

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ІОНОСФЕРИ  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«Харківський політехнічний інститут»

В. О. Пуляєв, Л.Я. Ємельянов, Д.В. Котов,  
І.Ф. Домнін, О. В. Богомаз, В.В. Колодяжний

# МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ ЗЕМЛІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДАРІВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ

Монографія



Харків 2025

УДК 621.396:654.147  
П88

Рецензенти:

*А.Н. Колосков*, д-р. фіз.-мат. наук, проф.,  
Радіоастрономічний інститут, м. Харків

*Р.В. Зайцев*, д-р. фіз.-мат. наук, проф.,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

*О.Ф. Єнікєєв*, д-р. техн. наук, доц.,  
Маріупольський державний університет, м. Київ

Рекомендовано до друку Вченою радою НДІ Іоносфери НТУ «ХПІ»  
(протокол №3 від 29.08.2025 р.)

**Пуляєв В.О.**

П88

Методи використання сигналів зондування іоносфери Землі та визначення її параметрів за допомогою радарів некогерентного розсіяння / В. О. Пуляєв, Л. Я. Ємельянов, Д. В. Котов, І.Ф. Домнін, О.В. Богомаз, В. В. Колодяжний. – Харків. Видавець: О.А. Мірошніченко, 2025. – 196 с.

ISBN 978-617-8130-94-7.

У монографії розглянуто особливості випромінювання сигналів складної структури, призначених для іоносферного зондування у методі некогерентного розсіяння радіохвиль, а також наведено приклади використання відповідної радіолокаційної апаратури для одержання автокореляційних функцій зворотного сигналу. Запропоновано уточнені методики та алгоритми обчислювальних перетворень, що призначені для розрахунку по цим функціям параметрів іоносферної плазми.

Розраховано для науково-технічних працівників і інженерів у галузі радіофізичних методів дослідження середовищ, фахівців з радіотехніки і радіолокації, а також для викладачів, аспірантів і студентів старших курсів.

**УДК 621.396:654.147**

© Пуляєв, В.О., Ємельянов Л.Я.,  
Котов Д.В., Домнін І.Ф.,  
Богомаз О.В., Колодяжний В.В.  
2025

ISBN 978-617-8130-94-7

© НТУ "ХПІ", 2025

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>7</b>
<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	<b>9</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>17</b>
<b>Розділ 1. СТИСЛІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОД НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ .....</b>	<b>20</b>
<b>Розділ 2. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ ЗОНДУВАННЯ ТА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ У МЕТОДІ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ .....</b>	<b>30</b>
2.1. Режим випромінювання прямокутних радіоімпульсів великої тривалості .....	34
2.2. Режим випромінювання складеного двохелементного імпульсу .....	39
2.3. Режим почергового випромінювання послідовностей двохелементних імпульсів .....	43
2.4. Режим почергового випромінювання послідовностей складених двохелементних імпульсів .....	47
2.5. Режим випромінювання складеного трьохелементного імпульсу .....	52
2.6. Режим випромінювання складеного трьохелементного імпульсу зі зміною напрямку обертання площини поляризації...	54
2.7. Режим випромінювання багаточастотного імпульсу зондування .....	57
2.8. Режим випромінювання кодованих імпульсів зондування ..	58
2.8.1. Режим багатоелементного імпульсного зондування нижніх іоносферних діапазонів .....	60

2.8.2. Режим багатоелементного імпульсного зондування верхніх іоносферних діапазонів .....	61
2.8.3. Апаратурна реалізація .....	62
2.9. Універсальний режим випромінювання кодованих імпульсів зондування для одночасного дослідження верхніх і нижніх висотних діапазонів .....	65
2.9.1. Алгоритмічна реалізація .....	66
2.9.2. Апаратурна реалізація .....	70
2.9.3. Мережеві технології ідентифікації сигналів при використанні кодованих імпульсів .....	73
2.10. Особливості використання антенних перемикачів у радіолокаційній системі .....	77
2.10.1. Механічні антенні перемикачі .....	78
2.10.2. Електромеханічні антенні перемикачі .....	79
2.10.3. Електронні перемикачі з використанням газорозрядних елементів .....	80
2.10.4. Схеми включень газорозрядних перемикачів у радіолокаційній системі .....	81
2.11. Розробка універсальної програмованої радіосистеми для формування та обробки складних кодованих сигналів .....	84
<b>Розділ 3. СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДАРІВ НР СКЛАДОВИХ ШВИДКОСТІ РУХУ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ .....</b>	<b>90</b>
3.1. Визначення радіальної складової швидкості руху іоносферних плазмових утворень .....	90
3.2. Спосіб визначення радіальної (вздовж променю) складової швидкості руху космічних об'єктів .....	92
3.3. Спосіб визначення горизонтальної складової швидкості руху космічних об'єктів .....	99

<b>Розділ 4. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ У МЕТОДІ НР .....</b>	<b>108</b>
4.1. Аналіз особливостей характеру поведінки радіохвиль, їх приймання і обробки .....	108
4.2. Режим випромінювання та приймання сигналу з лінійною поляризацією .....	110
4.3. Режим випромінювання та приймання сигналу з круговим обертанням площини поляризації .....	115
4.4. Розрахунок повного вмісту електронної концентрації з використанням сигналів супутникових системи GPS і ГЛОНАСС..	119
4.5. Особливості визначення $N_e(h)$ при використанні константи радара НР .....	125
4.6. Удосконалений режим приймання та обробки лінійно поляризованих сигналів .....	126
4.6.1. Моделювання режиму приймання поляризованого сигналу при відсутності обертання сигналу в плазмі .....	126
4.6.2. Моделювання режиму приймання лінійно поляризованого сигналу при наявності обертання сигналу в плазмі .	129
 <b>Розділ 5. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА КОРЕКЦІЇ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ СИГНАЛУ НР .....</b>	 <b>135</b>
5.1. Загальний алгоритм отримання сигналу некогерентного розсіяння, розрахунок його АКФ та наступного визначення параметрів іоносфери .....	135
5.2. Попередня обробка та перетворення сигналу НР .....	138
5.3. Уточнення кореляційних функцій сигналу НР з урахуванням апаратурних особливостей іоносферного зондування .....	140
5.3.1. Уточнення кореляційних функцій з урахуванням характеристик смугових фільтрів приймального каналу .....	140

5.3.2. Уточнення кореляційних функцій сигналу розсіяння з урахуванням довжини імпульсу зондування .....	145
5.3.3. Уточнення кореляційних функцій сигналу розсіяння з урахуванням особливостей антенних перемикачів радара НР .....	150
5.3.4. Врахування особливостей аналого-цифрового перетво- рення сигналу НР .....	154
5.3.5. Додатковий статистичний аналіз форми кореляційних функцій сигналу НР .....	157
<b>Розділ 6. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛА-</b> <b>ЗМИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ КОРЕЛЯЦІЇ</b> <b>ФЛУКТУАЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ .....</b>	<b>159</b>
6.1. Однокомпонентна іоносферна плазма .....	160
6.2. Багатокомпонентна іоносферна плазма .....	161
6.3. Реалізація розв'язків зворотної задачі розсіяння у методі не- когерентного розсіяння радіохвиль .....	163
6.3.1. Метод градієнтного спуску .....	164
6.3.2. Спуск по параметрам методом Монте-Карло .....	165
6.3.3. Метод покоординатного спуску .....	167
6.4. Метод уточненого розрахунку кінетичних температур іо- носферної плазми при однокомпонентному іонному складі	168
6.5. Приклади програмної реалізації розв'язків зворотної за- дачі розсіяння .....	174
6.6. Пакет комп'ютерних програм нового покоління для фор- мування бази даних щодо стану іоносфери над Україною..	179
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>182</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>186</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

НДІ Іоносфери – Науково-Дослідний Інститут іоносфери.

НР – некогерентне розсіяння.

АКФ – автокореляційна функція.

ВКФ – взаємна автокореляційна функція.

ОП – оперативна пам'ять.

АП – антенний перемикач.

РБП – розрядник блокування передавача.

ВЧ – висока частота.

НВЧ – надзвичайно висока частота.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

АГХ – акустико-гравітаційні хвилі.

РІЗ – рухомі іоносферні збурення.

ГНСС, GPS – космічні навігаційні системи.

VISRC-2, EPSBase, GPS-приймач, TFA 351095 SINUS – сучасне радіофізичне обладнання.

USRP – універсальна програмована радіосистема (Universal Software Radio Peripheral).

SDR – програмно визначене радіо (Software Defined Radio).

УКХ – ультракороткі хвилі.

МСМВ – метод мінімізації суми модулів відношень.

МНК – метод найменших квадратів.

ФМ – фазоманіпульований сигнал.

КК – коефіцієнти кореляції.

ПК – персональний комп'ютер.

D, E, F1 і F2 – висотні шари іоносферної плазми.

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій.

АЧХ – амплітудо-частотна характеристика.

КП – компаратор.

$O^+$ ,  $He^+$  та  $H^+$  – складові іоносферної плазми (кисень, гелій та водень).

ФН – функція невизначеності.

Windows, Linux і Mac OS X – операційних систем.

TMS320 – сигнальний процесор.

БД – база даних.

БМ – балансний міст.

C++ – мова програмування.

IRI – модель іоносфери.

## ПЕРЕДМОВА

Запропонований у даній монографії матеріал базується на дослідженнях, ознайомлення з якими розпочато у книгах “Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния” авторів Є.В. Рогожкіна, В.О. Пуляєва і В.М. Лисенка [1], “Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния” авторів В.О. Пуляєва, Д.А. Дзюбанова і І.Ф. Домніна [2], “Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі” авторів В.О. Пуляєва, Є.В. Рогожкіна і О.В. Богомаза [3], “Розрахунок статистичних характеристик сигналу некогерентного розсіяння” авторів В.О. Пуляєва, Є.В. Рогожкіна, Л.Я. Ємельянова, О.В. Богомаза, С.В. Кацко і М.О. Шульги [4]. Теперішні викладки доповнені останніми дослідженнями, де пропонуються нові підходи до синтезу і особливостей використання сигналів зондування з наступною реалізацією різноманітних апаратурних режимів роботи радіолокаторів некогерентного розсіяння (НР). Також приведені уточнені алгоритми розрахунку параметрів іоносферної плазми, за допомогою яких оцінюється стан та аналізується поведінка навколоземного космічного простору – геокосмосу.

Таким чином, у представленому виданні з огляду на специфіку іоносферних процесів наводяться особливості подальшої модернізації процесу імпульсного зондування та супутнього цьому зондуванню апаратурного забезпечення, особливості оброблення й інтерпретації сигналу некогерентного розсіяння та практичного підходу до розрахунку його статистичних характеристик (автокореляцій-

них функцій і спектрів), обговорюються шляхи підвищення якості при визначенні за цими характеристиками висотно-часових залежностей іоносферних параметрів.

У теперішній час дослідницький радіолокаційний комплекс НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ” (в подальшому – Інститут іоносфери), відомий як Іоносферний зонд, вже півстоліття активно використовується для моніторингу процесів у атмосфері та іоносфері Землі [5], роблячи значний внесок у розвиток світової науки. З його допомогою є можливість спостерігати за варіаціями параметрів іоносфери, викликаних різноманітними природними та антропогенними чинниками. До складу Іоносферного зонду входять два радари некогерентного розсіяння зі 100-метровою зенітною і 25-метровою повноповоротною антенами, аналогова станція “Базис” та цифровий іонозонд VISRC-2 для вертикального зондування іоносфери, чотири двохчастотні базові станції GNSS з системами безперебійного живлення та GPS-приймачем для проведення моніторингу повного вмісту електронів в іоносфері по сигналам глобальних навігаційних супутникових систем, сучасна метеостанція TFA SINUS, приймач VLF сигналів для дослідження плазмосфери, магнітометр GEOMAG-02M для дослідження варіацій магнітного поля Землі у спокійних та збурених умовах. Також в наявності є система сейсмічного і акустичного моніторингу.

Такий широкий спектр дослідницьких інструментів робить Іоносферний зонд найбільш потужним наземним комплексом для вивчення навколосемного простору в середніх широтах європейського континенту. Завдяки його використанню Інститут іоносфери виконує дослідження світового рівня спільно з командами зі США, Європейського Союзу та Японії.

Пріоритетними напрямками наукової діяльності Інституту іоносфери є такі:

1. Дослідження глобальної структури, феноменів та процесів в іоносфері, плазмосфері та верхній атмосфері Землі за допомогою широкого спектру методів та інструментів, зокрема, радарів некогерентного розсіяння, міжнародних супутникових місій, мереж іонозондів та приймачів сигналів глобальних навігаційних систем.

2. Дослідження фізичних явищ і процесів у атмосфері, іоносфері, плазмосфері та геомагнітному полі з використанням фізичних, емпіричних і напівемпіричних глобальних і регіональних моделей.

3. Створення, модернізація та впровадження спеціалізованих наземних радіофізичних систем, їх окремих підсистем і програмного забезпечення для дослідження атмосфери та геокосмосу. Розробка нового обладнання у рамках створення конкурентоспроможних світових науково-прикладних розробок.

4. Модернізація бази даних з її поповненням результатами експериментальних досліджень. Участь у глобальній міжнародній системі іоносферного моніторингу. Створення електронного порталу для обміну інформацією між працівниками вітчизняних та закордонних наукових установ, між професорсько-викладацьким і студентським складом різних університетів.

5. Реалізація наукової і освітньої діяльності Інституту відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та з урахуванням вимог європейського науково-освітнього простору. Об'єднання зусиль і кооперація українських вчених із закордонними колегами в галузі вищої освіти для підготовки висококваліфікованих молодих фахівців – спеціалістів у дослідженнях навколоземного космічного простору.

Науковцями інституту також продовжується розробка емпіричної моделі з метою прогнозування стану та поведінки як спокійної, так і збуреної іоносфери. Впровадження такої моделі навколоземного космосу (атмосфери, іоносфери та плазмосфери), що базується на радіолокаційних даних, є вкрай важливе для розрахунків критичних траєкторій космічних апаратів та підтримки тривалості їхнього штатного функціонування. В кінцевому підсумку, унікальні дані таких дослідницьких комплексів, як Іоносферний зонд, дозволяють передбачити та уникнути значної кількості нештатних ситуацій у космосі, що зберігає значні кошти, людські та часові ресурси.

В умовах військового стану прецензійні іоносферні дослідження набувають особливого значення, оскільки бойові дії, зокрема, ракетні удари, у значній мірі

впливають і на атмосферу, і на іоносферу. Іоносферні сигнатури таких впливів є цінною інформацією для їх врахування відповідними фахівцями.

Інститут іоносфери має стале співробітництво з багатьма закордонними організаціями, зокрема University of Alabama in Huntsville (США), Institute of Atmospheric Physics (Чехія), Space Weather Prediction Center (США), Institute for Space-Earth Environmental Research (Японія), Universitat Politècnica de Catalunya (Іспанія), Space Research Centre of Polish Academy of Sciences (Польща)). Ці організації виявляють значний інтерес до спільних експериментальних досліджень та інтерпретації результатів, які сприяють відображенню еволюції іоносферних процесів над різними регіонами земної кулі, включаючи Україну. Цьому допомагає і наявність бази іоносферних даних та функціонування WEB-інтерфейсу Інституту ([www.iion.org.ua](http://www.iion.org.ua)), що сприяє у режимі *on-line* у встановленні нових творчих контактів з науковцями, які бажають користуватися геофізичною інформацією, отримуваною за допомогою Іоносферного зонду.

Науковці Інституту іоносфери з метою дослідження полярної іоносфери за допомогою двох типів іонозондів – IPS-42 та SDR – приймають активну і безпосередню участь також і у складі експедицій, що працюють на базі української антарктичної станції “Академік Вернадський”. Ці іонозонди мають спільну антену та дозволяють отримувати високоякісні іонограми, які містять достовірну інформацію про поточний стан іоносфери для порівняння характеру поведінки іонізованого середовища над Україною та Антарктидою під час різних станів космічної погоди.

Виходячи з вказаних напрямків досліджень, у книзі детально розглядаються питання подальшого розвитку ключових інформаційних можливостей методу некогерентного розсіяння, питання синтезу і впровадження перспективних апаратно-алгоритмічних підходів, спрямованих на удосконалення процесу випромінювання та апаратної обробки іоносферної інформації. Мета цих підходів – поліпшення якості методологічного аналізу радіофізичних даних, мінімізація помилок обчислень, збільшення точності розрахунків як статистичних характеристик сигналу розсіяння, так і параметрів іоносферної плазми.

Даний матеріал може бути використаний і в навчальному процесі з метою підвищення професійного рівня майбутніх науковців тих установ і організацій, чия діяльність пов'язана з радіофізичними дослідженнями навколоземного простору, стан якого істотно впливає на процеси на Землі та задає особливості функціонування сучасних систем зв'язку, радіолокації і навігації. Робота може мати інтерес як для дослідників, що займаються проблемами обробки сигналів, отриманих як відбиття від розподілених у просторі об'єктів, питаннями поширення радіохвиль у статистично неоднорідних, дисперсійних середовищах, так і інтерес для тих, хто займається суміжними проблемами у радіо- і геофізиці.

Таким чином, спираючись на досвід експлуатації радіолокатора, створеного співробітниками Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” і Інститутом іоносфери, у даному матеріалі аналізуються та уточнюються принципи розвитку ключових інформаційних можливостей методу НР, реалізуються підходи до впровадження ряду обчислювальних алгоритмів, вказуються шляхи удосконалення процесу випромінювання та апаратурної обробки радіолокаційних даних. Читачі знайомляться з особливостями застосування у цьому методі обчислювальних процедур для можливості уточненого розрахунку іоносферних параметрів.

Монографія містить шість розділів.

У *першому розділі* читачі знайомляться з деякими особливостями дослідження навколоземного космічного простору при використанні радіолокаційної апаратури обсерваторій міжнародної мережі радарів НР. Також представлено напрямки програми наукових досліджень харківських вчених та структуру центру автоматизованої системи на базі дослідницької апаратури своєї Іоносферної обсерваторії.

У *другому розділі* відповідно до зазначеної проблеми і поставленої мети проведено аналіз принципів особливостей і можливостей дистанційного зондування іоносфери Землі за допомогою імпульсних радарних систем НР, аналіз існуючих методик обробки сигналів, методів, що використовуються для оцінки

параметрів середовища. Розглядається випадок залучення до іоносферних досліджень радіолокаторів НР, які мають можливості випромінювати прості, складені та кодовані зондувальні імпульси, та які укомплектовані пристроями для реалізації методик обробки сигналу розсіяння шляхом розрахунку його статистичних характеристик. Представлено варіанти апаратурної реалізації та конструктивних особливостей системи формування складних кодованих імпульсів, їх випромінювання та приймання сигналу розсіяння, різновиди структур кореляційних пристроїв (кореляторів) для кожного з варіантів режиму випромінювання.

*У третьому розділі* представлено способи визначення за допомогою радарів НР складових швидкості руху як плазмових утворень, так і штучних та природних космічних об'єктів, тобто тих, що знаходяться у навколоземному космічному просторі та періодично перетинають діаграми спрямованості антен радарів НР. Одночасно з фільтрацією та обробкою даних, що використовуються для визначення радіальної складової швидкості руху іоносферної плазми, ці сигнали у вигляді когерентних радіолокаційних відбиттів, які є заважаючими для дослідників стану іоносфери, у той же час можуть надавати цінну інформацію для спеціалістів у суміжних областях космічної галузі.

*У четвертому розділі* розглядаються різноманітні підходи до процесу розрахунку та уточнення значень висотного розподілу електронної концентрації іоносферної плазми, що базуються на особливостях використання різних радіофізичних інструментів для одержання цього параметру. Як приклад, залучається апаратура радара НР для формування сигналів зондування у вигляді лінійно поляризованої радіохвилі, а також для формування сигналу, у якому відбувається маніпуляція напрямком кругового обертання площини поляризації його окремих елементів. Висвітлено приклад розрахунку повного вмісту електронної концентрації з використанням сигналів супутникових системи GPS і ГЛОНАСС.

*У п'ятому розділі* розглядаються особливості отримання та корекції кореляційних функцій сигналу НР. Показано ключові моменти, які стосуються аналізу поведінки кореляційних функцій і процедур перетворення цих функцій у коефіцієнти кореляції флуктуацій електронної концентрації. Представлено варіанти

врахування апаратурно-методичних особливостей імпульсного зондування та специфіки обробки радіофізичних даних у методі НР з оглядом на характеристики фільтру приймача, параметри імпульсу зондування та конструктивних особливостей антенних перемикачів і аналого-цифрових перетворювачів.

У шостому розділі наводяться особливості обчислювальних процедур та алгоритмів розрахунку параметрів іоносферної плазми методом некогерентного розсіяння. Використовуються різні методи розв'язку зворотної задачі, які з використанням отриманих коефіцієнтів кореляції флуктуацій електронної концентрації ідентифікують стан як однокомпонентної, так і багатокомпонентної плазми для наповнення бази даних щодо поведінки іоносфери над Україною.

Таким чином, запропоноване читачам видання з метою підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери Землі при її дистанційному моніторингу методом НР присвячено проблемі подальшого удосконалення апаратурно-програмних процедур, що дозволяють реалізувати ефективні обчислювальні перетворення. У цьому напрямку у книзі висвітлюються ключові моменти випромінювання радіохвиль та особливості алгоритмів ефективною обробки сигналу, утвореного у результаті некогерентного розсіяння цієї радіохвилі на вільних електронах плазми. Також уточнюються і розвиваються напрямки підвищення вірогідності розрахунків статистичних характеристик цього сигналу – кореляційних функцій, розглядаються питання обчислень з їх допомогою коефіцієнтів кореляції та спектрів теплових флуктуацій плазми, а ще пропонуються шляхи підвищення точності визначення за цими коефіцієнтами основних геофізичних параметрів навколоземного космічного простору.

Такий підхід спрямовано на збільшення обсягу і поліпшення якості первісної інформації, на розробку і впровадження сучасних процедур їх статистичної обробки і наступної максимально однозначної інтерпретації, що в цілому дозволяє максимально використати потенційні можливості методу НР.

Автори вдячні колегам з Інституту іоносфери та НТУ “ХПІ” за допомогу у впровадженні результатів досліджень, а також за висловлені у ході дискусій пропозиції щодо уточнення матеріалу, викладеного у попередніх виданнях. Вважаємо своїм обов’язком висловити щире подяку рецензентам професору А.Н. Колоскову, професору Р.В. Зайцеву і доктору технічних наук О.Ф. Єнікєєву за ретельний і конструктивний аналіз матеріалів та вагомні рекомендації щодо тексту рукопису.

Автори будуть раді будь-якій інформації та відгукам від читачів. Зауваження і побажання просимо направляти за адресом: 61002, Україна, м. Харків-2, вул. Червонопрапорна, 16, радіофізичний корпус НТУ “ХПІ”, НДІ Іоносфери, а також електронною поштою: [iion@kpi.kharkov.ua](mailto:iion@kpi.kharkov.ua).

У монографії використано результати, отримані в ході проведення Інститутом іоносфери фундаментальних та прикладних досліджень у рамках виконання ряду держбюджетних НДР Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Автори

## ВСТУП

Радіолокатори некогерентного розсіяння є потужними інструментами, призначеними для дослідження верхніх шарів атмосфери – іоносфери. З аналізу спектра (або функції автокореляції) досліджуваного відбиття від іоносфери радіолокаційного сигналу зондування можна отримати інформацію про поточні характеристики її плазмових структур. При цьому комп'ютерні технології дозволяють реалізувати високошвидкісну цифрову обробку прийнятих сигналів за допомогою спеціалізованої апаратури радіолокаційних систем. Удосконалення ж цих технологій призводить до покращення функціональності даної апаратури і значно підвищує її продуктивність.

Роботи, націлені на вивчення характеру та поведінки середньоширотної іоносфери, почалися з 1950 р. співробітниками радіотехнічного факультету ХПІ шляхом розроблення іоносферної станції. У наступні роки було виконано значний обсяг робіт з модернізації та введення в експлуатацію двох високопотенційних радарів НР. Також було впроваджено спеціалізовані системи обробки інформації, розроблено ефективні методики зондування іоносфери, приймання НР сигналу та його наступного аналізу, про що детально описано в [6–7].

У даному матеріалі, орієнтуючись на можливості сучасних спеціалізованих обчислювачів та спираючись на досвід експлуатації харківських радіолокаторів, аналізуються та уточнюються принципи реалізації ряду нових апаратурно-методичних підходів і вказуються шляхи удосконалення процесу обробки радіолокаційних даних.

У цілому результати радіолокаційних досліджень стану навколоземного космічного середовища призначено для сприяння процесу розвитку ряду наук,

пов'язаних з радіофізикою, радіотехнікою та радіоелектронікою, що викликано, у тому числі, необхідністю зміцнення обороноздатності України. Отримані результати використовуються для вирішення і багатьох прикладних задач. До них відносяться задачі надійного функціонування сучасних систем наземного і космічного радіозв'язку, систем радіолокації, супутникової радіонавігації та багато інших, які повністю залежать від умов поширення електромагнітного сигналу по маршруту “космічний об'єкт – споживач” [8]. Так, у джерелі [9] наведено експлуатаційно-технічні вимоги до перспективного радіолокаційного сповіщення, яке повинно надійно виконувати свою функцію на фоні електромагнітних завад, а також висунуто вимоги до підвищення завадостійкості інформаційних повідомлень радіолокаційних систем. Для цього, щоб надійно функціонував радіозв'язок, і потрібні знання про стан іоносфери, а от для діагностики її стану необхідна подальша модернізації режимів випромінювання сигналів, призначених для зондування навколоземного космічного середовища, та вкрай важливе удосконалення способів приймання й обробки отриманого НР сигналу.

Досить величезний обсяг при обробці даних, пов'язаний із обчисленням в реальному часі статистичних характеристик прийнятого сигналу, часто не може бути підхоплений за допомогою комп'ютера загального використання, але може бути легко оброблений цифровими пристроями спеціального призначення. Тому сучасні радіолокатори НР у своїй структурі повинні мати спеціалізовані швидкісні обчислювальні блоки – багатоканальні корелятори, що в реальному часі працюють із сигналами у вигляді розсіяння і робота яких синхронізується за допомогою загальних систем керування.

Для покращення процесу моніторингу іоносфери *актуальною* також є проблема модернізації режимів випромінювання сигналів зондування та способів приймання й обробки отриманого НР сигналу. Необхідно мати відповіді на ряд питань принципового характеру, серед яких є такі: а) особливості поширення радіохвиль в іоносфері; б) якими потрібні бути сигнали на виході радіопередавачів

імпульсних радіолокаторів, щоб бути максимально адаптованими до особливостей розсіяння електромагнітних хвиль в іоносферній плазмі; в) як змінюються характеристики сигналу розсіяння в антено-фідерному тракті та у радіоприймальної системі; г) якими мають бути апаратні системи обробки та аналізу НР сигналу.

Таким чином, *метою* даних досліджень є узагальнення та подальший розвиток ключових апаратурних можливостей методу НР і впровадження перспективних алгоритмічних підходів, спрямованих на удосконалення процесу випромінювання сигналів зондування та обробки іоносферної інформації, збільшення високої роздільної здатності і точності розрахунків за допомогою спеціалізованих комп'ютерів (кореляторів) статистичних характеристик сигналу розсіяння – автокореляційних функцій – по яким оцінюються параметри іоносферної плазми.

## Розділ 1

## СТИСЛІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОД НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ

У даний час через активний розвиток радіозв'язку, радіоастрономії та в результаті бурхливого освоєння космічного простору значно зріс інтерес до процесів, які відбуваються в іонізованій частині верхньої атмосфери Землі – іоносфері, що визначально впливає на умови поширення радіохвиль у навколоземному космічному просторі (рис. 1.1). Під впливом випромінювання Сонця, проникнення космічних променів і частинок, що знаходяться в радіаційних поясах магнітосфери, у верхніх шарах атмосфери Землі відбуваються процеси іонізації, які призводять до утворення шарів плазми у вигляді квазінейтрального середовища заряджених частинок. Стан цієї плазми залежить від періоду доби, сезону, сонячної активності, стану геомагнітного поля, а також від висоти і географічних координат.

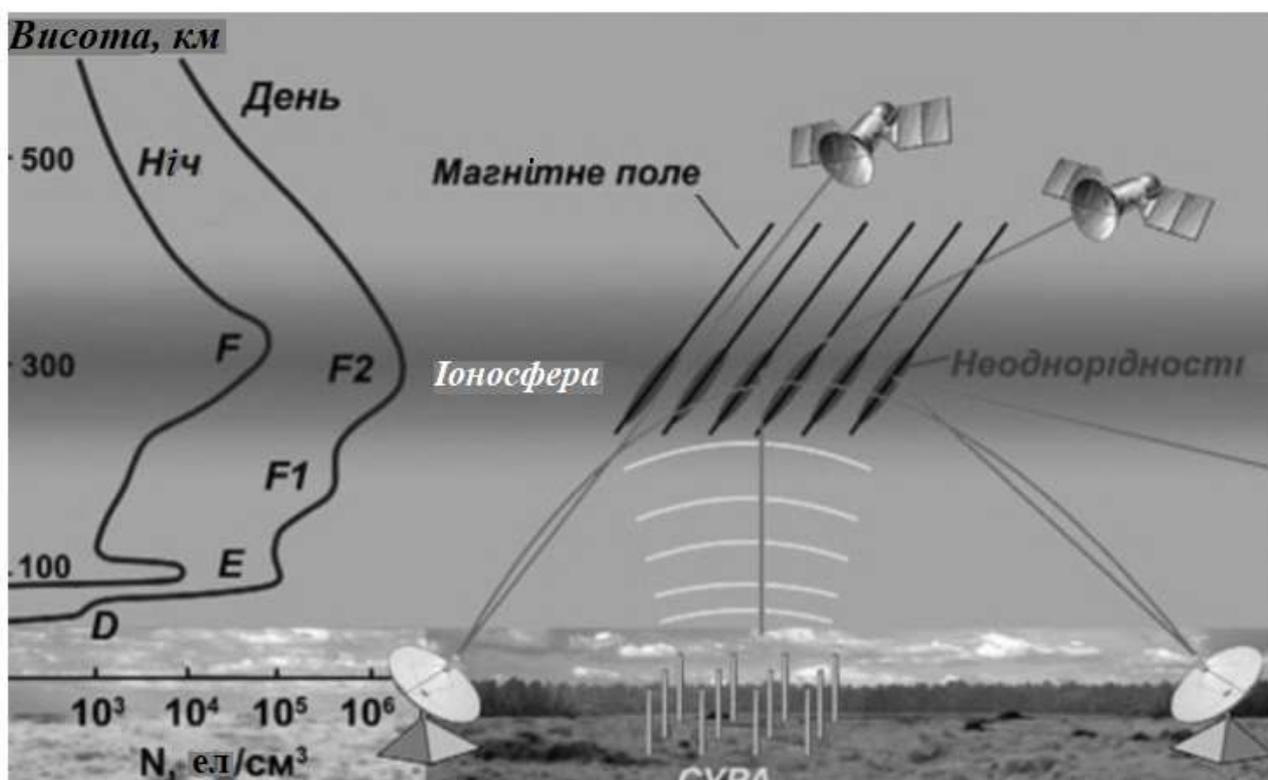


Рисунок 1.1 – Особливості структури іоносфери та поширення радіохвиль в іоносфері

Завдяки виникненню високої електропровідності іоносфера набуває ряд специфічних властивостей. Так, залежно від свого стану вона змінює ступінь поглинання і рефракції радіохвиль, у ній виникають ефекти крос-модуляції та ряд інших явищ.

