 °/с
- точність $\pm 0,2^\circ$;
- робочі режими – ручний, автоматичний або за участю комп'ютера.

Вихідний сигнал приймача:

- логарифмічний (для інтенсивності) 78 дБ і вище;
- лінійний (доплерівський режим) сигнали I і Q 26-80 дБ з АРУ.

Допплерівський режим:

- обробка ІКО й ІДВ методом парних імпульсів;
- частота вибірки $N \times 125$ м;
- розширення діапазону вимірюваних швидкостей – метод подвійний ЧСІ.

3.1.3 Алгоритми

Схема перетворення даних. WSR-88D є рівною мірою процесором сигналів, і доплерівським радіолокатором. В підсистему вторинної обробки входить паралельний комп'ютер на 3280 знаків з центральним блоком обробки на 6,1 млн команд в секунду, який можна розширити при необхідності до трьох таких блоків.

Обробка й архівація інформації в WSR-88D багаторівнева (рис. 3.2).

Базові дані (або продукти першого рівня) виходять на станції збору радіолокаційних даних (RDA). Система RDA перетворить прийнятий сигнал у відбиваний, радіальну швидкість і спектральну ширину в полярних координатах, а також архівує ці дані на ексабайтову частку. Дані в полярних координатах називають продуктами другого рівня. Після цього дані другого рівня передаються в генератор радіолокаційних продуктів (RPG), де утворюються графічні продукти (третього рівня) для їхнього відображення в Національній метеослужбі та передачі комерційним постачальникам даних, а також для архівації в Національному кліматичному центрі.

Національна лабораторія сильних штормів розробила систему радіолокаційного інтерфейсу й поширення даних (RIDDS) як засіб доступу до радіолокаційних даних другого рівня й паралельного виробництва продуктів третього рівня в RPG. Робоча станція RIDDS передає кожен пачку даних другого рівня в кільцевий буфер, де формуються пакети з

декількох пачок радіолокаційних даних, потім стискаються й ставляться в чергу на передачу. Дані передаються по лінії на робочу станцію, де розвертаються й знову збираються в обсяги другого рівня. Робоча станція, призначена для обробки й подання радіолокаційних обсягів, копіює останні файли другого рівня з диска й перетворює їх в універсальний формат. На цьому етапі алгоритм автоматичного контролю якості видаляє відбиття від місцевих предметів і коректує зміщені швидкості.

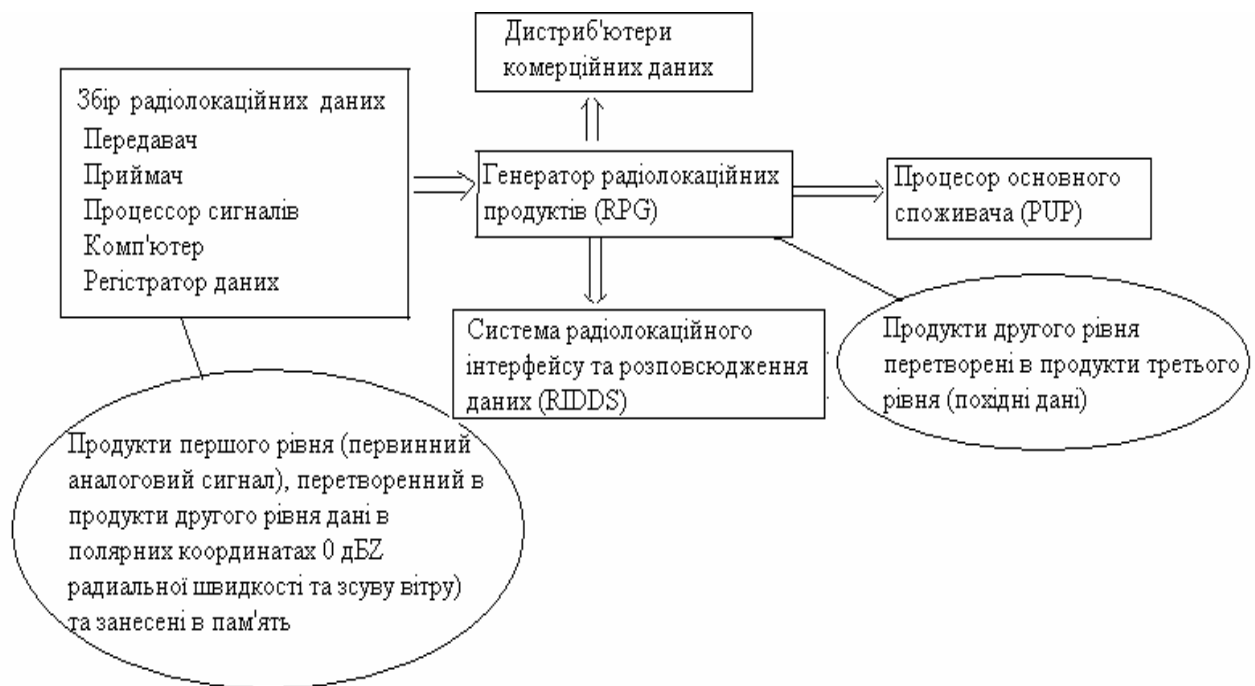


Рисунок 3.2 – Схема перетворення даних WSR-88D з даних першого рівня в дані другого рівня для обробки та архівації

Відредаговані дані про відбиваність і радіальну швидкість білінійно інтерполюються на декартову сітку (2x2x0,5 км) програмою NCAR SPRINT і перетворюються в NetCDF (загальний формат даних).

Метеорологічні алгоритми, реалізовані в WSR-8HD:

- 1) виділення частини шторму, 2) визначення центроїдів штормів,
- 3) супровід шторму, 4) прогноз місцезнаходження шторму, 5) структура шторму, 6) град, 7) мезоциклон, 8) вершини радіолуни, 9) вертикально проінтегрована водність (VIL), 10) ймовірність небезпечних явищ погоди,
- 11) зсуви вітру, 12) індикація швидкості та азимуту (VAD), 13) турбулентність, 14) об'ємна обробка швидкості (ООС), 15) попередня обробка опадів, 16) інтенсивність опадів, 17) накопичення опадів,
- 18) критконтроль даних по опадам, 19) ознака вихрячого торнадо (ОВТ), 20) результати за опадами, 21) фронт поривів вітру, 22) поперечний вітер,
- 23) конвергенція/дивергенція. 24) ІКО ПВ: відбиваність і швидкість, 25) потенціал повені.

Одержані на WSR-NHD результати спостережень і обробки за алгоритмами (продукти).

Основні (базові) продукти: 1) карти відбиваності, 2) карти швидкості, 3) карти ширини спектра.

Похідні продукти: 4) загальний зсув вітру, 5) контур загального зсуву вітру, 6) вершини радіовідлуння, 7) контур вершин радіовідлуння, 8) загальна відбиваність, 9) контур загальної відбиваності, 10) загальна відбиваність шару, 11) турбулентність шару, 12) індекс граду, 13) мезоциклон, 14) ознака вихрового торнадо (ОВТ), 15) структура шторму, 16) данні супроводу шторму, 17) область слабого радіовідлуння («пачка шарів відбиваності»), 18) вітер на дисплеї «швидкість/азимут», 19) графік на дисплеї «швидкість/азимут», 20) комбінований момент, 21) відносна швидкість шторму, 22) відображення аналізу небезпечних явищ погоди, 23) ймовірність небезпечних явищ погоди, 24) вертикально проінтегрована водність (VIL), 25) накопичення опадів за 1 рік, 26) накопичення опадів за 3 роки, 27) загальне накопичення опадів за шторм, 28) поперечник.

Буквено-цифрові продукти: 29) повідомлення про небезпечне явище погоди, 30) повідомлення звичайним текстом, 31) повідомлення радіолокаційним кодом.

Похідні продукти матриці даних: 32) метеодані, небезпечні для авіації, 33) радіальні дані про відбиваність; 34) радіальні дані за швидкістю; 35) цифрові радіолокаційні оцінки опадів за 1 годину.

3.2 Метеорологічний доплерівський радіолокатор METEOR 500C

3.2.1 Загальна структура та основні характеристики

Метеорологічний доплерівський радіолокатор METEOR 500 C складається з наступних основних підсистем (рис. 3.3):

- антенна система CLP10 з великою точністю позиціонування; магнетронний передавач потужністю 250 кВт, керований твердотільним двоімпульсним модулятором, і ВЧ приймач із низьким коефіцієнтом шуму;
- процесор сигналів ASPEN® DRX – цифровий приймач і процесор сигналів;
- система управління DIRAC для збору та контролю за параметрами ДМРЛ і радіолокаційними даними, створена на базі сучасної технології управління й автоматизації;
- програма RAINBOW® для створення вихідних продуктів на основі останніх досягнень у радіолокаційній метеорології, що функціонує під управлінням ОС Unix [11].

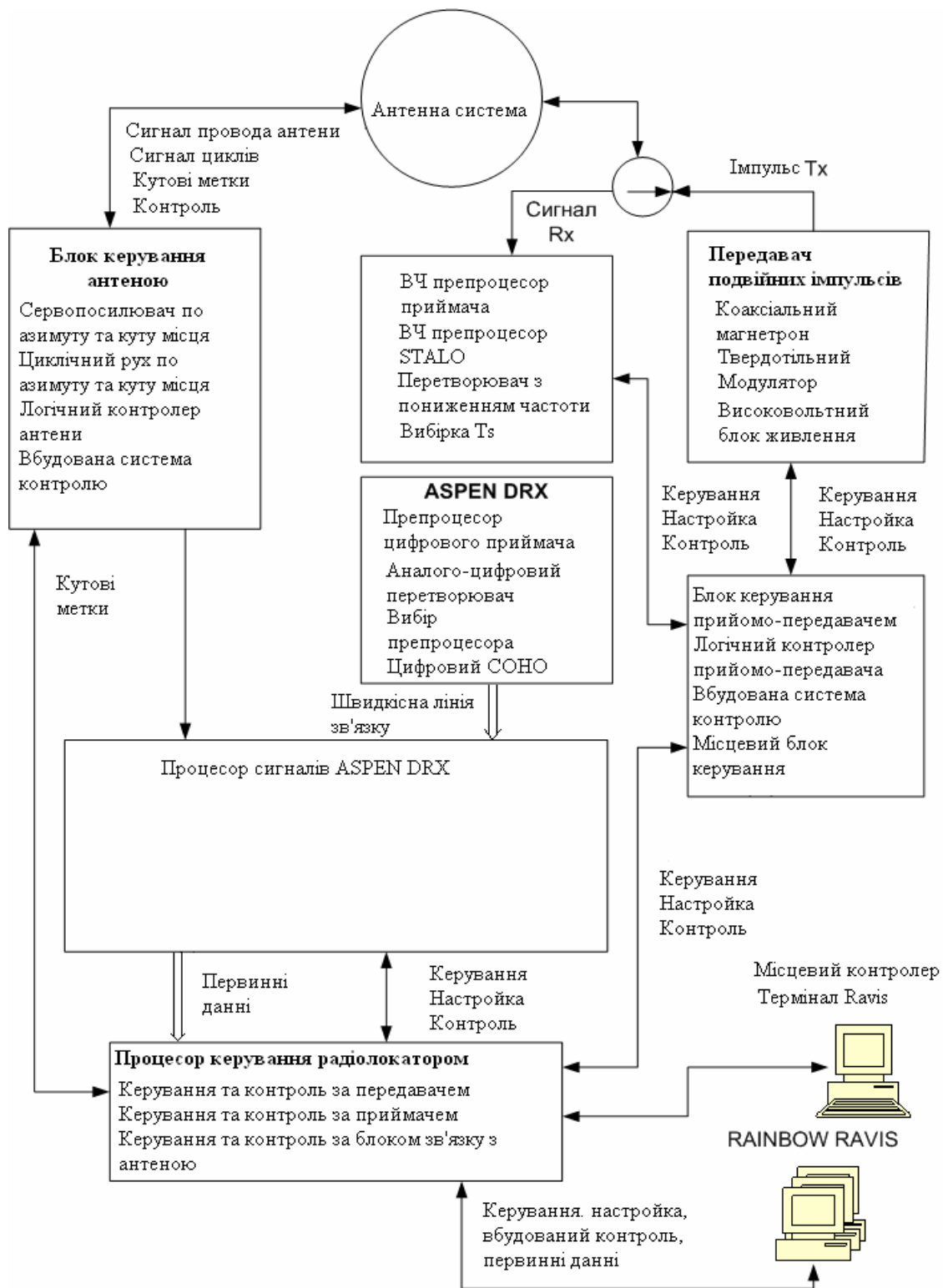


Рисунок 3.3 – Метеорологічний доплерівський радіолокатор METEOR 500 C

Основні робочі характеристики ДМРЛ МЕТЕОР 500 С:

Допплерівський режим

Тривалість імпульсу	0,83 мкс
Частота проходження імпульсів.....	250-1200 Гц
Індекс вобуляції.....	3/2, 4/3, 5/4
Дозвіл за дальністю та кутом.....	125 м, 1° 125 км
Радіус дії.....	$\pm 47,8$ м/с

Діапазон вимірювання швидкості

Чутливість на вході логарифмічного вузькосмугового підсилювача.....	≤ -138 дБ/Вт
Мінімальна відбиваність на відстані 50 км.....	≤ -5.8 дБZ
Придушення місцевих перешкод як правило.....	≥ 45 дБ

Режим відбиваності

Тривалість імпульсу.....	2 мкс
Частота проходження імпульсів.....	250-550 Гц.
Дозвіл дальності та куту.....	300 м, $\leq 1,0^{\circ}$
Максимальна дальність.....	≥ 500 км
Чутливість (MDDS) на вході логарифмічного вузькосмугового підсилювача.....	≤ -142 дБ/Вт
Мінімальна відбиваність на відстані 50 км.....	$\leq -13,6$ дБZ
Придушення місцевих перешкод як правило.....	≥ 45 дБ

Специфікація антени

Робоча частота.....	2,42-5,82 ГГц
Поляризація	лінійна, горизонтальна
Максимум ширини променя ДНА в точках 3 дБ.....	$1,0^{\circ}$
Коефіцієнт посилення параболічної антени	Мінімум 44,5 дБ; як правило 45 дБ
Перший рівень бічної пелюстки за азимутом та кутом місця.....	максимум -28 дБ; як правило, - 30 дБ
Розподіл кросполяризація.....	максимум -30 дБ
Діаметр відбивача (дзеркала).....	4,2 м
Кутовий діапазон за азимутом.....	від 0 до 360° безперервно
Кутовий діапазон за кутом місця.....	від -3 до $+180^{\circ}$
Швидкість за азимутом та кутом місця	від 1 до 36%
Прискорення за азимутом та кутом місця.....	Максимум 20%
Точність наведення.....	$\pm 0,1^{\circ}$
Час переходу на 2° і точність.....	1,5 с; $\pm 0,1^{\circ}$

Характеристики радіопрозорого укриття антени:

Тип та форма секції.....	сендвіч, апельсинова шкірка
З'єднання секції.....	з накладенням країв
Діаметр.....	6,7 м
Втрати при передачі	максимум 0,3 дБ (в один бік)
Стійкість до вітру.....	максимум 0,95 м/с

Прийомо-передавач

Пікова потужність імпульсу.....	≥ 250 кВт на виході передавача
Коефіцієнт шуму приймача.....	≤ 2 дБ
Ефективна ширина смуги (імпульсів 0,6 МГц $\pm 5\%$, погоджений 2 мкс).....	фільтр
Ефективна ширина смуги (імпульсів 0,83 1,5 МГц $\pm 10\%$, погоджений мкс).....	фільтр
Ефективний динамічний діапазон.....	95 дБ

Радіопрозоре укриття антени являє собою сферичну конструкцію без площин, що входять в корисну площу обтікача або систематичних відбиттів, що створюють. Поверхня обтікача гідрофобна та стійка до сонячного опромінення, пилу, граду, вітру з піском.

Радіопрозоре укриття антени встановлюється на даху будинку або на вищій, забезпечується блискавковідводом і сигнальними ліхтарями відповідно до специфікації ІСАО. Обтікач зміцнений металевим кільцем, який забетонований у фундамент будинку або встановлений на металевій платформі вишки.

Передавальна система складається з коаксіального магнетрона та твердотілого модулятора з подвійним імпульсом. Модулятор видає на катод коаксіального магнетрона імпульс високої напруги. Коли перевищується гранична напруга генерації, в лампі починається мікрохвильова генерація. Енергія НВЧ коливань з резонатора лампи приділяється на антену. Розрахункова довговічність коаксіального магнетрона – близько 50 000 г.

Твердотільний модулятор складається з конденсаторного пристрою, стабілізатора зарядної напруги, твердотілого комутаційного складання та перетворювача імпульсів.

Приймач являє собою цифровий супергетеродин. В нього входять ВЧ блок, блок цифрової вибірки ПЧ і підсистема когерентного гетеродина. ВЧ блок з'єднаний прямо з антенним перемикачем. Він підсилює прийняті сигнали за допомогою малошумлячого підсилювача та перетворить їх в проміжну частоту, використовуючи сигнал стабільного гетеродина.

Оскільки заключний етап когерентного перетворення – фазове порівняння – і демодуляція комплексної смуги частот (демодуляція I/Q)

виконуються процесором сигналів, аналогова частина приймача значно спрощується. Завдяки великому динамічному діапазону цифрового перетворювача ПЧ логарифмічний канал приймача стає непотрібним.

Зменшення рівня шуму виходить також за рахунок фільтрації смуги пропускання цифрового, а не аналогового сигналу. Ця процедура зменшує шум квантування, внесений аналого-цифровими перетворювачами.

3.2.2 Процесор

Процесор сигналів ASPEN® DRX, або цифровий приймач і процесор сигналів, забезпечує інтелектуальний зв'язок між ВЧ апаратурою (приймач, передавач і антенна система) і системою генерації радіолокаційних продуктів та їхнього відображення (див. рис. 3.3).

Процесор сигналів ASPEN® DRX являє собою програмувальний цифровий приймач, об'єднаний з високоякісними цифровими процесорами обробки сигналу з плаваючою комою, що роблять обробку сигналів в реальному часі та виконують контрольні функції для радіолокаційних додатків.

Блок ASPEN® DRX забезпечує виконання всіх функцій цифрового приймача, а також роботу трьох процесорів сигналу SHARC.

Процесор сигналів має два канали квантування ПЧ, що охоплюють динамічний діапазон понад 95 дБ (до точки стиску 1 дБ). На кожному каналі є програмувальний цифровий демодулятор і фільтр нижніх частот, що працюють на частоті 40 МГц. Фільтр FIR має до 256 режимів, за яких з великою точністю встановлюється смуга пропускання ПЧ.

Крім того, ASPEN® DRX управляє допоміжною системою фазової модуляції передавача в клістронних системах для виділення відбиттів попереднього зондування, відслідковує кути антени для синхронізації груп даних і блокування випромінювання в заданих секторах, а також управляє системою додаткового налаштування.

Блок ASPENW® DRX здатний виконувати стискання імпульсів. Ця опція додає комплексні поперечні фільтри для відфільтрованих даних I/Q смуги відеочастот. Можна використовувати до 128 комплексних відводів з інтервалами 104 та не одержати різні схеми стиску імпульсів.

Плата цифрової обробки сигналів COTS VME являє собою ряд процесорів SHARC та інтерфейс портової дво пам'яті з шиною VME. Плату можна сконфігурувати з одним з 18 процесорів SHARC при максимумі 2,52 GFLOP обчислювальної потужності, чого досить для будь-яких умов обробки радіолокаційних сигналів в майбутньому, та всі вони укладені в одному осередку VME.

В своїй основній конфігурації плата DSP містить два чіпи SHARC DSP, які дають системі ASPENS® DRX в цілому 585 MFLOP обчислювальної потужності. Цієї обчислювальної потужності досить для

різних умов доплерівської обробки 2000 дискретів дальності при ЧСІ 1000 Гц. До плати DSP можна додати до двох дочірніх плат SHARC' або інші інтерфейсні модулі для особливих цілей.

Така конфігурація масштабується від не доплерівської обробки сигналів тільки за відбиваності до повної доплерівської обробки сигналів з подвійною поляризацією з добуванням відбиттів другого проходу та швидкою перебудовою частоти.

Обробка каналу I/Q починається з фільтрації місцевих перешкод. Є 16 фільтрів, включаючи додаткові фільтри для користувача. Фільтри можуть додатково програмуватися за дальністю або за дальністю/азимутом/кутом місця (режим фільтрації за картою місцевих перешкод).

Потім процесор сигналів обчислює відліки автоковаріаційної функції з інтервалами R_0 , R_1 і R_2 . При бажанні ці відліки інтегруються за дальністю та азимуту, а потім процесор сигналів методом парних імпульсів визначає потужність сигналу, середню швидкість і ширину спектра. Оцінки потужності сигналу коректуються на місцеві перешкоди шляхом порівняння потужності фільтрованих і не фільтрованих тимчасових серій.

Gematronic DIRAC – це інтегральна модульна конструкція, що містить необхідне число сенсорів, що здійснюють іспитові функції. DIRAC реалізує функціональні можливості контролера підсистем, програмних модулів головного процесора управління або функціонує як спеціальний блок інтерфейсу людина-машина залежно від моделі системи. Зв'язок всередині підсистем здійснюються за допомогою процесорної польової шини PROFIBUS.

DIRAC дозволяє використовувати переваги розподілених вузлів управління, які зв'язані між собою через TCP/IP, PROFIBUS або інший наявний протокол. Цей міжвузловий та міжпроцесорний зв'язок реалізується за допомогою мови управління радіолокатором Gematronic (RCL) і майстра поштового зв'язку (PM).

ViTE підтримує DIRAC з моніторингу радіолокаційної системи, її налаштування, виявлення несправностей і в наступному захисті системи. Підтримуються також різноманітні процедури тестування та ізолювання збоїв [12].

4 АВТОМАТИЗОВАНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС «МЕТЕОР-МЕТОЯЧЕЙКА»

4.1 Особливості доплерівських метеорологічних радіолокаційних вимірювань

4.1.1 Принцип вимірювання доплерівської швидкості

АМРК «Метеор-Метеоячейка» це випущений серійною фірмою Selex Si/Gematronik (Німеччина) доплерівський метеорологічний радіолокатор «Метеор 500С» (частота випромінювання 5640 МГц) з програмним забезпеченням робочої станції інженера-метеоролога (РС-М), серійно виробленим ЗАТ «Інститут радарної метеорології» (Росія).

АМРК «Метеор-Метеоячейка» сертифікований Міждержавним авіаційним комітетом на відповідність типу устаткування аеродрому (Сертифікат МАК № 407 від 21.04.2006 р.).