Дослідження стану цієї іонізованої частини навколоземного космічного простору вкрай важливе, тому що вона сприяє розвитку фундаментальної науки, пов'язаної з аналізом процесів, які відбуваються як у нижніх іоносферних шарах, так і на висотах більше 1000 км. Це також важливо для розуміння процесів в нижній атмосфері, бо вони безпосередньо впливають на життєдіяльність людини. Зміни ж в атмосфері у цілому є результатом впливу на іоносферу як сонячних спалахів і викликаних ними магнітних бур, так і результатом техногенної діяльності людини (організатором потужних вибухів, пусків ракет, екологічних катастроф і ряду інших факторів).

Як частина цілісного організму іоносфера Землі дуже чутлива до змін у всіх своїх геофізичних оболонках – літосфері, атмосфері, магнітосфері – при впливі на них різних природних і антропогенних факторів. Тому актуальним є безперервний процес поточного моніторингу стану так званої космічної погоди. Для цього призначені апаратурні спостереження геокосмосу з одержанням і аналізом багатьох висотно-часових параметрів цього середовища. До таких параметрів належать електронна концентрація  $N_e(h, t)$ , електронна  $T_e(h, t)$  та іонна  $T_i(h, t)$  температури, швидкість переносу плазми  $V(h, t)$ , іонний склад  $\gamma(h, t)$  та ряд інших показників. У свою чергу, ці параметри є базовими при розрахунку характеристик іоносферного електричного поля, при визначенні сили струму, швидкості і напрямку переміщення іонізованих часток, а також при оцінюванні інших важливих показників.

Успіхи в розумінні цих фізичних процесів у навколоземному космічному просторі були досягнуті у результаті використання нових методів досліджень, серед яких визначне місце займає один з найбільш інформативних – метод некогерентного розсіяння, який дозволяє одержувати великий обсяг геофізичної ін-

формації. Він реалізується за допомогою унікальних наукових інструментів – радіолокаторів (надалі по тексту – радарів НР), розташованих на території ряду країн [10 – 13].

Як виявилось, некогерентне розсіяння на неоднорідностях іоносферної плазми можна зафіксувати за допомогою сучасної високопотенційної радіолокаційної техніки лише у тому випадку, якщо застосовувати сигнал зондування на частотах вище 50 МГц. Наприклад, для діапазону висот 200–500 км найбільш оптимальною є довжина хвилі порядку  $\lambda_0 = 1$  м і менше. Некогерентне розсіяння у цьому діапазоні як метрових, а також дециметрових хвиль обумовлене наявністю просторових флуктуацій концентрації плазми, що викликаються колективним тепловим рухом іонів і електронів. У результаті кулонівських взаємодій іонів і електронів в іоносферній плазмі виникають іонно-звукові та плазмові хвилі.

Розсіяння на теплових флуктуаціях плазми, обумовлене існуванням цих хвиль, призводить до того, що виникає некогерентно розсіяний сигнал, спектр якого характеризується наявністю ряду складових. Центральна частина цього спектру, шириною порядку декілька кілогерц, відповідає розсіянню на іонно-звукових хвилях. У цій зоні зосереджена основна частина енергії розсіяної хвилі. Крім того, є дві вузькі спектральні складові, віддалені від центральної частоти на величину плазмової частоти. Це так звана плазмова лінія, яка в окремих випадках може бути виявлена у денний час у висотному діапазоні, розташування якого залежить від довжини хвилі радара НР.

Іонно-звукова хвиля подібна звуковим хвилям і поширюється зі швидкістю, близькою до теплової швидкості домінуючих іонів. При наявності такої хвилі в плазмі утворюються згустки і розрідження концентрації. На цих слабких окремих неоднорідностях і розсіюються радіохвилі. Їхній результуючий вплив максимальний, якщо сигнали складуються по фазі, тобто коли відстань між неоднорідностями при зворотному розсіянні дорівнює половині робочої довжини хвилі радара.

Можна відзначити, що переріз розсіяння від об'єму іоносфери, який попадає у діаграму спрямованості антени на висоті 300 км при її опроміненні радаром НР

за допомогою 100-метрової харківської антени (тілесний кут випромінювання  $\sim 1^\circ$ ), за площею еквівалентний фізичному об'єкту розміром у декілька квадратних сантиметрів. Звідси випливає, що для надійного приймання сигналу у такому випадку і необхідні сучасні високопотенційні радары. З огляду на особливості поведінки іоносферної плазми, на практиці звичайно використовують радіопередавачі, що працюють у дециметровому або метровому діапазонах хвиль, причому з імпульсною потужністю у декілька мегават, радіоприймальні пристрої з рівнем шуму порядку 100 К, спеціалізовані пристрої первинної обробки інформації, а також швидкодіючі системи обробки геофізичних даних (комп'ютери).

У даний час вісім обсерваторій (табл. 1.1) ведуть регулярні дослідження іоносфери, використовуючи метод некогерентного розсіяння радіохвиль. Четверо із них розташовані у США і північній Європі [14 – 16], одна – в Японії. Геокоосмічне середовище в європейському регіоні успішно досліджується за допомогою радарів НР, що входять до складу іоносферної обсерваторії НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ” (м. Харків) [17].

Одна із установок харківської іоносферної обсерваторії являє собою дослідницький комплекс із 100-метровою зенітною дводзеркальною параболічною антеною, який працює в імпульсному режимі на частоті  $f_0 = 158$  МГц. Імпульсна потужність передавальних пристроїв знаходиться у межах 2,4 ... 3,6 МВт. Тривалість випромінюваних імпульсів можна задавати від 0,04 до 1 мс. Шумова температура системи не перевищує 500 К [1]. Цей комплекс є найбільшим на середніх широтах Європи і за унікальність отримуваних наукових результатів його внесено до державного реєстру наукових об'єктів, що становлять національне надбання України.

Цей науковий об'єкт є головним центром експериментальних досліджень навколоземної плазми в Україні, який постійно розвивається відповідно до сучасних світових трендів у галузі космічних досліджень. Дані, одержані за допомогою Іоносферного зонду, використовуються українськими науковцями та колегами зі США, ЄС та Японії. За допомогою Іоносферного зонду зроблено низку важливих наукових відкриттів. Так, він зафіксував вплив слабких змін космічної

погоди на іоносферу в середніх широтах. Отримано нові результати про поведінку рухомих іоносферних збурень над центральною Європою.

Таблиця 1. 1 – Інформація про світову мережу радарів некогерентного розсіяння

Місце знаходження установки	Організація	Антенна система	Імпульсна потужність, МВт (частота, МГц)	Географічні широта і довгота
Сондрестрем, Гренландія	Національний науковий фонд США	Повноповоротна параболічна, діаметр 32 м	5 (1330)	67° п.ш. 51° з.д.
Джикамарка, Перу	Лабораторії ESSA, США	Синфазна решітка 300м x 300м	4 (50)	12° півд.ш. 77° з.д.
Хайстек, Бостон	Массачусетський Технологічний інститут, США	Зенітна параболічна, діаметр 68 м; повноповоротна параболічна, діаметр 46 м	3 (440, 1295) 3 (440, 1295)	43° п.ш. 72° з.д.
EISCAT, Північна Скандинавія	Європейська асоціація НР (північна Скандинавія, Норвегія, Швеція, Фінляндія, Японія, Франція, Німеччина і Великобританія)	Керований параболічний циліндр 120 x 40 м (Тромсьо); повноповоротна параболічна, 32 м (Тромсьо); Дві приймальні антени (Кируна і Соданкюля)	5 (930) 2 (930)	65°-70° п.ш. 16°-26° з.д.
Свалбард, о.Шпіцберген	Університетський центр у Свалбарді, Норвегія	Повноповоротна параболічна, діаметр 32 м	2 (500)	78° п.ш. 16° з.д.
Радар ІСЗФ, Іркутськ	Інститут сонячно-земної фізики СВ РАН, Росія	Хвилеводно-щілинні антени довжиною 240 м, обмежені секторальними рупорами	2.8 (160)	52° п.ш. 104° сх.д.
МУ, Шигаракі	Університет Кіото, Японія	Нерухома синфазна решітка, 103 м	1 (46)	35° п.ш. 136° сх.д.
Радари Інституту іоносфери, Харків	НТУ “ХПІ” МОН України	Зенітна дводзеркальна параболічна, 100 м; повноповоротна параболічна, 25 м	2.4 - 3.6 (158) 2.4 - 3.6 (158)	50° п.ш. 36° сх.д.

У цілому, Іоносферний зонд з найбільшою параболічною антеною є єдиним у світі комплексом, здатним спостерігати за легкими іонами (водень та гелій) на межі між іоносферою і плазмосферою. Саме ця унікальна можливість дозволила зробити низку наукових відкриттів світового рівня, зокрема, вперше продемонструвати комплексний вплив концентрації нейтрального водню на систему іоносфера-плазмосфера.

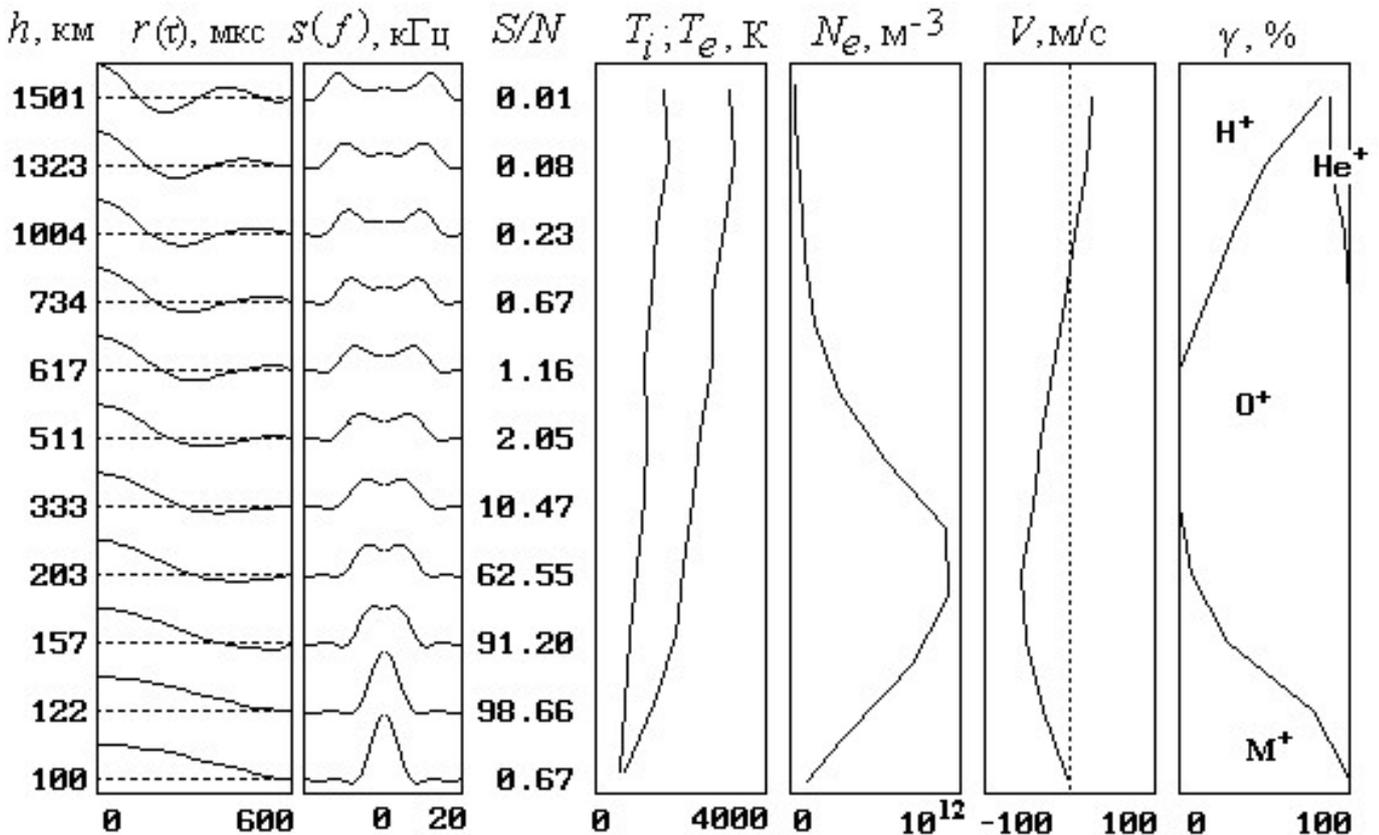
Результати наукових досліджень вчених Інституту регулярно публікуються у топових міжнародних рецензованих виданнях з космічної фізики, забезпечуючи просування досягнень української науки на світовому рівні. Тому подальша стратегія Інституту полягає у подальшому активному розвитку власних дослідницьких можливостей та поглибленню міжнародного співробітництва.

Функціонування обсерваторії Інституту іоносфери, яка також є важливим і освітнім центром, необхідно для забезпечення подальшої підготовки студентів, інженерів, фахівці вищої кваліфікації, які працюватимуть у галузі досліджень навколоземного космічного простору, космічної погоди, безпеки систем зв'язку та критичної інфраструктури. Таким чином, безперервне його функціонування гарантуватиме стабільне одержання наукових даних світового рівня про навколоземний космічний простір, що збереже лідерські позиції України у цій галузі та сприятиме подальшій інтеграції нашої країни в міжнародний ринок космічних послуг.

Програма наукових досліджень, яка реалізується з використанням дослідницьких установок, базується на проведенні, в основному, радіофізичних експериментів. При цьому для зондування вибирається висотний діапазон 100–1500 км і задається часове розрізнення (тривалість  $\Delta T$  сеансу статистичного накопичення) від 1 хв і більше.

На рис. 1.2 відповідно до фази високої сонячної активності наведено [3] один із прикладів одержання методом НР в одному із таких сеансів висотно-часових розподілів напруги (зображено у вигляді фрагменту *a*) та вздовж доби потужності (*b*) сигналу розсіяння, висотного розподілу (*в*) на протязі сеансу коре-

ляційних функцій  $r(\tau)$  сигналу НР, його спектрів  $s(f)$  і відношень  $S/N$  потужностей сигнал/шум. Також наведено результати розрахунку за цими статистичними характеристиками ряд параметрів денної іоносфери: кінетичних температур  $T_i$  і  $T_e$ , електронної концентрації  $N_e$ , швидкості  $V$  дрейфу плазми вздовж напрямку зондування, газового складу  $\gamma$ , що включає в себе іони водню  $H^+$ , гелію  $He^+$ , кисню  $O^+$  та молекулярні іони  $M^+$ .



6

Рисунок 1.2 – Висотно-часовий розподіл напруги (а) і потужностей (б) сигналу розсіяння та зміна поведінки статистичних характеристик сигналу НР і параметрів іоносфери у залежності від висоти (в)

Дослідники за даними радарів НР та з врахуванням додаткової інформації від іонозондів, густих мереж ГНСС приймачів і обладнання, встановленого на супутниках, використовують нові методики та сучасне програмне забезпечення, а також алгоритми для виявлення і оцінки ще й таких параметрів іоносфери, як акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) та рухомі іоносферні збурення (РІЗ). Розраховують періоди, тривалості, відносні амплітуди, масштаби та частоту реєстрації

фактів появи цих АГХ і РІЗ під час дії високоенергійних джерел природного та штучного походження.

Всі ці отримані параметри дозволяють визначати висотні, часові, сезонні варіації параметрів іоносфери під час характерних геофізичних періодів. Також по ним можна отримувати результати аналізу параметрів динамічних та теплових процесів в іоносфері у спокійні періоди та в умовах її збурень. Вийти на значення параметрів сонячного вітру та геомагнітних параметрів під час геокосмічних бур та оцінювати їх взаємозв'язок з варіаціями параметрів іоносфери. Досліджувати вплив іоносферних хвильових процесів та їх плазмосферних сигнатур на супутникові системи зв'язку та навігації. А також проводити порівняння одержаних за допомогою харківських радарів НР та іонозондів варіацій параметрів іоносфери з варіаціями, отриманими колегами-дослідниками в інших регіонах, а також з модельними даними.

Однією із особливостей методу НР є те, що в процесі зондування іоносфери сигнал, який реєструється у вигляді розсіяння на іонізованих частинках, приймається, як правило, при досить низькому відношенні сигнал/шум і, до того ж, на фоні імпульсних відбиттів і шумоподібних завад. У цьому випадку захист від активних та пасивних завад здійснюється за рахунок введення статистичної обробки даних і при використанні спеціалізованих алгоритмів розрахунку параметрів середовища (див. розділи нижче), що, зрештою, дозволяє вийти на досить високий рівень вірогідності щодо інтерпретації характеру різних іоносферних ефектів.

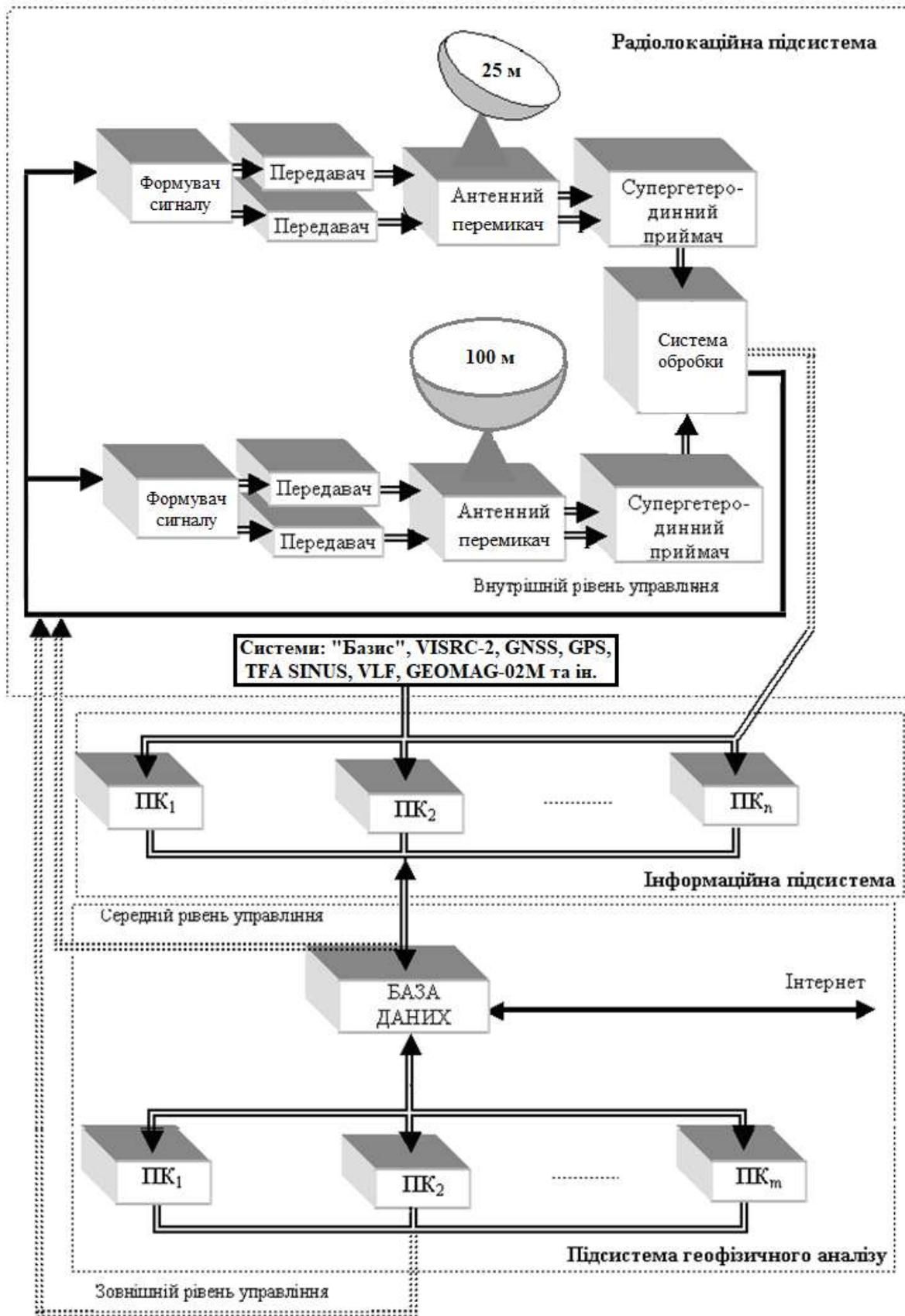


Рисунок 1.3 – Автоматизована система отримання параметрів іоносфери радіолокаційним методом НР

У цілому, харківські радари НР, якими поставлено задачу проведення повноцінного моніторингу іоносфери [2–3], є центром автоматизованої системи, де структурні зв'язки поєднують в одне ціле наступні важливі функціональні елементи (рис. 1.3):

1. Радіолокаційну підсистему у складі двох радарів НР для одержання вихідної інформації про кореляційні і спектральні характеристики сигналу розсіяння, а також набір різноманітної додаткової радіофізичної апаратури. Вони здійснюють випромінювання, приймання, аналіз сигналу НР, первинну обробку інформаційних масивів та накопичення додаткових геофізичних даних.

2. Інформаційну підсистему для розрахунків параметрів іоносферної плазми за статистичними характеристиками сигналу розсіяння з використанням швидкодіючих обчислювальних засобів. Для цього вона організує вибір режимів адаптивної обробки сигналу НР і задає перелік оцінюваних параметрів залежно від зміни умов експерименту.

3. Підсистему геофізичного аналізу з управлінням базою даних і міжнародним обміном результатами досліджень. Вона призначена для рішення питань оптимізації режимів і пристроїв зондування, перспективного синтезу пристроїв обробки сигналів та модернізації алгоритмів оцінки параметрів іоносферної плазми, для аналізу геофізичної інформації, розроблення адекватних моделей іоносфери, синтезу стратегічних узагальнюючих рекомендацій і т. п. Зворотні зв'язки у ній використовуються для контролю процесу обробки даних. Вводячи спеціальні програмні засоби, можна реалізувати тестування і внесення поправок у режими зондування з огляду на добові зміни параметрів, умови експерименту та на можливі ситуації, пов'язані з виявленням аномальних процесів в іоносфері при функціонуванні апаратури у режимі реального часу.

## Розділ 2

### ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ ЗОНДУВАННЯ ТА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ У МЕТОДІ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ

Так як іоносферна плазма має змінювану з висотою структуру, дослідники продовжують використовувати різні режими у процесі проведення експериментів по визначенню її характеристик. Реалізація цих режимів з поступовим ускладненням параметрів імпульсів випромінювання почалася більш ніж 50 років тому. При цьому на першому місці завжди стояла проблема щодо можливості підвищення точності ідентифікації її стану та динаміки, тому у результаті режими радіозондування іоносфери, а також пристрої та алгоритми для розрахунку параметрів навколоземного космічного простору по характеристикам отриманих сигналів розсіяння завжди потребували подальших удосконалень.

Практика показала, що вимоги до типу сигналу зондування у випадку проведення вимірювань методом НР істотно складніші, ніж при традиційній радіолокації об'єктів. У ній зазвичай використовуються такі сигнали [18 – 20], щоб з їх допомогою визначати тільки координати, швидкість, іноді розміри об'єктів. А так як у випадку проведення іоносферних вимірювань потрібно визначати до десяти параметрів стану середовища, то рядом закордонних авторів [10, 14] для цього методу було запропоновано різні варіанти сигналів і режимів їх випромінювання, які згодом нашими українськими вченими [21, 22] були удосконалені.

Так, в подальшому продовжувався процес вибору та використання саме складних сигналів зондування. Було акцентовано, що іоносфера, радіолокаційна апаратура, режими випромінювання, процесори для обробки сигналу розсіяння під час синтезу оптимальних сигналів зондування повинні розглядатися як взаємопов'язані елементи системи. Так як з точки зору радіолокації іоносфера являє собою сукупність безперервно розподілених у просторі цілей, то у цьому випа-

дку сигнал розсіяння формується хаотично розподіленими плазмовими утвореннями, що мають розміри порядку довжини робочої хвилі. Об'єм іоносфери, опромінений імпульсом зондування (десятки-сотні кілометрів), недостатньо малий, щоб його можна було вважати однорідним. До того ж іоносфера є складним об'єктом, якщо зважати на періодичну зміну її стану та на властивість швидкого реагування на вплив навколишніх джерел енергії. Звідси зрозуміла *перша задача* іоносферних досліджень – забезпечення якомога кращого висотного розрізнення, чому заважають різноманітні сигнали від сторонніх джерел та сигнали розсіяння від сусідніх висотних ділянок. *Другою задачею* є доведення до мінімуму рівня похибок при розрахунках характеристик сигналу – АКФ або спектру цього розсіяння. Оскільки процес розсіяння є випадковим процесом, то для одержання надійних оцінок цих характеристик навіть за достатніх співвідношень сигнал/шум використовують багатократне усереднення результатів, водночас погіршуючи цим розрізнення у часі.

Відзначимо також, що на відміну від традиційної радіолокації у методі НР для визначення параметрів плазми та її радіальної швидкості необхідно проводити детальний аналіз спектрів (або АКФ) цього сигналу вздовж усієї розгортки дальності. При цьому методичні спотворення, пов'язані з неоптимальною структурою сигналу зондування (наприклад, того ж самого довгого зондувального імпульсу), прямо трансформуються у похибки вимірювань параметрів іоносфери. Особливо це стосується імпульсних установок, для яких характерним є пошук компромісу між рівнем похибок вимірювань *локальних параметрів* плазми (наприклад, АКФ флуктуацій електронної концентрації) і рівнем похибок їх *висотного розподілу*. Приклад знайденого компромісу – режим вимірювання з застосуванням здвоєних імпульсів. У цьому варіанті необхідне розрізнення за висотою досягається шляхом використання коротких імпульсів, а необхідний інтервал кореляційних затримок при вимірюванні значень ординат АКФ  $r(\tau)$  задається взаємним розташуванням імпульсів.

З огляду на те, що специфіка вимірювань методом НР вимагає одночасно як поліпшення висотного розрізнення, так і скорочення часу сеансу спостережень,

тривалість сигналу зондування і способи його обробки повинні бути погоджені з властивостями іоносферного середовища, яке формує розсіяння. Отже, крок кореляційної затримки, а також кількість вимірюваних ординат АКФ сигналу НР також повинні задаватися значеннями параметрів іоносфери і характером їхнього висотного розподілу.

Таким чином, задіяний сигнал зондування має забезпечувати рішення суперечливих завдань, а саме – в ідеальному випадку він повинен мати коротку тривалість і одночасно – бути монохроматичним, тобто максимально довгим сигналом. При кореляційному аналізі тривалість імпульсу при зондуванні у метровому діапазоні радіохвиль можна вибирати, скориставшись результатами роботи [1], в якій для різних періодів доби наведено залежності положення  $\tau_2$ , тобто другого нульового значення АКФ сигналу НР, від висоти, з якої приймається цей сигнал (рис. 2.1).

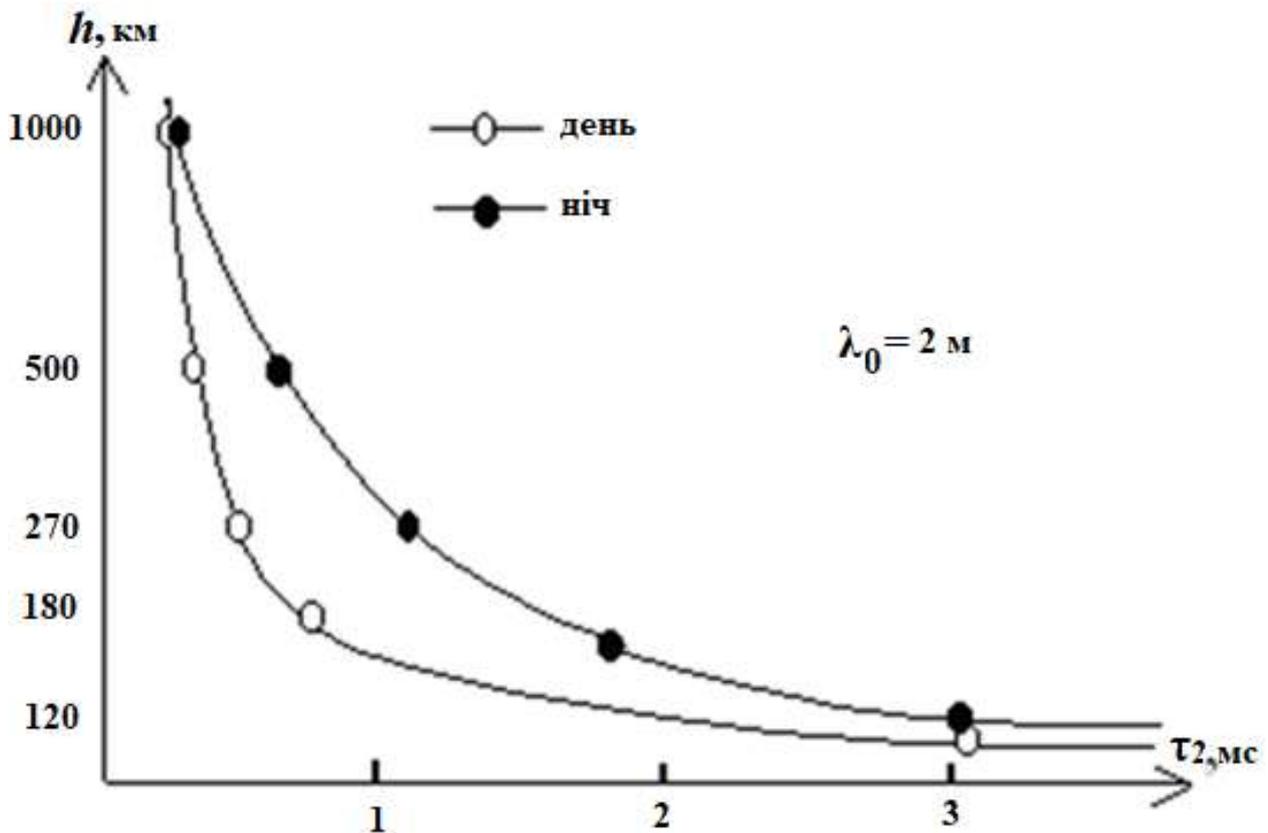


Рисунок 2.1 – Залежність значення другого нуля ( $\tau_2$ ) функції АКФ сигналу розсіяння у залежності від висоти

Важливим параметром у процесі розрахунків АКФ також є її форма на інтервалі кореляції флуктуацій електронної концентрації від нуля до значень  $\tau_2$ , тобто на відстані до другого нуля функції, який за допомогою емпіричних формул визначається як [1]:

$$\tau_2 \approx 0,003 \lambda_0 \sqrt{\frac{m_i}{T_i}}, \text{ с} . \quad (2.1)$$

Тут  $\lambda_0$ ,  $T_i$ ,  $m_i$  відповідно у метрах (м), градусах Кельвіна (К) і атомних одиницях маси (а. о. м.) сорту іонів;  $c$  – швидкість світла. Ці характеристики суттєво змінюються при різних положеннях досліджуваної ділянки вздовж висоти  $h$ .

З цього графіка видно, що існує протиріччя між необхідним розрізненням за висотою, яке для іоносфери має бути не більшим за 10–30 км, і розрізненням за затримкою (частотним зсувом), яке вимагає застосування імпульсів тривалістю не меншою, ніж 1,5–2,0 мс, що задають розрізнення у 225–300 км.

Використовуючи ту перевагу кореляційної обробки, що у методі некогерентного розсіяння є можливість для застосування складних сигналів зондування, можна домогтися необхідної розрізняювальної здатності за висотою менш ніж у 10 км, забезпечивши при цьому необхідні значення затримок на найбільш інформативному інтервалі АКФ. У результаті такі сигнали дозволяють реалізувати ті вимірювальні перетворення, що обумовлені недостатньо малими розмірами імпульсного об'єму.

Проаналізуємо ряд режимів випромінювання, які дають змогу експериментальним шляхом, з використанням радарів НР, отримати статистичні характеристики сигналу розсіяння, тобто ті режими імпульсного зондування іоносфери, що існують на даний час. При цьому зазначимо, що подальші викладки засновані на припущенні, що зондувальні імпульси мають ідеально прямокутну форму, а смуга пропускання радіоприймального тракту з ідеальною АЧХ є настільки широкою, що перехідні процеси несуттєво спотворюють результати подальшої обробки.

## 2.1. Режим випромінювання прямокутних радіоімпульсів великої тривалості

Радар НР періодично випромінює імпульсні сигнали зондування, які у відповідь визивають відбиття у вигляді сигналів некогерентного розсіяння, утворених на теплових флуктуаціях плазми. Найбільш просто результати спостережень стану та динаміки іоносферної плазми інтерпретуються у випадку використання зондувального радіоімпульсу  $T_{\text{имп}}$  великої тривалості (рис. 2.2, а). Його призначено для оцінки параметрів незбуреної іоносфери вздовж діапазону висот, в якому ці параметри змінюються монотонно і несуттєво [1].

Є кілька варіантів використання радіоімпульсів великої тривалості.

*Перший* з них той, коли тривалість імпульсу більша, ніж інтервал кореляції флуктуації електронної концентрації ( $T_{\text{имп}} \geq \tau_2$ ), і цим досягається мета одержання майже неспотвореного спектру сигналу (або його АКФ). Режимми зондування з випромінюванням імпульсів такої тривалості зазвичай використовують для вимірювань параметрів іоносфери там, де мають місце малі значення висотних градієнтів цих параметрів. Одночасно при цьому мають на увазі, що методичну похибку вимірювань у подальшому можна врахувати, застосовуючи коригувальні алгоритми обробки.

*Другий* варіант полягає в тому, що використовуються прямокутні радіоімпульси з тривалістю, меншою, ніж інтервал кореляції флуктуації електронної концентрації ( $T_{\text{имп}} < \tau_2$ ). Такі сигнали не дають можливості одержати кореляційні функції, а отже – і температури електронів та іонів, дрейф та інші іоносферні параметри, тобто вони призначені для розрахунку тільки потужності сигналу НР. У ранніх експериментах [1] та й у наш час такі короткі імпульси використовуються для спостережень за швидкими змінами в обмеженій області висот іоносфери – не вище максимуму іонізації, допомагаючи одержати висотний розподіл тільки перетину розсіяння, проте з найкращим просторовим розрізненням.

У разі кореляційного аналізу процедура отримання ординат АКФ передбачає запис відліків напруги прийнятого сигналу НР у моменти часу  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ ,

пов'язаних із заданим кроком  $\Delta t$  по кореляційній затримці, у процесі поширення імпульсу зондування вздовж висоти (рис. 2.2, *в*). Система обробки перемножує відповідні квантовані вибірки, у результаті чого для обраної висотної ділянки протяжністю  $\Delta h$  з центром на висоті  $h_0 = ct_0/2$  реалізується алгоритм отримання потужності сигналу НР (у момент часу  $t_0$  згідно зі значенням напруги  $u_0$ ). А також у тому ж циклі випромінювання можна обчислити  $n$  ординат нормованої АКФ з кроком  $\Delta t$ :  $r(i\Delta t) = u_0 u_i / R(0)$ , де  $i = 1, 2, \dots, n$  – індекси вибірок напруг  $u_i$  у моменти  $t_i$ .

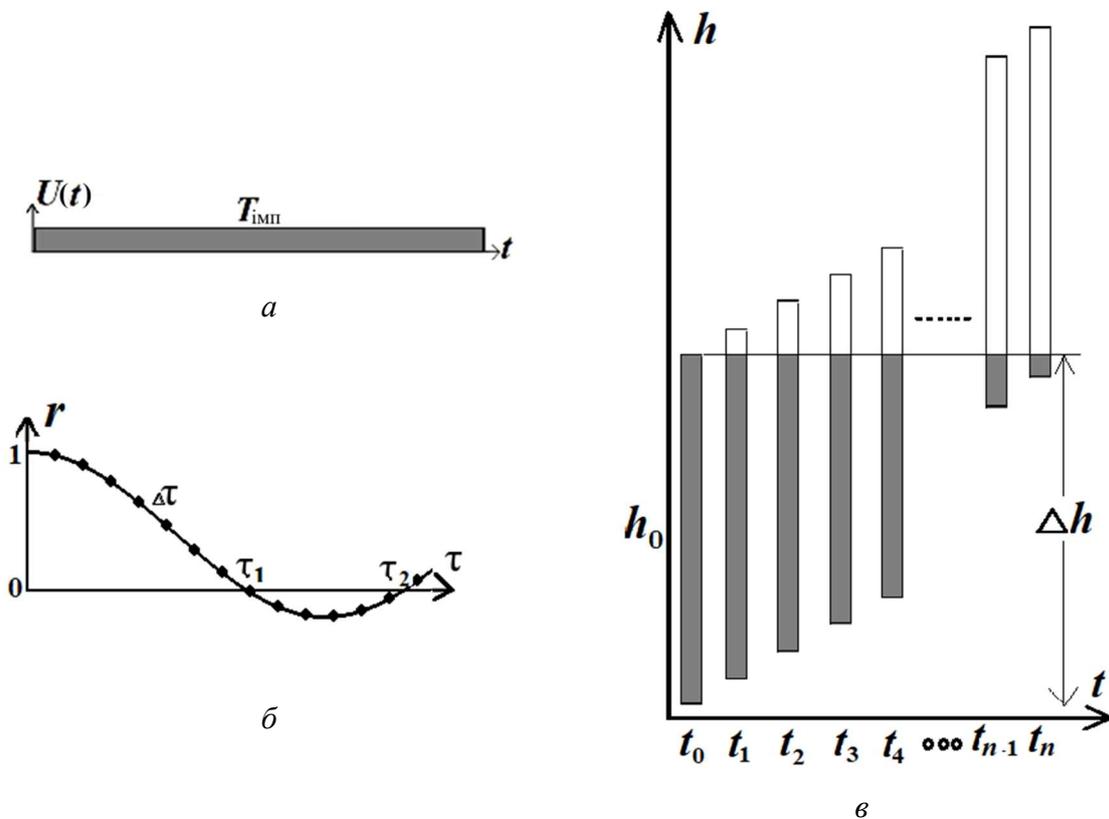


Рисунок 2.2 – Обвідна імпульсу зондування (*а*), нормована АКФ сигналу розсіяння для висотної ділянки  $\Delta h = cT_{\text{імп}}/2$  з центром на висоті  $h_0$  (*б*) та процес поширення в просторі тривалого імпульсу зондування (*в*). Крапками позначені розраховані ординати АКФ

Після статистичного накопичення результатів розрахунку АКФ для цієї та інших висот (зазвичай протягом сеансу тривалістю 1 хв) і подальшого врахування ряду апаратних факторів [4] ці ординати набувають вигляду, зображеному на рис. 2.2, *б* (крапки). Крок  $\Delta t$  дискретності їх отримання дозволяє досить точно відобразити поведінку реальної кореляційної функції, придатної для пода-

льшого використання в алгоритмі ідентифікації з її допомогою параметрів іоносфери. А тривалість  $T_{\text{імп}}$  імпульсу зондування в цьому випадку повинна забезпечити достатній для подальшого аналізу інтервал кореляції від 0 до  $\tau_2$  ( $\tau_2 \geq 600$  мкс), де  $\tau_2$  – кореляційна затримка, коли кореляційна функція вдруге перетинає вісь абсцис. Отже, коли довжина хвилі випромінювання радара має значення  $\lambda_0 = 2$  м, то для випадку, зображеному на рис. 2.2, знаходимо, що  $T_{\text{імп}} \geq \tau_2 \geq 600$  мкс.

Такий сигнал зондування визначає велику випромінювану енергію і тим самим сприяє забезпеченню достатнього відношення сигнал/шум, що дає можливість досліджувати іоносферу на висотах вище максимуму іонізації. Але якщо це дуже добре з точки зору статистичного накопичення, то така тривалість  $T_{\text{імп}}$  зондувального сигналу задає не дуже добре висотне розрізнення, яке практично складає  $\Delta h = cT_{\text{імп}}/2 \approx 100$  км. При цьому таке значення не дозволяє детально виділяти шарову структуру нижньої іоносфери, якщо залучати ці імпульси для вивчення її характерної особливості.

Особливо невдалим є такий сигнал для радарів НР із значною довжиною  $\lambda_0$  робочої хвилі. Наприклад, для радара НР, розташованого в Джикамарці (Перу), з  $\lambda_0 = 6$  м маємо:  $T_{\text{імп}} = 3$  мс і  $\Delta h = 450$  км. У вигіднішому становищі виявляються установки Хайстек у США і EISCAT у Північній Скандинавії [14, 16] з робочою частотою від 400 МГц до 1300 МГц. Проте існують методики, які дозволяють частково покращити це просторове розрізнення за рахунок деякого ускладнення методів обробки прийнятих сигналів. Наприклад, це може бути почергове випромінювання двох близьких по довжині імпульсів з виділенням інформації у вигляді різниці між їх відліками, або ж якщо використовувати коди Баркера.

Технічна система, наведена на рис. 2.3 [23–25], дозволяє реалізувати процес випромінювання такого протяжного сигналу зондування, що має кругову поляризацію, та відповідне приймання зворотного сигналу розсіяння з розрахунком його автокореляційних функцій прийнятої суміші сигнал+шум. У ній використовуються два передавачі, антено-фідерна система з елементами балансного мосту

БМ), на який подаються сигнали з вібраторних випромінювачів антени, приймач з можливістю синхронного детектування сигналів і багатоканальний корелятор з блоком аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів на вході.

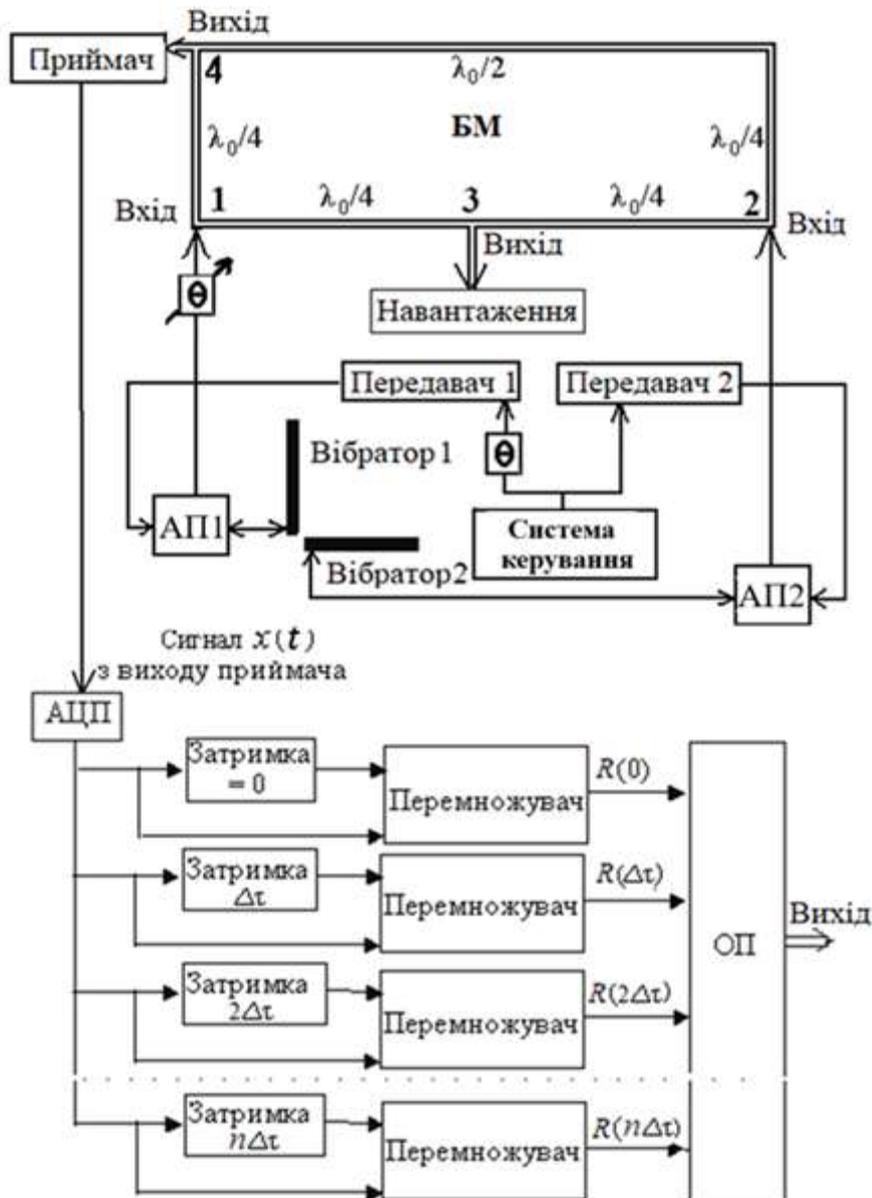


Рисунок 2.3 – Система випромінювання, приймання сигналів та багатоканальний корелятор для обчислення статистичних характеристик прийнятих сигналів

У кореляторі, який використовується у цьому випадку, сигнал  $x(t)$  з приймача протягом кожної розгортки подається одночасно на всі його  $n$  каналів. У кожному з цих каналів відбувається перемноження прямих і затриманих сигналів на час від 0 до  $n\Delta t$  (при цифровій обробці кореляційна затримка зазвичай кратна

кроку  $\Delta t$  дискретизації сигналу). Внаслідок цього знаходяться ординати АКФ (рис. 2.2, б) з їх накопиченням в оперативній пам'яті (ОП) з метою подальшої систематизації, обробки та розрахунку по ним значень кінетичних температур іоносферної плазми.

Особливості обробки сигналу у процесі розрахунку АКФ у цьому режимі полягає в тому, що для визначення ординат функції перемножуються відліки напруги, отримані в сусідні моменти часу. А так як в силу електричного екранування різні висотні елементи (їх розміри у практиці іоносферних вимірювань на порядки більші за дебаївський радіус) за теорією незалежні, то сигнали, розсіяні цими неспівпадаючими елементами, вважаються некорельованими, тобто при перемноженні дають нульовий результат. На рис. 2.2, в затемненням позначена та частина  $\Delta h$  об'єму розсіяння, який тільки і дає внесок у результат обчислення ординат АКФ для ділянки з центром на висоті  $h_0$ .

Таким чином, на середніх широтах для області висот вище 400–500 км тривалість радіоімпульсів доводиться вибирати не меншою, ніж заданий для досліджень інтервал кореляції флуктуації електронної концентрації, тобто  $T_{\text{имп}} \geq \tau_2$ , що говорить про їх незначну висотну роздільну здатність, тобто більш ніж у 100 км. Тобто така тривалість імпульсу зондування зводить нанівець спроби дослідити нижні області висот з кращою роздільною здатністю. Не говорячи вже про істотний його недолік – на час випромінювання імпульсу вхід радіоприймача блокується, тобто з процесу вимірювань випадає цілком конкретна початкова ділянка висот.

Проте переваги методу в тому, що для отримання температур електронів та іонів у верхній частині висотного інтервалу, де дуже мале відношення сигнал/шум, через застосування таких імпульсів зондування є можливість отримати достатньо достовірні значення температур  $T_e$  і  $T_i$ . Тому що додатково до цього використовується ще й вторинна обробка з алгоритмами часового усереднення результатів вздовж ряду висотних ділянок, тобто відбувається статистичне накопичення даних в сеансах, які при цьому можуть досягати значної тривалості (як правило, протягом 15–30 хвилин).

## 2.2. Режим випромінювання складеного двохелементного імпульсу

Особливості поведінки параметрів іоносферної плазми на інтервалі висот до 300 – 400 км в тому, що концентрація електронів  $N_e(h)$  швидко змінюється з висотою, та додатково виникають ще й ряд міжшарових долин. Тобто для дослідження цієї нижньої частини (аж до області  $h_0F2$  глобального максимуму іоносфери) необхідно мати розрізнення в 10–20 км. Це, зокрема, важливо для вивчення реакції іоносфери на різноманітні збурення та термосферні ефекти, які фіксуються над територією України. Тому для одночасного охоплення ще й нижньої області у процесі модернізації попереднього режиму запропоновано [23–25] варіант використання складеного зондувального сигналу, який є сумою довгого та короткого елементів радіоімпульсу.

Відомо про випадок використання складових такого сигналу зондування, що формуються на різних частотах (рис. 2.4, верх) [27]. У цьому варіанті елемент на частоті  $f_1$  (елемент з найбільшою енергією) пропонується для вивчення діапазону, починаючи від висоти  $h_0F2$  глобального максимуму іонізації. Вся енергія, яка припадає на цю складову, зосереджена у вузькій смузі частот, тому при такій енергії достатньо компенсується істотне зменшення співвідношення сигнал/шум у випадку збільшення відстані та зменшення з висотою значень електронної концентрації. Другий елемент на частоті  $f_2$  призначений для дослідження іоносфери нижче від висоти  $h_0F2$ , де присутні чітко виражені локальні максимуми іонізації – шари E і D.



Рисунок 2.4 – Складений двохелементний радіоімпульс зондування на різних частотах або зі зміною напрямку повороту площини поляризації

Однак слід звернути увагу на ту обставину, що в імпульсних установках, які використовують в методі НР, у першому приймачі через значну тривалість зондувального імпульсу, який своєю потужністю блокує вхід приймача, відсутня інформація про нижні висоти. А на вході іншого приймача під час дії другого імпульсу ще зберігається заважаюча реакція на перехідні процеси, зумовлені першим імпульсом. Тому обробка має базуватися на застосуванні методів ретельного обліку перехідних процесів в інерційних системах. У зв'язку з цим запропоновано орієнтуватися на маніпулювання поляризаційними характеристиками складових зондувального сигналу, який зводить до мінімуму ці недоліки.

В режимі зондування іоносфери складеними сигналами з такими характеристиками (рис. 2.4, низ) [23–25] спочатку випромінюється перший елемент радіоімпульсу тривалістю зазвичай  $T_{\text{ел1}} = 0,6 \dots 1,0$  мс із круговим (наприклад, правим) поворотом площини поляризації. За ним випромінюється елемент короткої тривалості  $T_{\text{ел2}} = 0,1 \dots 0,15$  мс із протилежним, лівим напрямком повороту площини поляризації. Напрямок обертання через передавачі задає система керування.

На рис. 2.5 наведено варіант технічного рішення, що реалізує цей режим. Все так же використовується балансний міст, але присутні вже два приймачі на його окремих виходах. Для обробки першого елемента імпульсу (з метою розрахунку АКФ) використовується корелятор того ж типу, що й на рис. 2.3. Він у каналі з правою поляризацією розраховує висотний розподіл значень ординат АКФ з просторовим розрізненням  $\Delta h_1 = cT_{\text{ел1}}/2 = 110$  км, за якими визначаються електронна  $T_e(h)$  та іонна  $T_i(h)$  температури плазми, а по ним – електронна концентрація  $N_e^{(\rightarrow)}(h)$ .

В той же час для обробки другого елемента імпульсу (з лівою поляризацією) використовується схема квадратора з метою обчислення потужності  $P(h)$  сигналу НР. Одержавши за допомогою іонозонда значення критичної частоти, з високим просторовим розрізненням, рівним  $\Delta h_2 = cT_{\text{ел2}}/2 = 19$  км, по значенню потужності розраховується (див. нижче) лише електронна концентрація  $N_e^{(\leftarrow)}(h)$ .

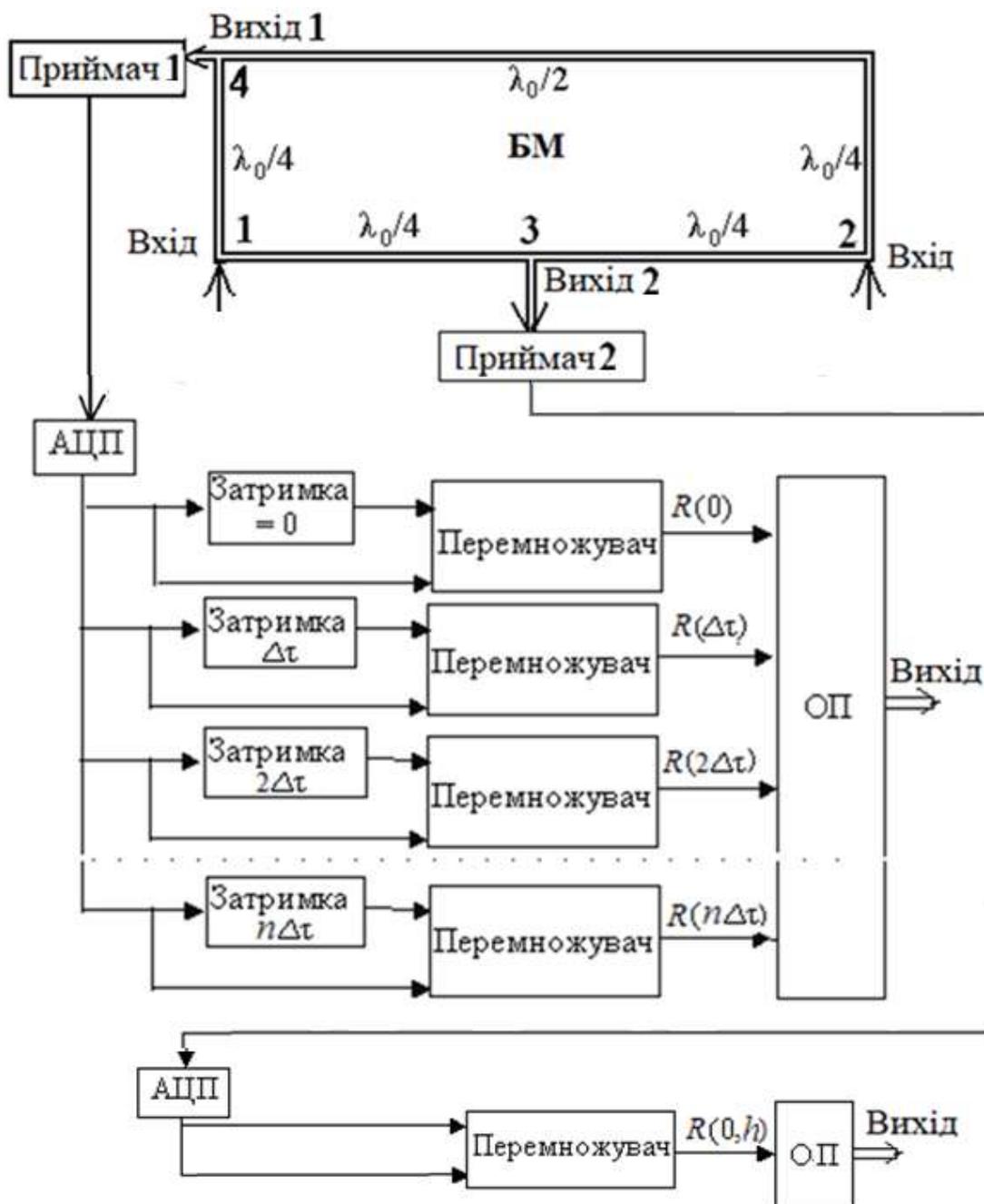


Рисунок 2.5 – Система отримання АКФ для випадку двохелементного імпульсу зондування

Чим коротша тривалість другого елемента імпульсу, тим точніше може бути визначений висотний розподіл перерізу розсіяння. Однак такі короткі сигнали дозволяють правильно обчислити лише потужність сигналу НР, тому що на цих висотах інтервал кореляції дуже протяжний. Цей інтервал значно перевищує тривалість другого елемента імпульсу, тому нема можливості розрахувати АКФ,

щоб обчислити температури електронів, іонів та інші параметри іоносферної плазми.

Деякий вихід все ж таки є. Так як переріз розсіяння з точністю до множника  $(1 + T_e/T_i)^{-1}$  повторює висотний профіль електронної концентрації  $N_e(h)$ , то з метою його обчислення для формування цього множника висотний розподіл температур  $T_e(h)$  і  $T_i(h)$  частково залучають із моделі параметрів іоносфери. Тобто, починаючи зі 100 км, де температури згідно моделі вважають рівними 386 К, їх монотонно збільшують, застосовуючи кусково-лінійну (або параболічну) апроксимацію значень. При цьому кінцевими даними для визначення параболи приймають ті значення температур, що розраховуються за результатами їх отримання на першій іоносферній ділянці внаслідок дії довгого імпульсу (на рис. 2.6 це висота  $h = 234$  км).

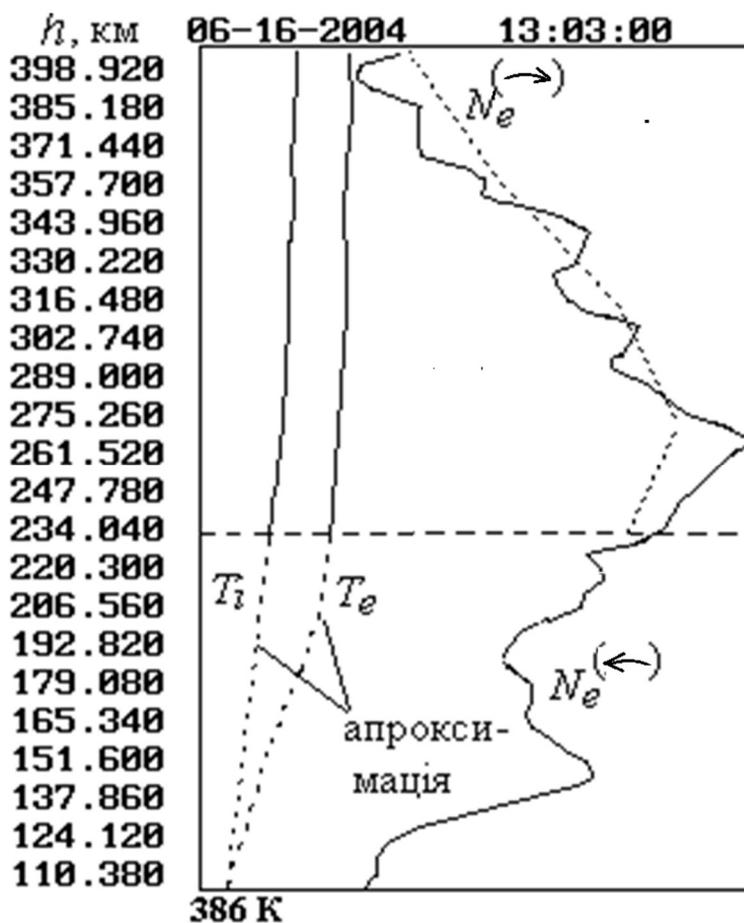


Рисунок 2.6 – Результат розрахунку висотного розподілу параметрів іоносфери для випадку використання двохелементного імпульсу з різним напрямком кругової поляризації

### 2.3. Режим почергового випромінювання послідовностей двохелементних імпульсів

Як було сказано, протягом інтервалу до значень 300-400 км концентрація електронів може швидко змінюватися з висотою, тому що це зона виникнення ряду міжшарових долин. У результаті для дослідження цієї нижньої області іоносфери необхідно мати розрізнення не більше, ніж у  $\Delta h = 10$  км. Це, зокрема, важливо і для вивчення реакції іоносфери на геокосмічні збурення та інші фактори, у тому числі реакції на антропогенний вплив. Такі дослідження реалізують, використовуючи режим випромінювання імпульсу особливої структури.

Якщо потрібно досліджувати цей нижній інтервал висот, то кращим варіантом є використання сигналу зондування типу “здвоєний” імпульс (рис. 2.7), коли у парі, що випромінюється, у наявності є перший елемент імпульсу, а також є другий елемент, що випромінюється на тій же частоті із затримкою у часі щодо першого з дискретним кроком  $\Delta t$  від значень  $\tau_1$  до  $\tau_2$ . Тобто, щоб забезпечити високу роздільну здатність по висоті, імпульс зондування ділять на дві частини зі змінним проміжком між ними, тобто і в паузах між ними є можливість приймати сигнал відбиття. Правда, при цьому розраховуються ординати АКФ сигналу розсіяння лише на укороченому інтервалі кореляційних затримок. Такий режим вперше дослідниками було застосовано на радарі НР із робочою довжиною хвилі  $\lambda_0 \sim 6$  м [26, 27].

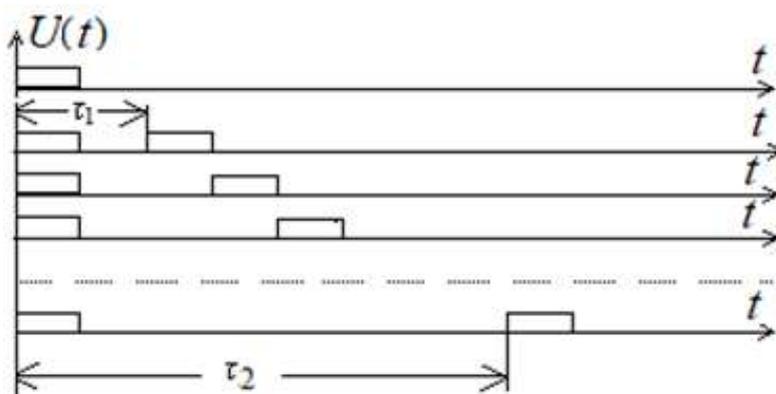


Рисунок 2.7 – Режим випромінювання послідовності здвоєнних імпульсів

Такий режим враховує той факт, що через переважну присутність на нижніх висотах іонів кисню  $O^+$  спектр сигналу НР є вузьким, тобто має місце збільшене значення інтервалу кореляції у порівнянні з великими висотами, де присутні легкі іони. У результаті прийнято рішення використовувати інтервал кореляційних затримок лише від першого до другого нуля АКФ (рис. 2.8, б), та змиритися з відсутністю інформації з інтервалу кореляційних затримок функції від 0 до  $\tau_1$ .

Режим випромінювання і обробки у цьому випадку організовується у наступний спосіб.