Автоматизований метеорологічний радіолокаційний комплекс (АМРК) «Метеор-Метеоячейка» призначений для виявлення хмар і пов'язаних з ними атмосферних явищ (обложних і зливових опадів, гроз, граду та снігопаду), а в доплерівському режимі роботи – для визначення параметрів радіальних швидкостей, а також передачі інформації про виявлені небезпечні явища в прогностичні служби Росгідромету та через АІС «Метеосервер» в автоматизовані системи управління повітряним рухом для забезпечення безпечних умов зльоту, посадки і польоту повітряних судів.

АМРК «Метеор-Метеоячейка» – є автоматизованим імпульсним когерентним доплерівським метеорологічним радіолокатором. Він може працювати як в некогерентному режимі (режим вимірювання відбиваності), так і в когерентному (режим доплерівської швидкості).

Випромінюваний надвисокочастотний імпульс радіолокатора, потрапляючи на метеоціль, викликає змушені коливання молекул синхронно зі зміною в часі електричних і магнітних полів.

Якщо хмарна частка спочиває або рухається вздовж поверхні постійної дальності (при фіксованому видаленні r), тоді молекули коливаються з частотою випромінювання.

Якщо хмарна частка буде рухатися в напрямку до випромінювача з швидкістю V , частота коливань збільшиться на v/λ , тому що молекули хмарної частки будуть частіше зазнавати впливу електричних і магнітних полів.

Колівні молекули самі створюють електромагнітні поля, які, в свою чергу, випромінюються за межі цілі [13].

Допплерівський радіолокатор може забезпечувати вимірювання швидкості цілі вздовж радіальної лінії, проведеної в напрямку від радіолокатора або до нього (негативна швидкість), або від нього (позитивна швидкість).

При збігу положень передавача та приймача величина доплерівського зсуву частоти рухомого об'єкта, f_{δ} визначається формулою:

$$f_{\delta} = |f_i \delta - f_{\hat{a}i}| = 2 \frac{v_p}{c} f_{\hat{a}i} = \frac{2v_p}{\lambda}, \quad (4.1)$$

де $f_{\hat{a}i}$ - випромінювана частота (Гц);

f_{np} - прийнята частота (Гц);

c – швидкість електромагнітного випромінювання ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

λ – довжина хвилі джерела випромінювання;

V_p – радіальна (доплерівська) складова швидкості цілі.

Коефіцієнт 2 в формулі (4.1) з'являється в результаті того, що збільшення частоти відбувається у два етапи. Спочатку на величину v_p / λ зростає частота електромагнітних коливань, а потім на таку ж величину зростає частота її поля випромінювання в напрямку приймача.

При звичайних швидкостях метеорологічних цілей доплерівський зсув частоти f_{δ} є малою величиною в порівнянні з несучою частотою радіолокатора $f_{\hat{a}i}$. В такій ситуації дуже важко домогтися потрібної точності частотних вимірювань. Наприклад, при $f_{\hat{a}i} = 5600$ МГц, $v_p = 15$ м/с, $f_{\delta} = 560$ Гц, тобто $(f_{\delta} / f_{\hat{a}i}) \cdot 100 \% = 10^{-5} \%$.

Для підвищення точності вимірювання доплерівського зсуву частоти f_{δ} частотні вимірювання в радіолокації замінюють фазовими вимірюваннями параметрів відбитих сигналів.

Якщо розглядати послідовність відбитих від метеоутворень імпульсів як стаціонарний випадковий процес (тобто процес, статистичні характеристики якого не залежать від початку відліку часу), тоді формулу для фази γ можна записати в вигляді:

$$\gamma = -\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) \div \psi - \psi_i, \quad (4.2)$$

де $2r$ – сумарний шлях, який проходить падаюча хвиля;

ψ – початкова фаза випромінюваного імпульсу;

ψ_i – зсув фази, що вноситься метеоутворенням при розсіюванні випромінювання радіолокатора.

Якщо шлях r збільшується згодом, тоді фаза радіолуни відповідно зменшується, а швидкість зміни фази γ описується формулою:

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} v_p. \quad (4.3)$$

Таким чином, з порівняння формул (4.1) і (4.3), швидкість зміни фази радіовідлуння (відлуння сигналу) рухомого об'єкта дорівнює коловій частоті доплерівського зсуву (зсув f_D).

На імпульсному доплерівському радіолокаторі вибірка сигналу (як за фазою, так і за амплітудою) здійснюється в моменти часу $t = \tau_s + (n-1)T_s$, де τ_s – час затримки між n -ім випроміненим імпульсом і сигналом радіовідлуння. Час $\tau_s = 2r/c$ називається часом відліку за дальністю.

Фазові вимірювання f_D так само як частотні, пред'являють дуже високі вимоги до стабільності частоти приймального-передавача радіолокатора. З цих вимог випливає, що час між гребенями хвиль для послідовно випромінюваних НВЧ імпульсів повинне або залишатися незмінним, або бути відомим.

Оскільки стабільні магнетронні генератори не синхронізуються за фазою зовнішнім сигналом, тоді фаза коливань випромінюваних ними імпульсів повинна вимірюватися та реєструватися.

Застосування в сучасному доплерівському радіолокаторі обчислювальної техніки дозволяє зафіксувати в цифровому вигляді кожний випромінюваний імпульс магнетрона та визначити його початкову фазу. Щодо цієї випадкової, але відомої початкової фази випромінюваного імпульсу та проводяться фазові вимірювання імпульсів, відбитих від метеоутворень.

Визначення радіальної швидкості можна уявити наступним чином:

- фіксують та запам'ятовують фазу випромінюваного імпульсу;
- порівняти її з фазою прийнятого імпульсу;
- визначають зміну фази між послідовними імпульсами;
- швидкість зміни фази між послідовними імпульсами безпосередньо зв'язують з радіальною (доплерівською) швидкістю цілі v_p .

Для імпульсного доплерівського радіолокатора зміна фази відбитих від метеоутворень сигналів аналізується в кожному біні (дискреті) дальності вздовж осі радіолокаційного променя. Для розрахунків v_p в кожному біні виходить часовий ряд цифрових даних.

Рішенням доплерівської швидкості є Δv_p на виході когерентного прийомо-передавача. Це витікає з формули:

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} \leq \frac{\sqrt{2} \Delta v_p T_s}{c \tau_{зонд}},$$

де f_n – несуча частота магнетрона;

T_s – період повторення імпульсів;

$\tau_{зонд}$ – тривалість випромінюваного імпульсу.

При типових значеннях $\Delta v_p = 1 \text{ м/с}$, $T_s = 10^{-3} \text{ с}$, $\tau_{зонд} = 10^{-6} \text{ с}$ отримуємо

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} \leq 4,7 \cdot 10^{-6}.$$

Використання магнетрона коаксіального типу забезпечує виконання зазначених вимог.

Середня радіальна (доплерівська швидкість в межах імпульсного обсягу радіолокатора) дорівнює середній швидкості руху часток, що розсіюють, зваженої ефективної площі розсіювання. Для кутів піднесення антени радіолокатора, близьких до 0° , вона близька до швидкості руху повітря в напрямку на радіолокатор (-) або від нього (+).

4.1.2 Обмеження радіолокаційних доплерівських вимірювань

Якщо фаза радіовідлуння \mathcal{U} змінюється більш ніж на $\pm 180^\circ$ (π), оцінка радіальної швидкості стає неоднозначною [14].

Всі доплерівські частоти, вкладені в інтервалі $\pm f_N = (2T_s)^{-1} - f_N$ – частота Найквіста), можуть бути однозначно виміряні, тоді як частоти, перевищуючі f_N , неможливо відрізнити від частот з цього інтервалу.

Щоб уникнути невизначеності радіальні швидкості v_p цілей повинні лежати в межах інтервалу однозначного визначення швидкостей:

$$v_{p\max} = \pm \frac{\lambda}{4T_s}. \quad (4.4)$$

Максимальна однозначна швидкість $v_{p\max}$ – це швидкість, що спричиняє міжімпульсну фазову зміну радіолуни, яка дорівнює π . Інакше кажучи, найвища однозначна швидкість, яка може бути виміряна імпульсним доплерівським радіолокатором, це швидкість $v_{p\max}$, з якою ціль може переміститися між послідовними імпульсами на відстань, що перевищує чверть довжини хвилі радіолокатора:

$$v_{p\max} = \pm \frac{\times \tilde{N}^2 \cdot \lambda}{4}. \quad (4.5)$$

Наприклад, для $\lambda = 5,3$ см ця відстань дорівнює 1,5 см.

Фазове змінення $\pi + \varphi$ не відрізнимо від змінень $(-\pi + \varphi)$. Тому швидкості $v_{p\max} + v$ будуть помилково прийматися при $v_{p\max} - v$, тобто швидкості накладаються. Накладення швидкостей можна уникнути за рахунок достатньо високої частоти проходження імпульсів (ЧСІ) (формула (4.5)). Однак такий підхід призводить до зменшення максимальної однозначної дальності r_{\max} :

$$r_{\max} = \frac{c}{\times \tilde{N}^2 \cdot 2} = \frac{\tilde{n} \dot{O}_s}{2}. \quad (4.6)$$

Здатність радіолокатора, що випромінює послідовність рівновіддалених імпульсів, однозначно вимірювати швидкість, і дальність визначається наступним співвідношенням невизначеності:

$$v_{\max} r_{\max} = \pm \frac{\lambda}{8} c. \quad (4.7)$$

Співвідношення (4.7) означає, що при заданій довжині хвилі збільшення дальності спостережень призводить до зменшення максимальних вимірюваних швидкостей, і, навпаки.

Проілюструємо формули (4.4) – (4.7) розрахунками для $\lambda = 5,32$ см, результати яких наведені в табл. 4.1.

Діапазон однозначного вимірювання v_{\max} можливо помітно збільшити, опромінюючи метеоціль попеременно (в шаховому порядку) за допомогою двох послідовностей зондувальних імпульсів з різними ЧСІ (метод зміни міжімпульсних інтервалів, або метод вобуляції ЧСІ).

Таблиця 4.1 – Залежність між $v_{\max} r_{\max}$ та ЧСІ для довжини хвилі радіолокатора $\lambda = 5,32$ см

v_{\max} , м/с	5	7,3	12	16	60
r_{\max} , км	400	272	166	125	33,4
ЧСІ, Гц	375	550	900	1200	4500

Максимальна однозначна швидкість v_{\max} в цьому методі визначається за формулою:

$$v_{p\max} = \pm \frac{\lambda \cdot \tilde{N}^2}{4(1 - \frac{\times \tilde{N}^2_1}{\times \tilde{N}^2_2})} \quad (4.8)$$

Як видно з (4.8), пари ЧСІ в співвідношеннях 3/2, 4/3, 5/4 розширює діапазон вимірювання швидкості $v_{p\max}$ відповідно в 2, 3 і 4 рази. На

$\lambda = 5,3 \text{ см}$ при $\frac{\times \tilde{N}^2_1}{\times \tilde{N}^2_2} = \frac{1200}{900} = \frac{4}{3}$ значення $v_{\max} = \pm 48,0 \text{ м/с}$. Останню

величину можна було б виміряти на одній ЧСІ, яка дорівнює 3600 Гц.

Якщо співвідношення ЧСІ перевищує 5/4, це причинне відношення

$\frac{\times \tilde{N}^2_1}{\times \tilde{N}^2_2} > \frac{5}{4}$ застосовуються рідко.

На рис. 4.1 і рис. 4.2 представлені приклади розрахунків за формулою (4.9) і корекція розрахунків правдивою радіальною (доплерівською) швидкістю в дискреті дальності при роботі радіолокатора на двох ЧСІ.

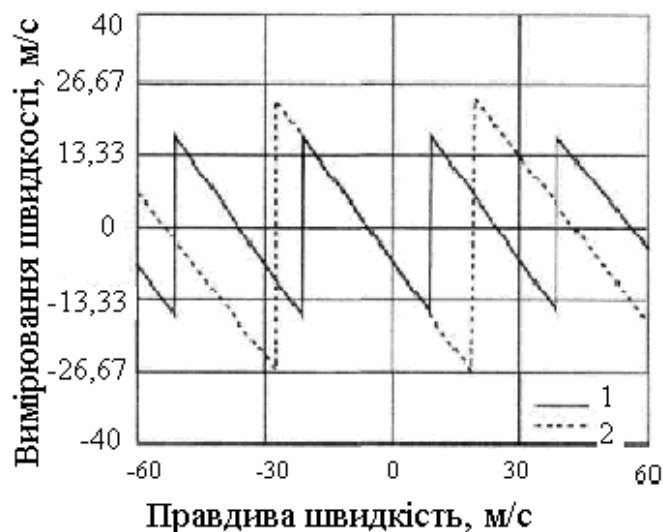


Рисунок 4.1 - Розрахунок правдивої радіальної (доплерівської) швидкості в дискреті дальності при роботі радіолокатора на двох ЧСІ:
1 – висока ЧСІ; 2 – низька ЧСІ

На практиці в кожному біні (дискреті) дальності вимірюються дві доплерівські швидкості: v_{pm1} і v_{pm2} . Далі за простим логічним алгоритмом, що впливає з (4.8), ці вимірювання поширюються на більший інтервал швидкостей v_{pm} . Наприклад, якщо при $\times \tilde{N}^2_1$

максимальна обмірювана радіальна швидкість дорівнює v_{pm1} , а при $\times \tilde{N}_2^2 - v_{pm2}$, то максимальна відновлювана за цими вимірюваннями швидкість v_{pm} описується за формулою:

$$v_{pm} = \frac{v_{pm1} v_{pm2}}{|v_{pm1} - v_{pm2}|}. \quad (4.9)$$

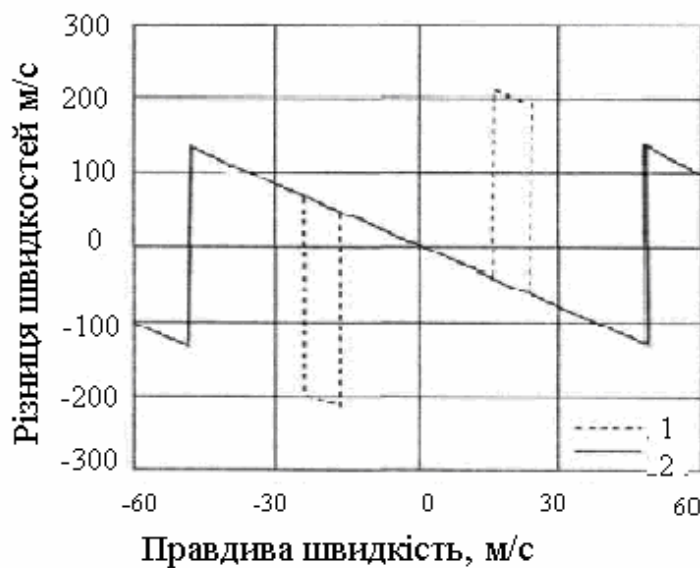


Рисунок 4.2 - Корекція розрахунків правдивої радіальної (доплерівської) швидкості в дискреті дальності при роботі радіолокатора на двох ЧСІ: 1 – правдива швидкість скоректована; 2 – правдива швидкість скоректована

4.2 Когерентний прийом радіолокаційних сигналів

4.2.1 Когерентність

Когерентність – властивість випадкових процесів, що характеризує їхню здатність взаємно підсилювати або послаблювати один одного при додаванні [15].

При додаванні випадкового процесу $\xi_1(t)$ з його запізненням на час t повторенням $\xi(t-\tau)$ середня потужність P сумарного процесу $\xi(t) = \xi_1(t) + \xi_1(t-\tau)$ дорівнює:

$$P = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\xi_1(t) + \xi_1(t - \tau)]^2 dt = 2[P_1 + R(\tau)],$$

де P_1 – середня потужність кожного з складних процесів:

$$P_1 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1^2(t) dt = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1^2(t - \tau) dt,$$

$R(\tau)$ – функція автокореляції випадкового процесу $\xi_1(t)$:

$$R(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi_1(t) \xi_1(t - \tau) dt. \quad (4.10)$$

Беручи до уваги, що $P_1 = R(\tau)|_{\tau=0}$ вираз для P можна представити в вигляді:

$$P = 2P_1[1 + p(\tau)], \quad (4.11)$$

де $p(\tau)$ – нормована функція автокореляції, або коефіцієнт когерентності:

$$p(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)}. \quad (4.12)$$

Коефіцієнт когерентності має максимальне значення $p(\tau) = 1$ при повній тотожності складних процесів, тобто при $\tau = 0$. В цьому випадку всі миттєві значення результуючого сигналу подвоюються, а його середня потужність зростає в 4 рази. При $\tau \rightarrow \infty$ $P = 2P_1$. Процеси повністю некогерентні й складаються енергетично.

Таким чином, випадкові процеси вважаються некогерентними, якщо функція їхньої взаємної кореляції дорівнює нулю, і когерентними, якщо вона відрізняється від нуля.

Спектр частот. Як відомо, автокореляційна функція $R(\tau)$ використовується для опису швидкості протікання (зміни) випадкового процесу й оцінки схожості випадкових процесів.

Для кількісної оцінки такої швидкості вводиться поняття час кореляції τ – такий інтервал часу $T_1 = 0 \dots \tau_0$, після закінчення якого $R(t)$

убуває до малого значення, наприклад до 15% свого максимального значення.

Для вирішення більшості практичних завдань послідовність відбитих від метеоутворювань радіолокаційних сигналів у дискреті дальності звичайно розглядають як стаціонарний випадковий процес.

Це припущення справедливо для всіх випадків, коли тривалість спостереження за процесом мала (звичайно ≤ 1 с) в порівнянні з необхідним для прояву значних змін статистичних характеристик процесу (таких, наприклад, як середнє значення, дисперсія та параметри кореляції).

Для опису швидкості протікання випадкового процесу, крім функції $R(\tau)$, використовується енергетичний спектр $S(f)$, що являє собою розподіл потужності гармонік процесу, що доводиться на інтервал 1 Гц. Крім того, спектр показує, якого роду коливання переважають в даному випадковому процесі, тобто спектр дозволяє оцінити, яка внутрішня структура випадкового процесу.

Для стаціонарних випадкових процесів спектр $S(f)$ є прямим перетворенням Фур'є автокореляційної функції $R(\tau)$:

$$S(f) = \frac{1}{\pi} \int_0^T R(\tau) e^{-if\tau} d\tau. \quad (4.13)$$

Спектр характеризують шириною спектра Δf .

Згідно з експериментальними даними, час кореляції радіолокаційних сигналів, відбитих від метеоутворень, перебуває в діапазоні $(3 \dots 15) \cdot 10^3$ с. Це означає, що для одержання надійних оцінок $R(\tau)$ і $S(f)$ в дискреті дальності еквівалентне число незалежних відліків у межах тимчасової реалізації відбитих сигналів повинне становити не менш 30-60 при ЧСІ, рівному 1000 Гц.

Проілюструємо взаємозв'язок $p(\tau)$ і $s(f)$.

Нехай стаціонарний випадковий процес, $x(t)$ має нормовану кореляційну функцію $p(\tau)$, що описується виразом

$$p(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}, \quad \alpha > 0.$$

Нормована спектральна щільність $s(f)$ при цьому визначається в вигляді:

$$s(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) e^{-if\tau} d\tau = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}} e^{-f^2/4\alpha}$$

На рис. 4.3 наведена залежність $p(\tau)$ і $s(f)$ для значень α , які дорівнюють 0,5; 1 і 3. З них витікає, що зі збільшенням α , тобто зі зменшенням часу кореляції, спектральна щільність $s(f)$ змінюється більш плавно, убиваючи з ростом частоти f . Для більших значень спектральна щільність з збільшенням f убиває досить повільно. При $\alpha=0,5$ випадкові процеси називаються вузько смуговими (енергія процесу зосереджена у вузькій смузі частот), при $\alpha=3$ – широкосмуговими.

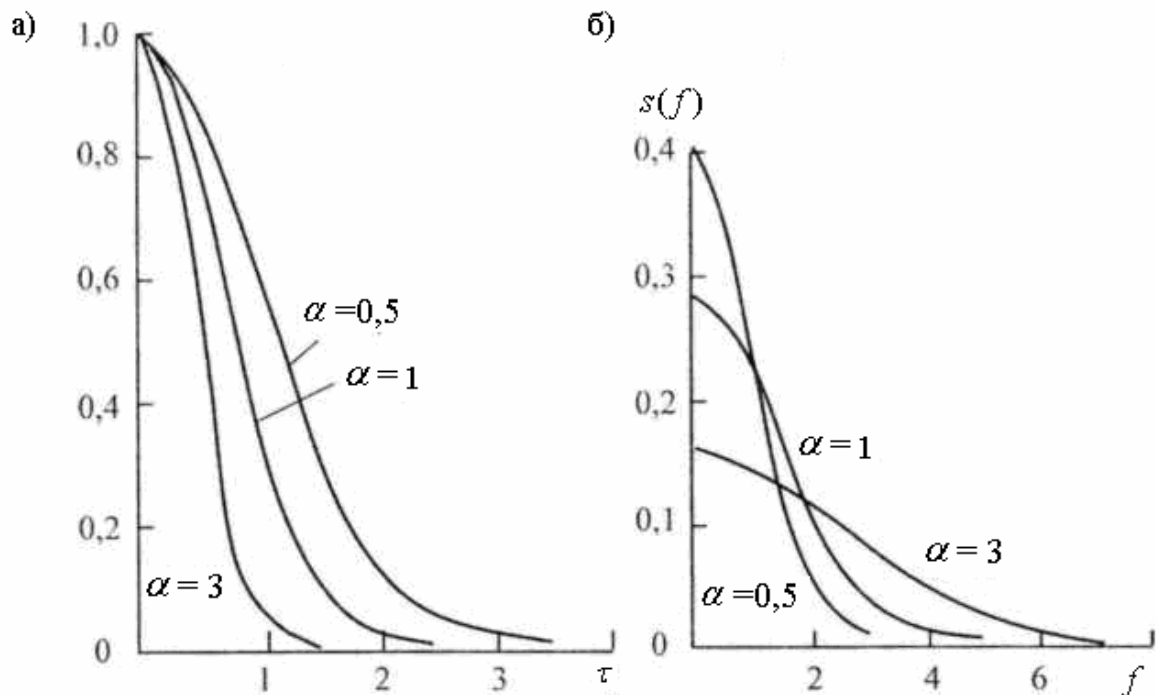


Рисунок 4.3 – Для стаціонарного та випадкового процесу:
 а) - нормована кореляційна функція $p(\tau)$; б) - відповідна нормована спектральна щільність $s(f)$

Допплерівський спектр $S(\nu)$ — спектр швидкостей, що описує поле швидкості великої кількості гідрометеорів в межах імпульсного об'єму радіолокатора. Ширина спектра σ_ν^2 є мірою дисперсії доплерівської швидкості в межах імпульсного об'єму.