Почергово, від випромінювання до випромінювання передавач радіолокатора формує пару ідентичних імпульсів тривалістю  $T_{\text{ел}} = 30$  мкс кожний. Перший імпульс випереджає другого на час, який у кожному періоді змінюється так, що за період із  $n = (\tau_2 - \tau_1)/\Delta\tau$  циклів затримка приймає ряд заданих дискретних значень на інтервалі від  $\tau_1$  до  $\tau_2$ . З метою нормування АКФ, тобто для отримання “нульової” ординати функції спочатку додатково випромінюється ще й одиночний радіоімпульс. На протязі сеансу статистичного накопичення цикли повторюються.

Відповідно до цього режиму будується і кореляційна обробка.

Обчислення ординат АКФ (рис. 2.8, б) з кроком  $\Delta\tau = T_{\text{ел}}$  полягає у фіксації для виділеної висотної ділянки протяжністю  $\Delta h$  з центром на висоті  $h_0 = ct_0/2$  ряду квантованих відліків  $u(t_i)$  сигналу розсіяння у моменти часу  $t_i$ . Будемо мати відлік  $u(t_0)$  при поширенні вздовж висоти одиничного елемента, а також відліки в моменти  $t_0$  і  $t_7$ ,  $t_0$  і  $t_8$ , ...,  $t_0$  і  $t_{12}$  у процесі почергового випромінювання здвоєних елементів (рис. 2.8, в). У цей час обчислювач здійснює перемножування відповідних відліків, у результаті чого для виділеної висотної ділянки реалізується алгоритм знаходження потужності  $R(0) = u(t_0)^2$  прийнятого сигналу, а також під час наступних циклів випромінювання відбувається обчислення ряду нормованих ординат АКФ [3], а саме:

$$r(i \cdot \Delta\tau) = u(t_0) \cdot u(t_0 + t_i) / R(0), \quad \text{де } i = 7, 8, \dots, 12. \quad (2.2)$$

В результаті такого підходу забезпечується значно краще висотне розрізнення, яке відповідає значенню  $\Delta h = cT_{\text{ел}}/2 \approx 4,5$  км. Як показує практика іоносферних досліджень, для випадку  $\lambda_0 = 2$  м і висот нижче 150 км найкращим варіантом є реалізація  $n = 6$  затримок (рис. 2.8, а), кратних  $\Delta\tau$ : 280, 320, 360, 400, 440 і 500 мкс, про які нижче і буде йти мова.

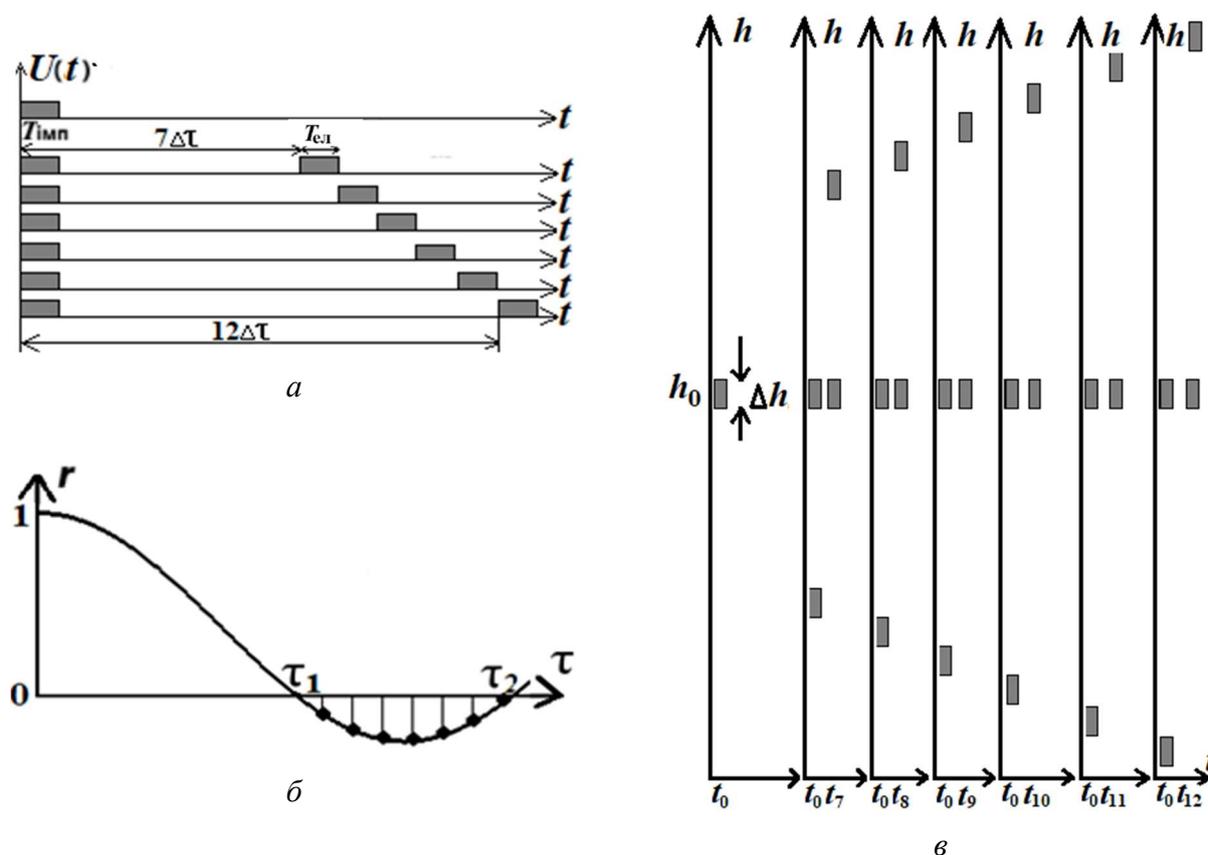


Рисунок 2.8 – Обвідні послідовності здвоєнних елементів імпульсу зондування (а); отримана з їх допомогою нормована АКФ сигналу розсіяння (б); процес почергового (у часі) поширення в просторі коротких пар імпульсу зондування відносно ділянки

$$\Delta h = cT_{\text{ел}}/2 \text{ з центром на } h_0 \text{ (в)}$$

У цьому режимі з метою реалізації технічних систем радара НР повинен бути застосований наступний підхід (рис. 2.9) [25, 28]. Крім антено-фідерної системи, через яку передавачі радара НР здійснюють випромінювання, а приймач – приймання та відфільтровування сигналу розсіяння, також залучається корелятор. Він повинен бути іншої структури, а саме – містити лише один канал, проте

з синхронізацією від системи керування, яка задає зміну значень у його лінії затримки синхронно із затримкою між здвоєними елементами імпульсу зондування.

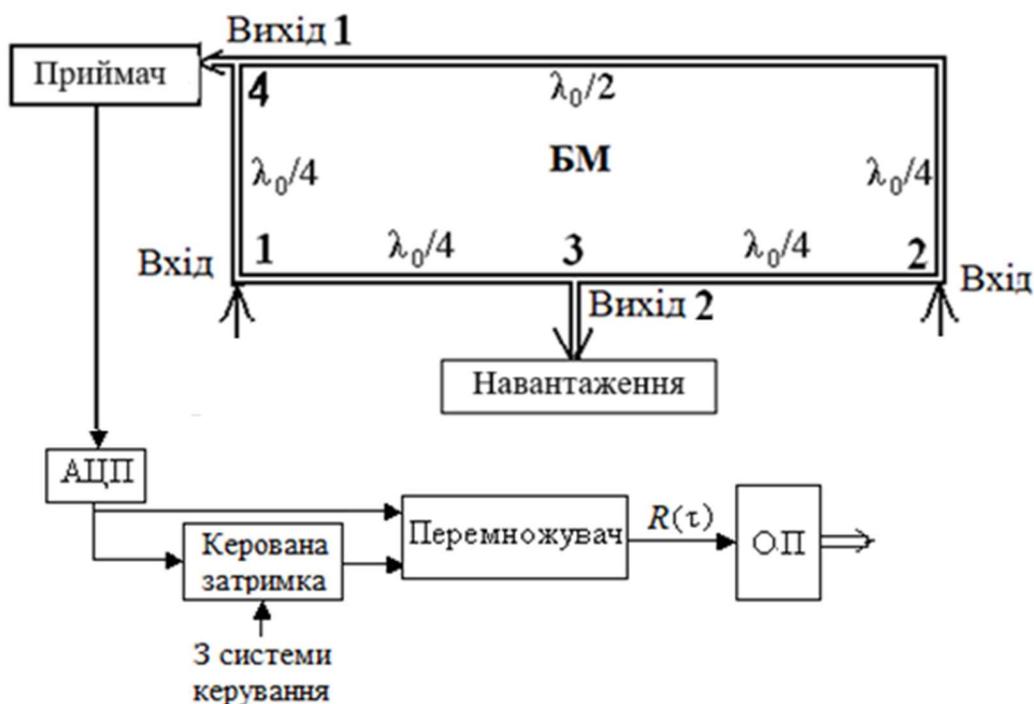


Рисунок 2.9 – Система отримання значень АКФ для пари коротких елементів імпульсу у випадку використання корелятора з програмованою затримкою

Однак при такому сигналі зондування має місце суттєвий недолік: із-за необхідності почергового обчислення ординат АКФ у 7 разів зменшується і загальний час при формуванні протяжності сеансу вимірювань. Тобто сеанси повинні бути більш тривалими, а це пов'язано з погіршенням роздільної часової здатності, яка не завжди припустима у випадку досліджень процесів в іоносфері, що мають швидкоплинний характер. До того ж чим коротший імпульс, тим більшою виявляється методична похибка вимірювань за рахунок зменшення об'єму розсіювання та через необхідність розширення смуги пропускання фільтру, тобто через зменшення співвідношення сигнал/шум.

Також у кожний момент часу приймаються ще й два сигнали розсіювання (рис. 2.8, в). Відлік у момент  $t_0$  на висоті  $h_0$ , яку досяг перший елемент імпульсу, містить паразитну складову сигналу, пов'язану з відбиттям від висоти нижче,

тобто  $h_0 - c\Delta t/2$ , яку досяг другий елемент. Коли ж у момент часу  $t_0 + \Delta t$  висоти  $h_0$  досяг другий елемент, то аналогічна паразитна складова визначатиметься положенням на висоті  $h_0 + c\Delta t/2$  першого елемента імпульсу.

Як результат – маємо характерне для здвоєних імпульсів розсіяння, отримане одночасно з двох висотних рівнів. Тобто, не зважаючи на теоретичну некорельованість сигналів з різних висот, утворюється перехресна шумова завада. Її інтенсивність визначається характером поведінки висотного профілю перерізу розсіяння.

#### **2.4. Режим почергового випромінювання послідовностей складених двохелементних імпульсів**

Є ще один варіант використання імпульсу зондування зі своєрідними параметрами. Він має особливу конструкцію, в ньому поряд розташовується (складається) пара вищенаведених двохелементних структур. При цьому залучається маніпуляція напрямком кругового обертання площини поляризації радіохвилі при випромінюванні окремих елементів. Даний підхід дозволяє за рахунок все тих же вибіркового антенно-фідерних властивостей апаратури радара НР випромінювати та окремими пристроями обробки приймати два різні сигнали, розсіяні на теплових флуктуаціях іоносферної плазми, яким задано протилежні значення напрямку обертання площини поляризації.

Таким чином, щоб для нижніх висотних діапазонів досліджень реалізувати даний режим, пропонується при випромінюванні в якості базової використовувати імпульсну комбінацію, зображену на рис. 2.8, *a*, але в яку вносяться наступні доповнення.

Основні елементи імпульсу (чорного кольору) будуть повторювати структуру базової комбінації. Але при цьому вони будуть використовувати правий напрям обертання у просторі площини поляризації радіохвилі при її випромінюванні (рис. 2.10, *a*). Додатково на тій же частоті вводяться і допоміжні елементи аналогічної структури (сірого кольору), що будуть використовувати протилеж-

ний, лівий напрямок обертання площини поляризації. Процес поширення у просторі такого типу імпульсу зондування з фіксацією відліків сигналу розсіяння у відповідні моменти двома незалежними приймачами демонструється на рис. 2.10, б.

Довжина  $T_{\text{ел}}$  кожного елемента коду зостається такою ж, що забезпечує все таке ж високе розрізнення  $\Delta h$ . А от за рахунок обробки допоміжної інформації є можливість отримати подвоєну кількість ординат АКФ, які в сукупності будуть відображати характер досліджуваної частини кореляційної функції з кращою статистичною точністю.

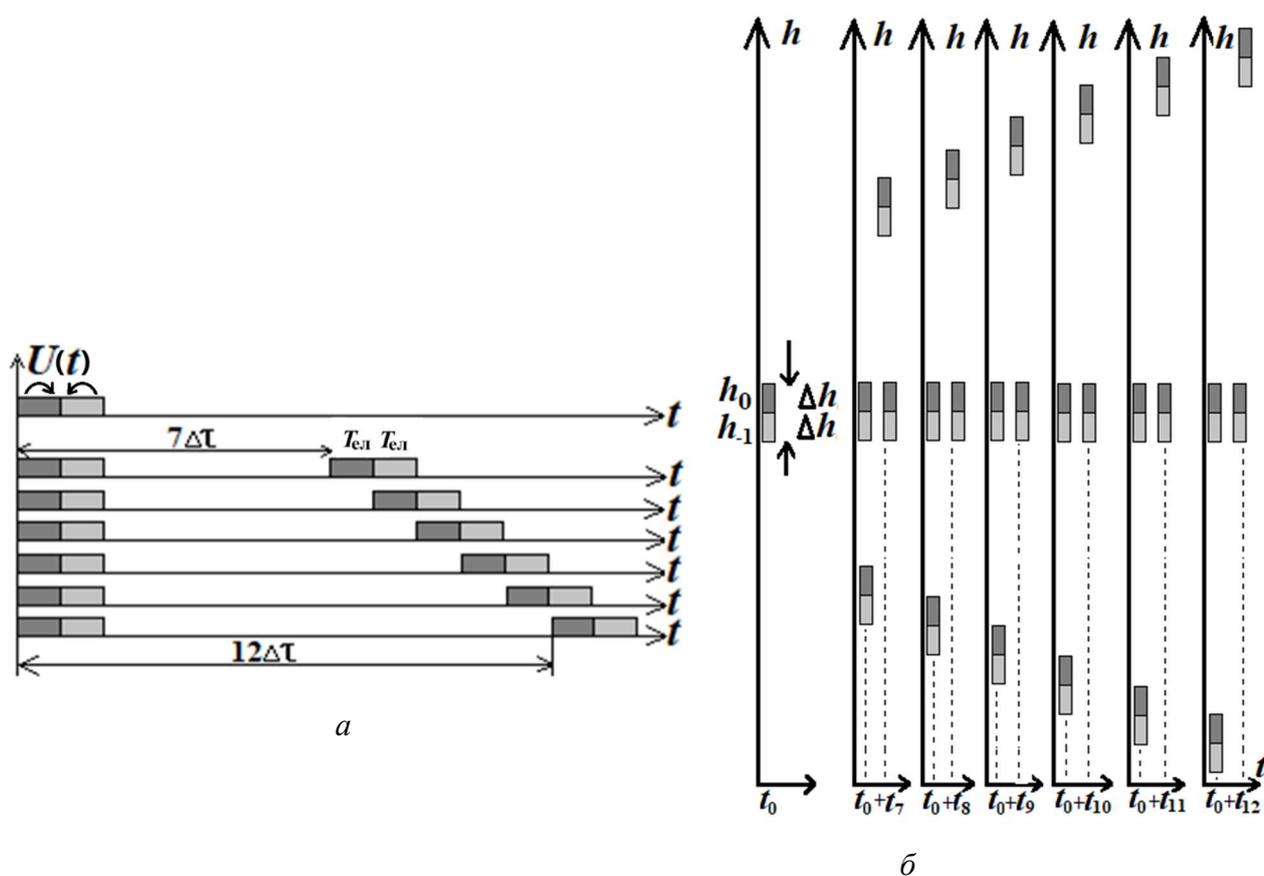


Рисунок 2.10 – Обвідні елементів імпульсу зондування (а), що використовують різні напрямки кругового обертання площини поляризації радіохвилі; процес почергового поширення у просторі коротких пар імпульсу зондування відносно ділянок  $\Delta h = cT_{\text{ел}}/2$  одночасно з центрами на  $h_0$  та  $h_{-1}$  (б)

У цьому режимі необхідно мати вже двоканальний обчислювач, який здійснюватиме перемноження відповідних квантованих відліків  $u(t_i)$ , отримуваних з виходів двох приймачів. У результаті для виділеної висотної ділянки з центром

на  $h_0$  за ті ж сім циклів випромінювання в першому каналі будуть обчислюватися як потужність  $R(0) = u(t_0)^2$  прийнятого сигналу (момент  $t_0$ ), так і шість нормованих ординат  $r(i \cdot \Delta\tau)$  АКФ, де  $i = 7, 8, \dots, 12$ . При цьому в другому каналі у той же час будуть отримані як потужність, так і ординати АКФ, проте для виділеної висотної ділянки з центром на  $h_{-1}$ .

Таким чином, в обчислювачі одночасно буде отримано у два рази більше інформації про значення ординат АКФ. Наступним кроком проводиться вирівнювання інформації по висоті та осереднення на однойменних ділянках результатів визначення двох варіантів АКФ, що дає можливість у  $\sqrt{2}$  раз зменшити результуючу статистичну похибку обчислень ординат, або у стільки ж скоротити протяжність сеансу накопичення даних.

Остаточні вимоги до структури сигналу зондування відповідно задають особливості та реальні можливості радіотехнічної системи радару НР. Природно, що і обчислювальний процесор, і система керування повинні відповідати вибраній структурі кодованого сигналу.

Так, запропонована маніпуляція напрямком кругової поляризації радіохвиль передбачає використання двох каналів передавача і двох каналів приймання. Їх структура є наступною (рис. 2.11). Циркулярно поляризований зондувальний сигнал формується приймально-передавальною антеною з двома ортогонально розташованими вібраторами, на які подаються сигнали від передавачів з різницею фаз у  $90^\circ$  (через перемикачі приймально-передавальної антени АП1 і АП2). Маніпулювання напрямком кругової поляризації забезпечується відповідною зміною фази сигналу збудження передавача від блоку гетеродинів. При зміні фази сигналу збудження першого або другого передавача на  $90^\circ$  відбувається відповідна зміна напрямку обертання вектора напруженості електричного поля випромінюваної радіохвилі.

Приймання сигналів НР з круговою поляризацією здійснюється тими ж вібраторами у паузі між випромінюваннями зондувального сигналу. Сигнали від них через антенні перемикачі АП1 і АП2 надходять на входи балансного моста, налаштованого на приймання сигналу з робочою довжиною хвилі  $\lambda_0$ .

Для реалізації цього режиму розроблено два керованих фазообертача, через які сигнали збудження подаються на передавачі. Почергове фазування вхідних сигналів передавача ( $0^{\circ}/90^{\circ}$  та  $90^{\circ}/0^{\circ}$ ) здійснюється під контролем сигналів з системи керування. Необхідне фазування прийнятих сигналів з круговою поляризацією здійснюється фазообертачем на вході 1 кільцевого мосту.

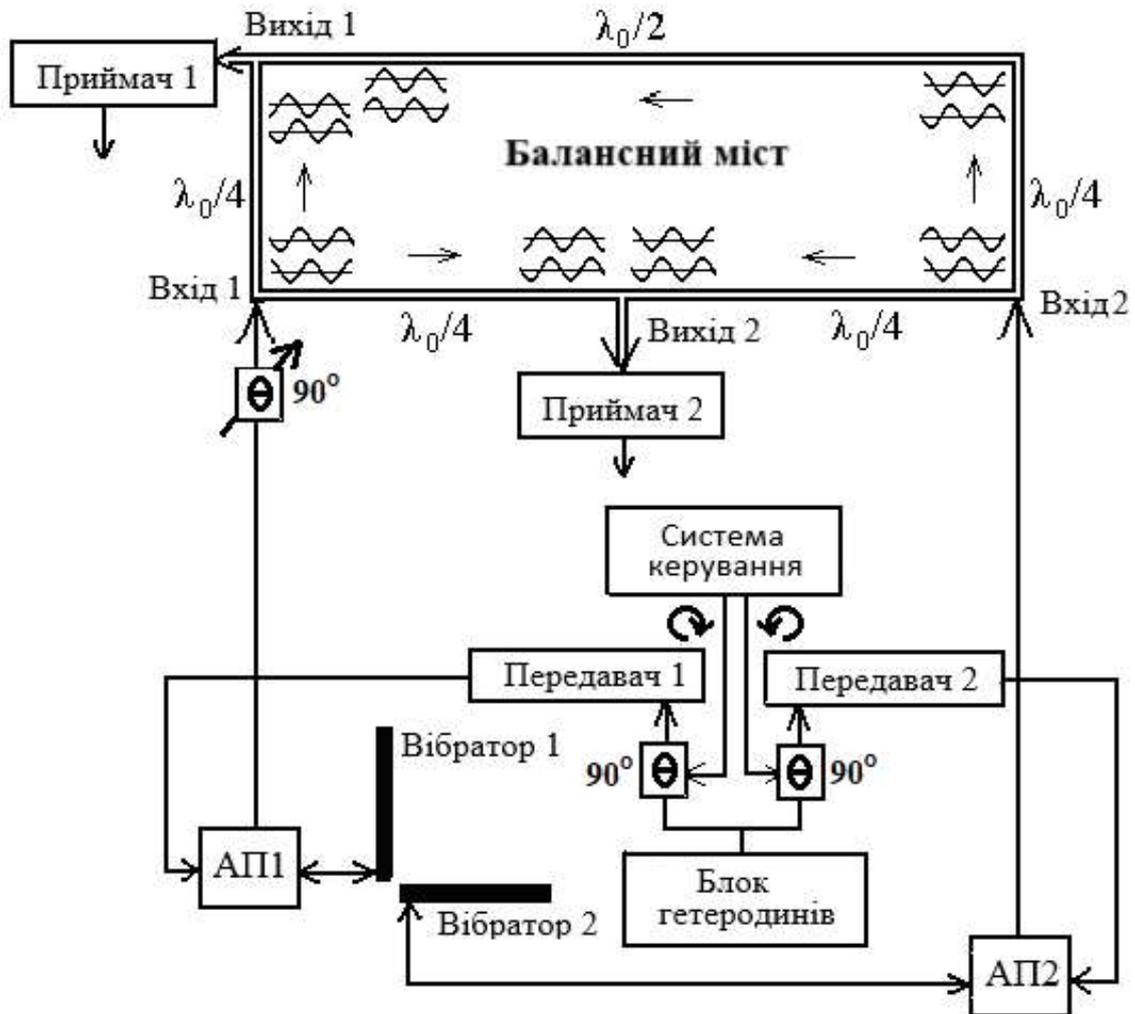


Рисунок 2.11 – Система випромінювання та приймання сигналів з різними напрямками кругової поляризації

Сигнали перемикавання фаз від системи керування по черзі надходять на фазообертачі перед передавачами, внаслідок чого під час випромінювання першого елемента (права кругова поляризація) фаза високочастотного коливання на шляху до першого передавача зсувається на  $90^\circ$  відносно сигналу на шляху до

другого передавача. При цьому на входи кільцевого моста дві лінійно поляризованих ортогональних компоненти сигналу надходять у протифазі, в результаті на виході 2 вони компенсуються, а на виході 1 присутній їх сумарний вклад (див. верхні епюри на плечах моста). І навпаки, при випромінюванні наступних елементів імпульсу (ліва кругова поляризація) фаза високочастотного коливання на шляху до другого передавача зсувається на  $90^\circ$  відносно сигналу на шляху до першого передавача. У цьому випадку на входи кільцевого мосту сигнали надходять синфазно, тобто на виході 1 вони компенсуються, а на виході 2 присутній їх сумарний сигнал (див. нижні епюри).

Після синхронного детектування сигнали з виходів приймачів подаються на двоканальний корелятор з блоками АЦП на входах. Ця система обчислювача реалізується у вигляді, що наведений на рис. 2.12.

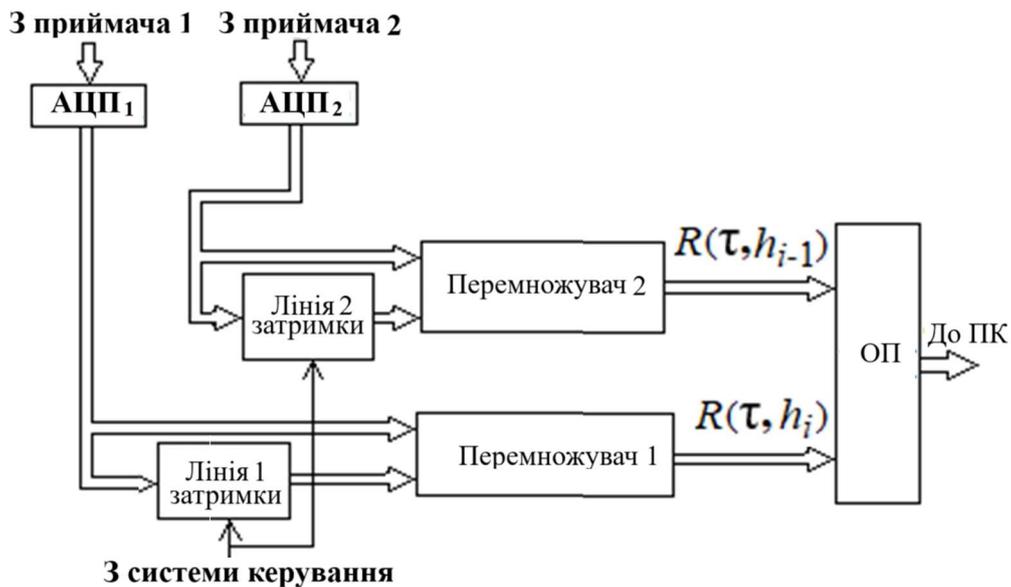


Рисунок 2.12 – Двоканальний обчислювальний процесор для розрахунку ординат АКФ сигналу розсіяння

З системи керування передавачами сигнали поступають і на керування значеннями у лініях затримки обчислювачів. Коли випромінюються одиночні імпульси, то за рахунок нульової затримки реалізується алгоритм накопичення вздовж висоти значень потужності прийнятого сигналу. А коли випромінюються

здвоєні пари імпульсів, то відповідно до взаємного їх положення у кожному обчислювачі відбувається синхронна зміна значень і кореляційних затримок, тобто розраховуються всі наступні ординати АКФ.

Як правило, значення затримки в кореляційних каналах кратне все тому ж кроку  $\Delta t$  дискретизації прийнятого сигналу [24, 25]. Така структура процесора дозволяє на виходах каналних перемножувачів отримувати весь висотний розподіл ординат АКФ.

## 2.5. Режим випромінювання складеного трьохелементного імпульсу

У наступній модифікації [23–25] елементи імпульсу зондування скомпоновані таким чином, щоб одночасно отримувати інформацію з усього висотного інтервалу, тобто від 100 до 1000 км. Для цього сукупність необхідних властивостей сигналу формується в одній посилці, а саме:

- сигнал зондування з круговим обертанням площини поляризації організується як дискретно-частотний, тобто він складається з елементів, які мають різні значення частоти випромінювання (рис. 2.13);

- положення елементів у сигналі таке, що той із них, який призначено для зондування більших висот, формується на початку посилки, а елементи, призначені для нижніх висот, завершують посилку.

Виходячи з цього правила, на частоті  $f_1$  для досліджень верхніх висот формується довгий елемент тривалістю  $T_{ел1}$ . У цей же час у нього на частоті  $f_2$  врізається пара коротких елементів тривалістю  $T_{ел2}$  з відстанню між ними, яка від випромінювання до випромінювання періодично змінюється по правилу, описаному в п. 2.3. У даному випадку значення цієї відстані вибирають так, щоб для нижніх висот все так же розраховувалися  $n$  ординат АКФ.

Також в одному із випромінювань разом з частотою  $f_1$  на частоті  $f_2$  випромінюється лише короткий елемент пари.

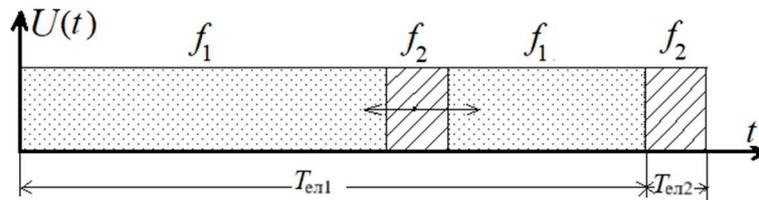


Рисунок 2.13 – Складений трьохелементний імпульс

У цьому випадку на загальний вихід схеми антено-фідерного тракту приймальної системи (рис. 2.14) одночасно під'єднано два приймачі, що налаштовані відповідно на приймання сигналу на частотах  $f_1$  і  $f_2$ . Після кожного приймача працюють два корелятори відповідного типу.

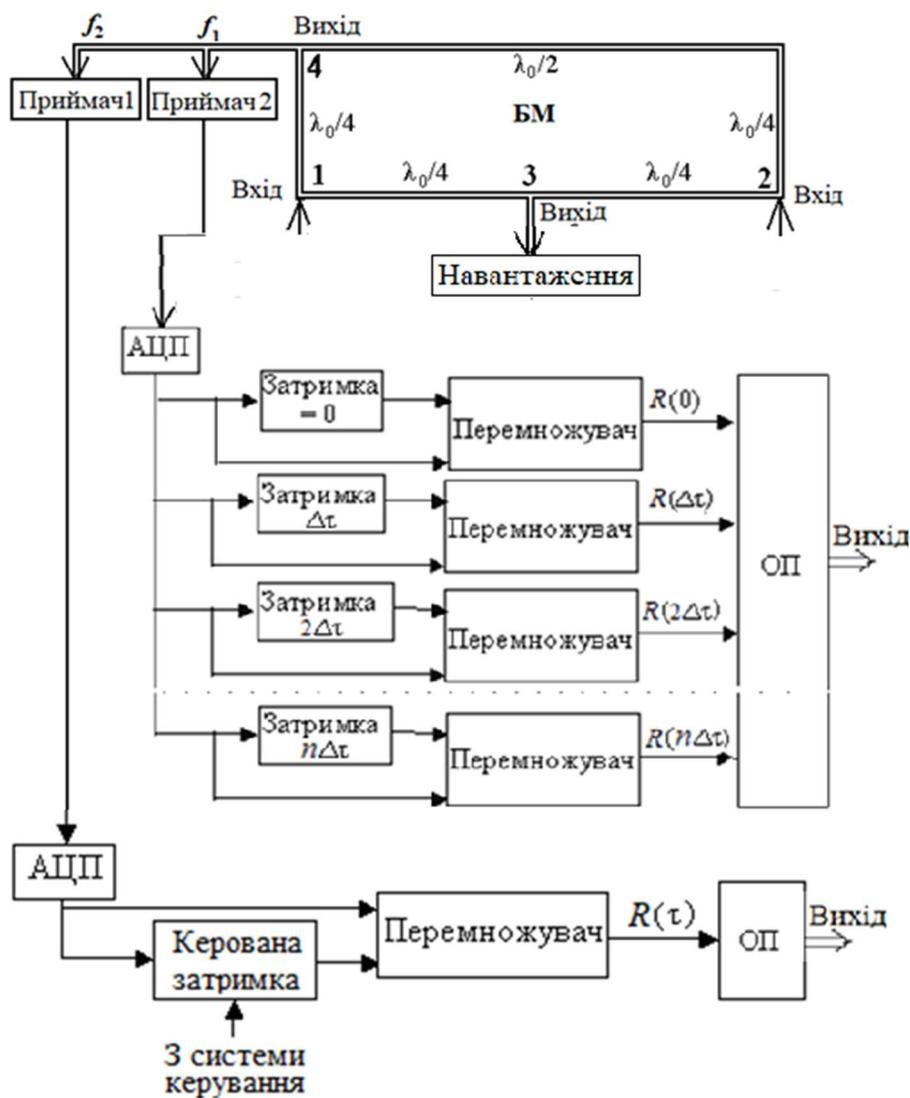


Рисунок 2.14 – Система отримання двох типів АКФ з різною кореляційною затримкою для випадку використання складеного трьохелементного імпульсу зондування

Недолік такого режиму у тому, що хоч для кореляційних вимірювань і став доступним весь висотний інтервал, проте форма протяжного елемента  $T_{ел1}$  імпульсу із-за наявності в ньому “заважаючого” першого рухомого елемента  $T_{ел2}$  на частоті  $f_2$  стала специфічною, і це потрібно додатково враховувати при обробці викликаного ним розсіяння. Також залишилися властиві для здвоєних радіоімпульсів некорельовані паразитні складові з суміжних висот.

## 2.6. Режим випромінювання складеного трьохелементного імпульсу зі зміною напрямку обертання площини поляризації

Наступний режим випромінювання імпульсу зондування складної структури [23-24], як і в попередньому варіанті, спрямований на отримання інформації про значення АКФ сигналу розсіяння одночасно з усіх висотних діапазонів. Але при цьому він вміє “обминати” заважаючі вклади сигналів від суміжних висотних ділянок, що виникають при перемножуванні відліків від здвоєних радіоімпульсів. Для цього парні елементи при випромінюванні передавачам пропонується формувати не тільки на іншій частоті, але і з протилежними напрямками кругового обертання площини поляризації радіохвилі (рис. 2.15). Також перевагою такого підходу є те, що одинарний імпульс на частоті  $f_2$  випромінювати не потрібно.

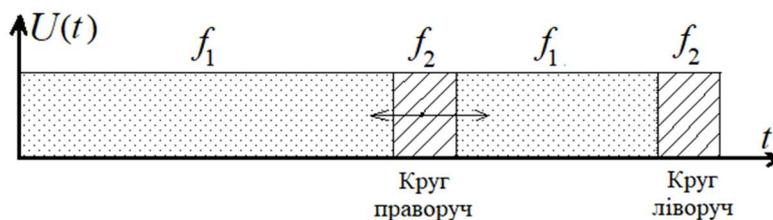


Рисунок 2.15 – Складений трьохелементний імпульс зі зміною напрямку обертання площини поляризації

Для реалізації такого режиму потрібно мати вже три незалежні радіоканали (рис. 2.16). У першому з них для розрахунку АКФ з верхніх висотних ділянок

приймається сигнал розсіяння, що є наслідком випромінювання довгого радіоімпульсу на частоті  $f_1$  тривалістю  $T_{\text{ел1}}$ . У той же час у другому і третьому радіоканалах на частоті  $f_2$  з нижніх ділянок незалежно один від одного приймаються сигнали від коротких імпульсів тривалістю  $T_{\text{ел2}}$  протилежних напрямків обертання, що виключає перехресне перемноження паразитних відліків від сусідніх висот.

Як результат, при перемножуванні сигналів з цих двох радіоканалів буде отримана вже взаємна автокореляційна функція (ВКФ) сигналу розсіяння. А так як довжина випромінюваної хвилі  $\lambda_0$  при протилежних напрямках обертання коротких елементів залишилася незмінною, то в обох каналах розсіяння буде визначатися однією і тією ж, тобто однаковою гармонікою. Це означає, що результуюча функція буде еквівалентна АКФ з попереднього режиму (п. 2.5), за винятком деякого поправкового коефіцієнту через різницю в швидкості поширення радіохвиль з протилежними напрямками обертання.

Таким чином, у даному пристрої потрібно мати вже три приймачі на відповідних частотах і два корелятори різної структури. Вихідний сигнал першого приймача використовується для розрахунку параметрів НР сигналу відносно довгого імпульсу з висотним розрізненням  $\Delta h_1 = cT_{\text{ел1}}/2$ , а вихідний сигнал другого і третього приймачів – зі значно кращим розрізненням  $\Delta h_2 = cT_{\text{ел2}}/2$ . При цьому нема потреби випромінювати одиночний імпульс пари, тому що й без нього є можливість статистичного накопичення  $2(n-1)$  елементів потужності.

При цьому структура другого корелятора, призначеного для розрахунку взаємнокореляційної функцій прийнятого сигналу згідно виразу

$$R(n\tau, h) = \sum_{i=1}^m u_i(t)u_{i+n}(t), \quad (2.3)$$

(де  $u_i$  – квантовані значення сигналу,  $m$  – кількість усереднень на протязі сеансу), для цього випадку повинна мати наступний вигляд (рис. 2.16). У ньому до структури блоку взаємної кореляційної обробки вводяться ще два елементи обчислення потужності сигналу згідно виразу

$$R(0, h) = \sum_{i=1}^m u_i^2(t). \quad (2.4)$$

Результати зведення в квадрат, отримані на їх виходах, також потрапляють в оперативну пам'ять, у якій вони будуть вирівняні вздовж шкали висот перед їх статистичним усередненням.

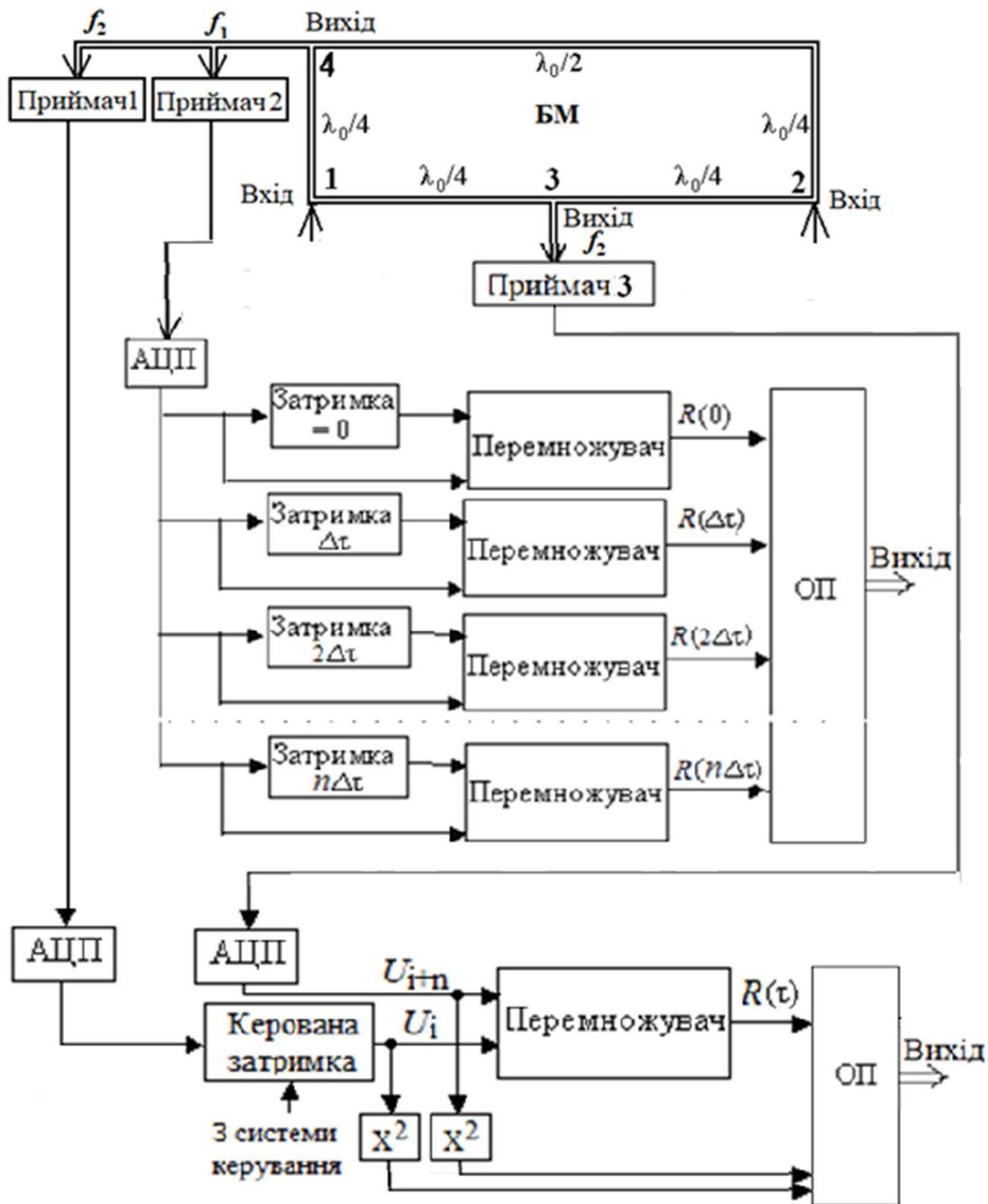


Рисунок 2.16 – Система отримання АКФ і ВКФ для випадку трьохелементного імпульсу зондування зі зміною напрямку обертання площини поляризації радіохвилі

## 2.7. Режим випромінювання багаточастотного імпульсу зондування

Так як недоліком попередніх варіантів, де використовуються парні елементи імпульсу, є вимушене збільшення часу накопичення по кожній ординаті АКФ, то деякі автори пропонують наступний варіант формування структури сигналу зондування, при якому дещо скорочується загальна тривалість сеансу. Передбачається, що можна використовувати не сім, а меншу кількість циклів випромінювання. При цьому залучаються нерівнозначні за значеннями частоти випромінювання елементи, які в цілому формують сукупний сигнал зондування із заданими властивостями.

В цьому випадку цей сигнал реалізується, наприклад, як дискретно-частотний [4], тобто складається з елементів, що представляють собою радіоімпульси, які мають однакові (наприклад, як один із них на рис. 2.17) значення затримок  $T_{ел} = \Delta\tau$  один відносно другого, але мають різні опорні частоти. Приведений радіоімпульс дозволяє після свого випромінювання отримати 5 ординат АКФ сигналу розсіяння для відповідних затримок:  $r(0)$  на частоті  $f_0$ , два  $r(4\Delta\tau)$  на частотах  $f_1$  і  $f_5$ ,  $r(5\Delta\tau)$  на частоті  $f_2$ ,  $r(6\Delta\tau)$  на частоті  $f_3$  та  $r(7\Delta\tau)$  на частоті  $f_4$ .

В цей час в апаратурі радара НР необхідно мати ряд незалежних каналів передавача, кожен з яких працює на свою антену типу фазованої антенної решітки. Це дозволяє формувати потрібний сигнал зондування, розділений на елементи не тільки у часовому, але і у частотному варіанті.

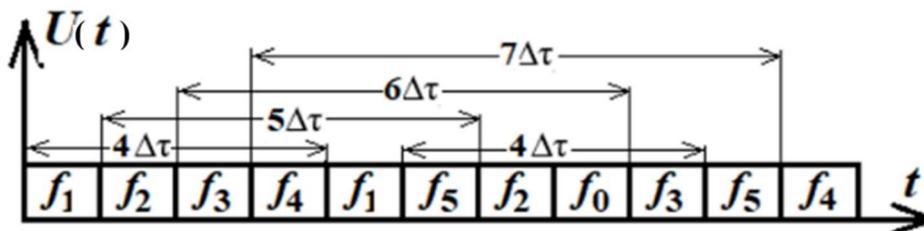


Рисунок 2.17 – Один із варіантів циклу випромінювання багатоелементного імпульсу загальною протяжністю  $T_{имп} = 11T_{ел}$  при різних значеннях опорних частот кожного елемента

Недолік такого підходу в тому, що коли скомпонувати результуючу АКФ для такого сигналу, то вноситься значна похибка із-за неоднозначності умов отримання ординат цього сигналу. При використанні різних частот випромінювання (різних значень  $\lambda_0$ ) не зовсім доречно об'єднувати отримувані ординати в загальну АКФ. Адже всі вони по відношенню один до одного формують дещо звужену (зі збільшенням частоти  $f$ ) форму АКФ. А це потребує в зворотній задачі розсіяння (при ідентифікації по цій АКФ параметрів іоносфери) використання якоїсь дуже складної бібліотеки теоретичних аналогів.

## **2.8. Режим випромінювання кодованих імпульсів зондування**

Для підвищення роздільної здатності при вимірюванні параметрів іоносфери можна використовувати більш складні комбінації елементів у структурі зондувального сигналу. Ефективність вимірювань істотно підвищується, якщо на одній і тій же частоті передавати не звичайну пару, а кілька (п'ять і більше) елементів з певними, більш оптимально вибраними інтервалами між ними. Такі сигнали повинні найкраще сприяти ефективному вивченню варіацій параметрів іоносфери з розрізненням як по висоті, так і у часі. При цьому рівень методологічних і статистичних похибок має задовольняти вимогам, щоб отримані в результаті кореляційних розрахунків характеристики сигналів від локальної іоносферної плазми були основою для подальшого надійного аналізу процесів у навколоземному космічному просторі.

Відповідно до цієї вимоги було використано комп'ютерну програму для пошуку таких комбінацій кодованих елементів у структурі сигналу, які дають змогу розрахувати ординати АКФ при більшій кількості кореляційних затримок. На рис. 2.18 показано результати, знайдені програмою для варіантів використання сигналів, у складі яких є від 4 до 8 елементів [28]. Зокрема, демонструються дві особливі комбінації (виділені темним кольором), які забезпечують рівномірний крок по кореляційній затримці, і на основі яких пропонується один із варіантів модернізації розглянутих вище режимів зондування.

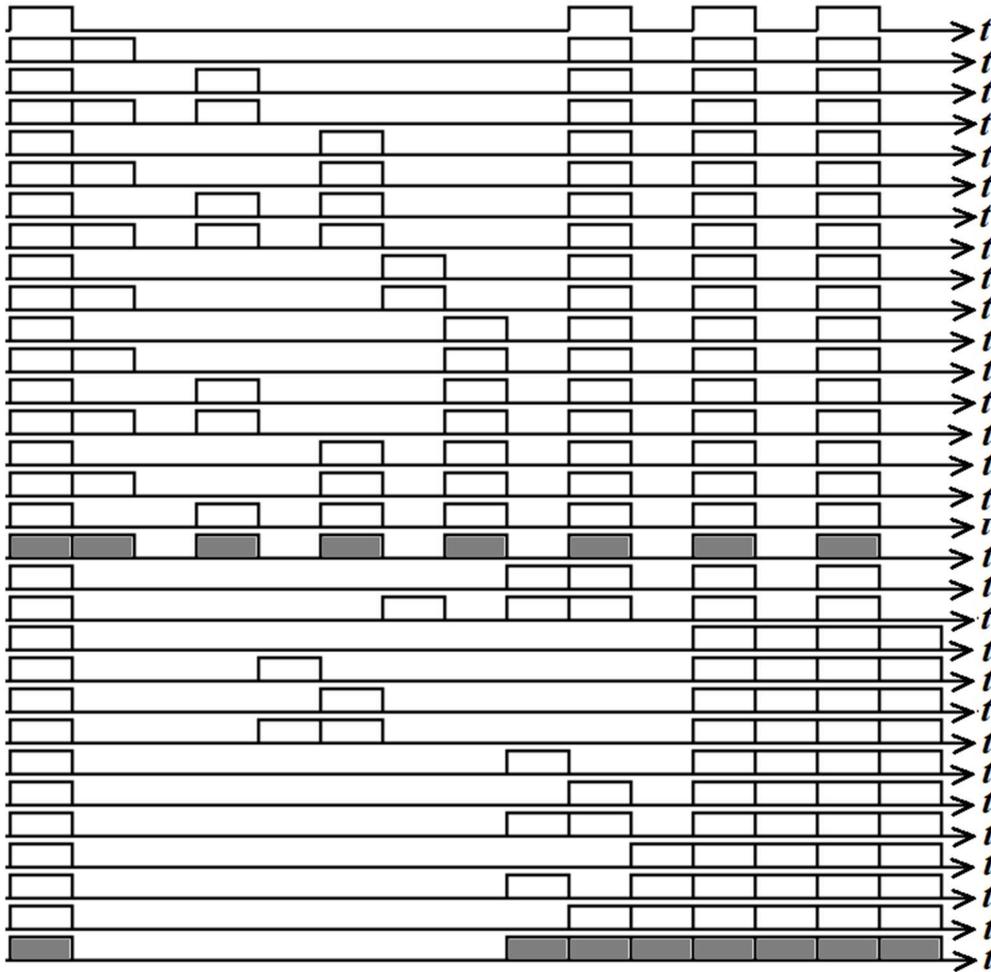


Рисунок 2.18 – Результати пошуку багатоелементних кодованих сигналів, що забезпечують одночасний розрахунок від 3 до 7 ординат АКФ сигналу розсіяння

Слід зазначити, що ці кодовані структури не дають можливості отримати потужність  $R(0)$  сигналу НР для нормалізації ординат АКФ, тобто потрібен ще й одиночний радіоімпульс. Ця проблема вирішується таким чином, щоб у кожній радіолокаційній розгортці, коли випромінюються запропоновані комбінації елементів, додавався ще один, перший елемент на початку випромінювання узагальненого імпульсу. Щоб гарантувати, що розсіяний від нього сигнал не заважає прийманню сигналу розсіяння від інших кодованих елементів, його випромінювання передбачається з протилежним напрямком обертання площини поляризації. Це дозволяє окремо прийняти отриманий від нього сигнал розсіяння і за допомогою властивостей антенно-фідерного пристрою радара НР передати його на свій пристрій обробки.

### 2.8.1. Режим багатоелементного імпульсного зондування нижніх іоносферних діапазонів

Виходячи з вищесказаного, для дослідження іоносфери на висотах поблизу максимуму іонізації та нижче пропонується використовувати зондувальний сигнал, кодова комбінація якого наведена на рис. 2.19, *а*. Його перший елемент випромінюється з правим напрямком обертання площини поляризації радіохвилі, при цьому отриманий ехо-сигнал використовується для визначення потужності з наступним нормуванням ординат АКФ НР-сигналу. Решта елементів, призначених для визначення коефіцієнтів кореляції, випромінюються з лівим напрямком кругової поляризації. У цьому випадку задається однакова тривалість ( $T_{\text{ел}} = 30$  мкс) кожного елемента коду, що забезпечує хорошу роздільну здатність  $\Delta h$  по висоті. Сім результуючих ординат АКФ (рис. 2.19, *б*) досить інформативно відображають характер правої частини цієї функції.

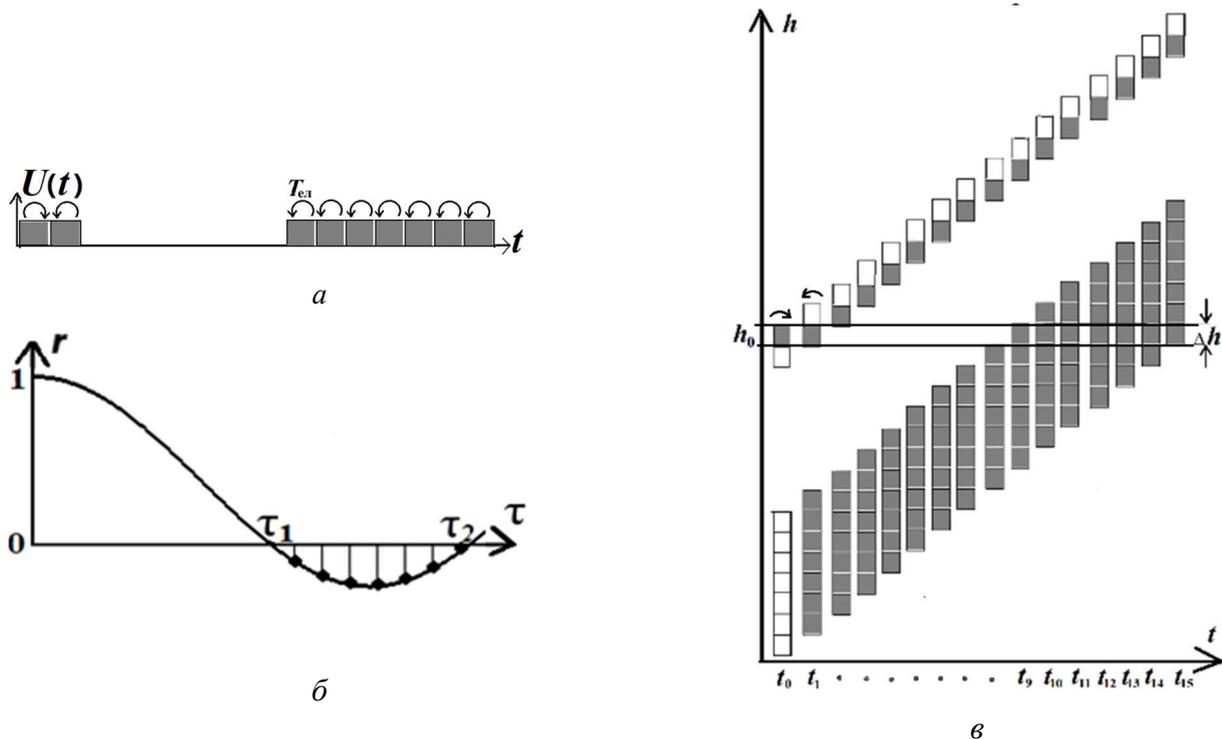


Рисунок 2.19 – Обвідні елементів сигналу зондування (*а*), нормована АКФ сигналу розсіяння для вузької ділянки  $\Delta h$  з центром на висоті  $h_0$  (*б*) та процес поширення кодованого сигналу зондування в просторі (*в*). Стрілки вказують напрямок обертання площини поляризації для кожного елемента зондувального сигналу

Процедура їх отримання продемонстрована на рис. 2.19, в, де зображено процес поширення цього типу кодованого зондувального сигналу в просторі та отримання ехо-сигналів у відповідний час двома незалежними приймачами.

У цьому режимі комп'ютер все так же перемножує відповідні квантовані вибірки  $u_i$ , отримані в момент часу  $t_i$ . У результаті для обраної висотної ділянки з центром на висоті  $h_0$  за один цикл випромінювання розраховуються як потужності сигналу НР (момент  $t_0$ ), так і  $n = 7$  нормованих ординат АКФ:  $r[(i - 1)\Delta\tau] = u_1 u_i / R(0)$ , де  $i = 9, 10, \dots, 15$  (індекси вибірок напруги  $u_i$  у моменти часу  $t_i$ ).

### ***2.8.2. Режим багатоелементного імпульсного зондування верхніх іоносферних діапазонів***

Подібним чином кодовані послідовності можна використовувати для дослідження і верхнього діапазону висот іоносфери. Для цього пропонується використовувати радаром зондувальний сигнал, кодова комбінація якого наведена на рис. 2.20, а. Перший елемент все так же передбачає використання правого напрямку обертання площини поляризації радіохвилі, що дає можливість окремо визначати потужність сигналу НР і з його допомогою нормувати ординати АКФ. Решта елементів, призначених для визначення коефіцієнтів кореляції, випромінюються з лівим напрямком обертання площини поляризації радіохвилі. У цьому випадку задається та ж тривалість  $T_{\text{имп}}$  кожного елемента коду, яка забезпечує високу роздільну здатність по висоті.

Поява іонів водню, що характерно для зовнішньої іоносфери, додатково відображається на зміні форми АКФ у діапазоні кореляційних затримок від 0 до  $\tau_1$  (рис. 2.20, б). Тепер АКФ необхідно інформативно оцінювати вже на всьому інтервалі кореляції, тобто від 0 до  $\tau_2$ , і це забезпечує новий режим, де ординати відображають характер АКФ з рівномірним кроком на цьому інтервалі. Такий варіант визначення ординат АКФ продемонстровано на рис. 2.20, в, де зображено випадок поширення цього типу кодованого зондувального сигналу у просторі та подальше приймання розсіяного сигналу двома незалежними приймачами.

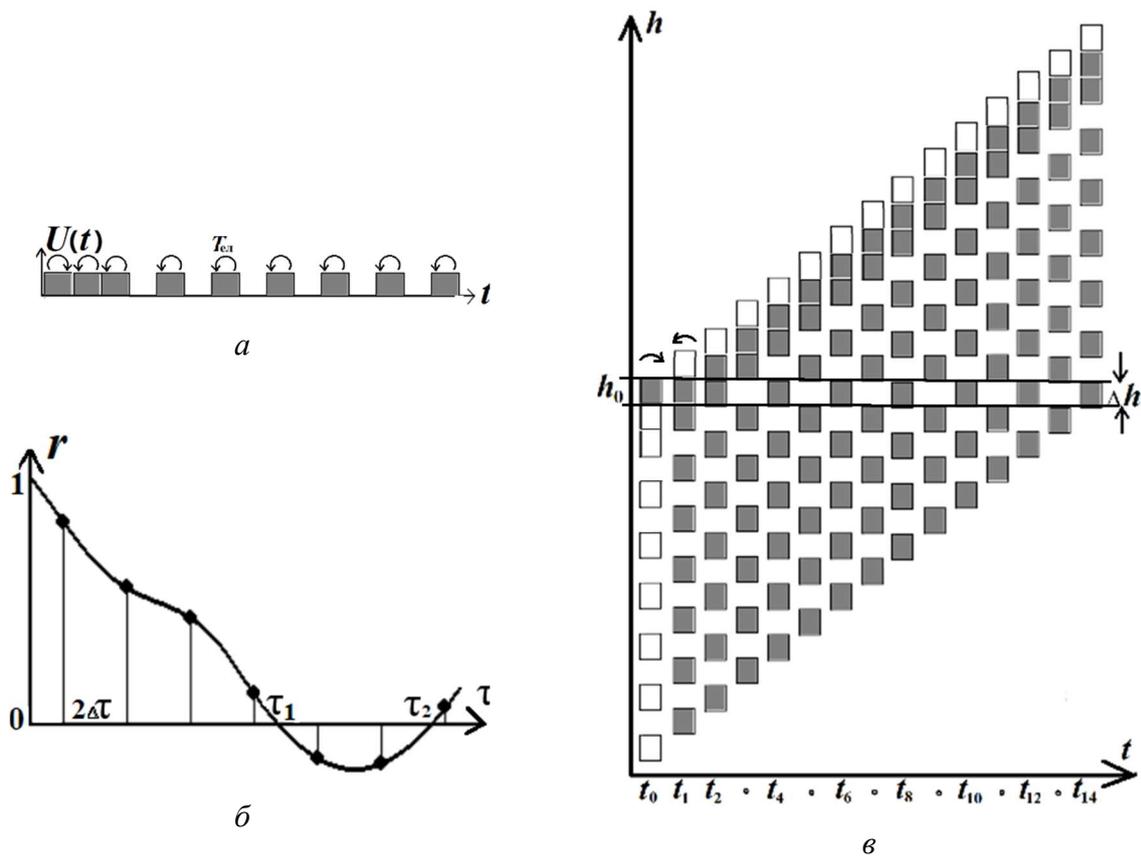


Рисунок 2.20 – Обвідні елементів сигналу зондування (а), нормована АКФ сигналу розсіяння для вузької ділянки  $\Delta h$  з центром на висоті  $h_0$  (б) та процес поширення кодованого сигналу зондування у просторі (в).

У даному режимі система обробки, перемножуючи відповідні квантовані відліки  $u_i$ , реалізує алгоритм розрахунку потужності  $R(0) = u_0^2$  сигналу НР (момент  $t_0$ ) для обраної вузької висотної ділянки з центром на  $h_0$ . У цьому ж циклі випромінювання розраховуються всі  $n = 7$  нормованих ординат АКФ:  $r[(i - 1)\Delta\tau] = u_i u_i / R(0)$ , де  $i = 2, 4, 6, \dots, 14$ .

### 2.8.3. Апаратурна реалізація

Технічна структура системи випромінювання та приймання для цих двох розглянутих варіантів сигналу зондування є наступною (рис. 2.21).

Поляризований по колу сигнал зондування під час роботи радіопередавачів, які мають виходи на свої випромінювачі (вібратори), при зміні на  $90^\circ$  фази збудження першого чи другого передавача може міняти напрямок обертання. Ан-

тенні перемикачі “приймання-передача” і кільцевий міст антено-фідерної системи радару при цьому налаштовані на приймання сигналу з довжиною робочої хвилі  $\lambda_0$ .

При наявності на його входах 1 і 2 сигналів з рівними амплітудами та різницею фаз у  $180^\circ$  (при правому напрямку обертання) результуючий сигнал буде передано тільки на вихід 1. При протилежному напрямку обертання сигнал потрапить тільки на вихід 2. Для реалізації такого режиму призначено два керовані фазообертачі, через які на передавачі подається сигнал збудження. Для їх синхронізації з системи керування поперемінно подаються сигнали перемикання.

Сигнали з виходів приймачів, в яких вони були перетворені, посилені, синхронно детектовані та відфільтровані, подаються на багатоканальний обчислювальний процесор, на входах якого встановлені блоки АЦП (рис. 2.22).