В багатьох практичних випадках, якщо не в більшості, доплерівський спектр можна апроксимувати Гаусовим (нормальним) розподілом. Це важливе допущення значно спрощує розрахунки і має наступне обґрунтування:

- розподіл потужності випромінювання в діаграмі направленості параболічних антен (їхньої головної пелюстки) описується Гаусовською кривою;

- розподіл швидкостей частинок в турболізованій атмосфері також

описується Гаусовською кривою.

Як і в нормальному (Гаусовому) розподілі, Гаусовський доплерівський спектр радіолуни метеоутворювань залежить лише від двох параметрів: середньої частоти спектра f_d та його середньоквадратичної ширини σ_f .

При переході до доплерівської швидкості одержуємо:

$$\bar{v}_p = \frac{\lambda}{2} f_d, \quad \sigma_v^2 = \frac{\lambda}{4} \sigma_f^2.$$

Необхідна умова корельованості послідовності імпульсів, відбитих від метеоутворювань, визначається так:

$$\frac{c\lambda}{4r_{\max}} > 2\pi\sigma_v,$$

де σ_v – ширина спектра швидкостей цілей, розташованих на віддаленні r_{\max} , λ – довжина хвилі РЛС.

Рівністю (4.14) задається максимальне значення ширини спектра σ_v , при якому ще зберігається кореляція сигналів при фіксованій дальності, або, навпаки, даною шириною спектра σ_v визначається максимальне значення r (рис. 4.4).

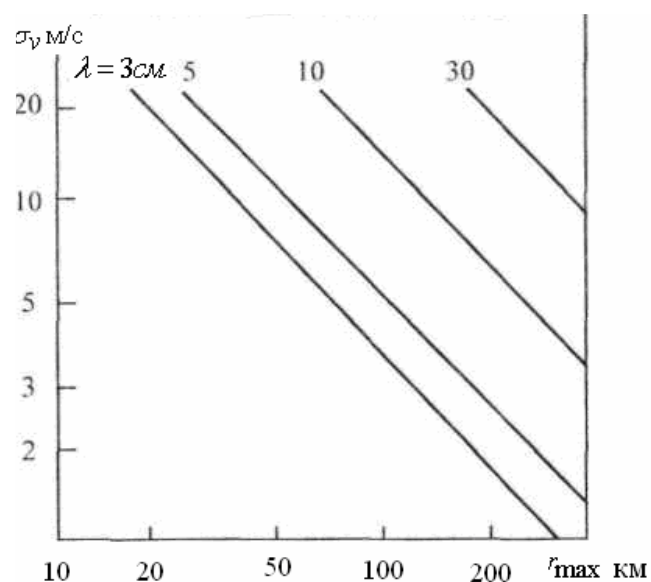


Рисунок 4.4 - Залежність максимальної ширини спектра σ_v від максимальної дальності однозначного виявлення r_{\max} , в межах якої відлуння сигналів когерентні

В процесі оперативної роботи при підготовці радіолокатора до вимірювань задається параметр *CPI* (coherent processing interval) — інтервал когерентної обробки. Наприклад, 1° – ширина інтервалу когерентної обробки в режимі синхронізації кутів і число імпульсів, що визначає *CPI* в режимі тимчасової синхронізації (до 256).

4.2.2 Когерентний прийом радіолокаційних сигналів

Як відомо, когерентний радіоприйом заснований на когерентності прийнятих сигналів. Він застосовується для збільшення чутливості й підвищення перешкодозахищеності приймальних пристроїв. Особливістю когерентного радіоприйому є кореляційна обробка прийнятого сигналу.

Спрощена блок-схема когерентного приймача імпульсного доплерівського радіолокатора АМРК «Метеор-Метеоячейка» наведена на рис. 4.5.

Стабілізований гетеродин (STALO) забезпечує коливання на частоті випромінюваного сигналу $f_{i\hat{a}}$ мінус малий, але фіксований зсув частоти f_{\square} . Частина цього сигналу підсумовується з сигналом радіолуни, інтенсивність якого мала в порівнянні з інтенсивністю сигналу стабілізованого гетеродина. При цій умові сума двох сигналів може бути добре апроксимована виразом, в якому сигнал STALO модулюється іншим сигналом, в точності які повторюють сигнал радіолуни як за фазою, так і амплітудою з тією лише різницею, що його частота дорівнює f_{δ} .

Просумовані сигнали надходять в перший подвійний балансний змішувач-перетворювач з нелінійною передаючою характеристикою, на виході якого виходить сума та різниця їхніх частот і гармонік [16].

Когерентний гетеродин служить для виділення сигналу, що модулює, і видалення суміші сигналів стабілізованого гетеродина та гармонік.

Нагадаємо, що гетеродинування служить лише для того, щоб перетворити (змістити) несучу частоту, залишаючи незмінною форму, що огинає прийнятий сигнал з подальшою обробкою де «витягають» метеоінформацію.

Основне завдання блоку стабілізованого гетеродина – забезпечити змішувачі частотою для його перетворення зі зниженням, щоб різниця між STALO і ВЧ відповідала першій проміжній частоті.

STALO в АМРК працює на частоті 5000–5300 МГц. Перша проміжна частота $f_{ПЧ1}$ обрана рівно 540 МГц, інша $f_{ПЧ2}$ рівно 60 МГц.

Необхідну стабільність частоти когерентного гетеродина за проміжок часу, що дорівнює $T_s \approx 10^{-3}$ с, оцінимо за формулою:

$$\frac{\Delta f_{\hat{e}\tilde{a}}}{f_{\hat{e}\tilde{a}}} \leq \frac{f_n \sqrt{2\Delta v}}{f_{\hat{e}\tilde{a}}} = 4,4 \cdot 10^{-7}$$

де f_n – несуча частота магнетрона (5640 МГц);

$f_{кг}$ – частота когерентного гетеродина (60 МГц);

$\Delta v = 1$ м/с – величина дозволу доплерівської швидкості.

Величина $f_{ПЧ} = 60$ МГц обрана в АМРК так, щоб вона набагато перевищувала частоти, що втримуються в спектрі прийнятого сигналу.

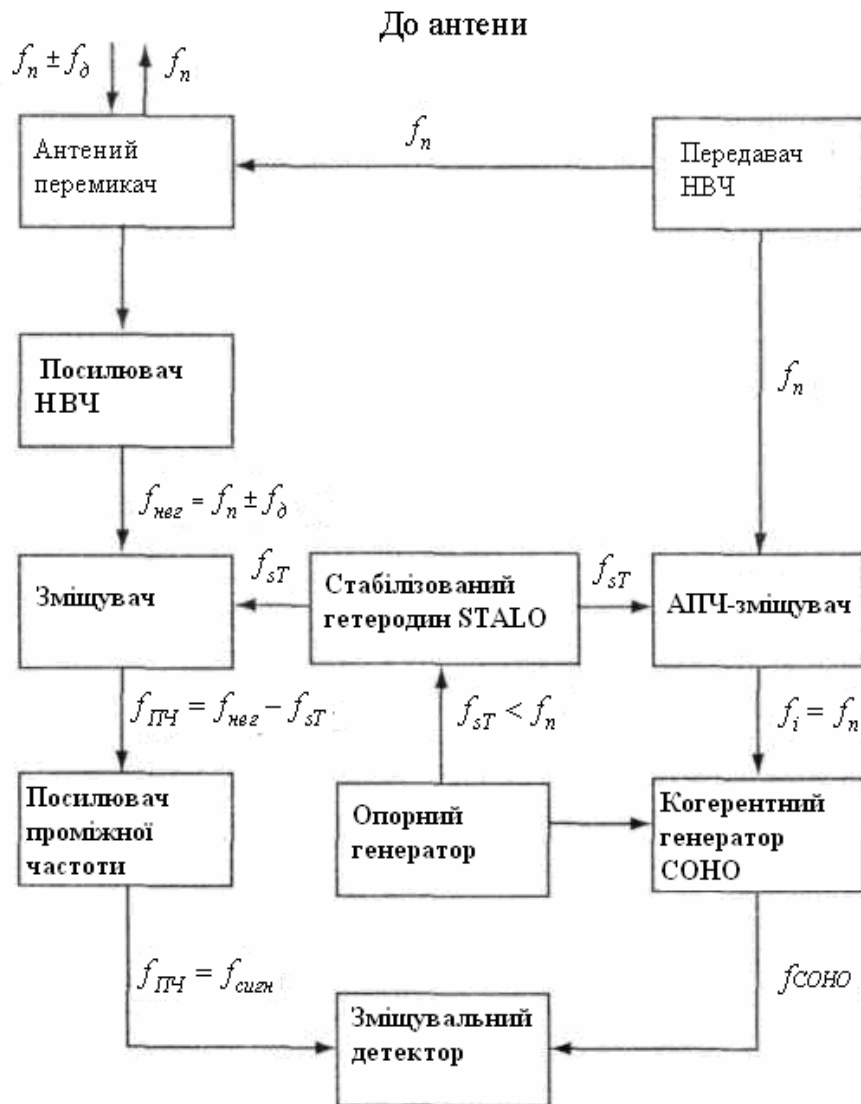


Рисунок 4.5 - Блок-схема когерентного радіоприймача-супергетеродина для імпульсного доплерівського радіолокатора АМРК «Метеор-Метеоячейка»

В STALO АМРК висока стабільність і низький фазовий шум забезпечуються фазовою синхронізацією з високоякісним опорним

генератором. Внаслідок цього сам STALO складається з двох генераторів: високочастотного та зовнішнього опорного. Для високочастотної частини STALO використовується ВЧ генератор з фазовою синхронізацією, а опорна частота створюється надто шумним кварцовим генератором. Останній служить для виключення перешкод і синхронізації джерел частоти STALO і когерентного гетеродина.

В якості цифрового контрольованого генератора для когерентного гетеродина служить синтезатор частоти з малим фазовим шумом, вихідна частота синтезатора 520 - 540 МГц. Для перетворення ПЧІ (520 - 540 МГц) на ПЧІІ (-60 МГц) з когерентного гетеродина на інший змішувач у вигляді потрібного балансового змішувача сигналів подається необхідна їм частота.

Фаза коливань когерентного гетеродина жорстко пов'язана з фазою приходячого сигналу проміжної частоти, який надходить.

Для одержання опорної фази при кореляційній обробці відбитих від метеоутворювань сигналів використовується вибірка випромінюваного передавачем імпульсу. Ця вибірка також перетвориться на імпульс проміжної частоти (60 МГц).

Таким чином, в когерентному приймачі АМРК «Метеор-Метеоячейка» забезпечується визначення фази шляхом зсуву відбитого сигналу на 90° для одержання синфазної (I) і квадратурної (Q) складових сигналу при фіксованій дальності (в біні дальності).

4.3 Первинна доплерівська обробка

4.3.1 Мета первинної обробки

При доплерівських вимірюваннях множинної метеоцілі на імпульсному радіолокаторі безперервні відбиті сигнали представляються послідовністю значень складного відлуння сигналу $V(t)$, відрхованих в дискретні моменти часу τ_s .

Складний комплексний сигнал $V(t)$ на виході фазових детекторів когерентного приймача являє собою стаціонарний випадковий нормальний процес. *Це положення лежить в основі первинної обробки відбитих сигналів, що повинна утворюватися в кожній дискреті (біні) дальності радіолокаційного променя.*

Ціль первинної обробки вимірювати відбиваність і два параметри спектра радіолуни хмар і опадів: його середню частоту f_d і дисперсію σ_f^2 .

Однак для цього необхідно спочатку виділити радіо відлуння метеоутворювань на тлі відбиття від поверхні Землі на основі розходження їхніх радіальних швидкостей, а також приглушити сигнали повітряних цілей [17].

Після приглушення відбиття, що заважають, вимірювання параметрів

спектра f_D та σ_f^2 полягає в наступному:

- проводиться оцінка параметрів спектра в кожній дискреті дальності на радіолокаційному промені;

- усувається неоднозначність вимірювань, що виникають при імпульсній роботі радіолокатора;

- усуваються накладені сигнали на різних відстанях, що виникають в протяжних метеоутвореннях.

4.3.2 Розрахунок параметрів спектру

Комплексний сигнал $V(t)$ на виході фазових детекторів приймача запишеться в вигляді:

$$V(t) = I(t) + jQ(t) = |V|(\cos \varphi + j \sin \varphi) = |V|e^{j\varphi},$$

а комплексний сигнал $V^*(t)$ в вигляді:

$$V^*(t) = I(t) - jQ(t) = |V|(\cos \varphi - j \sin \varphi) = |V|e^{-j\varphi}, \quad (4.15)$$

де $V(t)$ і $V^*(t)$ називають сполученими комплексними сигналами;

$I(t) = |V| \cos \varphi$ – синфазна складова сигналу;

$Q(t) = |V| \sin \varphi$ – квадратурна складова сигналу;

$\varphi = \arg V$ – аргумент;

$\operatorname{tg} \varphi = Q / I$ – величина $\operatorname{arctg} I / Q$ пропорційна фазі відбиття, амплітуда

$$|V| = \sqrt{I^2 + Q^2};$$

$V(t)$ – модуль.

На рис. 4.6 представлені ідеалізовані лінії розгорнення для синфазної складової $I(\tau_S)$, які відповідають відлунню сигналу від метеоцілі. Кожна крива характеризує відлуння сигналу, які обумовлені одним високочастотним зондувальним імпульсом P_r . Миттєві вибіркові значення сигналу беруться в моменти τ_{S1} , τ_{S2} і т.д. Час τ_C являє собою часовий інтервал кореляції вздовж осі τ_S .

Для пояснення обробки сигналу в дискреті дальності введемо тимчасову шкалу осі вибірок. В ній відліки проводяться через інтервал T_S у дискретні моменти часу, які відповідають вибіркам сигналу при фіксованому часі затримки $t = \tau_S$.

Аналіз зміни фази та амплітуди безперервного сигналу випадкового процесу утворюється вздовж тимчасової осі вибірок для дискретних моментів $(n-1)T_S$. Вони відповідають певному часу відліків за дальністю $\tau_S = 2r/c$, тобто прив'язані до конкретного біну дальності.

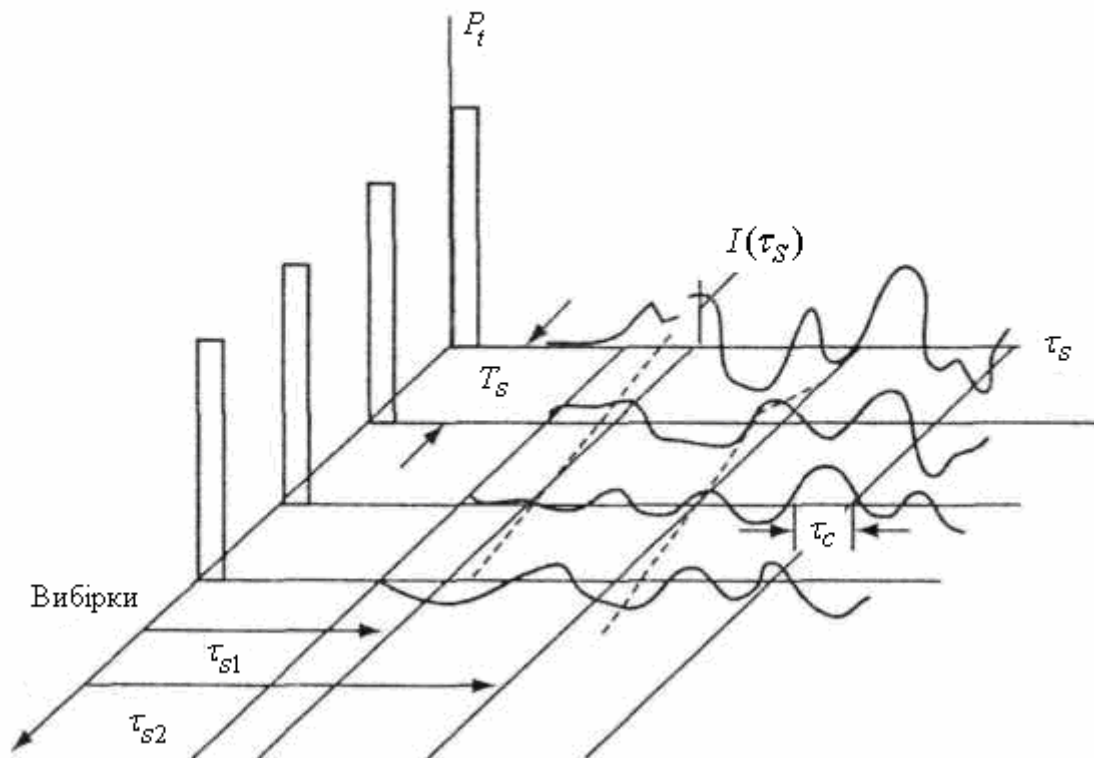


Рисунок 4.6 – Ідеалізовані лінії розгортки для синфазної складової $I(\tau_S)$, відповідні відлунню сигналу від множини цілей

Штрихом зазначена можлива зміна вибіркового сигналу при фіксованому τ_{S1} , коли частота стробування T_S^{-1} зростає та не є цілю на неоднозначно зчитувальних відстанях [18].

Величини $I(\tau_S, T_S)$ і $Q(\tau_S, T_S)$ розподілені за нормальним законом з нульовим середнім і є незалежними випадковими величинами. Фаза φ не залежить від амплітуди $|V|$, яка розподілена рівномірно, а амплітуда $|V| = (I^2 + Q^2)^{1/2}$ має розподіл з щільністю ймовірності, що підлягає закону Релея.

Хоча I і Q є незалежними випадковими величинами, стохастичні процеси $I(\tau_S, nT_S)$ і $Q(\tau_S, nT_S)$ не можна вважати незалежними. Це означає, що в загальному випадку при $k \neq m$ для математичного очікування E одержуємо:

$$E[I(\tau_S, mT_S)Q(\tau_S, kT_S)] \neq 0.$$

Відстань між вибірками на тимчасовій осі відліків дальності обирається так, щоб вони служили незалежними оцінками відбиваності та швидкості в напрямку зондування.

Автокореляція комплексного стаціонарного випадкового процесу $R(l)$ визначається таким чином:

$$R(l) = E[V^*(m) V(m+l)] = E[V^*(m-1) V(m)], \quad (4.16)$$

де $E[\]$ – математичне очікування з ансамблю.

Ансамбль являє собою сукупність випадкових послідовностей, в яких $V(m)$ змінюється від члена до члена, навіть якщо значення m фіксоване.

Автоковаріація являє собою автокореляцію з виключеним середнім значенням сигналу $E[V(m)]$. Для більшості сигналів відбитих від метеоутворень, $E[V(m)] = 0$, а для сигналів від наземних цілей $E[V(m)] \neq 0$.

Всі ансамблі величин сигналів $V(m)$ є ергодичними. Це означає, що статистичні властивості ансамблю можуть бути одержані з осереднення вибірок за часом значень. З урахуванням кінцівки числа вибірок M функцію автокореляції випадкових процесів можна оцінити за такою формулою:

$$R(l) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-|l|-1} V^*(m) V(m+l), & \text{при } |l| \leq M-1. \end{cases} \quad (4.17)$$

На рис. 4.7 зображено модуль автокореляційної функції.

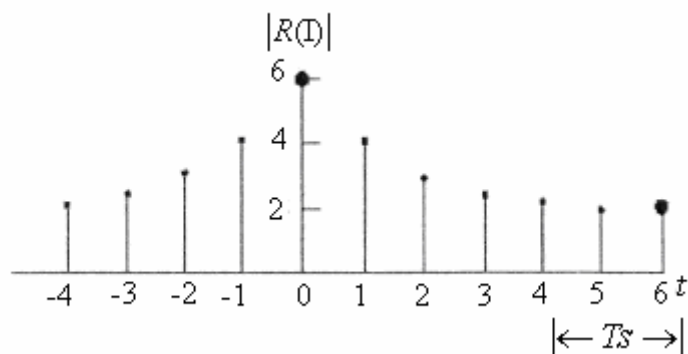


Рисунок 4.7 - Модуль автокореляційної функції

Потужність, яка відповідає послідовності даних, дорівнює 6. Через

час майже $3T_s$ вибірки стають не корельованими. Модуль середнього значення $E[V(m)]$ дорівнює $\sqrt{2}$.

Спектр потужності $S(f)$ (енергетичний спектр) визначається як дискретне перетворення Фур'є автокореляційної функції $R(l)$:

$$\hat{S}(f) = T_s \sum_{i=-(M-1)}^{M-1} \hat{R}(l) e^{-j2\pi f T_s l}, \quad (4.18)$$

де $\hat{S}(f)$ – безперервна функція з періодом T_s^{-1} ;

$\hat{R}(l)$ – комплексні коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є. Використовуючи швидке перетворення Фур'є тимчасової послідовності $V(m)$ спектр потужності $\hat{S}(f)$ можна визначити таким чином:

$$\hat{S}(f) = \frac{T_s}{M} \left\{ \sum_{m,n}^{M-1} V^*(m) V(n) e^{-j2\pi f T_s l} \right\}, \quad (4.19)$$

де $l = n - m$, а підраховування ведеться за двома індексами.

Збільшилася можливість обчислювальної техніки яка дозволяє в оперативному режимі роботи АМРК розраховувати енергетичний спектр або щільність спектра потужності за формулою (4.18), та за формулою (4.19). Вважається, що метод (4.18) пульспарний (коваріаційний) більш надійний, ніж (4.19), для розрахунку $\hat{S}(f)$ при невеликих значеннях сигнал/шум, але поступається (4.19) при посунені відбиттів, що захищають, від місцевих предметів, оскільки розрахунок енергетичного спектра за формулою (4.19) дає можливість провести в процесі розрахунків спектральну фільтрацію.

Розрахунок автокореляційної функції зводиться до розрахунку коефіцієнтів кореляції двох зміщених випадкових стаціонарних процесів (тимчасової послідовності) в інтервалах $0 - R(0) = R_0$, $1 - R(1) = R_1$, $2 - R(2) = R_2$, де $R(l)$ оцінюється в дискретні моменти через інтервал T_s (рис. 4.7).

Щільність доплерівського спектра потужності $S(v)$ можна виразити через середню радіальну швидкість \hat{v}_p і ширину доплерівського спектра σ_v за формулою:

$$S(v) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi\sigma_v}} \exp\left(-\frac{(v - \hat{v}_p)^2}{2\sigma_v^2}\right), \quad (4.20)$$

де P_0 – потужність прийнятих сигналів.

4.3.3 Метод комплексної автоковаріації (пульсарний)

Якщо випромінюється послідовність M рівновіддалених імпульсів, тоді автокореляційна функція послідовності відбитих комплексних сполучених сигналів для часу запізнювання T_s може бути оцінена за допомогою суми:

$$\hat{R}(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V^*(m) V(m+1). \quad (4.21)$$

Оцінка середньої доплерівської швидкості \hat{v}_p (м/с) буде описуватися в такому вигляді:

$$\hat{v}_p = -\left(\frac{\lambda}{4\pi T_s}\right) \arg \hat{R}(T_s). \quad (4.22)$$

Аргумент функції $\hat{R}(T_s)$ виражений в радіанах, а знак мінус означає, що позитивним доплерівським зсувам частоти відповідають негативні швидкості.