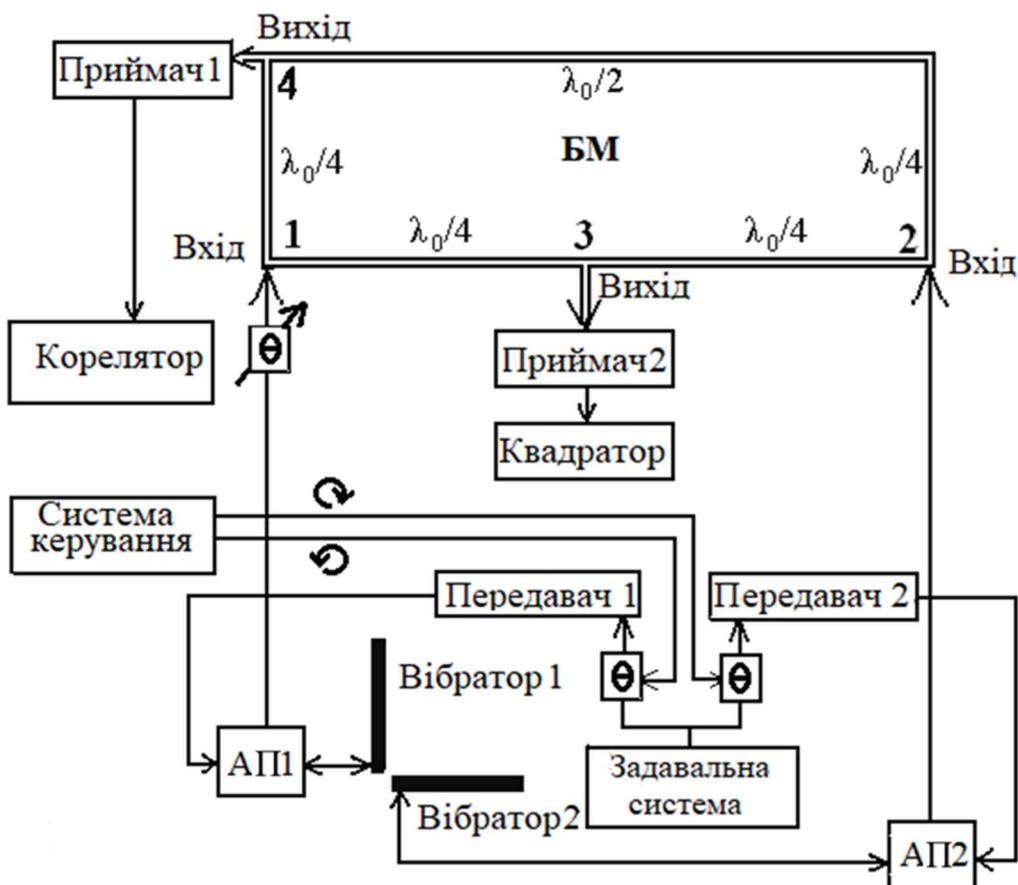


Рисунок 2.21 – Система випромінювання та приймання кодіваних багатоелементних сигналів зі зміною напрямку обертання площини поляризації

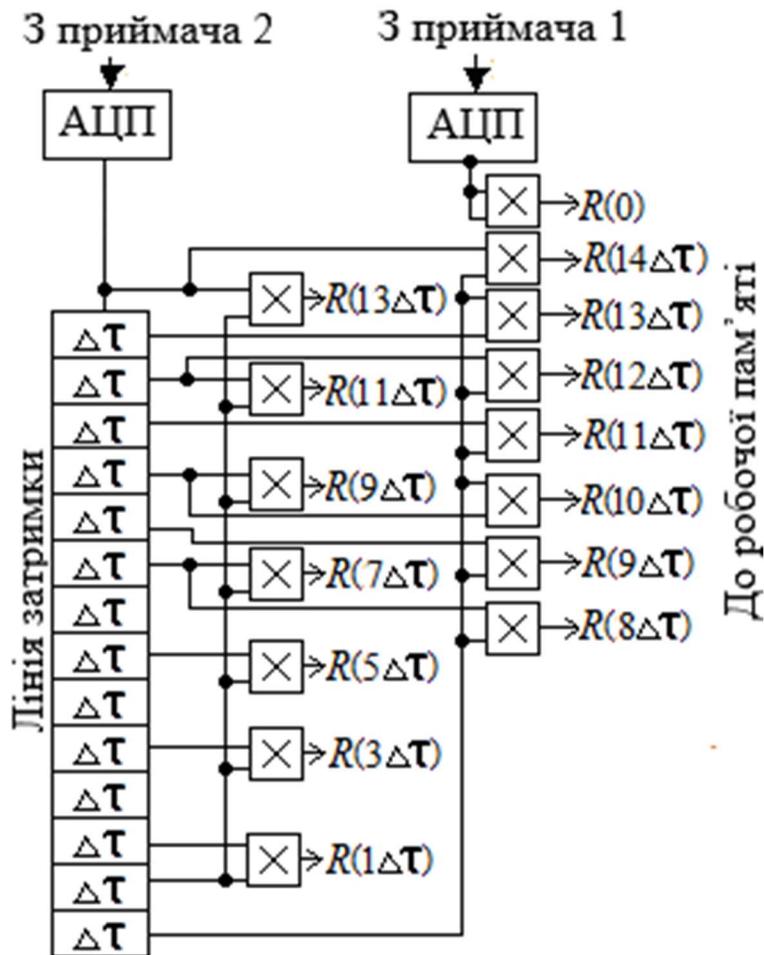


Рисунок 2.22 – Багатоканальний обчислювальний процесор для розрахунку ординат АКФ кодового сигналу розсіяння

Структура даного процесору дозволяє розраховувати потужності та автокореляційні функції прийнятого сигналу по чергово, тобто в залежності від ситуації – як для випадку застосування режиму зондування, зображеного на рис. 2.19, так і для режиму, представленого на рис. 2.20. Затримка у кореляційному каналі є кратною кроку дискретизації  $\Delta\tau$ . Така структура процесора дозволяє отримувати синхронно змінювані з висотою результати на виходах каналних перемножувачів. У кожен момент часу  $t_i$  всі ординати АКФ відносяться до загальної висотної ділянки на висоті  $h_i$ . Ці результати заповнюють відповідний стовпець у робочій пам'яті, де вони статистично накопичуються від розгортки до розгортки протягом сеансу вимірювання.

## 2.9. Універсальний режим випромінювання кодованих імпульсів зондування для одночасного дослідження верхніх і нижніх висотних діапазонів

Як було сказано вище, у [28] приведено результати розрахунку за допомогою комп'ютерної програми ряду комбінацій кодованих елементів у структурі сигналу зондування протяжністю  $T_{\text{імп}}$ . Основним правилом при їх пошуку було те, щоб, як і раніше, найбільш активний елемент розташовувався на початку кодової послідовності. Саме за допомоги цього елемента розраховуються ординати кореляційної функції шляхом його перемноження на всі наступні елементи. Дійсним результатом при цьому вважаються ті складові перемножень, що відносяться до вибраної висотної ділянки  $\Delta h$  з центром на  $h_0$ , яку досяг цей перший елемент.

Селекції саме корисних складових перемножень сприяє особливий характер розсіяння. Він полягає в тому, що у напрямку поширення імпульсу вздовж висоти кореляційні зв'язки у просторі між елементами імпульсного об'єму зберігаються на інтервалі відстаней, співмірному з дебаєвським радіусом екранування  $r_d$  (долі метра). А так як відстань між досліджуваними висотними ділянками більше цього радіусу, то сигнали, розсіяні на них, один до одного некорельовані, і при перемноженні та статистичному накопиченні дадуть нульовий результат.

Запропоновані у п. 2.8 коди дозволяють при загальній довжині імпульсу зондування, що може містити до 15 кодованих елементів, використовувати лише 8 з них в якості активних, тобто вийти на розрахунок лише 7 ординат АКФ, та і то по черзі їх використання у процесі досліджень нижнього, або верхнього висотного діапазонів. Нижче пропонується універсальний режим випромінювання кодованих імпульсів зондування, який дозволяє одночасно досліджувати весь діапазон висот.

### 2.9.1. Алгоритмічна реалізація

У програму синтезу сигналів зондування можна закласти алгоритм пошуку особливих комбінацій розташування кодованих елементів, а саме – поставити вимогу знаходження такого варіанту, щоб ці елементи сприяли одночасній реалізації описаних у п. 2.8 двох режимів випромінювань. Тобто такий сигнал повинен забезпечувати максимально можливі роздільні здатності як по висоті, так і по кореляційній затримці при розрахунках форми АКФ сигналу розсіяння на висотних ділянках як нижньої, так і верхньої іоносфери.

З оглядом на такі вимоги у [29] запропонована модернізація процесу кодування імпульсів, мета використання яких наступна:

- повністю заповнити імпульс активними елементами, наприклад, на різних частотах (слідкуючи, щоб спектри визваних ними сигналів розсіяння не перекривалися) та з різним напрямком обертання площини поляризації, що в цілому максимально збільшить випромінюючу енергію імпульсу;

- забезпечити оптимальний режим роботи передавачів радара, не допускаючи хаотичного, від елемента до елемента, їх включення та виключення всередині імпульсу, що шкідливо відбивається на їх технічному стані та визиває небажані перехідні процеси в антенних перемикачах;

- в одній радіолокаційній розгортці із задовільною точністю отримати ординати АКФ при аналізі сигналу розсіяння одночасно як від нижнього, так і від верхнього висотного діапазонів.

Результати синтезу багатоелементних кодованих сигналів, що задовільняють цим вимогам, представлено на рис. 2.23 у вигляді однієї із груп. Елементи чорного кольору передбачається випромінювати на частоті  $f_1$ , а сірого кольору – на частоті  $f_2$ , причому частоти необхідно рознести так, щоб спектри визваних ними сигналів розсіяння не перекривалися.

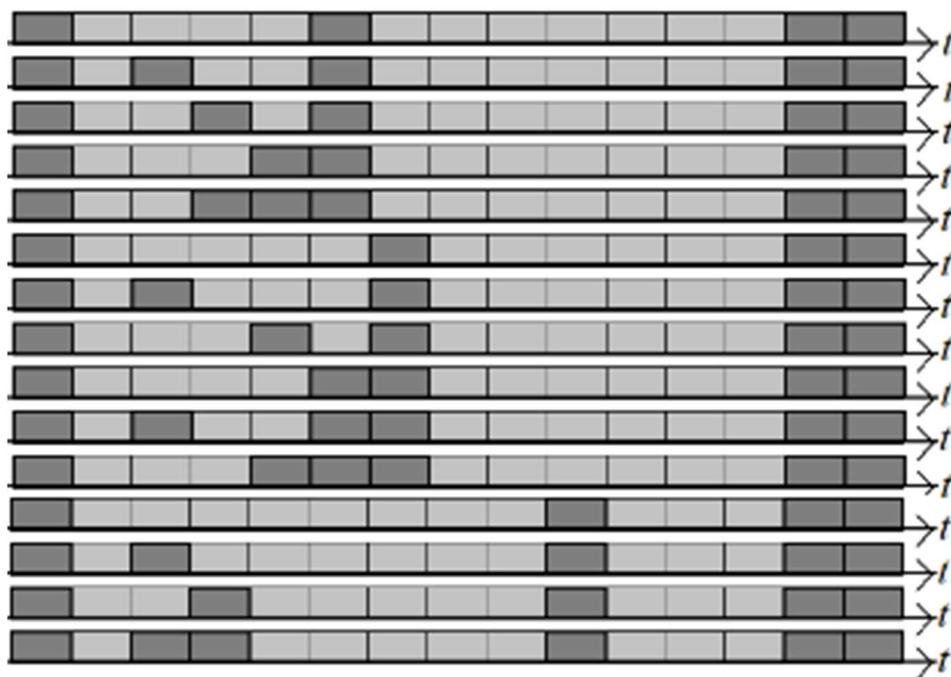


Рисунок 2.23 – Результати пошуку багатоелементних кодованих сигналів, які забезпечують отримання одночасно до 13 ординат АКФ сигналу розсіяння

Аналіз можливостей цих сигналів показав наступне.

В табл. 2.1 винесено наступну інформацію. Перший рядок – це номери запропонованих варіантів сигналів, починаючи з верхнього на рис. 2.23. Другий рядок – загальна кількість взаємних перемножень між елементами всередині цих сигналів, які можна реалізувати. Третій рядок – та кількість ординат АКФ, які при цих перемноженнях можна отримати.

Табл. 2.1 Інформація про розрахунок ординат АКФ

Номер сигналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Загальна кількість перемножень	7	12	11	7	9	7	12	11	7	13	9	7	12	11	15
Кількість отриманих ординат	7	11	10	7	8	7	11	11	7	12	9	7	11	10	13

Інформацію з даної таблиці для більшої наочності можна представити графічно (рис. 2.24, *a*). При співставленні цих 15 варіантів сигналів зондування можна спостерігати різні випадки розташування ординат АКФ, що розраховуються вздовж осі кореляційних затримок. При цьому крапки більшого розміру вказують на кращу статистику обчислень (ці ординати отримано двічі).

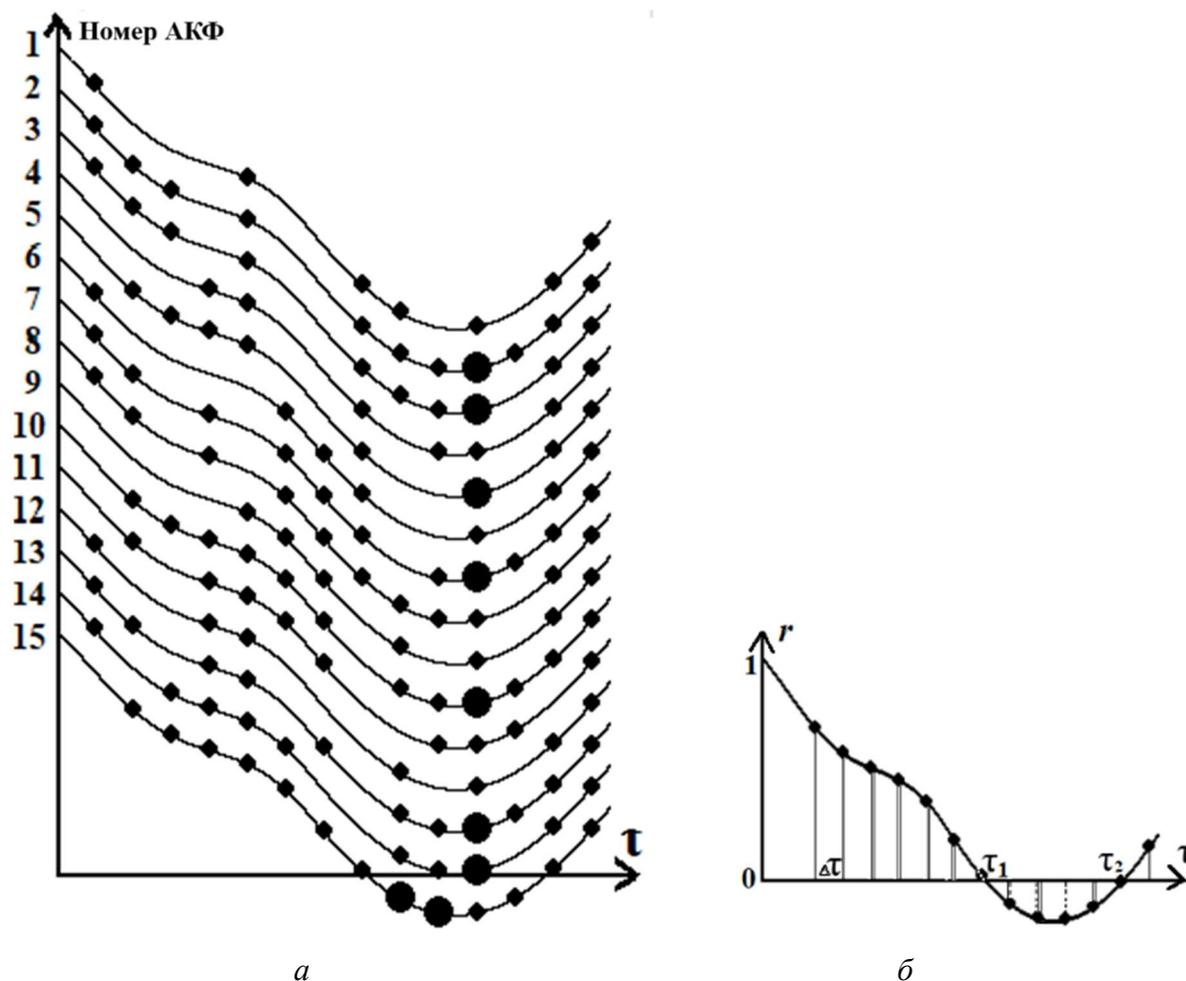


Рисунок 2.24 – Варіанти розташування ординат АКФ сигналу розсіяння при використанні різних сигналів зондування з рис. 2.23 (*a*), та нижній варіант (*б*), як найбільш оптимальний

Виходячи з представленої інформації, для подальшого використання пропонується кодований сигнал з нижнього рядка на рис. 2.23. Він дозволяє отримати достатню кількість рівномірно розподілених ординат АКФ (рис. 2.24, *б*), а дрібний крок їх розташування по кореляційній затримці задовольняє вимогам

щодо подальших надійних розрахунків параметрів іоносфери одночасно як на нижніх, так і на верхніх висотних діапазонах.

Таким чином, приймаючи ці умови розташування кодованих елементів сигналу зондування, в кінцевому вигляді при випромінюванні він буде виглядати так, як це зображено на рис. 2.25.

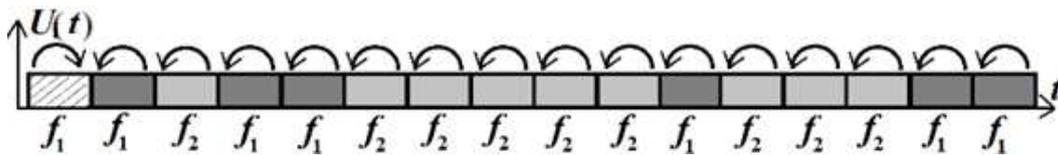


Рисунок 2.25 – Обвідні кодованих елементів імпульсу універсального режиму зондування

Перший елемент цього сигналу буде мати правий напрямок обертання у просторі площини поляризації радіохвилі, що дозволяє в окремому приймачі отримувати потужність сигналу розсіяння для наступного нормування ординат АКФ. Всі останні елементи, які призначено для обчислень коефіцієнтів кореляції – з лівим напрямком обертання. У цьому випадку задається все така ж довжина  $T_{\text{ел}} = 30$  мкс кожного елемента коду, яка забезпечує дуже якісне висотне розрізнення  $\Delta h = cT_{\text{ел}}/2 \approx 4,5$  км.

Процес поширення у просторі елементів кодованого імпульсу окремо на частотах  $f_1$  і  $f_2$  представлено на рис. 2.26 і рис. 2.27. Вони демонструють можливість отримання ординат АКФ шляхом перемноження не тільки першого елемента імпульсу на останні, але і за рахунок інших взаємних перемножень між елементами.

У кінцевому вигляді отримані ординати нормованої АКФ сигналу розсіяння будуть мати вигляд, як на рис. 2.24, б. Одиночні вертикальні лінії на графіку означають, що дані ординати (за номерами 2, 3, 9, 13 і 14) будуть отримані на частоті  $f_1$ . А також на ній же будуть отримані ординати за номерами 4, 5, 6, 7, 10 і 12 (здвоєні лінії). На частоті  $f_2$  будуть отримані ординати за номерами 8, 9, 10 і 11 (штрихові лінії).

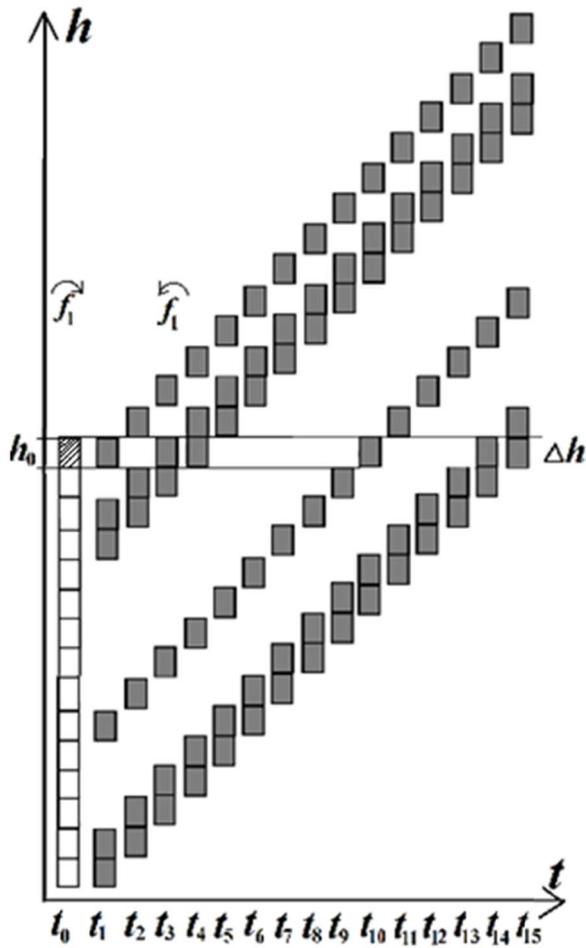


Рисунок 2.26 – Процес поширення у просторі елементів кодованого імпульсу на частоті  $f_1$

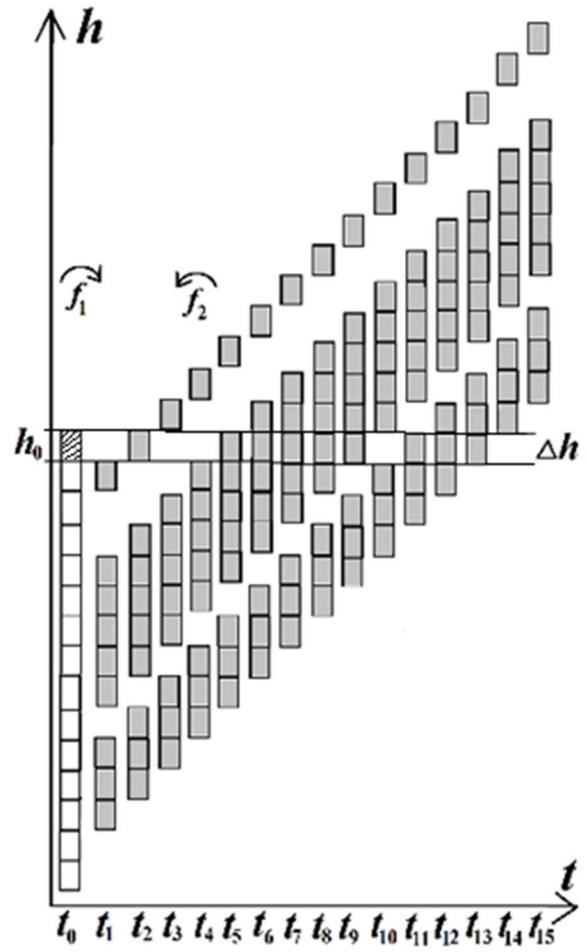


Рисунок 2.27 – Процес поширення у просторі елементів кодованого імпульсу на частотах  $f_1$  і  $f_2$

### 2.9.2. Апаратурна реалізація

Склад радіотехнічного блоку апаратури радару НР у цьому випадку повинен відповідати вибраній структурі кодованого сигналу. У зв'язку з цим, якщо використовується маніпуляція напрямком обертання площини поляризації, то мається на увазі наявність двох каналів приймання сигналу на частоті  $f_1$ . А введення другої частоти  $f_2$  випромінювання потребує ще й третього приймального каналу. Дана структура пропонується наступною (рис. 2.28).

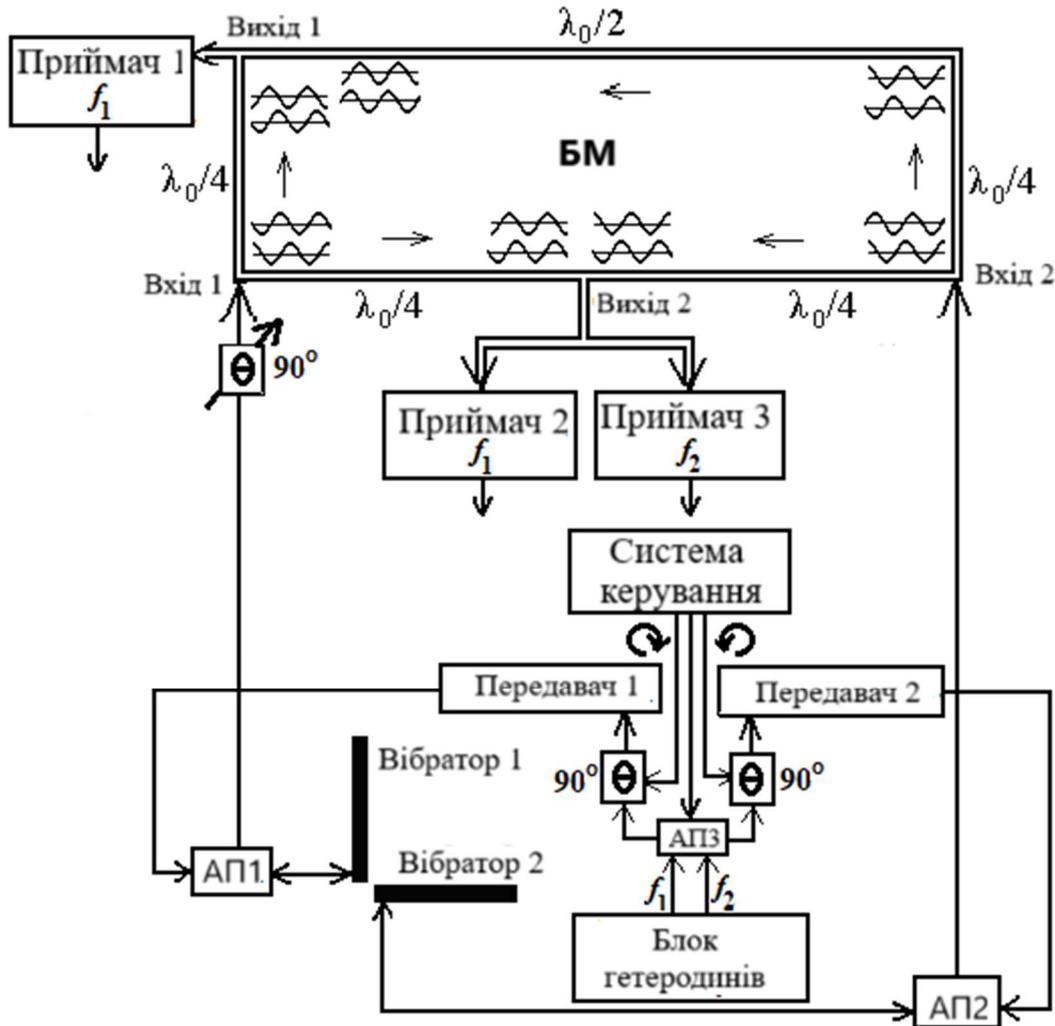


Рисунок 2.28 – Система випромінювання та приймання багатоелементних кодованих сигналів універсального режиму зондування

Для формування поляризованого по колу сигналу все так же потрібні два радіопередавачі, режим випромінювання за допомогою яких задає система керування радару НР.

Поперемінно змінюючи на  $90^0$  через керовані фазообертачі початкову фазу високочастотного заповнення, яке подається на них, підсилений сигнал за допомогою вібраторів, розташованих у рупорі антени, відповідно змінює свій напрямок обертання.

Приймаючи у паузах між циклами випромінювання сигнал розсіяння через перемикачі АП1 і АП2, на входах кільцевого моста вони будуть присутні у фазі

(нижні епюри), чи у протифазі (верхні епюри) у залежності від напрямку обертання площини поляризації. Відповідно, результат їх сумування виділятиме приймач 1 (правий напрямок обертання) або приймач 2 (лівий напрямок), які налаштовані на селекцію сигналу на частоті  $f_1$ .

В цю структуру введено додатковий приймач 3, налаштований на селекцію сигналу на частоті  $f_2$ . Він буде виділяти сигнал розсіяння, коли при лівому напрямку обертання система керування радаром за допомогою перемикача АПЗ змінює частоту випромінювання на  $f_2$ .

З виходів приймачів результати подаються на спеціалізований обчислювальний процесор (рис. 2.29) з блоками АЦП на входах та з наступними лініями затримки, що мають крок  $\Delta\tau = T_{\text{ел}}$  дискретизації. Перший стовпчик перемножувачів у ньому для ділянки на висоті  $h_0 = ct_0/2$  протяжністю  $\Delta h$  реалізує розрахунок ординат згідно алгоритму, коли сигнали розсіяння від інших елементів помножуються на сигнал, визваний тільки першим елементом. Тобто  $R((i-1) \cdot \Delta\tau) = u_1 u_i$ , де  $i = 3, 4, 10, 14, 15$  (індекси моментів відліків напруги  $u_i$  на протязі розгортки в моменти часу  $t_i$ ). Другий стовпчик реалізує вже взаємне перемноження між собою сигналів від всіх інших елементів, а саме:  $R(k \cdot \Delta\tau) = u_i u_j$ , де  $k = 7, 12, 6, 10, 4, 5$  відповідно при  $i = 3, 3, 4, 4, 10, 15$ ;  $j = 10, 15, 10, 14, 14, 10$ . Третій же стовпчик розраховує ординати АКФ сигналу розсіяння, прийнятого на частоті  $f_2$ , тобто:  $R(k \cdot \Delta\tau) = u_i u_j$ , де  $k = 8, 9, 10, 11$  відповідно при  $i = 5, 2, 2, 2$ ;  $j = 13, 11, 12, 13$ .

Також у момент  $t_0$  для ділянки на висоті  $h_0$  можна отримати потужність сигналу НР як  $R(0) = u_0^2$ .

Результат розрахунку всіх ординат АКФ на виходах цього процесора, який фіксується в робочій пам'яті для подальшої обробки, в кожний момент часу відноситься до загальної для всіх висотної ділянки, номер якої змінюється в процесі поширення імпульсу вздовж напрямку випромінювання.

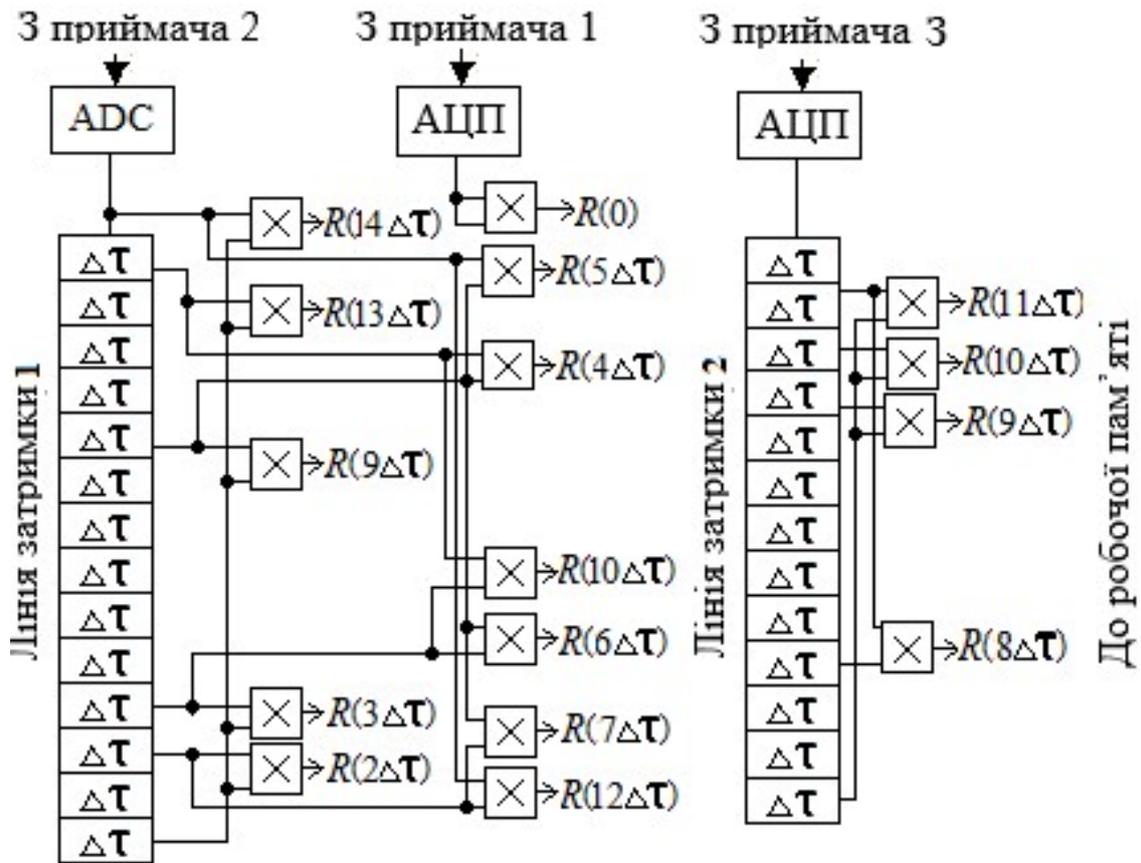


Рисунок 2.29 – Спеціалізований обчислювальний процесор для розрахунку ординат АКФ сигналу розсіяння в режимі реального часу

### 2.9.3. Мережеві технології ідентифікації сигналів при використанні кодованих імпульсів

Подальша процедура обчислень у методі НР полягає у розрахунку параметрів іоносферної плазми за експериментально отриманими АКФ сигналу розсіяння. При цьому особливістю є те, що через відсутність прямих аналітичних формул цей розрахунок ґрунтується на розв'язанні зворотної задачі (детально див. нижче). Її суть у порівнянні форми кожної АКФ, отриманою на досліджуваній висотній ділянці, з безліччю теоретичних аналогів, заздалегідь розрахованих згідно фізичних уявлень про характер поведінки іоносферної плазми. Ці аналоги зберігаються у пам'яті комп'ютера ( $N$  модельних кореляційних функцій по  $k$  ординат кожна). При почерговому їх використанні із супровідним залученням операції згортки (для урахування поточних характеристик параметрів АКФ фільтру

приймальної системи радара НР) вони беруть участь у методі покоординатного спуску, формуючи поверхню функції нев'язки. Це досить повільна процедура обчислень, і найбільш трудомісткими в ній є операції множення (згортки) матриць. Тому метою подальшого удосконалення процедури, яку необхідно проводити в реальному часі, є підвищення її швидкодії за рахунок розпаралелювання процесу ідентифікації АКФ на фоні теоретичних аналогів.