Середня доплерівська швидкість може розраховуватися в такий спосіб:

$$\hat{v}_p = -\left(\frac{\lambda}{4\pi T_s}\right) \arg[R(1)]. \quad (4.23)$$

При припущенні, що спектр апроксимується по кривій Гауса, ширина спектра σ_v визначається за формулою:

$$\sigma_v = \left(\frac{\lambda}{4\pi T_s \sqrt{2}}\right) \left| \ln \frac{1}{R(T_s)} \right|^{1/2}, \quad (4.24)$$

або, як пропонують розробники АМРК при тому ж допущенні, формулою:

$$\sigma_v = \left(\frac{\lambda}{4\pi T_S} \right) \sqrt{\frac{2}{3} \ln \left(\frac{R(1)}{R(2)} \right)}, \quad (4.25)$$

де $R(1)$ і $R(2)$ – оцінки автокореляційної функції, або, формулою:

$$\sigma_v = \frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi T_S}} \sqrt{\ln \left| \frac{R(1)}{R(2)} \right|}. \quad (4.26)$$

Показник якості сигналу оцінюється розміром SQI (signal quality index):

$$SQI = \frac{|R(1)|}{R(0)}. \quad (4.27)$$

SQI використовують так само, як обмеження при первинній обробці відбитих сигналів: $SQI = 0$ – зовсім не корельовані данні, $SQI = 1$ – зовсім корельовані данні. Оператор АМРК сам задає поріг в одиницях SQI вище якого утворюється доплерівська обробка. SQI іноді позначається як NCP (нормована потужність когерентності).

Метод спектральної обробки.

При використанні методу спектральної обробки для кожної дискрети дальності процедура розрахунків полягає в наступному:

- розрахунок дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) для даних тимчасового ряду $V(t)$:

$$f_m = \text{ДПФ}(V(t_m)); \quad (4.28)$$

- визначення енергетичного спектра перетворення Фур'є (4.19):

$$\hat{S}_m = f_m f_m^*; \quad (4.29)$$

- застосування спектрального фільтра (при необхідності):

$$\hat{S}'_m = \text{filter}(\hat{S}_m); \quad (4.30)$$

- розрахунок дискретного перетворення Фур'є для енергетичного спектра:

$$R_{m-1} = ДПФ(\hat{S}_m). \quad (4.31)$$

Індекс $m=1...M$ встановлюється до однієї дискрети дальності, а зірочкою позначена сполучена величина.

В результаті обробки за формулою (4.31) виходять значення коефіцієнта автокореляції на різних інтервалах: $R(0)$, $R(1)$, $R(2)$ і $R(3)$.

Розрахунок параметрів спектра при використанні методу зміни міжімпульсних інтервалів.

Метод, заснований на зміні міжімпульсних інтервалів від відліку до відліку, використовують комбінацію автоковаріаційних оцінок: $\hat{R}(T_{s1})$ при затримці T_{s1} і $R(T_{s2})$ при запізнюванні T_{s2} .

Швидкість в цьому випадку визначається різницею їх фаз.

В методі вобуляції швидкість визначається за формулою:

$$v_p = \frac{\lambda}{4\pi(T_{s2}-T_{s1})} \arg \left(\frac{\hat{R}(T_{s1})}{\hat{R}(T_{s2})} \right). \quad (4.32)$$

Оцінка ширини спектра може бути отримана з відношення модулів коваріації:

$$\hat{\sigma}_v = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2(T_{s2}^2-T_{s1}^2)}} \left[\ln \left| \frac{\hat{R}(T_{s1})}{\hat{R}(T_{s2})} \right| \right]^{1/2}. \quad (4.33)$$

4.4 Вимірювання відбиваності порогів обробки

4.4.1 Відбиваність

Цифровий приймач GDRX АМРК видає дані про коефіцієнт шуму N і дані I/Q , які потім розраховуються процесором сигналів. Існують типи даних I і Q впорядковані за дальністю і за вибіркою.

На рис. 4.8 показане розходження між даними за дальністю і даними за вибірками для одного СР1. Дані за вибірками створюються в АМРК лише в тому випадку, якщо оператором обраний конкретний селектор дальності.

Великий динамічний діапазон приймача АМРК і практично ідеальна лінійність його амплітудної характеристики дозволяють виконувати оцінку всіх параметрів сигналу без нелінійних перетворень. В зв'язку з

цим оцінка інтенсивності комплексного лінійного сигналу складається з простого підрахунку потужності $(I^* + QQ^*)$ на заданій дальності в азимуті.

Оцінка середньої потужності сигналу $P_{\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\delta}}$, інтегрована за M вибіркою дальності азимуту і скоректована на потужність шуму системи N , може бути отримана за наступною формулою:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (I_m I_m^* + Q_m Q_m^*) - N. \quad (4.34)$$

Якщо результат розрахунку виявився негативним, тоді $P = 0$.

Вибірки, проінтегровані за M , складаються з фіксованого значення за дальності, заданої оператором, плюс значення за азимутом. Інтегрування за азимутом може бути фіксованим, наприклад 1° , або визначається азимутальним інтервалом, заданим оператором.

Якщо ввімкнути фільтрацію «местників», тоді $P_{\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\delta}}$ буде оцінюватися за відфільтрованими даними I/Q . В цьому випадку з даних будуть віддалятися відбиття від опадів, що мають швидкість, близьку до нуля.

Якщо в АМРК ввімкнена статистична фільтрація «местників», тоді для введення виправлення в $P_{\tilde{n}\hat{\alpha}\hat{\delta}}$ на «засмічення местниками» використовуються статистичні методи.

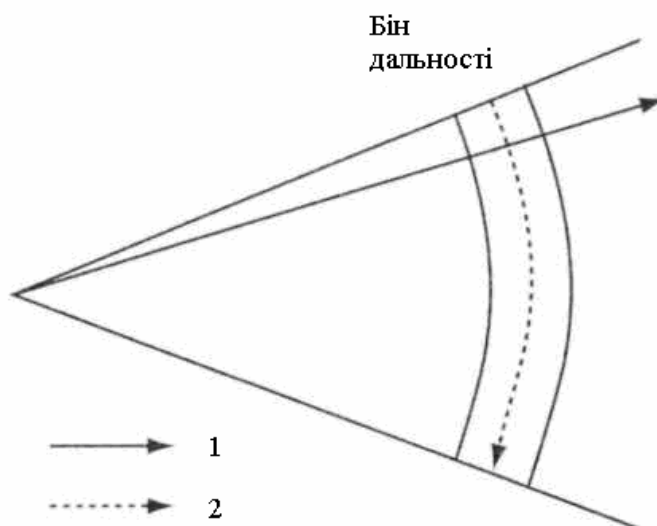


Рисунок 4.8 - Різниця даних синфазних I та квадратурних Q складових сигналу упорядкованих за дальністю (I) та за вибіркою (кута) для одного інтервалу когерентної обробки (СРІ)

Після оцінки $P_{\text{наб}}$ з урахуванням результатів каліброваних вимірювань приймального тракту АМРК в кожному селекторі дальності розраховується відбиваність Z (дБ). Вона може бути двох типів:

- некоректована UZ (uncorrected), розрахована за не фільтрованими даними I/Q

$$UZ = 10 \lg(T_0 - N) + C_r(r^2) + C_{\text{атм}}(r) + C_{\text{radar}}, \quad (4.35)$$

- скоректована CZ (corrected), розрахована за фільтрованими даними I/Q , якщо оператором встановлюється зворотний фільтр «местників»

$$CZ = 10 \lg(R_0 - N) + C_r(r^2) + C_{\text{атм}}(r) + C_{\text{radar}}, \quad (4.36)$$

де T_0 – середня потужність відбитих сигналів без корекції «местників»;

R_0 – середня потужність відбитих сигналів, з яких в результаті фільтрації виключені сигнали від местників;

N – коефіцієнт шуму;

$C_r(r^2)$ – виправлення на віддалення;

$C_{\text{атм}}(r)$ – виправлення на ослаблення в атмосфері;

C_{radar} – радіолокаційна постійна, за допомогою якої обмірювана потужність переводиться у відбиваність.

Виправлення $C_{\text{атм}}(r)$ на двостороннє ослаблення в атмосфері для довжини хвилі АМРК, яка дорівнює 5,3 см, приймається рівним $0,013$ [дБ/км] $\cdot r$ [км] або $0,013 \cdot r$ [дБ/км][км].

4.4.2 Пороги обробки

Для підвищення якості первинних даних в АМРК передбачена двоступінчаста процедура введення порогів обробки. Випробування порогів проводяться для кожного селектора дальності. При випробуванні порогів селектор дальності може пройти або не пройти тест.

Оператор АМРК має повну волю при завданні величини порогів. Якщо ж в оператора з'явилися сумніви, то йому рекомендується використовувати установки порогів за замовчування, які пропонуються розробниками АМРК.

Опис порогів обробки, встановлених розробниками АМРК, приводиться нижче [19].

LOG. Поріг LOG (логарифмічний) використовується для обмеження

даних про відбиваність. Часовий ряд логарифма потужності визначається як $10 \lg(I^* + QQ^*)$. Значення дані в одиницях потужності (дБ/мВт). Для цього дані каналів I і Q операторові потрібно перевести з лінійних довільних одиниць в одиниці потужності, використовуючи інформацію, одержану в результаті калібрування приймача радіолокатора. Тест обмеження LOG корисний для фільтрації даних зі значеннями відбиваності, близькими до шуму системи. Типові значення порога LOG: від 1 до 3 дБ.

CCOR. Поріг корекції «местників» (clutter correction) перевіряється за значенням CCOR в селекторі дальності. Коефіцієнт корекції «местників» визначається як потужність не скоректованої радіолуни, поділеної на потужність скоректованої. Величина CCOR дає оцінку між сигналом опадів і «месниками». Цей поріг корисний при видаленні оцінок інтенсивності з даних, занадто сильно засмічених «месниками».

В RAVIS встановлене значення за замовчуванням 30 дБ. Це означає, що потужність «местників» і оцінена потужність метеорологічного сигналу перебувають в співвідношенні 1000:1. Типові значення порога CCOR: від 10 до 50 дБ.

SQI1. Поріг SQI1 перевіряється на показник якості сигналу (signal quality index, SQI) в селекторі дальності. Показник якості сигналу є мірою когерентності даних і визначається як відношення значення першого коефіцієнта автокореляції сигналу до значення нульового коефіцієнта. Відбиття з низькою когерентністю можуть виходити в результаті низького рівня сигналу або за рахунок сигналів з дуже широким розкидом швидкостей. Коли в сигналі низька когерентність, оцінки швидкості й ширини спектра мають погану якість. Використовується для фільтрації некогерентних даних. Типові значення порога SQI1: від 0,3 до 0,5.

SQI2. Для порогу SQI2 застосовується той же алгоритм оцінки, що й для порогу SQI1. Це означає, що перевіряються ті ж дані і показник якості сигналу (SQI) в селекторі дальності. Визначення додаткового SQI надає більшу гнучкість. Типові значення для порога SQI2: від 0,3 до 0,5.

Рекомендація. Не використовуйте те саме значення для SQI1 і SQI2.

Наступний крок введення порогів полягає у введенні за допомогою матриці результату випробування порогів, що буде використовуватися при обробці певного типу даних (моментів). В кожному рядку матриці вказується оброблений тип даних. В кожній колонці вказується тест порога. Той самий поріг LOG застосовується у двох тестах:

- UZ-LOG: перевірка порога LOG застосовується до даних *UZ* ;
- CZ-LOG: перевірка порога LOG застосовується до даних *CZ* .

Окремі результати випробування порогів поєднуються в один результат випробування. Не витримав хоча б один тест селектор дальності одержує значення «немає даних».

В даному прикладі тип даних про момент – це не скоректована

відбиваність UZ , обрані граничні фільтри $UZ-LOG$, $SQI1$ і $CCOR$. Це значить, що будуть проведені такі випробування порогів:

- дані про UZ перевіряються на поріг LOG ;
- дані SQI перевіряються на поріг $SQI1$;
- дані $CCOR$ перевіряються на поріг $CCOR$.

Якщо одна із цих перевірок порогів закінчиться невдало для якогось селектора дальності, значення UZ цього селектора дальності буде «немає даних». Якщо всі випробування пройдені успішно, значення UZ селектора дальності залишиться незмінним.

4.5 Фільтрація первинних даних

4.5.1 Фільтри придушення сигналів від местників

Сигнали від місцевих предметів характеризуються більшими часами кореляції а, отже, мають вузький спектр. Середня швидкість джерел перешкоди дорівнює нулю і тому легко виділяється в спектрі доплерівських частот.

Якщо перед одержанням оцінок моментів з доплерівського спектра сигналів видалити нульову й найближчі до неї частотні складові, тоді можна буде відновити широкий спектр потужності при досить великому (>90 дБ) динамічному діапазоні приймача.

Для придушення сигналів від місцевих предметів використовуються рекурсивні фільтри, що працюють з цифровими значеннями I і Q складових сигналу, а також еліптичні цифрові триполюсні або чотириполюсні фільтри, що загороджують. Останні забезпечують рівень відсічення до 30 дБ при роботі з магнетроном, пульсації в смузі пропускання 1 дБ і ширину інтервалу відсічення, рівну 2 – 4 % інтервалу Найквіста.

Параметри фільтра «местників» для АМРК. Фільтр местників використовується для видалення відбиттів від землі під час обробки даних. На цьому етапі обробки даних з декорельованих даних про відбиваність виходять скоректовані дані про відбиваність. Є фільтри «местників» для тимчасової області й частотної. Який з фільтрів активується, залежить від заданого режиму обробки. Фільтрація «местників» переважніше в частотній області, тому що в результаті фільтрації краще зберігається відношення сигналу до шуму.

Фільтрація «местників» заснована на властивостях швидкості в нескоректованих даних про відбиваність. Тому ширина фільтра визначається в швидкості. Ширина фільтра (м/с) залежить від обраної ЧСІ (а також від випромінюваної частоти). Значення ширини фільтрів за замовчуванням, починаючи із всечастотного фільтра, що впливають: 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 м/с.

Допплерівські фільтри тимчасової області реалізовані в вигляді чотириполюсних цифрових еліптичних фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ) з глибиною придушення від 30 до 50 дБ.

Коефіцієнти фільтрації повинні змінюватися оператором, тому що вони залежать від файлів конфігурації.

В фільтрі DFT використовується фільтр частотного доменна, заснований на обчисленні спектра сигналу з використанням швидкого перетворення Фур'є. Як і для доплерівських БІХ-фільтрів «местників», є також ряд фільтрів «местників» на базі DFT. Спектр DFT може зважуватися віконними функціями: прямокутної (Rectangular), Хеммінга (Hamming) і Блекмана (Blackman). Відповідно до заданої ширини фільтра ряд спектральних ліній у центра викидається. Далі для кожної сторони лакуни, що утворилася, обираються найближча пропущена лінія і дві найближчі залишені лінії які обчислюють їхні середні значення. За цими середніми значеннями за допомогою лінійної інтерполяції відновлюється щільність спектра потужності викинутих ліній.

Статистична фільтрація «местників». Як ми вже відзначали, доплерівські фільтри «местників» майже повністю видаляють відбиття опадів, що мають нульову радіальну швидкість. Цей небажаний побічний ефект фільтрів «местників» може створювати серйозні помилки в сумарних значеннях накопичених опадів у деяких азимутах. Єдиний спосіб уникнути таких систематичних помилок, створюваних фільтром «местників» при вимірюванні опадів, використання методів виключення «местників», що не залежать від спектральних властивостей сигналу. Існують два таких методи: проста карта «местників», яка використовується на більшості радіолокаторів, і статистична фільтрація «местників».

Статистична фільтрація местників заснована на розходженнях між розподілом ймовірності радіолуни опадів, що добре описується розподілом Релле, і відбиттями від «местників», які мають малу дисперсію і менший спектральний вміст, ніж відбиття від опадів.

Відзначимо, що цифровий приймач дозволяє проводити доплерівську, або статистичну фільтрацію – одночасно обидва методи не застосовуються. Статистична фільтрація «местників» допускається лише в режимі відбиваність.

Обробка тривимірної карти «местників»². Тривимірна карта фільтра «местників» описується як фільтр тривимірної структури [азимут] [кут місця] [дальність]:

- [азимут] визначає кутову ширину дозволу (1°);
- [кут місця] визначає п'ять секторів у межах від 2 до 15° ;
- [дальність] визначає 1 - кілометрові проміжки максимум до 255 км.

Кожна отримана пляма фільтра дозволяє визначити ширину фільтра. В фільтрах частотної області окремі плями можна змінювати за дальністю,

кутом місця й азимутом. При обробці фільтрами тимчасової області зміна коефіцієнтів фільтрації в азимутальному напрямку при стабілізації фільтра може приводити до різних перехідних процесів, і, отже, при обробці в тимчасовому домені зміна коефіцієнтів підтримується лише для дальності і кута місця.

Тривимірний фільтр можна автоматично ініціювати відповідним тривимірним зразковим скануванням в гарну погоду. Процесор сигналів створює інтенсивність і ширину спектра для цього зразкового сканування та автоматично конфігурує окремі довідкові карти з номерами фільтрів, отриманими під час зразкового сканування.

При найпростішому варіанті оператор може вибрати один фільтр «местників» для всіх дальностей, азимутів і кута місця.

Розширена фільтрація «местників». Процесор СГЖХ може доповнюватися фільтрацією «местників», для якої використовуються комбіновані методи оптимального видалення «местників» без видалення радіолуни опадів з нульовою швидкістю. В цьому вдосконаленому методі використовуються інтенсивність сигналу, швидкість, когерентність, статистичні параметри та адаптована карта «местників».

Пороги. Оцінки інтенсивності сигналу, швидкості й ширини спектра можна розрізнити за числом граничних тестів з різними параметрами. Ці тести дозволяють операторові відбракувати оцінки моментів низької якості. Коли тест не досягає порога, сумнівні дані містяться в розряді відсутності даних, і подальша обробка даних ведеться з виключенням таких даних.

4.5.2 Видалення спеклів

Видалення спеклів. Спеклами називають оцінки сигналів (інтенсивності, швидкості або ширини спектра), оточені значеннями «даних ні». Такі ізольовані відбиття найчастіше виявляються просто шумовим викидом або відбиттям від літаків або «местників». Вони можуть бути також обумовлені невеликими ізольованими дощовими зливами, однак такі однопиксельні вимірювання рідко використовуються в метеорології, тому їх втрата при видаленні спеклів несуттєва [20].

З цієї причини для видалення всіх ізольованих вимірювань в основі аналізу лише дальність (не азимута). У програму GDRX включений алгоритм видалення спеклів. Алгоритм включається як опція користувача для звільнення дисплеїв радіолокатора від випадкових точкових цілей.

В програмне забезпечення процесора сигналів включений алгоритм видалення спеклів для видалення всіх ізольованих об'єктів на основі аналізу лише дальності або дальності та азимуту ($2D$). Щоб на дисплеї радіолокатора не виводилися випадкові точкові об'єкти, потрібно включити фільтр спеклів.

Він застосовується до даних про відбиваність і доплерівські моменти.

Оператор може обрати тип фільтра спеклів:

- *none* – фільтр спеклів не буде застосований до даних;
- *radial* – фільтр спеклів буде застосований до даних при яких використовується інформація лише про дальність у тім же СРІ, це означає, що будуть перевірені всі сусідні селектори дальності на наявність значень «немає даних», якщо це так, тоді значення буде виправлене на «немає даних»;

- *spatial* – фільтр спеклів буде застосований до даних, у яких є інформація про дальність в тім же СРІ або в двох сусідніх СРІ.

На рис. 4.9 показані три СРІ і типові селектори дальності з сусідніми селекторами дальності. Фільтр проходить по СРІ і перевіряє кожний селектор дальності стосовно восьми його сусідів. Він веде перевірку на недійсність і на підстановку.

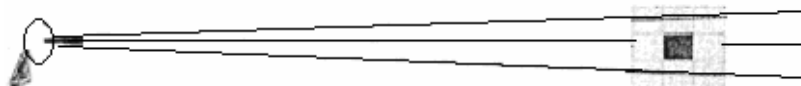


Рисунок 4.9 - Три СРІ і типові селектори дальності з сусідніми селекторами дальності

При виборі просторового фільтра *invalid neighbours* число недіючих сусідів («немає даних») вказує, коли селектор дальності став недіючим. Якщо число занадто велике, селектор дальності позначається «немає даних».

Число діючих сусідів (*valid neighbours*) вказує, коли значення селектора дальності підставляється. В випадку підстановки селектора дальності його значення замінюється середнім з діючих навколишніх селекторів.

Розрахунки після фільтрації. Для кожного селектора дальності обробка парних імпульсів дає оцінку автокореляції в різні інтервали часу. Якщо число вибірок радіолуни в одному селекторі дальності дорівнює M , значення автокореляції розраховуються в такий спосіб:

- за інтервалом 0 без корекції «местників»

$$T_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_m * V_m, \quad (4.37)$$

- за інтервалом 0 з корекцією «местників»

$$R_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M U_m * U_m, \quad (4.38)$$

- за інтервалом 1 з корекцією «местників»

$$R_1 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} U_m * U_{m+1}, \quad (4.39)$$

- за інтервалом 2 з корекцією «местників»

$$R_2 = \frac{1}{M-2} \sum_{m=1}^{M-2} U_m * U_{m+2}, \quad (4.40)$$

де V_m – часовий ряд сигналів до корекції «местників»,

U_m – часовий ряд сигналів після корекції «местників». Зірочкою позначені сполучені комплексні амплітуди парних сигналів. Число імпульсів, необхідне для розрахунку автокореляції в одному селекторі дальності, залежить від режиму синхронізації процесора сигналів. Обробка парних імпульсів повинна опрацьовуватися для кожного селектора дальності одного СРІ.

4.6 Режими обробки

4.6.1 Фіксований і стандартний режими

Робота з двома ЧСІ. Вибір алгоритму для роботи АМРК з двома ЧСІ описаний в табл. 4.2.

На рис. 4.10 показане співвідношення між СРІ, ЧСІ-High (B1) і ЧСІ-Low (B2) в режимі кутової синхронізації, коли СРІ являє собою кутовий діапазон.

Фіксований і стандартний режими (табл. 4.2) рекомендується для обробки і фільтрації «местників» в частотній області (DFT). В обох режимах врівноважуються ЧСІ і число імпульсів у групі, що найкраще відбивається на обробці DFT фільтром місць-піків, тому що він компенсує варіації ширини фільтра. При заданій фіксованій швидкості антени фіксований режим дасть вдвічі більше імпульсів, чим стандартний. При такому збільшенні числа імпульсів в групі підвищиться і якість даних. З іншого боку, в фіксованому режимі кожна група відповідає одному СРІ, що ідеально відповідає діаграмі направленості антени. Розгортання швидкості в цьому режимі базується на двох суміжних діаграмах

направленості, а не виконується в межах однієї діаграми направленості, як в стандартному режимі.

Таблиця 4.2 – Вибір алгоритму режиму для роботи АМРК з двома ЧСІ

Режим	Опис
Стандартний	У режимі кутової синхронізації кутова ширина СРІ розбивається на рівні частини. Обидві групи, ЧСІ-High (B1) і ЧСІ-Low (B2), мають однаковий кутовий розмір. У режимі тимчасової синхронізації різниці між стандартним і адаптивним режимами немає. Структура параметрів ЧСІ в цьому режимі B1B2B1B2
Адаптивний	Кожна група ЧСІ-High (B1) і ЧСІ-Low (B2) містить однакове число імпульсів. Це означає, що розмір групи обчислюється за відношенням параметрів ЧСІ. Структура параметрів ЧСІ в цьому режимі B1B1B2B2
Фіксований	Кожна із двох груп ЧСІ-High (B1) і ЧСІ-Low (B2) займає весь СРІ. Структура параметрів ЧСІ в цьому режимі B1B2B1B2

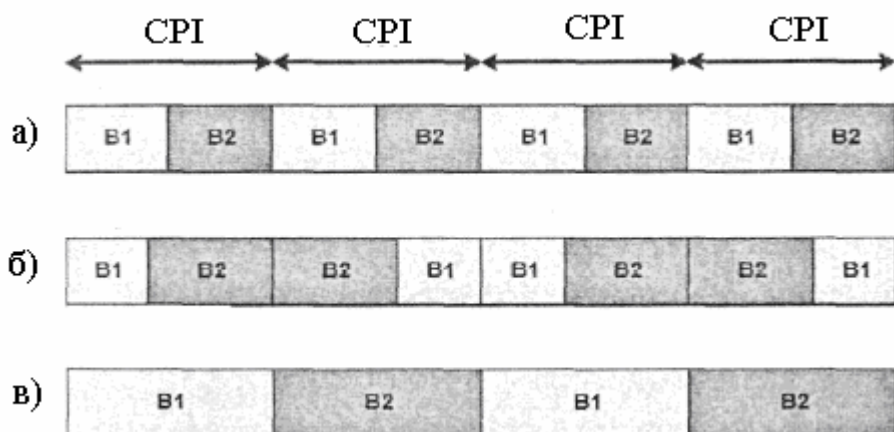


Рисунок 4.10 – Співвідношення між інтервалами когерентної обробки (СРІ), високої ЧСІ (High (B_1)) та низькою ЧСІ (Low (B_2)) в режимі кутової синхронізації (СРІ в вигляді вибірки) при роботі радіолокатора з двома ЧСІ: а) - стандартному; б) - адаптивному; в) - фіксованому режимах

Адаптивний режим рекомендується для обробки та фільтрації «местників» в тимчасовій області. Він забезпечує однакове число імпульсів в групі, що підвищує якість результатів за швидкістю та ширини спектра, тому що розгортання обчислення SQI і фільтрація базуються на однаковій кількості даних в групі. Друга перевага адаптивного режиму при використанні БХ-фільтрів в тимчасовій області полягає в тому що,

як правило, між кожною зміною ЧСІ певне число імпульсів віддається від обробки і використовується лише для повторної ініціалізації БІХ-фільтрів. Однак використання схеми В1В1В2В2 зменшує число змін ЧСІ в два рази. У результаті обробки вимикається в два рази менше імпульсів, що знову ж підвищує якість вторинних метеоданих.

4.6.2 Завершення процесу первинної обробки

Радіолокаційні вимірювання утворюються за допомогою випромінювання в певному напрямку електромагнітних мікрохвильових імпульсів і наступного прийому та аналізу створених ними відбиттів.

Після випромінювання кожного імпульсу приймач звичайного радіолокатора видає залежний від часу сигнал потужності $S(t)$, пропорційний логарифму потужності кожного відбиття $P(r)$ на радіолокаційній дальності r .

Когерентний приймач видає два сигнали $I(t)$ і $Q(t)$ – синфазний сигнал I пропорційний амплітуді відбиття та синусу його фази (щодо випроміненої хвилі), квадратурний сигнал Q пропорційний косинусу його фази. Сума $I^2 + Q^2$ пропорційна потужності відбиття, а арктангенс (I/Q) пропорційний фазі відбиття.

Вихідні дані S, I і Q на виході радіолокаційного приймача, він буде звичайний або когерентний, супроводжуються відомостями про синхронізацію, калібрування, час, положення антени та про стан радіолокатора і називаються первинними радіолокаційними даними.

Первинні дані, одержані від послідовних радіолокаційних імпульсів, випромінених в одному напрямку, надходять в процесор радіолокаційних сигналів.

За кожним біном (дискрета, строба, селектор) дальності вздовж осі радіолокаційного променя виходить часовий ряд цифрових даних. Сигнали потужності в кожному біні дальності осереднюються за часом, та усередненні за часом сигнали від декількох сусідніх бінів – осередку дальності – осереднюються за простором.

Аналогічно опрацьовуються синфазні та квадратурні сигнали з кожного осередку дальності, після чого виходить енергетичний спектр відбитих сигналів, середня оцінка між імпульсною змінною фази – доплерівська частота і ширина спектра.

За певних умов потужність відбиттів пропорційна відбиваності метеоцілі Z , доплерівська частота – середній радіальній швидкості цілі v_p , а ширина спектра – дисперсії швидкості цілі σ_v^2 .

Первинна обробка починається з придушення в кожному селекторі дальності відбиттів від місцевих предметів в такий спосіб:

- шляхом фільтрації п'яти – семи гармонік спектра поблизу нульової частоти $|\Delta v| \leq 1$ м/с;

- вимкненням селекторів дальності, в яких ширина доплерівського спектра $\sigma_v < \pm(0,5 + 0,7)$ м/с;

- вимкненням селекторів дальності, в яких відзначені сигнали, відбиті від місцевих предметів і точкових цілей.

Первинну обробку після усунення відбиттів від місцевих предметів можна вважати закінченою, коли в кожному селекторі дальності виконані такі операції:

- оцінка ширини спектра доплерівських швидкостей гідрометеорів σ_v з припустимою точністю ± 1 м/с в діапазоні від 0 до 10 – 15 м/с (за $R(1)$ і $R(2)$) (формула (4.24));

- оцінка радіальної швидкості v_p з точністю $\pm 0,25$ м/с (за $\arg R(1)$) (формула (4.22));

- розрахунок потужності відбитих сигналів (за $R(0)$);

- розрахунок відбиваності з урахуванням потенціалу АМРК і виправлень на загасання в антенно-хвильоводному тракті, РПУ і атмосфері з точністю ± 1 дБ;

- усунення неоднозначності при вимірюванні радіальних швидкостей.

Після проведення первинної обробки всі масиви даних повинні пройти редагування алгоритмами автоматичного контролю якості з знищенням інформації в селекторах дальності з даними, що Z, σ_v, v_p вискакують.

Цифровий вихід процесора радіолокаційних сигналів по кожному осередку дальності в кожному напрямку зберігається в пам'яті комп'ютера у вигляді тривимірних полів у полярних координатах (r, φ, θ) щодо місця розташування радіолокатора. Звичайні радіолокатори створюють поля радіолокаційної відбиваності, тоді як когерентні радіолокатори додатково створюють поля радіальної швидкості й дисперсії швидкості. Поля Z, v_p , і σ_v в полярних координатах називаються базовими (або вторинними) радіолокаційними даними.

Базові дані служать відправною точкою для розрахунків за заданими алгоритмами різних величин, представлених трьох-, двох- і одномірними полями в прямокутних координатах (x, y, z) різних площин проекції, і називаються продуктами радіолокаційної станції.

Ці продукти можна розділити на три групи: відбиваність, опади та вітер.

Найбільш важливими продуктами по відбиваності є відбиваність на постійній висоті, верхня межа радіолуни та вертикальний профіль відбиваності. Всі вони розраховуються за базовою відбиваністю на прямій

лінії.

Головні продукти по опадах містять в собі інтенсивність опадів на землі й накопичення опадів на землі за різні проміжки часу. Інтенсивність опадів виходить з функціональної залежності між інтенсивністю дощу і відбиваністю.

Основним продуктом вітру є вертикальний профіль горизонтального вітру. Він розраховується за радіальними швидкостями і їхніми просторовими градієнтами.

4.7 Характеристики автоматизованого метеорологічного комплексу «Метеор-Метеоячейка»

4.7.1 Склад комплексу

АМПК «Метеор-Метеоячейка» (рис. 4.11) складається з наступних систем.

В блоці модуля передачі інформації цифрового приймача: 1 - VSWR (коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, КСХН) (міра безпеки); 2 - Door SW (дверний вимикач); 3 - WG ARC (гнутий хвилевід); 4 - GUNARC; 5 - Trigger (тригер); 6 - AFC (АПЧ); 7 - POL SW (поляризаційний перемикач); 8 - SSI down (інтерфейс SSI); 8 - SSI up (інтерфейс SSI); 10 - ANGLE parallel (кутова паралель); 11 - dCLK (диференціальний датчик часу); 12 - CLK.50R (годинники); 13 - Share Link Ports (порти зв'язку Share); 14 - GPIO Ports (порти); 15 - 12C (інтерфейс 12C); 16 - RS232 (інтерфейс RS232); 17 - 10/100 Enet (інтерфейс Ethernet 100 Мбайт); 18 - GB Enet (інтерфейс Gigabit Ethernet).

Основні системи:

- антенна система (CLP-10);
- блок керування антеною (ACU);
- хвилеводна система (WP);
- процесор керування (RCP);
- передавач ТХС400;
- приймач RХС510 (аналогова (ARX) і цифрова (GDRX) частини);
- робоча станція інженера з радіолокації (PC-P) (RAVIS);
- робоча станція інженера-радіометеоролога (PC-M);
- робочі станції споживачів інформації (PC MAPC).

Примітка. PC MAPC являє собою окремий комплекс і не входить до складу АМПК «Метеор-Метеоячейка».

Робоча станція радіоінженера (PC-P):

- персональна ЕОМ типу HP (одна) з попередньо встановлених операційною системою Windows XP Pro;
- фільтр в мережі Pilot;
- пристрій безперебійного енергопостачання Back-UPS;

- мультиплекс 8RS232;
- програма RAVIS;
- сполучні кабелі;
- комплект експлуатаційної документації.

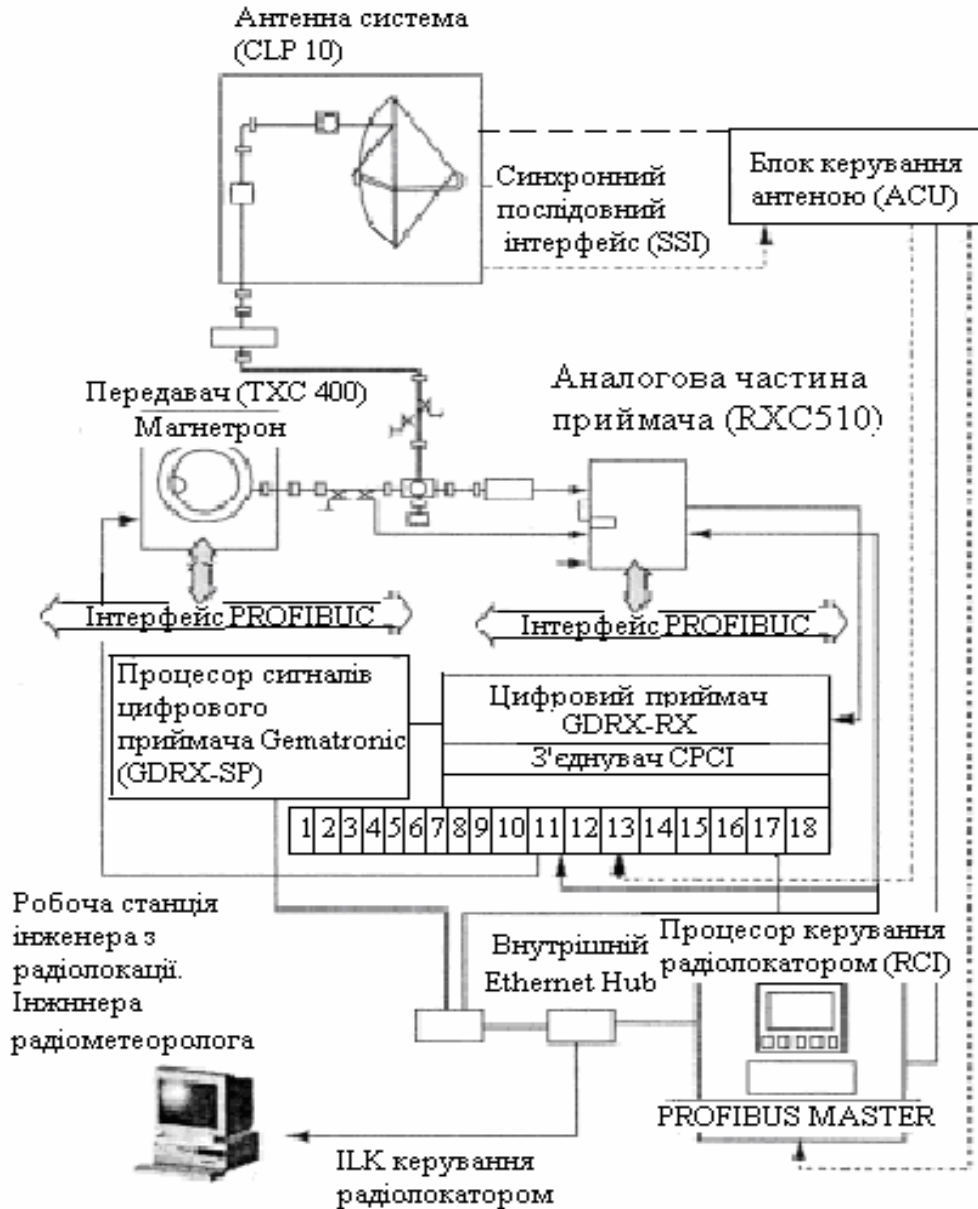


Рисунок 4.11 - Блок-схема АМПК «Метеор-Метеоролог»

На рис. 4.12 STAI.O - стабілізований гетеродин; СОНО – когерентний гетеродин; РС-Р - робоча станція інженера з радіолокації (оперативний програмний контроль за роботою системи на базі RAVIS); ВІТЕ – вбудовані засоби діагностики стану устаткування; PLC - програмні логічні контролери; РС-М - робоча станція інженера-радіометеоролога.

Робоча станція метеоролога (РС-М):

- персональна ЕОМ типу HP (одна) з попередньо встановленою

операційною системою Windows XP Pro;

- фільтр в мережі Pilot;
- пристрій безперебійного енергопостачання Back-UPS;
- мультиплексом 8RS232;
- спеціальне програмне забезпечення РС-М (ИТАВ 416311.008

Метеоячейка 2.0);

- сполучні кабелі;
- комплект експлуатаційної документації;
- шафа телекомунікаційного стандарту 19”;
- модем з комплектом рознімань для зв'язку з абонентами;
- друкувальний пристрій (принтер дев'ятигольчатий) формату

A4.

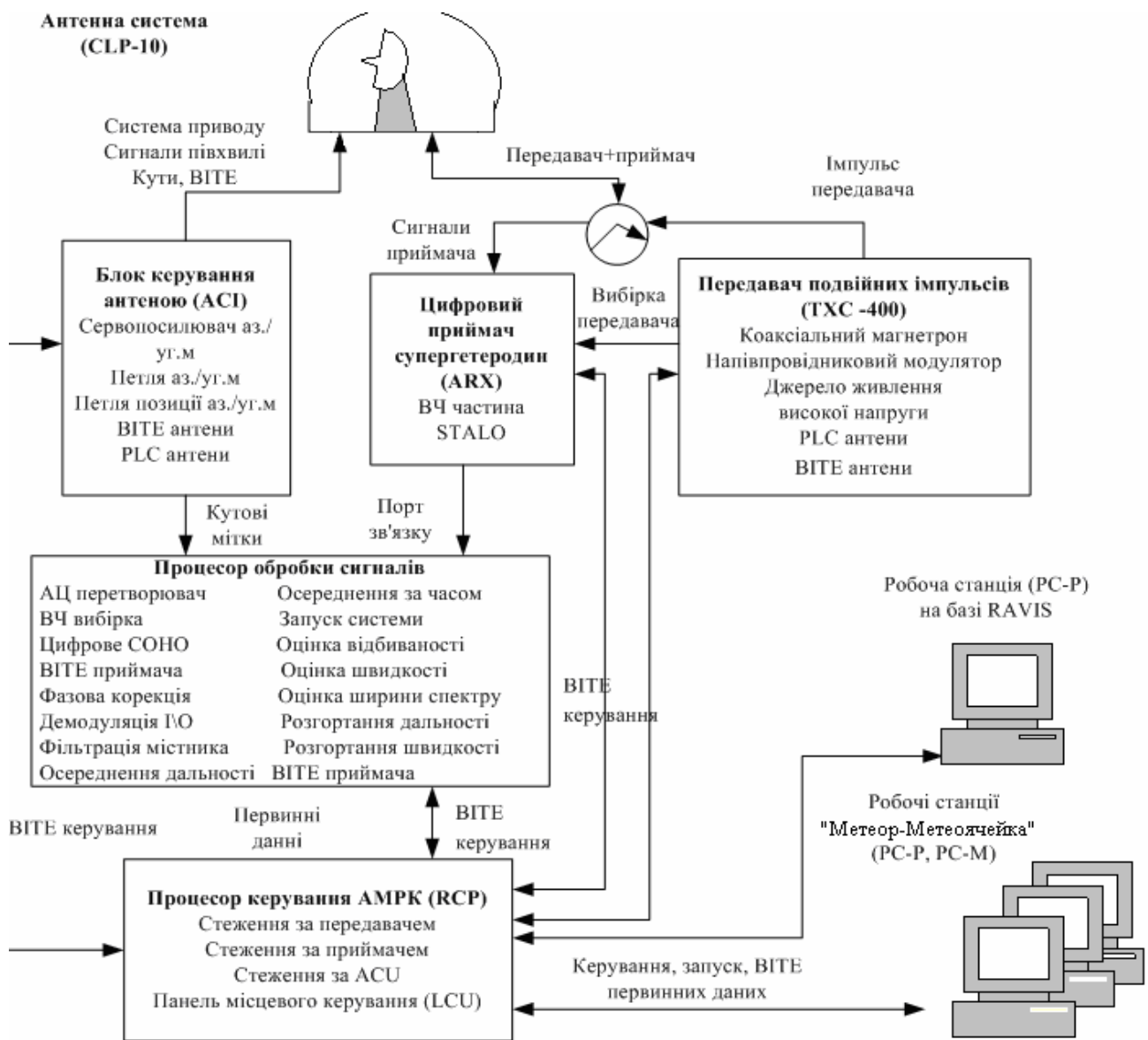


Рисунок 4.12 – Функціональна структура автоматизованого метеорологічного радіолокаційного комплексу «Метеор-Метеоячейка»

Технічні характеристики РС АМРК наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технічні дані РС АМРК «Метеор-Метеоячейка»

РС-Р	RAVIS®
Мінімальні потреби до апаратури	ПЕВМ 2 ГГц, 1 Гб RAM
Операційна система	Windows XP Pro
РС-М	Метеор - Метеоячейка
Мінімальні потреби до апаратури	P4/512 Мб/401 'б/CD/LAN/19"LCD
Операційна система	Windows XP Pro

4.7.2 Вбудовані системи автоматизованого метеорологічного комплексу

В АМРК використовуються складні алгоритми управління та опрацьовуються більші обсяги даних в режимі реального часу. Для рішення таких завдань використовуються готові комерційні рішення (commercial off-the-shelf, COTS), такі як вбудовані в систему, промислові комп'ютери, стандартні промислові інтерфейси для взаємодії різних компонентів системи, спеціалізоване програмне забезпечення, вмикаючи операційні системи.

Прийнятий розробниками АМРК підхід спрощує розробку системи як цілого так і дозволяє з легкістю розширювати та адаптувати радіолокатор під конкретні потреби замовника.

Під вбудованою системою розуміється будь-яка комп'ютерна система, що працює разом з іншим устаткуванням і розташовувана з ним в одному конструктиві, або всередині даного встаткування. Звичайно вона являє собою рішення на базі мікропроцесора або мікроконтролера і реалізує яку-небудь спеціальну функціональність, але може бути й повноцінним комп'ютером, що має всі звичні можливості і компонентами звичайного комп'ютера. Основні системи АМРК «Метеор-Метеоячейка», пов'язані з управлінням або обробкою даних, які реалізовані у вигляді систем, що вбудовуються - це процесор управління RCP-L, блок управління антеною ACU, цифровий приймач GDRX і сигнальний процесор.

Процесор управління RCP являє собою стоїчний комп'ютер, що складається з пасивної об'єднуючої плати із шиною Compact PCI і двох плат стандарту Compact PCI. Перша плата – це однопалатний комп'ютер з процесором PowerPC MPC 8245, що базується на RISC-Архітектурі. На платі розташовуються оперативна пам'ять SDRAM, флеш-пам'ять для зберігання операційної системи і додатків, рознімання Fast Ethernet для зв'язку з цифровим приймачем, сигнальним процесором і клієнтами, інтерфейси COM, USB, IDE і PS/2. Також є рознімання для розширення

можливостей комп'ютера за допомогою підключення додаткових карт, що задовольняють стандартам M-Module, PC-MIP (multiple-in-line package) і PMC (PCI Mezzanine Card). Процесор управління RCP працює під управлінням операційної системи реального часу¹ VxWorks (розробка американської фірми Wind River) і програмного забезпечення Rason (Selex-Gematronik).

Друга плата процесора управління використовується для підключення M-модулів для управління різними підсистемами радіолокатора збору діагностичної інформації. Один з цих модулів виконує функції управління шиною Profibus (process field bus - специфікація відкритої високошвидкісної шини для цифрового технологічного встаткування), але процесор управління одержує з аналогових і цифрових датчиків інформацію про стан всіх вузлів радіолокатора. В цьому модулі використовується один з процесорів MC 86000 (виробництва Motorola) на базі CISC-Архітектури.

Блок управління антеною ACU містить в собі одноплатний комп'ютер на базі процесора PowerPC MPC 8245 з шиною VME (Versa Module Europe), аналогічний одноплатному комп'ютеру, який використовується в процесорі управління. Також через загальну шину VME до комп'ютера підключений модуль управління шиною Profibus (такий, що в процесорі управління) і контролер синхронного послідовного інтерфейсу для зчитування показників кодування положення антени.