Рішенню подібних проблем присвячено значну кількість публікацій, і серед них викликає інтерес принцип використання штучних нейронних мереж. Цікаві результати наведено у дослідженнях Кохонена Т. [30] на прикладі самоорганізуючих структур, які використовуються при розпізнаванні образів, представлених векторними величинами. При цьому у [31] зустрічається опис значної кількості ознак, якими має володіти вирішуване завдання, щоб застосування згорткових нейронних мереж було виправдано. До основних із них, з оглядом на наші умови, належать такі:

- відсутній суворий математичний вираз, але накопичено достатню кількість експериментальних даних;
- процес обробки характеризується великими обсягами інформації;
- дані, що приймаються в умовах іоносферних перешкод, значно зашумлені.

Як бачимо, для розпізнавання образів АКФ сигналу НР, у процесі якого відбувається оцінка по кореляційним функціям параметрів іоносферного середовища, згідно з цими ознаками можна залучати нейронні мережі.

Сформулюємо завдання статистичної обробки іоносферної інформації у такий спосіб. Необхідно визначити невідомий параметр  $\theta$ , що характеризує стан іоносферної плазми, маючи інформацію про  $k$  ординат експериментальної АКФ  $r^e(k; \theta)$ , яку отримано з сигналу розсіяння. Такий підхід залучує алгоритм функціонування асоціативної пам'яті, і він може бути організований з використанням нейронної мережі. У нашому випадку є деякий набір еталонних, теоретично розрахованих кореляційних функцій  $r^t(k)$ , серед яких мережа повинна вміти дати інформацію про зразок, найбільш подібний на отриманого під час експерименту.

Щоб реалізувати цю мережу, задаймо алгоритм її функціонування для випадку ідентифікації форми АКФ сигналу розсіяння, отриманої в нашому експерименті. Алгоритм повинен забезпечувати розрахунок елементів функції нев'язки шляхом вирішення різницевого функціоналу наступного виду:

$$\chi_n^2(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=2}^{14} [r^e(k; \boldsymbol{\theta}) - \langle r_n^t(k; \boldsymbol{\theta}) * r^f(k) \rangle]^2. \quad (2.5)$$

Тут символом  $\langle \square \rangle$  позначена операція згортки кожної з  $n = 1 \dots N$  теоретичних АКФ сигналу  $r^t(k)$  з АКФ фільтру  $r^f(k)$ , що дозволяє для еталонних функцій виконати умовне їх проходження через фільтр приймача, як це реально робить експериментальна АКФ.

В результаті, у пропонованій радіально-базисній структурі ідентифікуюча нейронна мережа (рис. 2.30) повинна мати кілька шарів нейронів. Так як у даний час на радарі НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ” використовується бібліотека з  $N$  (кілька тисяч) теоретичних АКФ, а відповідно до нашого експерименту будуть отримані АКФ зі значенням  $k = 2, 3, \dots, 14$  ординат кожна, то в такій структурі нейрони вхідного шару  $\mathbf{A}^1$  повинні бути організовані у вигляді безперервної лінії затримки довжиною  $13N$  осередків. Вони призначені для їх заповнення значеннями ординат теоретичних АКФ, тобто на початку обробки мережа сприймає службову інформацію про  $r^t$ , після чого вона готова до роботи.

В подальшому інформація передається по нейронах інтерфейсного шару, який представлено елементами синаптичних зв'язків  $r^f(k)$  і який дозволяє реалізувати процес апаратурної згортки двох функцій. Шар  $\mathbf{A}^2$ , в якому накопичуються результати згортки, передає їх у шар  $\mathbf{A}^3$ , що має вигляд різницевих нейронів зі зв'язками на входах виду “ $\pm 1$ ” для визначення відмінності між значеннями вхідних порівнювальних ординат. На виходах цього шару розташовані квадратичні функції активації. А вже в останньому інтерфейсному шарі  $\Sigma$  відбувається підсумовування зведених у квадрат результатів обчислення різниць, тобто на його виходах ми маємо всі  $n = 1, 2, \dots, N$  елементів  $\chi^2$  функції нев'язки.

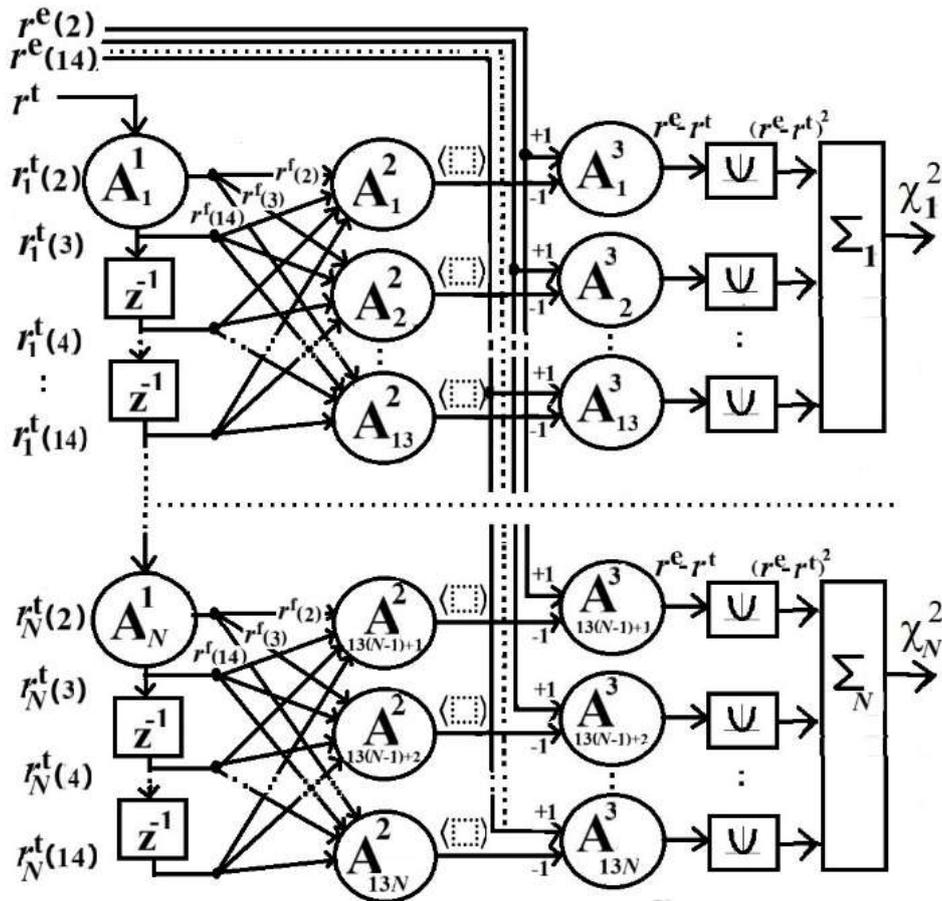


Рисунок 2.30 – Ідентифікуюча нейронна мережа для розпізнавання АКФ кодованого сигналу НР

Таким чином, нейронна мережа відносить вхідне значення  $r^e(k; \theta)$  одночасно до всієї сукупності  $N$  оновлених на значення смугового фільтра теоретичних аналогів. І ступінь найкращої близькості відображає величина  $\chi_{\min}^2$ , яку комп'ютеру легко відшукати серед переліку отриманих значень функцій нев'язки, і по  $\chi_{\min}^2$  вийти на відповідну АКФ  $r^t(k; \theta)$  та на вектор  $\theta$  іоносферних параметрів.

Така нейронна мережа дозволяє реалізувати одночасну ідентифікацію отримуваних АКФ  $r^e$  на фоні всіх залучених теоретичних аналогів  $r^t$ . Навчання мережі зазвичай супроводжується процедурою переналаштування ваг мережі  $r^f(k)$  для реалізації нових поточних умов експерименту. Тобто у разі використання в приймальній системі радара НР іншого типу фільтра мережу навчають, підлаштовуючись під нові ваги  $r^f(k)$  до тих пір, поки для контрольних (незашумлених значень  $r^e$ ) не будуть отримані нульові результати на відповідних їм виходах  $\chi^2$ .

Як стверджують автори, ними ставилося завдання програмного моделювання подібної мережі, але зі спрощеною архітектурою (для кількох теоретичних функцій  $r^t$ ). У результаті це моделювання підтвердило ефективність розпізнавання різних форм АКФ сигналу розсіяння, тобто працездатність запропонованої ідентифікуючої нейронної мережі. Надалі розглядатиметься апаратурна реалізація даної нейронної мережі з урахуванням спеціалізованих нейроплат. На ринку почали з'являтися подібні вироби, засновані на використанні механізму дії нейронних мереж. Наприклад, розроблювані нейроБІС фірми Adaptive Solutions (США) містять вже 64 нейрони, мають 262144 синаптичних зв'язків і припускають швидкодію до 1,2 млрд. зв'язків/сек [32]. Ці елементи, безперечно, стануть основою спеціалізованих багатопроцесорних пристроїв, у тому числі придатних для використання і у методі НР.

## **2.10. Особливості використання антенних перемикачів у антенно-фідерній системи радару НР**

Так як у розглянутих вище технічних схемах присутні антенні перемикачі, проаналізуємо особливості їх використання у радіолокаційній апаратурі.

До складу найбільш поширених НВЧ-пристроїв входять відрізки лінії передачі, перехідні і стикові вузли, узгоджувальні елементи, відгалужувачі, поглиначі потужності, фільтри, фазообертачі, комутуючі пристрої, вентилі і т. п. Сукупність цих НВЧ-пристроїв, з'єднаних між собою певним чином, називають трактом НВЧ або лінією прийому-передачі.

Антенний перемикач – це пристрій [33, 34], що забезпечує автоматичне та з високою швидкістю підключення антени до передавача або до приймача. Такі антенні перемикачі обов'язково потрібні у фідерних трактах РЛС, що працюють в імпульсному режимі, коли одна й та сама антена в момент випромінювання зондувального імпульсу повинна підключатися до виходу передавального пристрою, а в момент приймання відбитого від цілі сигналу – до входу приймального

пристрою. При цьому при переході РЛС на приймання слабого сигналу, що надходить від антени, цей сигнал не повинен поглинатися в лініях передавача, а з мінімальними втратами надходити на вхід приймача. Таке застосування однієї і тієї ж антени дає економію у масі та габаритних розмірах РЛС і виключає труднощі синхронізації діаграми направленості передавальної та приймальної антен при огляді простору.

До антенного перемикача висуваються наступні вимоги:

- мінімальні втрати ВЧ-енергії та максимальна розв'язка (не гірше величини 60...70 дБ) між передавачем та приймачем у режимі передачі;
- мінімальні втрати сигналу в режимі приймання, що не повинні перевищувати 1,5 дБ;
- час переходу антенного перемикача з режимів передачі на приймання має бути значно менше періоду повторення РЛС, тобто воно має бути не більшим за кілька мікросекунд;
- антенний перемикач не повинен суттєво підвищувати коефіцієнт стоячої хвилі у фідерному тракті.

Розглянемо варіанти [35] технічної реалізації цього одного із важливих елементів антено-фідерного тракту.

### **2.10.1. Механічні антенні перемикачі**

На сантиметрових хвилях часто застосовують механічні хвилеводні вимикачі та перемикачі. Такі механічні елементи знайшли застосування у трактах НВЧ РЛС для перемикання дуже високих рівнів потужності.

У найпростішому перемикачі (рис. 2.31, *a*), коли передавач потрібно просто відключити, три хвилеводи комутуються за допомогою двох хвилеводних каналів у поворотному металевому роторі. При повороті ротора на  $90^\circ$  хвилеводи по черзі з'єднуються або закорочуються поверхнею ротора, а дросельні канавки перешкоджають просочуванню сигналу по зазору між ротором і корпусом. У більш

складних перемикачах (рис. 2.31, б), коли потрібно не просто відключати передавач, а перемикати його вихід з антени на еквівалент, ротор може комутувати сигнали уже між чотирма напрямками.

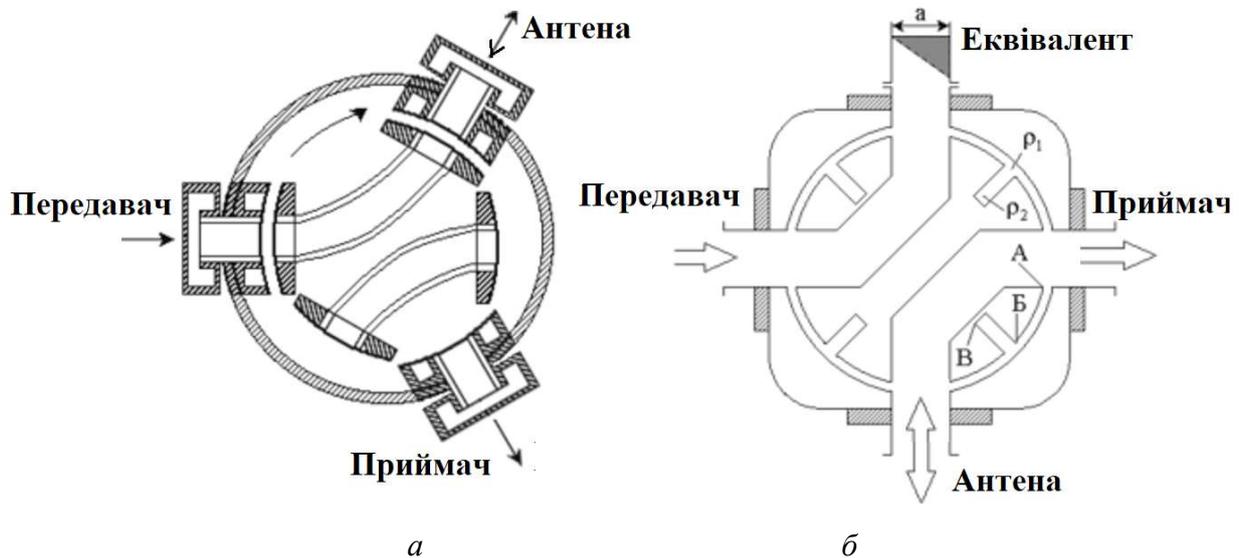


Рисунок 2.31 – Механічний перемикач на два різні положення:

*a* – відключення передавача; *б* – перемикання передавача на еквівалент

Основний недолік таких систем – не існує механічних перемикачів, здатних відкриватися (закриватися) протягом декількох мікросекунд. У цьому випадку для швидких перемикань повинні використовуватися електромеханічні або електронні перемикачі.

### 2.10.2. Електромеханічні антенні перемикачі

Електромеханічні перемикачі на дециметрових та більш довгих хвилях створюють із застосуванням спеціальних високочастотних реле та герконів.

Геркон – герметизований магнітокерований контакт, що представляє собою дві плоскі контактні пелюстки з магнітом'якого сплаву, впаяних в кінці заповненої інертним газом трубки (діаметр трубки 2...3 мм, довжина 10...20 мм). Вільні кінці пелюсток розташовані один над одним із невеликим зазором. Під дією керуючого постійного магнітного поля контакти намагнічуються, притягуються

один до одного та замикають ланцюг. При вимиканні магнітного поля контакти геркона розмикаються під впливом сил пружності. Магнітне поле, що управляє цим процесом, може бути створене соленоїдом, розміщеним навколо геркона, постійними магнітами або електромагнітами.

Максимальна частота перемикачів складає сотні герц. Потужність комутованих безперервних НВЧ-сигналів поки що не перевищує десятків ват, а їх максимальна частота – сотень мегагерц.

### ***2.10.3. Електронні перемикачі з використанням газорозрядних елементів***

Існує варіант компонування антенних перемикачів із використанням газорозрядних приладів (розрядників). Газовий розрядник є основним елементом більшості конструкцій антенних перемикачів, що використовуються в сучасних РЛС. Існують два різновиди конструкції газових перемикачів, а саме:

1. У вигляді скляного балона, заповненого сумішшю водню або аргону з парами води при низькому тиску ( $10^2 \dots 10^4$  Па). У балоні розміщуються два конусоподібні електроди з дисковими виходами для підключення до фідерного тракту. Також у деяких розрядниках для прискорення виникнення розряду у балоні розміщують додатковий електрод підпалу. До цього електроду підводиться постійна негативна напруга ( $-700 \dots 1000$  В), завдяки чому поблизу конусів завжди підтримується слабкий тліючий розряд, який створює резерв вільних електронів усередині розрядника, і за рахунок яких прискорюється виникнення розряду між основними електродами.

2. У вигляді герметичного відрізка прямокутного хвилеводу, заповненого тією самою сумішшю газів. На вході та виході розрядника встановлені резонансні діафрагми, герметизовані пластинками зі скла або кераміки (так звані вікна). Усередині розрядника на середній лінії широкої стінки хвилеводу на відстані  $\lambda/4$  від вхідного та вихідного фланців з вікнами зв'язку розташовуються конусоподібні розрядні електроди.

У звичайному стані (режим примання) розрядник є смуговим фільтром, що має відносну смугу пропускання  $\pm 5 \dots 10\%$ , і на проходження електромагнітної хвилі істотного впливу не має. При надходженні на його вхід цієї хвилі з великим рівнем потужності (в режимі передачі) він запалюється, його внутрішній опір стає дуже малим, що відповідає виникненню короткого замикання у лінії передачі у місці його включення.

Для зменшення порогу спрацьовування розрядник може конструктивно поміщатися в об'ємний резонатор, зв'язок якого з відгалуженням лінії передачі здійснюється за допомогою петлі зв'язку або щілини. У резонаторі для його налагодження використовуються підстроювальні елементи, що збільшують смугу пропускання.

Завдяки високій власній добротності  $Q$  об'ємного резонатора (вона обчислюється тисячами – десятками тисяч), у режимі передачі він запалюється при напрузі імпульсів передавача в  $Q$  разів меншій, а в режимі приймання втрати сигналу невеликі і не перевищують  $0,5 \dots 1,0$  дБ.

Такий антенний комутатор має забезпечити час перемикання порядку декілька наносекунд. Однак і в цей короткий проміжок часу небажана потужність, генерована передавачем, досягає приймача. Для збільшення швидкості перемикання можливо застосовувати спосіб, який полягає у подачі високої напруги ( $800 \dots 1200$  В) до електродів розрядника. Цим досягається прискорення іонізації та запалення розрядника при потраплянні на його вхід потужного сигналу з виходу передавача.

#### ***2.10.4. Схеми включень газорозрядних перемикачів у радіолокаційній системі***

Схеми включень газорозрядних антенних перемикачів діляться [9], в основному, на два типи: шлейфові (відгалужувальні) та балансні. Розглянемо їх особливості.

### *Шлейфова схеми включень газорозрядних перемикачів*

Шлейфовий перемикач (рис. 2.32) містить розрядники, що включені у відрізки лінії (відгалуження або шлейфи), які приєднані паралельно головному фідеру. Розрядник  $P_1$  називається розрядником захисту приймача (РЗП), а  $P_2$  – розрядником блокування передавача (РБП).

У момент генерування передавачем потужних імпульсів у розрядниках виникає газовий розряд та їх опір різко зменшується. У результаті головний фідер пропускає сигнал з передавача через газовий розрядник  $P_1$  до антени. Розрядник  $P_2$  захисту приймача через маленький вхідний опір закорочує лінію, що з'єднує приймач з головним фідером, і захищає вхід приймача від потужного сигналу.

У режимі приймання, коли на виході антени потужність невелика, газовий пробій у розрядниках не виникає і прийнятий антеною сигнал проходить у приймач та не надходить у ланцюги передавача через великий опір розрядника  $P_1$ , який відключає ланцюги передавача від антени.

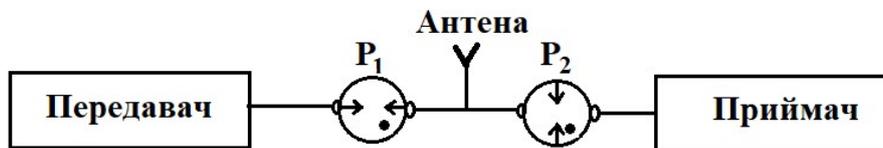


Рисунок 2.32 – Схема використання шлейфового перемикача

### *Балансна схеми включень газорозрядних перемикачів*

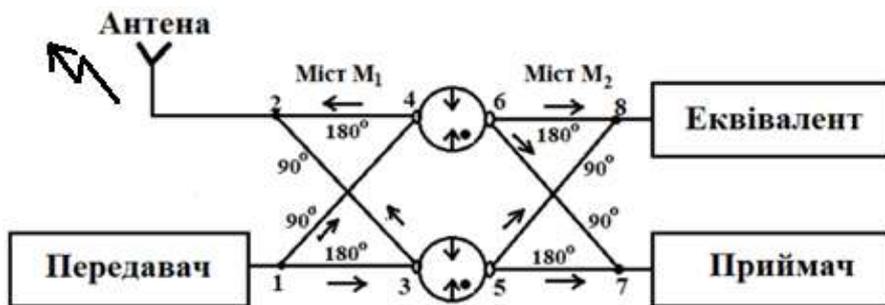
Балансний антенний перемикач будується на основі мостових пристроїв НВЧ. На рис. 2.33 схематично показано балансний перемикач, що складається з двох послідовно з'єднаних хвилеводно-щілинних мостів  $M_1$  та  $M_2$  та двох газових розрядників  $P_1$  та  $P_2$ .

У режимі передачі (рис. 2.33, а), коли з боку плеча 1 моста  $M_1$  подається потужний сигнал від передавача, обидва розрядники пробиваються і відіграють роль короткозамикачів, що відбивають практично всю енергію, яка падає на них. Оскільки проходження сигналу в щілинному мосту по шляху 1-3 супроводжується зсувом по фазі на  $180^\circ$ , то відбиті від розрядників хвилі вздовж шляху 3-2

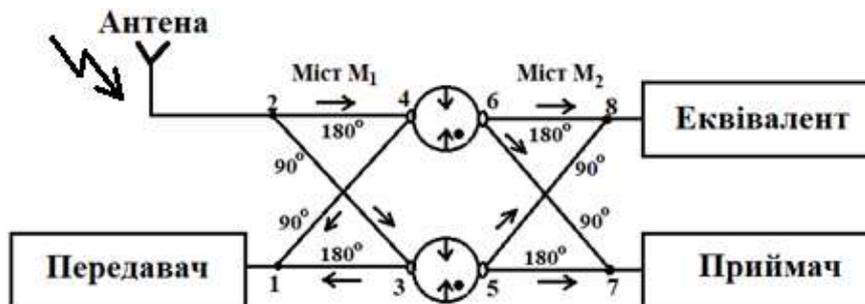
мінняють фазу ще на  $90^{\circ}$ . Таким чином, у точці 2 по шляху 1-3-2 фаза буде дорівнювати  $270^{\circ}$ . А от по шляху 1-4 відбудеться зсув на  $90^{\circ}$ , а по шляху 4-2 – ще на  $180^{\circ}$ . У результаті різниця фаз двох складових у точці 2 буде дорівнювати нулю, тому енергія подвоюється і через антену випромінюється у простір.

Невелика частина потужності все ж таки просочується через розрядники. Вона надходить на міст  $M_2$  і в силу фазових співвідношень виявляється синфазною в точці 8, де гаситься в узгодженому навантаженні (еквіваленті). А оскільки сигнали у точці 7 протифазні, то завдяки цьому енергія на вхід приймача, підключеного до цієї точки, у режимі передачі не надходить.

У режимі приймання (рис. 2.33, б), коли розрядники погашені, сигнал від антени надходить на міст  $M_1$ , ділиться на дві рівні частини, але на входах розрядників вони зсунуті по фазі на  $90^{\circ}$ . Вони складаються на плечах другого моста  $M_2$  так, що стають протифазними у точці 8 і синфазними тільки у точці 7, тобто на вході приймача.



а



б

Рисунок 2.33 – Схема функціонування балансного комутатора в режимі випромінювання (а) та приймання (б) сигналів

Таким чином, існує ряд елементів, які можна використати в якості антенних перемикачів, та є ряд реалізацій їх схемних включень. Всі вони мають свої переваги та недоліки. Хотілося б відмітити, що в антено-фідерній системі харківського радара НР працює балансна схема включень двох газорозрядних комутаторів, так як відносно використання метрового діапазону радіохвиль вона забезпечує надійне функціонування апаратури при великій потужності сигналу випромінювання (мегавати). До того ж надійний захист входу приймача забезпечується використанням ще й діодних обмежувачів, а також додаткових комутаторів на  $p-i-n$  діодах, розташованих у високочастотних ланцюгах приймача.

З метою такої модернізації антенних перемикачів у структурі харківського радіолокатора було проведено ряд робіт [36-39], які дозволили покращити його технічні характеристики та додатково захистити приймач від перенавантаження.

Особливість використання цієї схеми з точки зору її участі в геофізичних експериментах, які проводять два радіолокатори НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ” у тому, що при розрахунку коефіцієнтів кореляції сигналу розсіяння в моностатичній (з однією антеною) радіолокаційній системі необхідно залучати відповідну процедуру корекції. Вона визвана тим, що потрібно аналізувати і враховувати реальні технічні характеристики антенних перемикачів фідерного тракту радара НР, адже вони все ж є причиною деякої зміни кореляційних характеристик вхідного сигналу (детально див. п. 5.3.3).

## **2.11. Розробка універсальної програмованої радіосистеми для формування та обробки складних кодованих сигналів**

За останні роки комп'ютерні технології отримали широкий розвиток. На їх базі створено нову архітектуру побудови радіосистем – програмно визначене радіо (Software Defined Radio, SDR), що знайшла своє застосування у військовому і цивільному радіозв'язку, а також у науковому обладнанні для проведення моніторингу стану геокосмічного середовища. Більше того, усі радіосистеми моні-

торингу, що розроблюються в наш час, належать до класу SDR, тобто є програмованими радіосистемами. А так як застосування ручного конфігурування систем радара (задавальної, радіопередавальної, радіоприймальної та системи обробки даних) значно ускладнює швидкий перехід з одного режиму роботи радарів до іншого та практично унеможливорює введення нових режимів, то саме такі сучасні системи потрібні для оперативного формування складних кодованих сигналів зондування, що були запропоновані до використання у попередніх розділах цього видання.

Виходячи з цього, у даному розділі представлено варіант радіосистеми [40], що дозволяє для визначення параметрів геокосмосу та об'єктів проводити керування режимами зондування на частотах коротких та ультракоротких хвиль, які використовуються у методах вертикального зондування та некогерентного розсіяння, із формуванням, прийманням та обробкою сигналів за допомогою програмно-апаратних комп'ютерних засобів. Основні завдання, які доводилось при її реалізації вирішувати, наступні:

- аналіз особливостей формування сигналів у програмованих радіосистемах для радіофізичних досліджень атмосфери та геокосмосу;
- розробка концепції програмованої радіосистеми, що здатна зменшити негативний вплив радіовипромінювання на здоров'я та самопочуття людей та служити цілям підвищення рівня безпеки та захисту;
- розробка апаратного забезпечення для формування та обробки сигналів;
- розробка програмного забезпечення для формування та обробки сигналів;
- проведення тестових випробувань розробленої радіосистеми та аналіз результатів;
- надання практичних рекомендацій щодо оптимальних режимів роботи радіосистем міжнародної мережі радарів HP.

В результаті була запропонована універсальна програмована радіосистема (Universal Software Radio Peripheral, USRP) моніторингу геокосмосу, яка функці-

онує під керуванням спеціалізованого програмного забезпечення, що встановлено на високопродуктивному комп'ютері, та спрямована на отримання нових геофізичних знань про навколосемний космічний простір.

До складу пасивної радіосистеми (рис. 2.34) для дослідження космічних сигналів входить USRP з дочірніми платами BasicRX та BasicTX (частота, на якій передбачається робота радіосистеми, складає  $f_0 = 158$  МГц), малошумливий підсилювач, генератор сигналів 10 МГц та 1 Гц, а також персональний комп'ютер, який керує системою USRP, оброблює прийняті сигнали та зберігає результати обробки даних.