Цифровий приймач GDRX управляється процесором PowerPC MPC 8540, крім того, що є високопродуктивним процесором, містить у собі широкий набір контролерів (пам'яті DDR SDRAM ECC, Ethernet різних швидкостей, шини PCI, локальної шини, послідовних інтерфейсів та ін.). Процесор відповідає за прийом і виконання управляючих команд, форматування та передачу даних сигнальному процесору або клієнтам, управління сигнальними процесорами, забезпечення взаємодії з платами розширення та зовнішніх інтерфейсів. Як операційна система використовується розподілення Linux з підтримкою RTAI (real time application interface - інтерфейс додатків реального часу).

Обробка даних в цифровому приймачі утворюється в основному трьома цифровими сигнальними процесорами Tiger, SHARC, ADSP-TS101S. Перший відповідає за одержання даних I/Q - каналів від АЦП або вибірки сигналу передавача, перетворення даних з числа плаваючої коми, корекцію значень за результатами калібрування, вибір використовуваного каналу приймача (низької або високої чутливості), перетворення порядку проходження даних, синхронізацію з положенням антени при необхідності попередньої фільтрації. Два інші цифрових сигнальних процесори обчислюють моменти комплексної кореляційної функції та метеопараметри, що передають результати центральному процесору.

Всі параметри обробки і самі мікропрограми, які використовуються з цифровим сигнальним процесором, завантажуються центральним процесором.

4.8 Принципи роботи автоматизованого метеорологічного комплексу

Роботу АМРК викладемо за функціональною схемою, наведену на рис. 4.11. Активно стабілізований коаксіальний магнетрон передавача генерує НВЧ імпульс, що проходить через антенний перемикач і випромінюється антеною. Антена випромінює НВЧ імпульс передавача з симетричної вузької направленої діаграми направленості антени. Сканування антени за азимутом і кутом місця відбувається відповідно до програми метеорологічних спостережень (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд антенної колонки АМРК «Метеор-Метеоячейка» без радіопрозорого укриття

На цьому етапі передачі НВЧ імпульсу приймач блокується обмежувачем прийому передачі антенного перемикача, що запобігає влученню енергії з циркулятора антенного перемикача на чутливий приймач.

Після передачі імпульсу обмежувач прийому-передачі відкривається

і з'єднає тим самим через циркулятор приймач з антеною. Починається етап прийому, на якому приймач приймає сигнали, відбиті гідрометеорами. Цей етап триває до випромінювання наступного мікрохвильового імпульсу.

Прийнятий сигнал оцифровується і двійкові коди. Оцифровані вибірки передаються по високошвидкісній лінії на процесор радіолокаційних сигналів для подальшої обробки аналізу.

Цифровий приймач з процесором обробки сигналів GDRX (фірми Selex Si/Gematronik) виконує чотири головні функції: створює фазовий еталон за наявний вибір імпульсів передавача і утворює комплексний сигнал, що модулює, попередньо опрацьовує прийняті комплексні сигнали, що модулюють, генерує імпульси для запуску радіолокатора і вводить прийняті дані інформації про кутове положення антени, створюючи в такий спосіб просторовий еталон інформації.

Процесор обробки відбитих сигналів робить їх швидко оцифровку з високим дозволом, гнучку фільтрацію сигналів відбитих від «местників», осереднення відбитих сигналів часу і дальності, їх пульспарну обробку.

Виконуючи звичайні функції приймача в програмувальному середовищі, GDRX яке забезпечує повну гнучкість формування смуги пропускання ПЧ (для максимальної чутливості до випромінюваного сигналу), фільтрацію смуги частот відеосигналу, керування частотою стабілізованого гетеродина STALO і генерацію випромінюваних імпульсів.

Завдяки тому, що процесор обробки сигналів робить докладний аналіз кожного випроміненого імпульсу, є можливість на постійній основі контролювати частоту радіолокаційного передавача.

Процесор управління (RCP) з локальним контролем управляє і стежить за функціонуванням АМРК. Зокрема, під його контролем перебувають вбудовані засоби діагностики (ВІТІ). В цілому контролюється стан великої кількості параметрів підсистем АМРК, у випадку збою процесор управління RCP діє за заданими пріоритетами відповідно до важливості збою.

Крім усього іншого, процесор управління (RCP) забезпечує спільну роботу радіолокатора й робочої станції інженера-радіометеоролога РС-М. Головним завданням РС-М є одержання (витяг) метеорологічної інформації (продукції) з сигналів, відбитих від метеоутворювання.

Радіопрозоре укриття (РПУ) антени створює комфортні умови для роботи антенної системи та являє собою сферичну конструкцію без площин, що вторгаються в корисну площу обтікача або систематичних відбиттів, що створюються. Поверхня обтікача гідрофобна та стійка до сонячного опромінення, пилу, граду і вітру з піском.

Радіопрозоре укриття антени встановлюється на даху будівлі або на вищій, забезпечується блискавковідводом і сигнальними ліхтарями

відповідно до специфікації ІСАО. Обтікач зміцнюється металевим кільцем, який забетонований у фундамент будівлі або встановлений на металевій платформі вишки (рис. 4.14 і рис. 4.15).

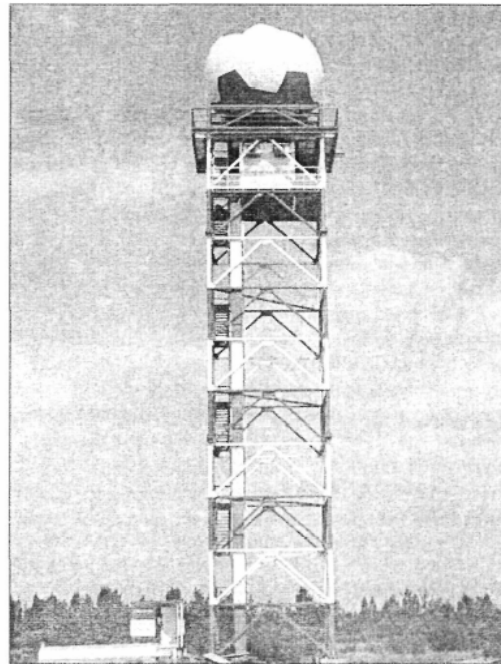


Рисунок 4.14 - Розміщення АМРК «Метеор-Метеоячейка» на 30-метровій металевій вишці в аеропорту Пулково (Санкт-Петербург)

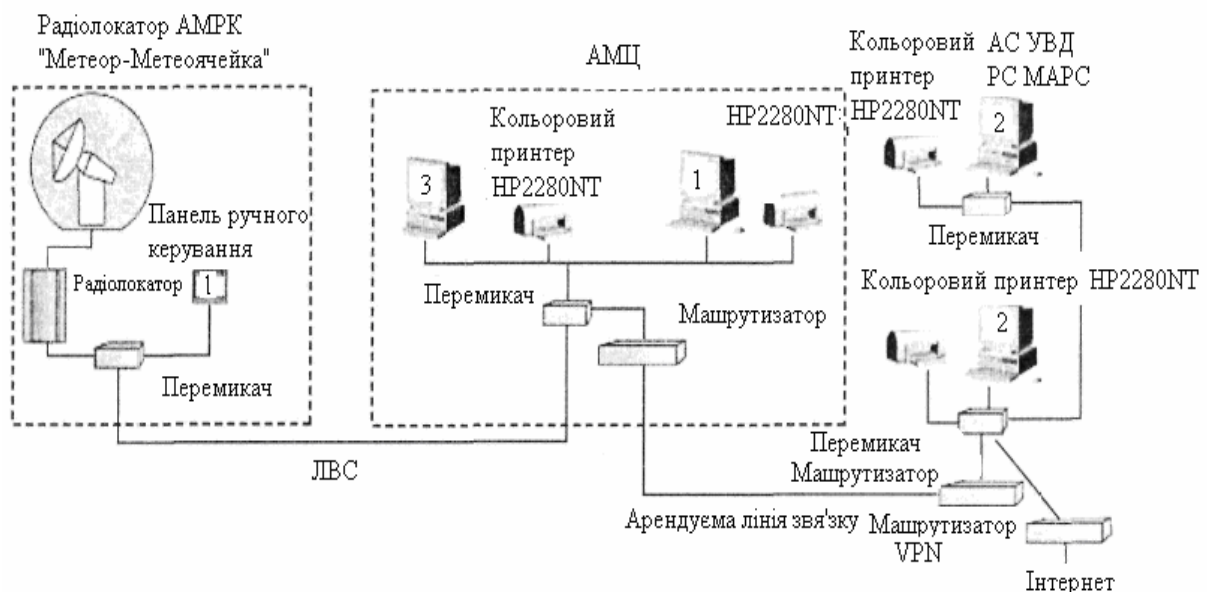


Рисунок 4.15 – Типова конфігурація АМРК «Метеор-Метеоячейка» з робочими станціями в аеропорту: 1 – робоча станція інженера з радіолокації (РС-С); 2 – РС МАРС; 3 – робоча станція інженера-радіометеоролога (РС-М)

4.8.1 Сканування об'єму простору

Антенна система АМРК має таку характеристику:

- вузька діаграма направленості антени та малі бічні пелюстки;
- більша точність наведення;
- швидка реакція направлення системи управління кутом місця антени при збільшенні швидкості сканування;
- тверда механічна конструкція та мінімальні вимоги до обслуговування.

Сучасні метеорологічні радіолокатори з цифровою обробкою даних майже 99 % свого робочого часу експлуатуються в режимі сканування.

Під об'ємним скануванням розуміється обертання антени за азимутом на 360° при східчій зміні її положення за кутом місця.

Кут місця повинен змінюватися як найшвидше, щоб мінімізувати загальний час сканування. Антенна система АМРК оптимізована за часом реакції на зміну кута місця для підвищення швидкості одержання даних за обсягом простору.

Схема і конфігурація АМРК.

В місці установки радіолокатора «Метеор 500С» присутність обслуговуючого персоналу під час оперативної роботи не потрібна.

Процесор управління радіолокатором (RCP) забезпечує інтелектуальний зв'язок між радіолокатором і робочою станцією інженера-радіометеоролога (РС-М) і пов'язаний з процесором обробки сигналів (рис. 4.15).

Зв'язок радіолокатора з вилученими робочими станціями АМРК «Метеор-Метеоячейка», що перебувають в авіометеоцентрі, здійснюється по орендованій лінії зв'язку.

4.9 Технічні характеристики

Основні характеристики підсистем автоматизованого метеорологічного радіолокаційного комплексу «Метеор-Метеоячейка», які ставляться до «Метеор 500С» і РС-М, представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Характеристики антенної системи

Характеристики антени	
Робоча частота	Від 5,60 до 5,65 ГГц
Калібрована ширина спектра	Від 5,420 до 5,825 ГГц
Поляризація	Лінійна горизонталь
Ширина діаграми направленості антени (ДСА) в точках -3 дБ	1,0° макс. без РПУ
Посилення потужності	44,5 дБ мін., 45 дБ типічно

Продовження табл. 4.4

Характеристики антени	
Рівень першої бічної пелюстка за азимутом та кутом місця	-28 дБ макс., -30 дБ типчино
Діаметр	4,2 м
Характеристики антенної колонки	
Швидкість обертання	від 0,5 до 6 об./хв (від 1 до 36 град./с)
Варіації швидкості обертання	±0,5 град./с
Прискорення	16 град./с ² макс.
Точність позиціонування	±0,1°
Час переміщення на 2°	1,5с
Точність переміщення на 2°	±0,1°
Характеристики антенної колонки за кутом місця	
Кутовий діапазон	від -2 до +182°
Швидкість підйому й опускання	36 град./с макс.
Прискорення	12 град./с ² макс.
Час переміщення на 2°	1,5 с
Точність переміщення на 2°	±0,1°
Кінцеві вимикачі	від -2 до 182°
Характеристики блоку управління антени	
Тип сервопривода	Посилючий, модульований за тривалість імпульсу
Контроль швидкості	Аналогове коло
Контроль позиціонування	Цифрове коло
Дозвіл позиціонування	14 біт (LSB – 0.021°, где LSB (least significant bit) – найменш значимий біт)
Процесор управління	16 біт, 10 МГц
Інтерфейс	Profibus Dp
Характеристики РПУ	
Тип	Сандвіч
Формат сегменту	Панель
Діаметр	6,7 м
Висота	5,77 м
Діаметр основи	4,62 м
Число сегментів	12
Втрати при передачі	0,3 дБ макс., в один бік
Зсув променя	≤+0,01°
Поверхня	Гідрофобна, покрита гелем
Колір	Білий, RAL 9010
Характеристика прийомо-передавача	
Частотний діапазон	від 5450 до 2850 МГц
Пікова потужність в імпульсі	≥250 кВт на виході передавача
Тривалість довгого імпульсу в точці 3 дБ	(2±0,1)мкс
Частота проходження імпульсу (ЧСІ)	(0,83±0,05)мкс
2 мкс	Від 250 до 550 Гц
0,83 мкс	Від 250 до 1200 Гц
Відношення ЧСІ	5/4, 4/3, 3/2

Продовження табл. 4.4

Характеристики прийомо-передавача	
Робоча частота	5640 МГц
Коефіцієнт шуму	2 дБ або менше
Ефективна ширина смуги	
2 мкс	0,6 МГц \pm 5%, погоджений фільтр
0,83 мкс	1,5 МГц \pm 10%, погоджений фільтр
Чутливість (MDDS)	
2 мкс	-112 дБ/мВт на виході приймача
0,83 мкс	-108 дБ/мВт на виході приймача
Ефективний динамічний діапазон	100 дБ миттєво
Характеристики цифрового приймача GDRX. Одержані дані	
Вибірка заПЧ	2 каналу, 14 біт, 80 МГц
Динамічний діапазон	більше 95 дБ, до точки стиску -1 дБ
Мін. інтервал між бінами (дискретами) дальності	30 м
Селекторів дальності за розгорткою	до 2000
Управління	
Імпульси запуску	15, програмуються окремо
Частота проходження імпульсів (ЧСІ)	від 250 до 1200 Гц
Тривалість імпульсу	0,83 мкс (короткий), 2 мкс (тривалий)
Робочі характеристики	
Допплерівський режим з подвійною ЧСІ	Відношення ЧСІ 3/2, 4/3 и 5/4 відповідає збільшенню радіальної швидкості в два, три та чотири рази.
Фільтри местників на доплерівському каналі.	Чотириьохполосні еліптичні Біх-фільтри; три набори по 16 фільтрів, включаючи все прохідний (нульової ширини); загасання в смузі придушення 30, 40, 50 дБ; ДПФ-фільтри (фільтри дискретного перетворення Фур'є)
Фільтри местників в каналі відбиваності	Статичний фільтр на місці установки, ослаблення местників на місці установки і ситуації, 15-20 дБ
Осереднення в біні (дискреті) дальності	від 2 до 16 послідовних бітів
Тимчасове осереднення	від 2 до 256 імпульсів

4.9.1 Зведення робочих характеристик і оцінка метеорологічної ефективності

Основні робочі характеристики АМРК наведені в табл. 4.5.

АМРК «Метеор-Метеоячейка» має дві тривалості імпульсу, які обираються залежно від режиму роботи. Для одержання високої чутливості використовується довгий імпульс в 2 мкс, що відповідає дозволу дальності 300 м, а для доплерівського режиму – стандартний

короткий імпульс в 0,83 мкс з більш високим дозволом дальності, рівним 125 м, що підсилює придушення «местників», але зменшує потенціал АМРК «Метеор- Метеоячейка».

Таблиця 4.5 – Основні робочі характеристики АМРК

Робоча характеристика	Режим	
	Допплерівська швидкість	Вимірювання відбиваності
Тривалість імпульсу	0,83 мкс	2 мкс
ЧСІ	Від 250 до 1200 Гц	Від 250 до 550 Гц
Відношення ЧСІ	3/2, 4/3, 5/4	
Мінімальний дозвіл дальності кута огляду	$125 \text{ м} \leq 1^\circ$	$300 \text{ м} \leq 1^\circ$
Діапазон дальності для однозначного вимірювання швидкості	До 125 км	
Дальність штормового оповіщення		До 256 км
Діапазон однозначного вимірювання швидкості	До $\pm 65 \text{ м/с}$	
Максимальний діапазон виявлення метеооб'єктів		$\geq 500 \text{ км}$
Ширина спектру	Від 0,1 до 15,8 м/с	
Діапазон вимірювання відбиваності		Від -31,5 до 95,5 дБZ
Пікова потужність	250 кВт	250 кВт
MDDS (чутливість цифрового приймача)	$\leq -108 \text{ дБм/Вт}$ $\leq -138 \text{ дБ/Вт}$	$\leq -112 \text{ дБ/мВт}$ $\leq -142 \text{ дБ/Вт}$
Коефіцієнт корисної дії високоякісного тракту (величина послаблення)	-1,5 дБ	-1,5 дБ
Метеорологічний потенціал P_M		
Оптимальний, в од. СІ $\text{дБ} \cdot \text{м}^{-1}$	281,6	289,4
Оптимальний по Керівництву для МРЛ. $\text{дБ} \cdot \text{м}^{-1}$	57,2	64,7
Мінімальна відбиваність на відстані 50 км	$\leq -4,7 \text{ дБZ}$	$\leq -12,5 \text{ дБZ}$
Згасання местників	$\geq 40 \text{ дБ}$ типово	Вираховування, статистична фільтрація

В таблиці 4.6 – 4.8 наведені розрахункові характеристики метеорологічної ефективності АМРК «Метеор-Метеоячейка», одержані в процесі сертифікаційних випробувань на основі вимірних технічних характеристик АМРК і рівняння радіолокації атмосферних утворень.

Таблиця 4.6 – Ефективний розрахунковий радіус радіолокаційного виявлення хмар $R_{\text{до}}$ (км) і пов'язаних з ними атмосферними явищами для АМРК «Метеор-Метеоячейка»

Форма хмар	Атмосферні явища	Тепле півріччя	Холодне півріччя
Купчасто-дощові	Град, гроза, злива або сніг	250	160
Потужні купчасті	Без опадів облогові опади, облогові мрячні опади	60—70	20—30
Шарувато-дощові		150—200	100
Шаруваті, шарувато-купчасті, високошаруваті		30—70	20—50

Таблиця 4.7 – Максимальний розрахунковий радіус (км) виявлення хмар

Форма хмар за радіолокаційною класифікацією	Тепле півріччя	Холодне півріччя
Верхній ярус (С)	150	80
Середній ярус (А)	200	100
Нижній ярус (В)	120	120
Шарувато-дощові (Н)	250	200
Кучово-дощові (О)	300	200

Таблиця 4.8 – Розрахункові середні ймовірні похибки визначення меж купчасто-дощових хмар в межах ефективного радіуса їх виявлення

Віддалення від МРЛ, км	10, 30, 50, 100, 150, 200, 250
Середня ймовірна похибка, м	30, 85, 142, 283, 427, 570, 710

4.10 Метеорологічний потенціал МРЛ-5

В співвідношенні з розрахунку дії (РД) розрахунок метеорологічного потенціалу МРЛ розраховується за формулою:

$$\check{I}_i = \frac{0,1\pi^6 D_s \dot{A}_{\delta h} K_{AA}}{D_o \lambda^4}, \quad (4.41)$$

де, \check{I}_i - метеорологічний потенціал ($\text{км}^2/(\text{смм}^6 \cdot \text{м}^{-3})$);

P_i - потужність зондуючого імпульсу (Вт);

\dot{A}_{δ} - апертура антени (м^2);

h - протяжність зондуючого імпульсу (м);

K_{AB} - коефіцієнт корисної дії височастотного тракту $0,16(-8 \text{ дБ})$;

λ - довжина хвилі (см);

$P_{ш}$ - чутливість приймального пристрою (Вт).

Розрахунок P_m в децибелах ($10 \lg \check{I}_i$) виконується за формулою:

$$10 \lg \check{I}_i = 10 \lg \dot{A}_{\delta} + 10 \lg D_s + 10 \lg h + 10 \lg \dot{E}_{AA} - 10 \lg D_o - 40 \lg \lambda - 110, \quad (4.42)$$

В випадку застосування МРЛ при метеозабезпеченні в авіації його потенціал $10 \lg \check{I}_i$, розрахований за формулою (4.8), повинен становити не менше 47 дБ .

4.10.1 Розрахунок потенціалу

Керування з експлуатації у виконанні спостережень з МРЛ. Рекомендація для величини метеорологічного потенціалу, який має бути на діапазонах довжин хвиль від $0,03$ до $0,11 \text{ м}$ не менше $270 \text{ дБ} / i^4$ заснована на іншому виразі для розрахунку метеорологічного потенціалу.

Оцінка співвідношення вимог НГЕА метеородарів виконується шляхом обчислення метеорологічного потенціалу за формулою:

$$\check{I}_i = 10 \lg \left[\frac{\pi^3 c P_e G^2 \theta_0 \varphi_0 \tau K_{AA}}{\lambda^2 D_{i \delta \min} * 4^5 \ln 2} \right], \quad (4.43)$$

де $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, швидкість розповсюдження електромагнітних коливань в атмосфері;

G - коефіцієнт посилення антени;

θ_0, φ_0 - ширина діаграми направленості за азимутом та кутом місця на рівні 0.5 потужності (рад);

τ - тривалість зондуючого імпульсу (с);

$P_{i \delta \min}$ - мінімальне виявлена потужності відбиваючого сигналу (Вт).

Розрахунок \dot{I}_i в децибелах ($10\lg \dot{I}_i$) виконується за формулою:

$$10\lg \dot{I}_i = 10\lg P_s + 20\lg G + 10\lg \theta_0 + 10\lg \varphi_0 + 10\lg \tau + 10\lg K_{AB} - 10\lg P_{i\delta_{\min}} - 20\lg \lambda + 71,2, \quad (4.44)$$

де P_s - потужність зондуючого імпульсу МРЛ (B_T).

Розрахунок \dot{I}_i ($\partial \dot{A}$) виконується за формулою (4.10) в одиницях СІ .

В табл. 4.9 і табл. 4.10 наводяться приклади розрахунку \dot{I}_i ($\partial \dot{A}$) для обох каналів за формулами (4.43) і (4.44) складає:

- для 3-сантиметрового каналу $280,7 - 59,9 = 220,8$ ($\partial \dot{A}$);
- для 10-сантиметрового каналу $272,5 - 79,5 = 193$ ($\partial \dot{A}$).

Таким чином, потенціал Пм обох каналів МРЛ-5, неузгодженість числа за (4.44) перевищують $270 \partial \dot{A} / i$, так вони можуть використовуватися для метеозабезпечення авіації.

Результати розрахунків Пм можна перевірити за табл. 4.9

Таблиця 4.9 - Розрахунок потенціалу МРЛ-5 для I каналу

Параметр(х)	Позначки	Значення х	10lg x, дБ		
			Посібник з МРЛ	НГЕА СССР (од. СІ)	Посібник з МОЛ
Імпульсна потужність	P_s	250кВт	250000Вт	+24	+54
Чутливість приймача	$P_{i\delta_{\min}}$	$-134 \partial \dot{A} / \dot{A} T$	$-134 \partial \dot{A} / \dot{A} T$	-(-134)	-(-134)
Площа апертури	Ar	16м ²	-	+12	-
Тривалість зондуючого імпульсу	τ	-	$2 \cdot 10^{-6}c$	-	-57
Довжина зондуючого імпульсу	h	600м	-	-27,8	-
Довжина хвилі	λ	3,14см	$3,14 \cdot 10m^{-2}$	-19,9	+30,1
Коефіцієнт посилення антени	G	-	$49 \partial \dot{A}$	-	98
Ширина променя за азимутом	θ_0	-	0,0087 рад	-	-20,8
Ширина променя за кутом місця	φ_0	-	0,0087 рад	-	-20,8
Коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту	K_{AB}	0,16	0,16	-8	-8
Константи формул(4.43) і (4.44)	-	-	-	-110	+71,2
Потенціал $10\lg \dot{I}_i, \partial \dot{A}$	-	-	-	59,9	280,7

Результати розрахунків P_m можна перевірити, провести розрахунки за формулами (4.43) і (4.44), результати яких наведені в табл. 4.10. Необхідно лише виміряти P_i і P_ϕ для тієї МРЛ, яка перевіряється.

Таблиця 4.10 - Розрахунок потенціалу МРЛ для II каналу

Параметр(х)	Позначки	Значення х		10lg x, дБ	
		Посібник з МРЛ	НГЕА СССР (од. СІ)	Посібник з МОЛ	НГЕА СССР (од. СІ)
Імпульсна потужність	D_s	800кВт	800000Вт	+29	+59
Чутливість приймача	$P_\phi P_i \delta_{\min}$	-136 дБ / Вт	-136 дБ / Вт	-(-136)	-(-136)
Площа апертури	A_p	16м ²	-	+12	-
Тривалість зонduючого імпульсу	τ	-	2*10 ⁻⁶ с	-	-57
Довжина зонduючого імпульсу	h	600м	-	+27,8	-
Довжина хвилі	λ	10,15см	1,015*10м ⁻¹	-40,3	+19,9
Коефіцієнт посилення антени	G	-	40 дБ	-	80
Ширина променя за азимутом	θ_0	-	0,0087 рад	-	-20,8
Ширина променя за кутом місця	ϕ_0	-	0,026 рад	-	-15,8
Коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту	K_{AB}	0,32	0,32	-5	-5
Константи формул(4.43) і (4.44)	-	-	-	-110	+71,2
Потенціал 10lg I і , дА	-	-	-	49,5	272,5

4.11 Обробка інформації цифрових приймачів GDRX

4.11.1 Схема руху даних, що опрацьовуються

В АМРК обробка відображених сигналів в основному виконується цифровим приймачем GDRX (Germantronik) і процесором сигналів.

Розглянемо схему руху опрацьованих даних (рис. 4.16).

Цифровий приймач GDRX опрацьовані дані I/Q з розширенням 16/32 біт з можливістю корекції даних за фазою та амплітудою в 2048 бітах дальності з мінімальним розширенням біт на відстані 30 м. Число біт може бути збільшено за рахунок конфігурації, а розширення за дальністю – до 15м.

Механізм обробки GDRX базується на трьох процесорах для

обробки сигналів Tiger Share DSP(240 Mry, 12 в Мбайтах SDRAM-Synchronous dynamic RAM)

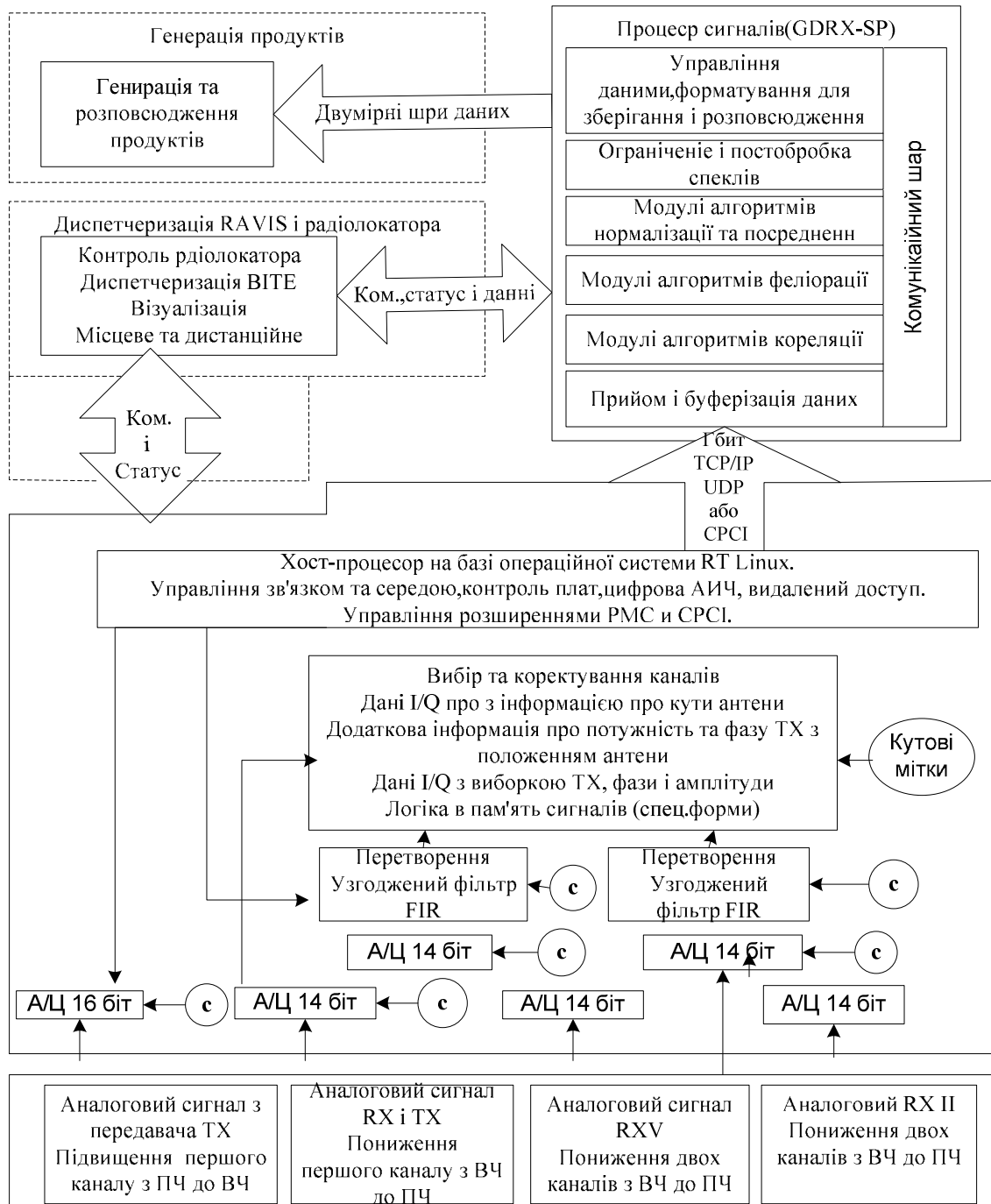


Рисунок 4.16 - Схема руху опрацьованих даних

Тут А/ц 14 біт-14біт АЦП зі швидкістю вибірки 80МГц;

TCP/IP або UDF- стандартні протоколи зв'язку;

FIR- не рекурсивні погоджені фільтри;

PCI- локальна шина;

RAVIS (radarvisnaluzation software) - програма загального управління

радаром;

С-контроль.

В якості системного контролера і механізму виводу даних в GDRX використовується управляючий процесор Pover PC NeYworth Processor MPC 8540.

Він обслуговує інтерфейс SDRAM, контролера Ethernet, два асинхронних інтерфейси, локальну шину та інтерфейс локальної шини PCI.

GDRX має чотири аналогових вхідні канали для підтримки сигналів П4П на частотах 60 МГц. Два канали для прийому сигналів з горизонтальною поляризацією (H), два інших з вертикальною поляризацією (V). Конструкція GDRX з двома каналами вертикальної поляризації використовується для розширення лінійного динамічного діапазону приймача (рис. 4.17).

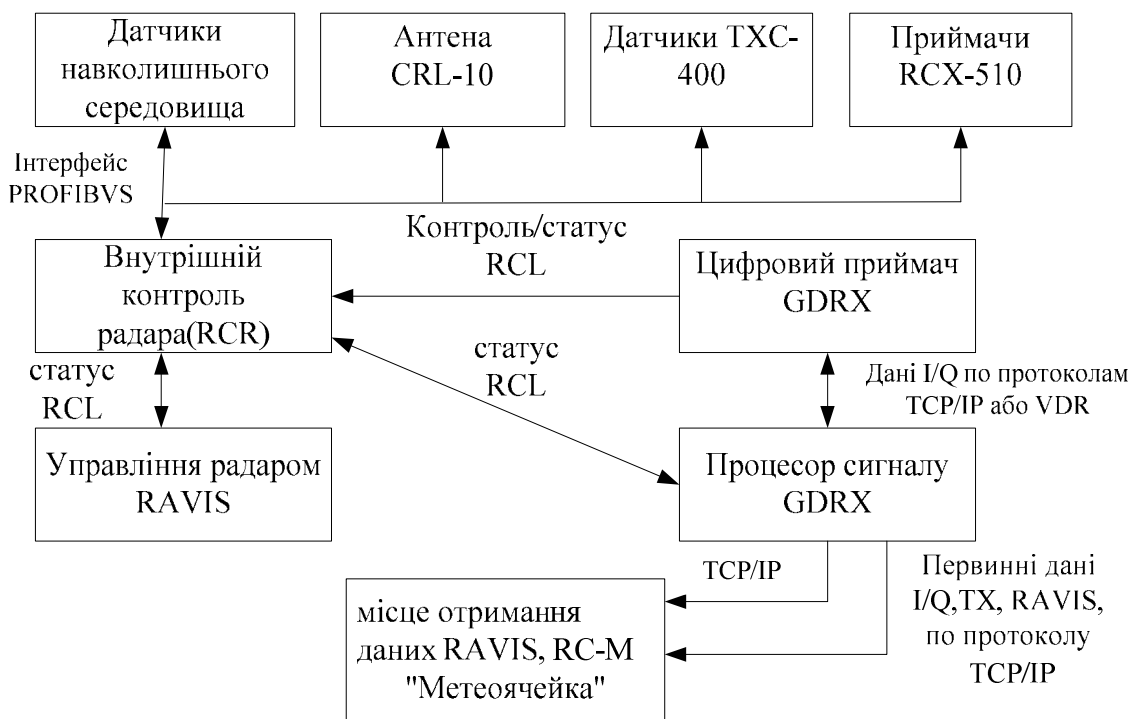


Рисунок 4.17 - Схема розміщення GDRX в структурі АМПК

4.11.2 Режими обробки

В середовищі обробки сигналів SPE (signal processing environment).

На вхід надходять первинні радіолокаційні дані типу I/Q, а на виході виходять дані у вигляді моментів (відображення, швидкість і тд.)

Коло обробки даних процесором (SP) складається з кількох модулів обробки, які взаємопов'язані у відповідність з заданим режимом обробки.

Типове коло обробки включає приймач даних I/Q та декілька

модуль, наприклад фільтрації «местників», обчислення коваріації, порогів обмеження моментів, рис.(4.18).

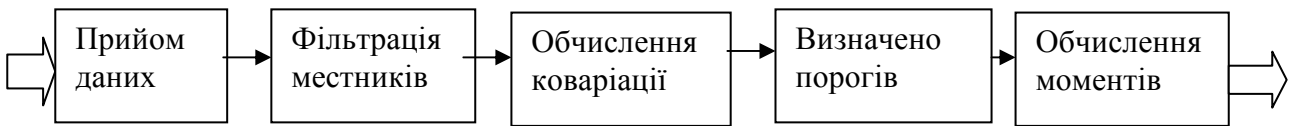


Рисунок 4.18 - Типове коло обробки даних

Обраний режим може включати складне коло обробки даних з відгалуженням та злиттям (рис. 4.19).

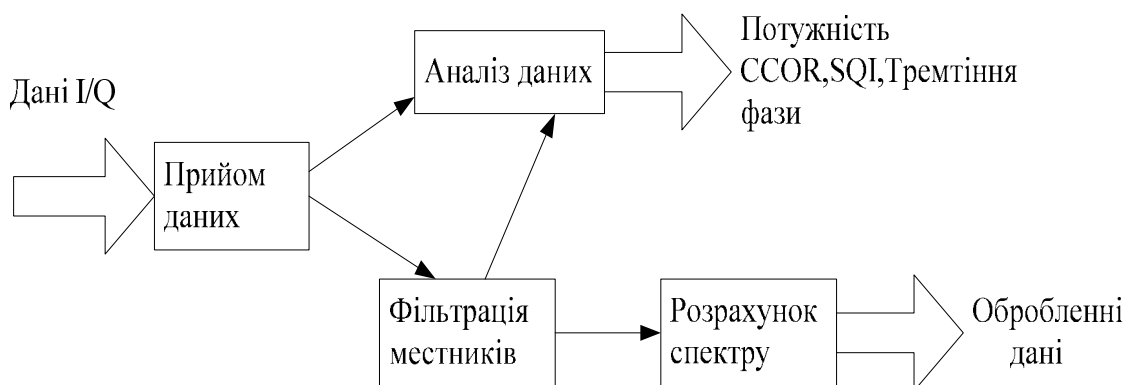


Рисунок 4.19 – Складне коло обробки даних

Обробка даних ініціюється передачею на SP нової команди RSP на обробку. В залежності від ввімкнення режиму SP зупиняє-запускає або перезапускає потрібні модулі обробки [21].

Модулі обробки одержують команди на мові RCL (radar control language).

Обробка може бути частиною функцій завдання оператора на сканування (наприклад, з використанням таблиці сканування RAVIS).

Коло обробки даних процесором сигналу визначається файлами конфігурації в форматі XML:

- файли, представляючи модуль процесора сигналів, описують модуль обробки даних;
- файли, які визначають режим процесора сигналів, визначають коло обробки, яке складається з декількох модулів процесора сигналів.

Програми процесора сигналів написані на мові Java і працюють в середовищі виконання Java 5 (а.к.а.1.5) і вище. Вільна конфігурація режимів обробки базується на суворій модульній структурі.

SP може працювати в двох режимах:

- 1) Real Time Nexus (ядро реального часу);
- 2) Management Nexus (ядро управління).

Перший режим відповідає за обробку сигналів та оптимізований для швидкої та надійної передачі інформації.

В другому режимі знаходиться налаштування SP, мережа сервер для шарів і дані спостережень в реальному часі.

Фрагменти первинних даних I/Q приймаються за обраним оператором протоколу зв'язку (TCP/IP, UDP).

Модуль прийому передає дані на синхронізацію CPI.

Режим синхронізації - це виконання вказівок оператора АМРК зв'язати ряд приймальних імпульсів в рамках заданих оператором кутів з інтервалами когерентної обробки (Coherent processing interval, CPI).

В іншому блоковому режимі задане користувачем число імпульсів зв'язується з CPI ширини кута, що впливає на частоту дослідження імпульсів (ЧСІ), необхідного для обробки числа імпульсів і швидкості обертання антени за обраним режимом сканування.

4.12 Вторинна обробка

4.12.1 Режим "Вимірювання відбиваності"

Базові дані – відбиваності Z , середня радіальна швидкість V_r , ширина спектра σ_v – опрацьовуються на АМРК за допомогою алгоритмів розпізнання метеоявищ і образів для одержання набору метеорологічних продуктів, які одержують споживачі в погоджених з ними форматах, протоколах та об'ємах для відображення на автоматизованих робочих місцях (АРМ) споживачів.

На АМРК "Метеор-Метеоячейка" в режимі вимірювання відображення хмар та опадів в радіусі огляду 256 км вся площа розбивається на квадрати 4*4 км. Для кожного квадрату визначається максимальна висота верхньої межі радіовідлуння й радіолокаційна відображеність в 11 шарах, з середньою товщиною 1000м.

Радіолокаційна характеристика – висота верхньої межі радіовідлуння конвективної (РКО) та шаровидної (PCO) хмарності H (км); радіолокаційна відображуваність Z – площа зайнята радіовідлунням, швидкість та напрямок переміщення радіовідлуння метеоб'єктів – всі вони знаходяться в фізико – статистичній залежності з метеопараметрами хмарної атмосфери. Це дозволяє оцінювати їх радіолокаційними характеристиками.

Спеціальне програмне забезпечення РС–М АМРК "Метеор-Метеоячейка" виконує:

- обробку всіх первинних даних, які надійшли;
- обчислення критеріїв грозо небезпеки;
- виявлення радіовідлуння конвективної хмарності;
- інтерпретацію радіовідлуння метеоутворень;

- класифікацію радіовідлуння за заданими алгоритмами (базове та спеціальне програмне забезпечення);
- формування інформації синоптику-прогнозисту, синоптику на вильотах, для АСУВД, консультації льотного складу і передачі в лінії зв'язку;
- вимірювання опадів;
- визначення радіальних швидкостей.

В режимі "Вимірювання відбиття" одержання інформації забезпечується АС-М шляхом виконання таких функцій:

- проведення огляду та обробки даних спостереження;
- розрахунок напрямку та швидкості переміщення поля радіовідлуння;
- розрахунок тенденції розвитку поля радіовідлуння;
- представлення результатів спостережень АМРК на екрані комп'ютера в вигляді наступних карт: (метеоявища, небезпечні явища погоди, висота (верхня межа) радіовідлуння H , відображення Z в двох шарах).

Конттури небезпечних явищ:

- швидкість шквального посилення вітру V_w ;
- інтенсивність опадів I ;
- кількість опадів Q в будь-який період спостережень;
- видимість при опадах IV ;
- вертикальний перетин за довільним азимутом і заданим повітряним коридором;
- обмерзання за довільним азимутом і заданим повітряним коридором;
- виведення на екран, друк і передача в канал зв'язку телеграм в кодї RADOB-86 і BVFR-94;
- виведення на друк бланк-карти АМРК;
- архівація даних за період не менше 30 днів, який визначається розміром жорсткого диска комп'ютера;
- введення даних метеостанцій штормового кільця (шквальне посилення вітру: град, грози, сильні зливові опади).

Складання даних метеостанцій про НЯ з даними АМРК:

- виведення на друк, таблиця з результатами складання;
- запис і доповнення файла відображень від місцевих предметів;
- установка координат метеостанцій.

4.12.2 Режим "Допплерівська швидкість"

В цьому режимі кінцевим результатом, який надходить споживачеві від АМРК, є просторовий розподіл радіальних швидкостей, швидкостей в радіусі огляду 125 км на квадраті 4*4км.

На основі обробки інформації оброблених сигналів в кожному імпульсному об'ємі (дискретна дальність бін), яка проводиться в GDRX, виходять дані про середню радіальну швидкість метеоцілі та про ширину спектра швидкостей. Подальша їх обробка, поширення за квадратом 4*4км, розрахунок та просторове розподілення доплерівських швидкостей в радіусі огляду виконується спеціальним програмним забезпеченням РС-М. Реальні швидкості розраховуються під одним кутом місця АМРК в періоди між спостереженням в режимі "вимірювання відображеності".

Дискретність вимірювання радіальної швидкості складають 0,5 м/с, дискретність вимірювання ширини спектру 0,62 м/с в діапазоні вимірювань ширини спектра від 0,1 до 15,8 м/с. Аналіз спектральних характеристик дозволяє оцінити дисперсію швидкості метеоцілі.

На основі прямих вимірювань радіальної швидкості можуть бути розраховані явища, що становлять значну небезпеку при зльоті та посадці літаків (смерч, рух вітру). Коли починається вітер тоді і визначається фронт переривання і мікрошквал. При коловому огляді одним кутом місця можна одержати вертикальний розподіл вітру коли хмарно та опади.

Вітер впродовж контуру нульової доплерівської швидкості і перпендикулярний промінь радіолокатора. Оскільки середній вітер змінює напрямок з висотою, ця зміна спостерігається на контурі з нульової лінії доплерівських швидкостей. Контур в першому наближенні має форму S.

4.12.3 Ймовірнісний характер прийняття рішення про небезпечні явища

Алгоритм розпізнавання явищ в АМРК при прийнятті рішень про ступінь небезпеки явища (НЯ) має характер ймовірності.

При інтерпретації явищ, пов'язаних з купчасто-дошовими хмарами, і визначення їх грозової активності враховується добре відомий факт-літак, який потрапив в таку хмару, саме це може стати причиною розряду на нього блискавки. З іншого боку, час різкого переходу такої хмари з не грозового стану в грозовий (3-5 хвилин) порівняний з часом одержання і передачі інформації споживачеві. З цього випливає неминучість класу небезпечних явищ "гроза з двома дужками" (позначена(R)), що відповідає ймовірності правильного розпізнавання грози від 30 до 70%.

Існують такі обмеження через послаблення радіохвиль в опадах. Так, через екрануючу водяну плівку на поверхні антени ДМРЛ небезпечні явища (НЯ) можуть не виявляти або виявлятися за зменшенням ступеня їх небезпеки, спотвореннями висоти і відображення НЯ за екрануючими опадами.

У випадку рідких опадів в місці установки антени АМРК, на деякий проміжок часу АМРК "Метеор - Метеоячейка" перестає виявляти радіо відлуння стає "сліпим".

З цих причин інформацію АМРК слід вважати не абсолютною, а відносною.

Під відносним радіолокаційним методом одержання інформації мається на увазі здатність вказувати ймовірність ступеня небезпеки лише виявленого явища.

Споживач сам повинен встановлювати перелік НЯ погоди (з отриманих АМРК), що впливають на рішення задач, які виконуються ним. Так, в разі використання інформації лише про грози з ймовірністю 80% і далі споживач сам несе відповідальність за прийняття рішення в ситуаціях, коли ймовірність грозового стану менше 80%.

4.13 Калібрування приймально-вимірювальних трактів автоматизованого метеорологічного комплексу "Метеор-Метеоячейка"

4.13.1 Калібрування приймально-передавальної системи

Відмінність від калібрування АМРК та радіолокаторами нового покоління, в яких процес одержання інформації повністю автоматизований, та калібруються за допомогою вбудованих генераторів з застосуванням ЕОМ, в яких існують програми з сценаріями калібрування.

Калібрування можна розділити на калібрування, які виконувалися після ремонтних робіт і налаштування (після заміни комплектуючих), коли використовується стандартний набір генераторів і загальноприйнятні схеми їх підключення, а також калібрування щоденне, які виконуються за допомогою вбудованих генераторів, приладів і програм для ЕОМ. Останні можуть використовуватися при одержанні і обробці первинних даних (процесор радіолокаційних сигналів в режимі контролю).

У технічній і експлуатаційній документації АМРК "Метеор-Метеоячейка" наведені методики вимірювань за допомогою стандартних вимірювальних приладів (ватметра, каліброваних генераторів, цифрових осцилографів, набору атенюаторів) і наступних параметрів АМРК:

- пікової потужності передавача;
- тривалості зондувального імпульсу;
- інтервалу проходження НВЧ імпульсів;
- надвисокої частоти передавача на магнетроні;
- чутливості приймача;
- коефіцієнта шуму цифрового приймача;
- динамічного діапазону приймача.

Розглянемо щоденне калібрування за допомогою вбудованої виміральної апаратури АМРК.

Калібрування приймача полягає у вимірюванні різниці між синфазними (I) і квадратурними (Q) (тобто зсувом за фазою на 90^0) сигналами в різних комбінаціях чотирьох каналів, що використовують тестовий сигнал. Кожен день калібрування приймача відбувається за сценарієм, який у вигляді набору програм перебуває в процесорі радіолокатора.

Для запуску калібрування оператор повинен увімкнути режим обслуговування і запустити калібрування приймача. За цією командою активізується внутрішній генератор сигналів, який випробовується. Він генерує відому потужність у лінійну ділянку вхідних каналів. Вимірюється потужність сигналів, що виходять з каналів високої і низької чутливості. Вони дозволяють обчислювати відмінності каналів за фазою і амплітудою. Після цього система перезапуститься і входить в нормальний стан.

Калібрування потужності передавача.

Мета калібрування передавача — налаштувати приймач радіолокатора на номінальну потужність передавача, виміряну на всіх імпульсах. Процесор сигналів RSP буде коректувати дані на коливання потужності передавача, які використовуються в якості еталону номінальної потужності.

Перш ніж виконувати калібрування, передавач повинен попрацювати не менше 30 хв. За цей час передавач досягне своєї робочої температури, а його вихідна потужність стабілізується.

До початку калібрування потужності передавача необхідно виміряти номінальну потужність передавача для кожної тривалості імпульсу. В сценарії калібрування передавача використовується ЧСІ, яке дорівнює 500 Гц на всіх тривалих імпульсах.

1. Передавач ЛМРК слід встановити на ЧСІ, яка дорівнює 500 Гц, за допомогою ватметра потрібно виміряти номінальну потужність передавача на кожній тривалості імпульсу.

2. Знаючи фактичну потужність передавача (кВт) на кожній тривалості імпульсу, треба натиснути кнопку запуску калібрування. Під час калібрування RSP перейде в особливий імпульсний режим роботи передавача. В цьому режимі RSP буде зчитувати фактичну амплітуду на вході досліджуваного каналу передавача в довільних лінійних одиницях. Вона стане еталоном для подальшої вибірки каналів передавача та корекції потужності.

3. Вимірювання значення потужності передавача вводяться вручну (кВт).

4. Після введення вимірюваного значення обчислюється співвідношення між лінійними одиницями потужності передавача, використовуваними RSP, і вхідними параметрами (кВт).

5. Одержані калібровані коефіцієнти (відношення вимірюваної потужності до лінійних одиниць) будуть використовуватися для передачі всіх подальших результатів вибірки амплітуди передавача у фактичну вимірювальну потужність передавача (кВт).

4.13.2 Калібрування процесора сигналів

Панель калібрування процесора сигналів, або RSP Calibration, дозволяє зробити точкове калібрування й калібрування нуля. Обидва види калібрування реалізуються через запуск заданого сценарію, що перебуває в процесорі радіолокатора. Перед калібруванням передавач повинен попрацювати не менше 30 хв.

Мета точкового калібрування полягає у визначенні співвідношення між потужністю (дБ/мВт) на вході мало шумового підсилювача (LNA) і потужністю (дБ/мВт), що приходить на процесор сигналів. Ця інформація потрібна процесору сигналів для обчислення значень відображеності за вимірний сигнал потужності.

Точкове калібрування складається з двох головних вимірювань:

- вимірювання потужності після введення іспитового сигналу;
- вимірювання потужності шуму (для корекції першого вимірювання і покращення калібрування).

Оскільки відомо, що амплітудна характеристика приймача являє собою пряму лінію у всьому динамічному діапазоні, можна обчислити відхилення цієї прямої від результату вимірювання. Цієї інформації досить для вимірювання необхідного співвідношення.

АМРК «Метеор-Метеоячейка» обладнаний вбудованим генератором випробуваних сигналів (ITSG), ITSG вводить фіксований сигнал для калібрування, рівень потужності сигналу задається при виробництві радіолокатора.

Зазначені вище вимірювання проводяться для всіх можливих тривалих імпульсів, на яких працює радіолокатор.

Робота генератора ITSG визначається сценарієм. Потужність сигналу, що вводиться, зберігається для відповідної тривалості імпульсу. На наступному етапі введення сигналу припиняється для визначення значень потужності шуму системи. Наприкінці процедури система повертається в звичайний стан.

В результаті точкового калібрування для всіх тривалість імпульсів АМРК виходять такі параметри калібрування SP:

- 1) потужність каліброваного сигналу (дБ/мВт), що вводиться внутрішнім генератором випробуваних сигналів;
- 2) лінійна потужність шуму в довільних лінійних одиницях, коли випробуваний сигнал не подається;

3) потужність сигналу в довільних лінійних одиницях при подачі випробуваного сигналу;

4) відносини введеної потужності до виявлення з виправленням на результати вимірювання шуму.

Шум-фактор (коефіцієнт шуму) - числова характеристика радіоелектронних приладів і обладнань, що визначає погіршення їх чутливості за рахунок шуму, внесених ними самими в корисний сигнал у процесі його обробки:

$$F = (P_c / P_{\sigma})_{\text{вх}} / (P_c / P_{\sigma})_{\text{вих}}$$

де $(P_c)_{\text{вх}}$ і $(P_{\sigma})_{\text{вх}}$, $(P_c)_{\text{вих}}$ і $(P_{\sigma})_{\text{вих}}$ - потужності корисного сигналу і шуму на вході і виході лінійної частини обладнання в межах смуги його пропускання Δf .

При цьому передбачається, що на вході обладнання ввімкнений шумовий погоджений опір (еквівалент антени), що перебуває при стандартній температурі 290 К. Оскільки власні шуми обладнання зменшують відношення сигнал/шум, тоді $F > 1$.

Часто використовуються іншою формою запису шум-фактора:

$$F = (P_c)_{\text{вх}} / (kT \Delta f)$$

де $(P_c)_{\text{вх}}$ - потужність вхідного (еталонного) сигналу, при якій на виході відношення сигнал/шум дорівнює 1;

$kT \Delta f$ - потужність теплових шумів погодженого вхідного опору в смузі пропускання.

Шумова температура джерела шуму T_{σ} оцінюється такою температурою погодженого опору, при якій спектральна щільність потужності теплового шуму цього опору буде дорівнювати спектральній щільності потужності шумів даного джерела.

Шумовою температурою або шумовим числом називається відношення T_{σ} до «кімнатної» температури $T_0 = 290\text{К}$, тобто

$$T_{\sigma} = (F-1)T_0,$$

$$F = 1 + \frac{T_{\sigma}}{T_0}.$$

Спектральна щільність потужності погодженого опору визначається формулою Найквіста:

$$S = kT,$$

де k – стала Больцмана;

T - абсолютна температура опору.

При оцінці реальної чутливості радіоприймача при величині шум-фактора необхідно враховувати, що спектр корисного сигналу може не збігатися зі спектром вхідних і власних шумів, а ефективна температура антени відрізняється від T_o .

Калібрування нуля (Zero Cheek) ініціює вибірку шуму приймача, яка застосовується для визначення лінійної потужності шуму, що віднімається з одержуваних даних перед обробкою відбиваності.

Як у всякій прийомній системі, для виявлення та індикації корисний сигнал повинен бути більше надлишкового теплового шуму, створюваного приймачем. Зменшення цього шуму приводить до зменшення мінімального сигналу, що виявляється (minimum detectable signal, MDS).

Коефіцієнт шуму приймача F (дБ) визначається за формулою:

$$F = ENR - 10\lg(Y - 1) = 10\lg(kT_o B_w) - 10\lg(Y - 1), \quad (4.45)$$

де Y - відношення між двома рівнями потужності шуму, один з яких вимірюється при увімкненому джерелі шуму (N_{on}), а інший при вимкненому (N_{off}):

$$Y = \frac{N_{on}}{N_{off}},$$

де (N_{on}) і (N_{off}) у термінах лінійної потужності.

Мета вимірювання мінімального сигналу, що виявляється, МС8 перевірка чутливості приймача. За чутливість приймача приймається вхідна потужність мінімального сигналу, що виходить на виході приймача при відношенні сигналу до шуму, рівному одиниці ($P_{out} / N_{out} = 1$, або 0 дБ). Вона обчислюється за формулою:

$$P_{min} = kT_o B_w + F + B_w + L, \quad (4.46)$$

де $kT_o B_w$ 174 дБ/мВт - потужність шуму (дБ/мВт) при ширині смуги 1 Гц, яка обумовлена потужністю шуму на вході приймача;

F - коефіцієнт шуму приймача (дБ);

B_w - смуга пропускання приймача (дБ);

L - втрата (дБ).

Проведемо розрахунки P_{\min} при таких параметрах $T_O=300\text{K}$ - шумова температура приймальної системи, $kT_O=4\cdot 10^{-21}$ Вт·с :

$$B_w = 10 \lg \frac{1,2}{\tau_{\text{ціä}}},$$

$$F = 2 \text{ дБ},$$

$$L = 0 \text{ дБ}.$$

В режимі вимірювання відбиваності Z при $\tau_{\text{ціä}} = 2 \cdot 10^{-6}$ нс отримуємо

$$P_{\min} = -174 + 2 + 57,5 = -114,5 \text{ дБ/Вт}, \quad \text{або} \quad -144,5 \text{ дБ/Вт}. \quad (4.47)$$

В режимі доплерівська швидкість при $\tau_{\text{ціä}} = 0,83 \cdot 10^{-6}$ нс знаходимо

$$P_{\min} = -174 + 2 + 61,5 = -110,5 \text{ дБ/Вт}, \quad \text{або} \quad -140,5 \text{ дБ/Вт}. \quad (4.48)$$

При $L=0,2$ дБ маємо $P_{\min} = -142,0$ дБ/Вт і $P_{\min} = -138,0$ дБ/Вт.

4.13.3 Розрахунок радіолокаційної постійної

АМРК «Метеор-Метеоячейка» процедура вимірювання еквівалентної відбиваності Z_e відрізняється від відповідної процедури в МРЛ-5. Радіолокаційна постійна розраховується автоматично для кожної тривалості імпульсу та не сходиться за величиною з потенціалом Π_m . Рівняння радіолокації атмосферних утворень з урахуванням потенціалу Π_m можна записати в такий спосіб:

$$\frac{D_{i\delta}}{D_\emptyset} = \dot{I}_i \frac{Z_e}{r^2} [\chi K_{\text{вн}} \sigma], \quad (4.49)$$

де $K_{\text{РПУ}}$ - втрата на радіопрозорому укритті за рахунок послаблення електромагнітного випромінювання (Radome Loss);

r - віддалення метеорологічного утворення від МРЛ;

$D_{i\delta}/D_\emptyset$ - відношення величини прийнятого радіолокаційного сигналу від метеоутворення до рівня шуму (D_\emptyset);

χ – двостороннє послаблення радіохвиль опадів: $\chi = 2 \int_0^R \alpha_{i i \tilde{n} \tilde{e}}(r) dr$.

В АМРК «Метеор -Метеоячейка» $\chi = C_{\text{ади}}(r)$.

В такому вигляді рівняння радіолокації для атмосферних утворень враховує спосіб вимірювання відбитого сигналу, і особливі умови спостережень (у квадратних дужках).

Необхідно одержати формулу для розрахунку Z_e , яка зв'язувала б загальноприйнятні вирази з урахуванням особливостей розрахунків параметрів в АМРК «Метеор- Метеоячейка» (табл. 4.11).

Якщо рівняння виразити в децибелах, тоді еквівалентна відбиваність Z_e (дБ) буде описуватися формулою

$$Z_a = 10 \lg \left(\frac{D_{i \delta}}{D_{\emptyset}} \right) = 10 \lg \tilde{I}_i + 20 \lg r - 10 \lg K_{\text{Ді О}} - 10 \lg \chi. \quad (4.50)$$

Втрата на приймання і передачу в антенно-хвильоводному тракті $\hat{E}_{\text{АА}}$ розраховується за формулою

$$\hat{E}_{\text{АА}} = \hat{O}_{\chi} \text{Loss} + R_{\chi} \text{Loss} + \text{Matched Filter Loss}, \quad (4.51)$$

$$10 \lg K_{\text{Ді О}} = 2 \text{Radome Loss}.$$

Таблиця 4.11 - Значення параметрів для розрахунків втрат

Параметр	Позначення	Значення
T, Loss	Втрати на передачі *	-1,2
R, Loss	Втрати на прийомі **	-1,5
Radome Loss	Втрати на РПУ	-0,2
Matched Filter Loss	Втрати на погоджуючому фільтрі	0
$R_{\chi} P_{OW}$	Заданий розробником рівня вихідного сигналу при калібруванні	?

* Втрати передавача між двонаправленими відгалужувачами і рупорним випромінювачем антени.

** Втрати приймача між рупорним випромінювачем антени і малошумовим ВЧ трактом приймача. В процесі калібрування ($R_{\chi} P_{OW}$) задається підприємством-виробником при установці АМРК «Метеор- Метеоячейка» на об'єкті.

Якщо $Z_e(\text{аА}) = UZ(\text{аА})$, з урахуванням рівняння (4,50) знаходимо:

$$C_r(r^2) = 20 \lg r,$$

$$10 \lg(T_0 - N) = 10 \lg \frac{D_{i\delta}}{D_0},$$

$$\tilde{N}_{\text{ади}}(r) = -10 \lg \chi = +0.013(\text{аА/еи}) \cdot r(\text{еи}),$$

$$\tilde{N}_{\text{radar}} = 10 \lg \tilde{I}_i + 10 \lg \hat{E}_{\text{Ді О}} + R_\chi R_{OW}. \quad (4.52)$$

Радіолокаційна постійна C_{radar} або Rad const (дБZ), визначається при установці АМРК «Метеор-Метеоячейка», коли представники підприємства-виробника виставляють рівень вхідного сигналу при калібруванні ($R_\chi R_{OW}$).

Наведемо приклад розрахунків еквівалентної відбиваності Z_e .

Метеоціль, яка знаходиться від АМРК на $r = 100$ км і дає максимальний відбитий сигнал:

$$10 \lg \left(\frac{D_{i\delta}}{D_0} \right) = 40 \text{аА},$$

$$10 \lg \tilde{I}_i = 64,7 \text{аА},$$

$$-10 \lg \hat{E}_{\text{Ді О}} = +0,4,$$

$$-10 \lg \chi = +0,013 \cdot 100 = 1,3 \text{дБ},$$

$$Z_{\text{а}}(\text{аАZ}) = 40 - 64,7 + 40 + 0,4 + 1,3 = 17.$$

Калібрування АМРК «Метеор-Мстеоячейка» за сонцем.

Існуючі стандартні методи калібрування АМРК мають обмеження за точністю. Якщо вимірювати всі відрізки шляху сигналу від передавача до антени та від антени до приймача-процесора, а потім, як належить, скласти результати вимірювань, тоді потрібно буде складати також помилки окремих вимірювань. Крім того, такий процес практично неможливо автоматизувати для його застосування в оперативній роботі.

З цих причин уже давно утворюються способи калібрування, шляхи сигналу в цілому: за сонцем і за опадами.

Сонце використовують при калібруванні антени радіолокатора, кутів наведення антени, визначення ширини діаграми направленості антени на точках половинної потужності, посилення антени.

В спеціальному програмному забезпеченні АМРК «Метеор-Метеоячейка» є програма San Track, яка дозволяє проаналізувати відхилення положення антени стосовно положення сонця та обчислення посилення антени.

Положення сонця розраховується з урахуванням координат калібруючого радіолокатора та часу проведення калібрування. Після підключення програмного забезпечення RAVIS до радіолокатора параметри місця розташування змінюються на значення калібруємої системи і розраховуються траєкторія і положення сонця. Під час цього вимірювання передавач відключається. Фактична потужність сигналу сонця вимірюється безупинно після запуску процедури, і антена одержує команду повернутися прямо на сонце. За допомогою цієї процедури визначають фактичну розорієнтацію антени та задають у систему АСУ необхідні зміщення.

Якщо відоме значення потоку сонячної енергії на частоті 2800 МГц, можна розрахувати і посилення антени.

Коротка методика калібрування складається:

- кожні 5 хв запускається процедура автоматичного відстеження сонця;
- перевіряється потужність сигналу і фактичне положення антени;
- положення антени з максимальним значенням обирається для обчислення нових значень зсуву антени.

Якщо антена точно направлена на сонце, вимірювальна потужність сигналу стає максимальною. Будь-яке зменшення вимірюваної потужності показує, що антена на сонце не направлена.

Після декількох вимірювань оператор може визначити нові змішання. За вхідними значеннями і за фактичними значенням зсуви у блоці управління антени (АСУ) розраховуються нові зсуви, які передаються і зберігаються в АСУ. Якщо, наприклад, фактичне змішання азимуту в АСУ визначене як $0,5^\circ$ і значення потужності сигналу сонця додають змішання - 0.2, тоді новий зсув 0.3° зберігається в АСУ, це ж справедливо і для кута місця.

Визначення посилення антени (окрема функція). Опис процедури обчислення посилення антени представлено в роботі Кевіна (Kevin M. Calibration of the Dopler on wheels system using sokar flux.-MoGraft, 2002)

Для розрахунку необхідні такі параметри:

- смуга пропускання шуму приймача BWn (Гц);
- довжина хвилі радіолокатора λ (м);
- сонячний потік S (на 10 см або 2800 МГц) за даними найблищих обсерваторій одиниця сонячного потоку ($10^{-22} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$).

- прийнята потужність сигналу сонця і чистого неба D_s (дБ/мВт);
- прийнята потужність сигналу чистого неба P_b (дБ/мВт).

Насамперед, розраховується значення потужності сигналу сонця P_r (дБ/мВт), яке переводиться в значення P_w (мВт):

$$P_r = 10 \lg(10^{P_s/10} - 10^{P_b/10}), \quad (4.53)$$

$$P_w = 10^{P_r/10} \cdot 10^{-3}.$$

Далі розраховується корекція на діаграму направленості. Оскільки радіосонце (від $0,56$ до $0,58$)^o займає значну частку діаграми направленості антени в точці 3 дБ (наприклад, 1°), радіолокаційне вимірювання потужності сигналу є зваженим середнім, а не піковим значенням, наданим обсерваторією. У зв'язку з цим потрібно обчислити поправковий коефіцієнт на діаграму направленості.

Важливо враховувати частоту, на якій працює МРЛ, тому що щільність сонячного потоку змінюється з частотою. Для оцінки сонячного потоку S_f на всіх частотах, крім 2800 МГц, використовується формула екстраполяції, запропонована Теппінгом. Всі спостереження – це вимірювання сонячного потоку на всіх поляризаціях для зіставлення з радіолокаційним вимірюванням на одній поляризації, повинні бути зменшені у два рази:

$$S_f = (0,0002S_{obs} - 0,01)(f - 2800) + S_{obs},$$

$$S_{fs} = \frac{S_f}{2}, \quad (4.54)$$

де S_{obs} - виміряна щільність сонячного потоку.

Тепер можна вирахувати ефективне посилення антени (g_e) і просте посилення антени (G_e):

$$g_e = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{P_w k_l}{S_{fs} BW_n} \right),$$

$$G_e = 10 \lg(g_e).$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеор – Метеоячейка». Руководство по эксплуатации 73-1887РЭ. – Selex Sistemi Integrati, GmbH, 2006. – 200 с.
2. Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс «Метеор – Метеоячейка». Инструкция по монтажу, настройке, регулированию и прогону 73-1887ИМ. – Selex Sistemi Integrati, GmbH, 2006. – 320 с.
3. Автоматизированная информационная система (АИС) «МетеоСервер». Руководство по эксплуатации ИТАВ. 416311.007РЭ. – ЗАО ИРАМ, 2005. – 240 с.
4. Голд Б., Рэдер Ч. Цифровая обработка сигналов. – Советское радио, 1973. – 368 с.
5. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
6. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.
7. Международный код FM 94 BUFR. – FM 94 BUFR Collected papers and specification/European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Feb. 1998. – Рекомендация 3 КОС- XII, 2001. – 60 с.
8. Метеорологическое обеспечение международной авиации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Часть 1. Основные SARPS. Часть II. Добавления и дополнения. Изд. 15-е. – ИКАО. 2004. – 80 с.
9. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Коллективная монография ИРАМ. – СПб: Гидрометеиздат, 2002. – 332 с.
10. Метеорологическое оборудование аэродромов и его эксплуатация / Коллективная монография ИРАМ. – СПб: Гидрометеиздат, 2003. – 592 с.
11. МУ. Контроль и нормализация электромагнитной обстановки, создаваемой метеорологическими радиолокаторами / Госкомгидромет СССР и Минздрав СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 63 с.
12. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). – Изд. Росгидромета и Минтранса РФ, 1995. – 96 с.
13. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации / Коллективная монография ГГО. Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 375 с.
14. РД 52.05.320.-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 358 с.

15. Рыжков А. В. Характеристики метеорологических РЛС. - Зарубежная радиоэлектроника, 1993, №4, с. 29-34.
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. – 1104 с.
17. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. Изд. 4-е. – СПб: Питер, 2005. – 699 с.
18. Таненбаум Э. Современные операционные системы. Изд. 4-е. – СПб: Питер, 2005. – 1038 с.
19. European organization for the Safety of Air navigation. Eurocontrol standard Document for Radar Data Exchange, Part 3. Transmission of Monoradar Derived Weather Information (SUR. ET1. STO5. 2000-STD-03-01).
20. Radar Data Quality – Ensuring Procedures at European Weather Radar Stations/ M. Divjak et al. OPERA/WD/9/1999. Final document, 1999, p. 12.
21. Yanting Wang, Chandrasckar V. Adaptive clutter identification and filtering using subspace processing technique. – (Proc. ERAD 2006). – Barcelona, 18 – 22 Sept., 2006, p. 72-75.

Навчальне електронне видання

**Олександр Сергійович Лімонов
Тетяна Михайлівна Пустовіт
Катерина Олександрівна Дяченко**

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Конспект лекцій

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

E-mail: info@odeku.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016