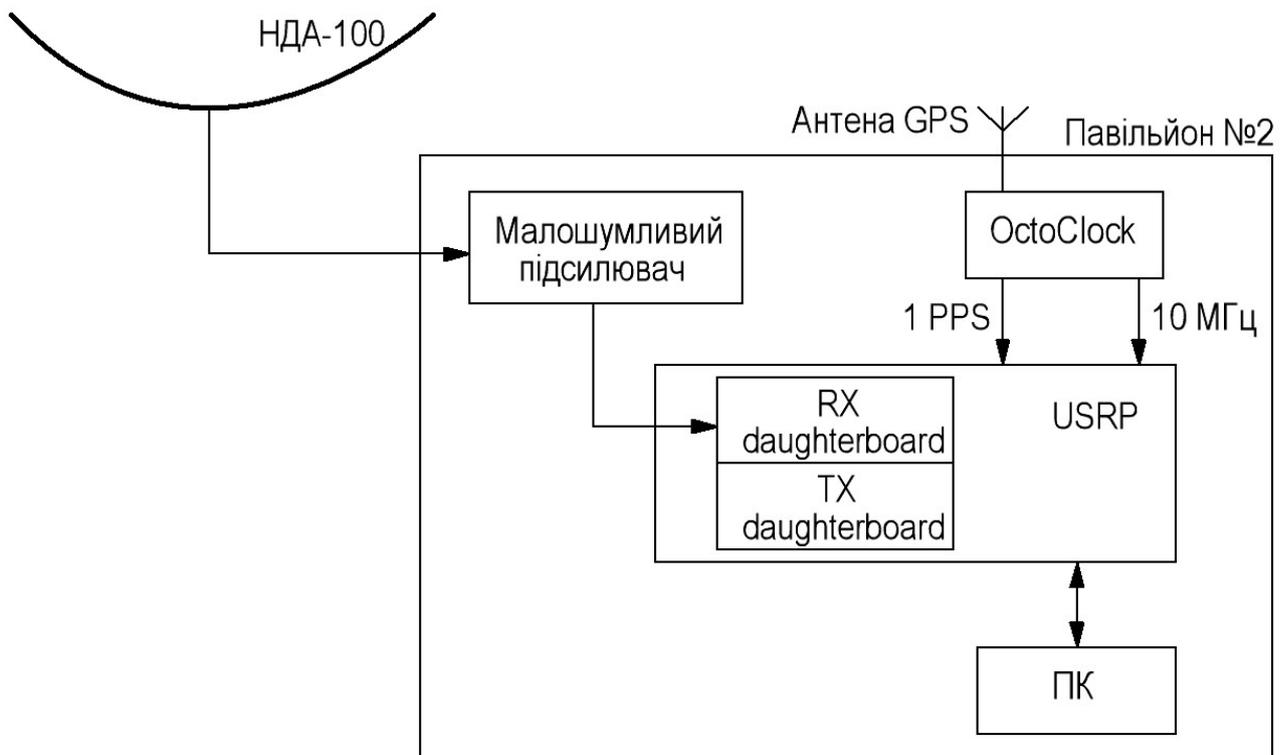


Рисунок 2.34 – Структурна схема пасивної радіосистеми на базі USRP

В структурі активної радіосистеми (рис. 2.35) крім складових з пасивної системи також присутні антенний комутатор, попередній підсилювач сигналів від передавальної дочірньої плати USRP та вихідний підсилювач потужності. Як і у випадку пасивної радіосистеми, передбачається робота активної радіосистеми на частоті 158 МГц. Тому передавальна дочірня плата USRP – це BasicTX.

Структуру програмованої радіосистеми у складі модифікованого іонозонду VISRC2-t наведено на рис. 2.36. Іонозонд працює в діапазоні 1–16 МГц та використовує USRP з дочірніми платами LFRX та LFTX. Для організації роботи іонозонду за розкладом до його структури входить приймач GPS.

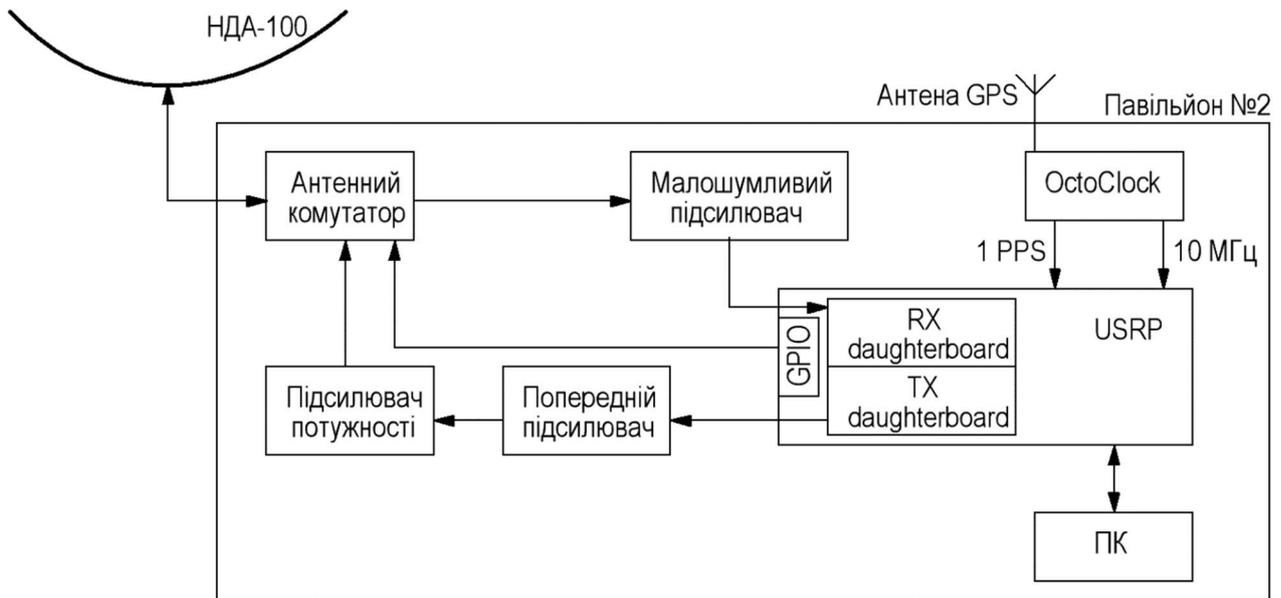


Рисунок 2.35 – Структурна схема активної радіосистеми на базі USRP

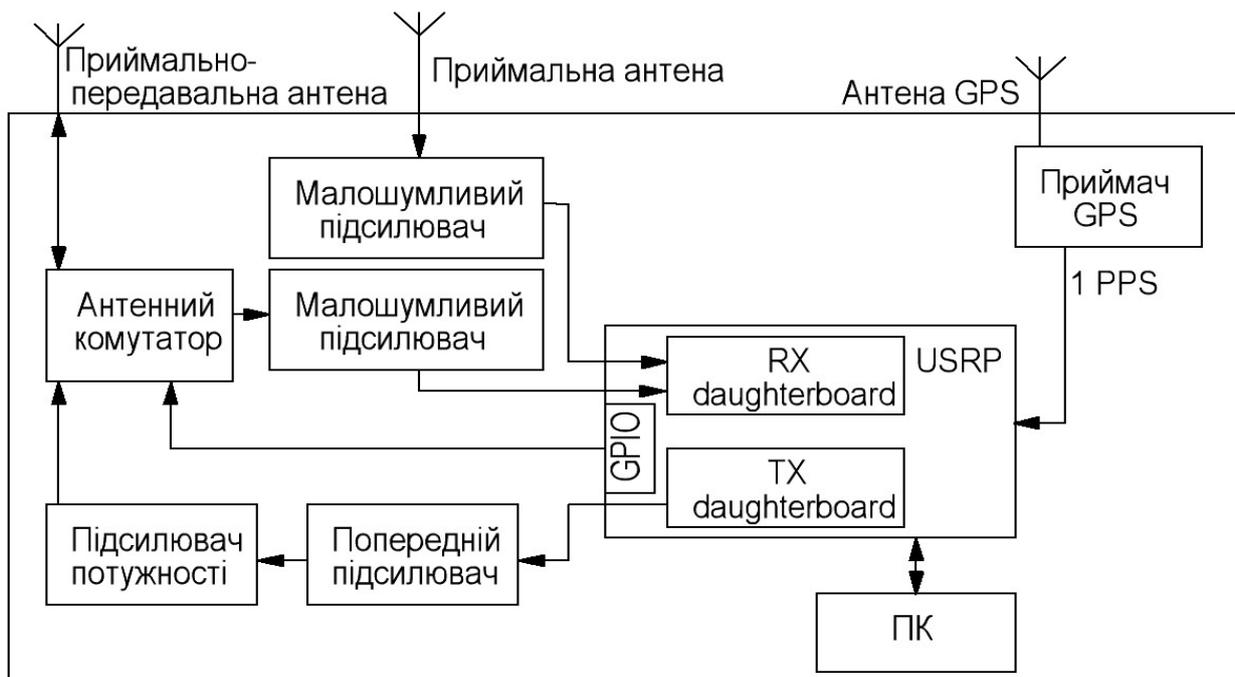


Рисунок 2.36 – Структурна схема радіосистеми на базі USRP у складі цифрового іонозонду

Впровадження програмованої радіосистеми, призначеної для введення в склад радара НР Інституту іоносфери, пов'язано з реалізацією схеми, показаною на рис. 2.37. Через те, що передавач та приймач радара знаходяться у різних будівлях (павільйон №3 та павільйон №2 іоносферної обсерваторії Інституту відповідно), передавальну та приймальну частину програмованої радіосистеми необхідно розмішувати окремо, реалізувавши її на двох USRP. Синхронізація передавальної та приймальної підсистем відбувається за допомогою OctoClock (1 PPS та 10 МГц) і додаткового приймача GPS для формування сигналу PPS.

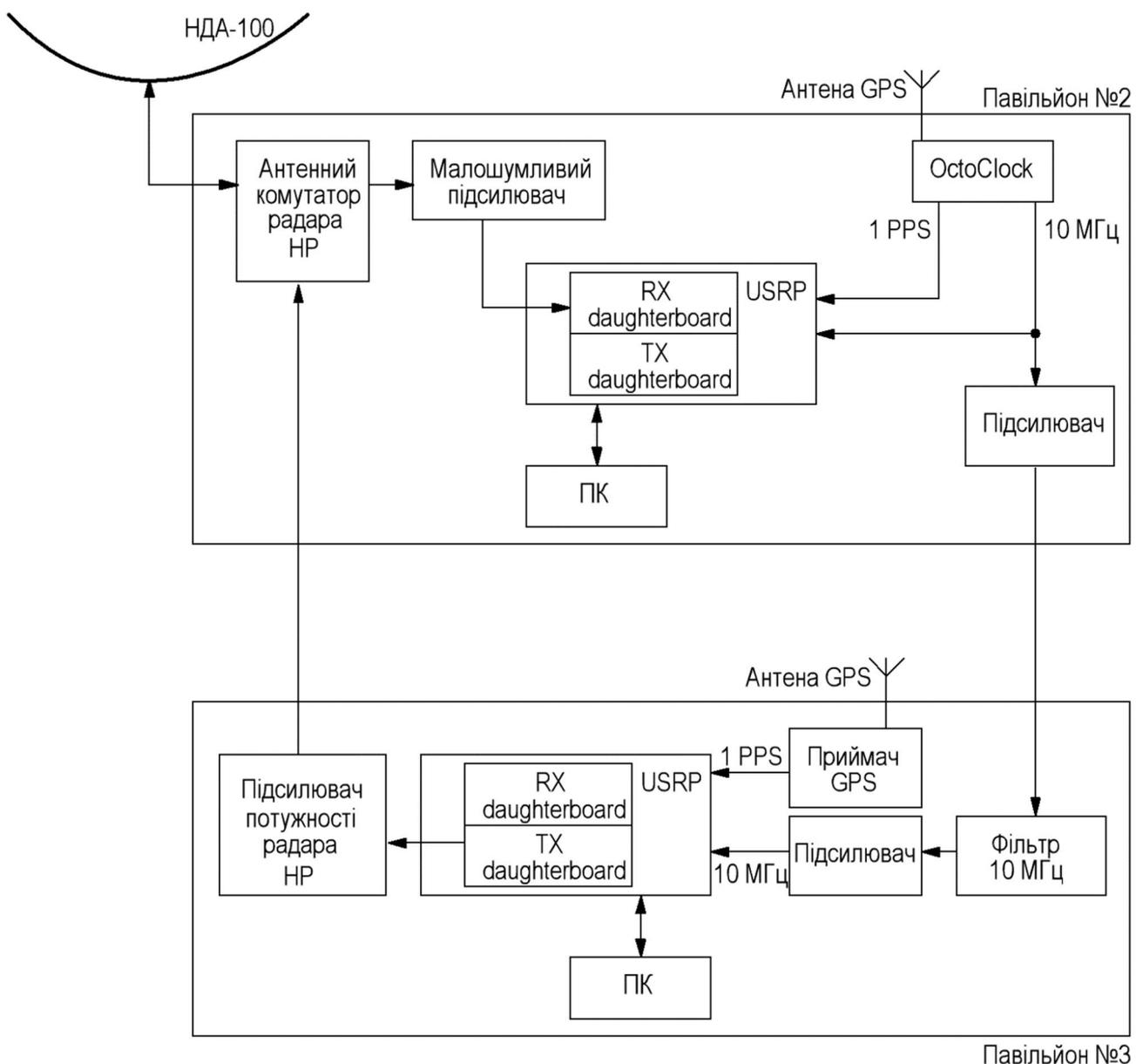


Рисунок 2.37 – Структурна схема радіосистеми на базі USRP у складі харківського радара НР

Для задавальної системи харківського радара НР на мові програмування C++ було розроблено програму керування модулем USRP, яка дозволяє генерувати сигнали необхідної форми. Передавальна частина USRP переводиться у двоканальний режим з параметрами сигналу, заданими у конфігураційному файлі. Програма реалізує формування зондувальних імпульсів в одному каналі передавача та реєстрацію сигналів розсіяння у каналах приймача. Запис отриманих даних розгортки дальності проводиться у бінарні файли. Керування антенним комутатором здійснюється за допомогою портів введення/виведення загального призначення (general purpose input/output, GPIO) модуля USRP.

Таким чином, апаратна та програмна складові багатоцільової програмованої радіосистеми для моніторингу геокосмосу включають обчислювально-вимірвальне обладнання та створене для неї програмне забезпечення. Радіосистема може працювати в пасивному та активному режимах у складі радара НР та у складі цифрового іонозонду в різних діапазонах частот. Ця радіосистема за рахунок наданої можливості в оперативному формуванні, прийманні та обробці складних кодованих сигналів дозволяє отримати нові геофізичні знання про навколоземний космічний простір. У той же час ця радіосистема служить цілям підвищення рівня безпеки і здатна зменшити негативний вплив радіовипромінювання на здоров'я та самопочуття людей.

### Розділ 3

## СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДАРІВ НР СКЛАДОВИХ ШВИДКОСТІ РУХУ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

### 3.1. Визначення радіальної складової швидкості руху іоносферних плазмових утворень

В теперішній час навколораземний космічний простір беззаперечно став повноцінним середовищем життєдіяльності людства, його активне освоєння почалося майже сім десятироків тому. І з кожним роком кількість космічних запусків зростає, все нові і нові супутники різних країн світу обертаються навколо Землі, збираючи та передаючи цінну інформацію. Регулярно відбуваються запуски міжпланетних апаратів і космічних кораблів на Міжнародну космічну станцію (МКС).

Але в той же час фахівцям з кожним роком все складніше розраховувати передбачувану траєкторію польоту чергової ракети або супутника. Виною тому те, що космічний простір не зовсім порожній, у ньому присутні електромагнітне випромінювання, магнітні поля, пил та космічні промені. Він має хоч і низьку, проте заважаючу стабільним траєкторіям космічних об'єктів щільність іонізованих частинок, переважно у вигляді плазмового стану водню та гелію. Також великою проблемою є так зване космічне сміття, яке скупчилося навколо нашої планети (див. п. 3.2).

Тому не тільки вивчення динамічних процесів у геокоcosмічній плазмі є однією із важливих задач космічної радіо- і геофізики, а також потрібне врахування і всіх інших факторів, адже вони суттєво впливають не тільки на позиціонування у просторі об'єктів у галузі космонавтики, але і в галузях, що пов'язані з радіозв'язком, радіолокацією, радіонавігацією, радіотелеметрією та багато іншими.

У зв'язку з цим вивчення варіацій швидкості руху плазмових утворень у широкому діапазоні висот, яке можливе за рахунок використання методу НР, є важливим, практично потрібним і актуальним напрямком.

Суть розрахунків такого параметру, як дрейф плазми вздовж променя радіолокатора, полягає в наступному.

З теорії радіолокації відомо, що фазовий зсув  $F_p$  прийнятого сигналу щодо сигналу зондування визначається відстанню  $D$  до об'єкта, тобто кількістю довжин періодів  $\lambda_0$  радіохвиль, що укладаються на цій відстані. При переміщенні об'єкту уздовж променя радіолокатора зі швидкістю  $V_p$  (в радіальному напрямку) фазовий зсув сигналу безупинно зростає, що приводить до появи доплерівської добавки частоти у прийнятому сигналі на значення

$$F_p(D) = -2V_p(D)/\lambda_0. \quad (3.1)$$

Для її виділення на радіолокаторах огляду простору звичайно використовуються фазові детектори, тому що вони мають справу з великими значеннями швидкостей. Після перенесення частоти прийнятого сигналу до проміжного, нижчого значення вона порівнюється з опорним значенням. За отриманими різницями і знаходять швидкість об'єкта. Таке технічне рішення застосовують у РЛС із безперервним випромінюванням і в РЛС із випромінюванням імпульсів досить великої тривалості.

При вимірюванні ж в імпульсних РЛС швидкості іоносферної плазми виникає задача визначення дуже малих доплерівських добавок, тому що вони пов'язані з незначними фазовими зсувами. У цьому випадку період таких доплерівських змін істотно менше довжини (у часі) зондувального імпульсу.

Варіанти визначення швидкості плазми у методі НР припускають обов'язкове отримання АКФ сигналу НР у вигляді двох квадратурних складових. Тому АКФ розраховуються у двох каналах радіоприймального пристрою, де попередньо вони були перетворені в сигнал на проміжній частоті  $f_{пр}$ .

Для визначення значення швидкості з використанням АКФ найбільше поширення одержав наступний алгоритм розрахунку [41, 42].

З огляду на те, що при використанні зенітної антени можна оцінити лише вертикальну складову швидкості дрейфу  $V_p(h_i)$ , для сигналу з кожної  $i$ -ї ділянки, яка має центр на висоті  $h_i$ , застосовується процедура, що використовує вираз вигляду

$$V_p(h_i) = -\frac{1}{K} \frac{\lambda_{\text{пр}}}{4\pi} \sum_{k=1}^K \{ \arctg[r_{\sin}(k\Delta\tau, h_i) / r_{\cos}(k\Delta\tau, h_i)] \} / k\Delta\tau, \quad (3.2)$$

де  $K$  – кількість залучених ординат кореляційної функції;  $\lambda_{\text{пр}}$  – довжина радіохвилі радара на проміжній частоті;  $r_{\sin}(k\Delta\tau, h_i)$  і  $r_{\cos}(k\Delta\tau, h_i)$  – квадратурні складові нормованих функцій, отримані з кроком по кореляційній затримці  $\Delta\tau$ .

### 3.2. Спосіб визначення радіальної (вздовж променя) складової швидкості руху космічних об'єктів

Відомо, що космічні літальні апарати через опір середовища, який виникає із-за наявності на їхньому шляху часток іоносферної плазми, потребують постійного контролю їх швидкості, а особливо небажаної складової в напрямку до Землі. До того ж за останні десятиліття значно ускладнилась проблема безпеки життєдіяльності супутників та космічних станцій ще й через забруднення навколоземного космічного простору небесними об'єктами природного (метеорити та ін.) і штучного походження (космічним сміттям). До нього відносяться зруйновані з часом супутники, які вичерпали свої енергетичні ресурси, відпрацьовані ступені ракет-носіїв, їхні різноманітні деталі та ін. (рис. 3.1).

Найбільша густина космічного сміття спостерігається в областях навколоземних орбіт на висотах від 400 до 2000 км, які використовуються найчастіше. Також саме на цих висотах літають метеорологічні супутники і супутники дистанційного зондування, а також більша частина супутників з ядерними установками. У результаті міжнародній космічній спільноті доводиться багато уваги

приділяти каталогізації об'єктів та розробці методів і засобів підвищення рівня безпеки від зіткнень цих орбітальних апаратів, зокрема орбітальних космічних станцій, з космічним сміттям.

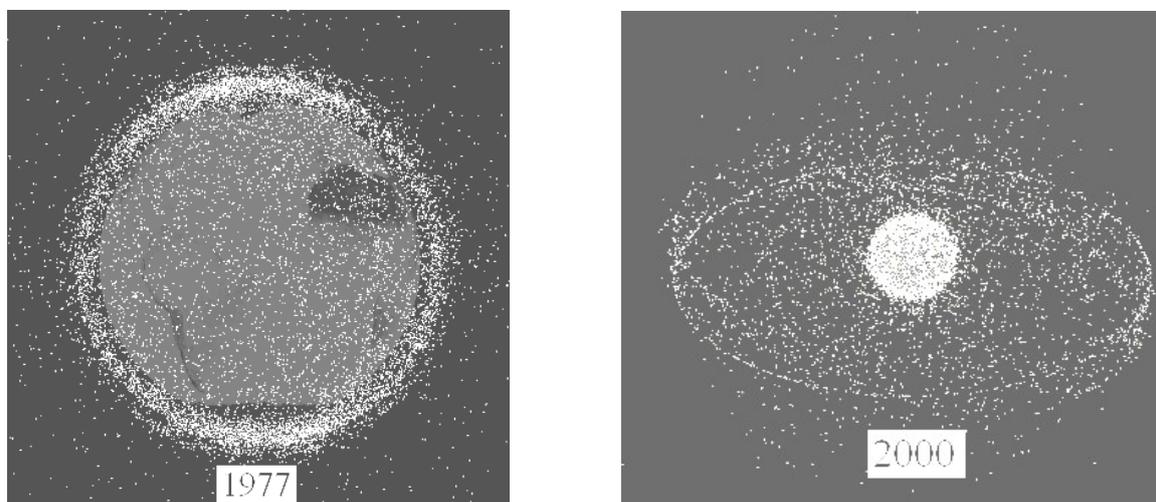


Рисунок 3.1 – Накопичення космічного сміття у навколосемному космічному просторі

Відомо, що горизонтальна складова швидкості руху штучних космічних об'єктів тісно пов'язана з висотою їх орбіти над поверхнею Землі. Так, на висоті 300 км ця швидкість, що має назву першої космічної, для забезпечення польоту по круговій орбіті повинна мати значення як мінімум 7,726 км/с. Вираз, за допомогою якого розраховується ця швидкість, має вигляд

$$V_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\mu_0}{R}}, \quad (3.3)$$

де  $\mu_0 = 3.98602 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – гравітаційний параметр Землі,  $R$  – радіус орбіти об'єкту, відлічуваний від центру Землі ( $6,371 \times 10^6 + h_{\text{орбіти}}$ , м) [43].

Однак, цей вираз справедливий лише для незбурених умов руху, коли на космічний об'єкт діє лише одна сила – сила земного тяжіння. Для точного визначення елементів орбіти об'єкта і, зокрема, його горизонтальної та вертикальної складових швидкості руху, необхідно врахувати фактори збурювання: додаткову силу земного тяжіння, зумовлену несферичністю Землі, вплив сил тяжіння Мі-

сяця, Сонця та інших планет, аеродинамічні і електромагнітні сили, тиск сонячного світла та ін. Це доволі складне теоретичне завдання. Метою ж наших досліджень є практичне визначення реальної швидкості руху об'єктів, яку ми можемо спостерігати, та які із-за дій вище зазначених факторів мають відхилення від значень під час незбуреного руху.

Відомо про спосіб визначення швидкості руху об'єктів, коли використовуються радіолокаційні методи, що мають назву доплерівських [44]. Вони базуються на аналізі частоти відбитого сигналу або його статистичних характеристик (спектрів або кореляційних функцій). У цьому випадку використовується імпульсний радіопередавач радара, а також радіоприймальний тракт, який за допомогою радіоприймача здійснює супергетеродинне перетворення частоти (спектру) прийнятих коливань до значень на проміжній частоті  $f_{\text{пр}}$ , а потім проводить аналого-цифрове перетворення сигналу і його наступну цифрову обробку. Якщо в процесі опитування АЦП забезпечується ситуація, коли будь-які суміжні відліки сигналу  $U(t)$  знаходяться у квадратурній залежності, то за допомогою, наприклад, корелятора на кожній висотній ділянці можна здійснювати статистичне, від розгортки до розгортки, накопичення ортогональних ( $R_{\text{cos}}$  і  $R_{\text{sin}}$ ) складових кореляційних функцій прийнятого сигналу. По ним радіальне значення швидкості визначається як

$$V_{\text{P}} = f\left(\frac{R_{\text{sin}}}{R_{\text{cos}}}\right). \quad (3.4)$$

Саме високі енергетичні можливості радарів НР, які використовують аналогічні методи накопичення, аналізу і статистичної оцінки характеристик прийнятих сигналів, що попадають в зону діаграми спрямованості задіяних ними антен у діапазоні висот до декількох тисяч кілометрів, мають можливість відслідковувати не тільки плазмові утворення, але і літальні об'єкти, навіть якщо вони мають ефективну площу розсіяння у декілька квадратних сантиметрів і менше. Сигнали відбиття від них, якщо їх розглядати на фоні слабого шумоподібного сигналу некогерентного розсіяння, утвореного частками плазми, дуже контрастні за

потужністю (напругою), тому ці відбиття можна використовувати для каталогізації положення об'єктів у космосі та для передбачення їхньої поведінки з метою високоточного і безпечного балістичного забезпечення космічних польотів.

Таким чином, ми маємо ситуацію, коли одночасно з фільтрацією та обробкою даних, які використовуються для визначення радіальної складової швидкості руху іоносферної плазми, на вході приймача радара НР також присутні сигнали відбиття від штучних та природних елементів (рис. 3.2), не пов'язаних з фізичною структурою іоносферної плазми. Це ті літальні космічні об'єкти, що знаходяться у навколосемному космічному просторі та періодично перетинають діаграми спрямованості антен радарів НР.

Найбільш часто когерентні радіолокаційні відбиття протягом доби припадають на характерні висотні діапазони від 200 км до 1500 км, що приводить до спотворення висотного профілю сигналу, який формується як розсіяння на частках іоносферної плазми [3].

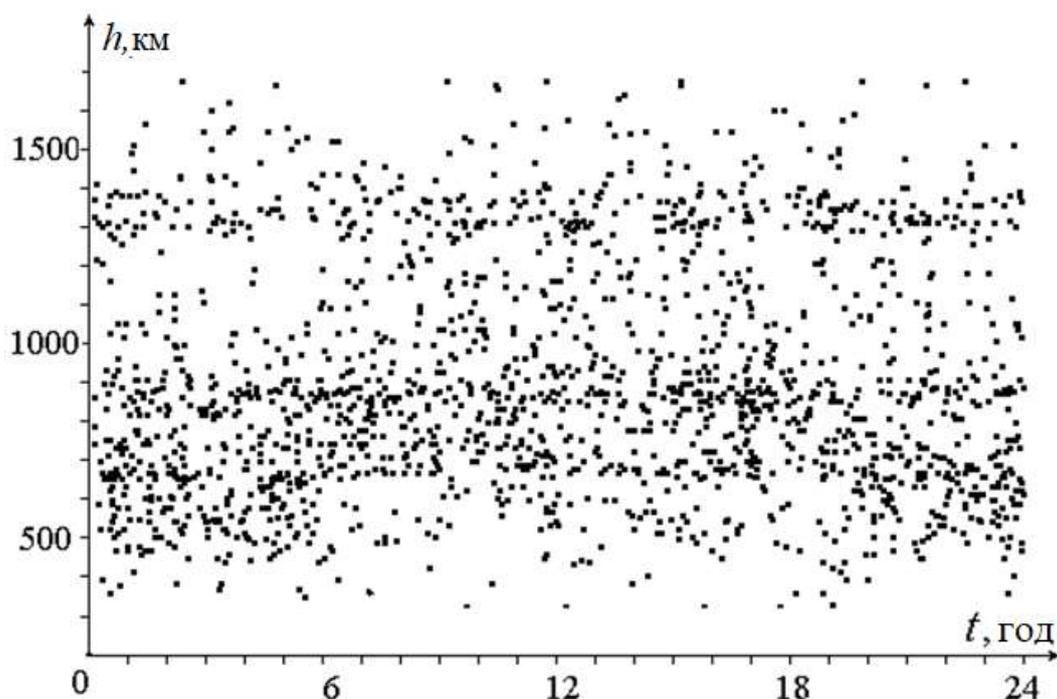


Рисунок 3.2 – Реєстрація радіолокаційних відбиттів під час спостережень іоносфери над Харковом

У цілому, у кожному сеансі вихідним результатом є усереднений на протязі хвилини висотний розподіл потужності приймаємої суми сигналу плюс завада. На рис 3.3 для періоду часу з  $8^{00}$  до  $8^{10}$  (11 сеансів) приведені графічні зображення результатів такого усереднення профілів. Саме по цим зображенням програмою обробки фіксуються заважаючі відбиття, що спотворюють висотний профіль потужності сигналу розсіяння. Як приклад, також можна спостерігати потужні відбиття у  $8^{00}$  і  $8^{03}$  на висотах 500 і 700 км, ймовірно, від супутників. У той же час на інших місцях профілів мають місце слабкі відбиття від елементів “космічного сміття” з меншим перерізом розсіяння.

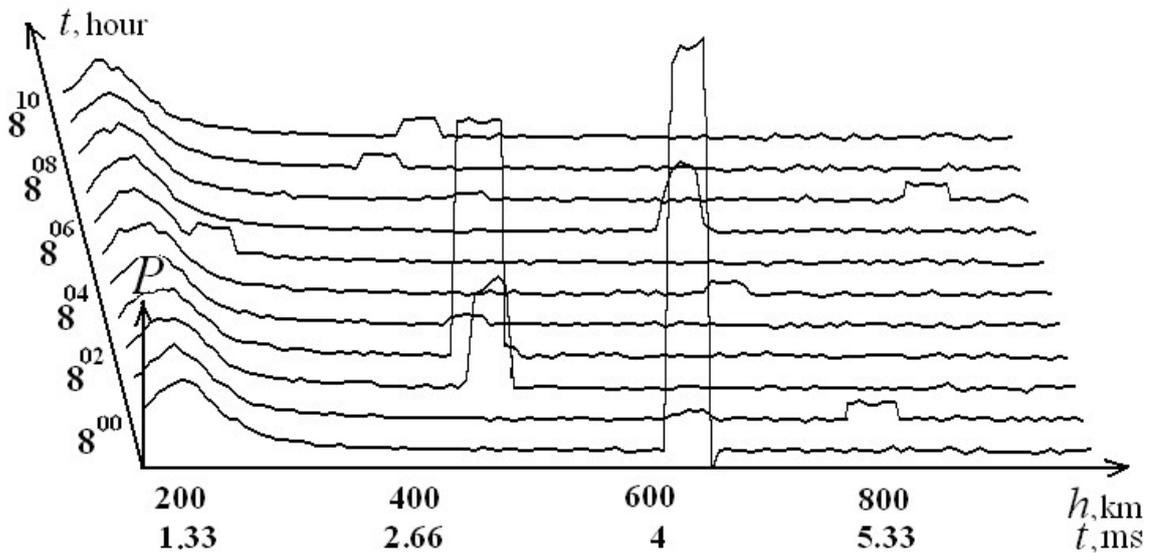


Рисунок 3.3 – Висотно-часові залежності результатів усереднення на протязі сеансів накопичених значень потужності суми сигнал+завада

При дослідженні іоносфери ці відбиття є завадовими, тому науковцями, що вивчають структуру та динаміку іоносферної плазми, розроблено методи їх локалізації та придушення за допомогою алгоритмів розпізнавання, які використовуються у процесі обробки сигналів НР.

В [4] описана методика, як радар НР на фоні інформації, яка ним реєструється з метою визначення радіальних значень швидкості руху іоносферної плазми, можна проводити ще й додатковий аналіз сигналів відбиття від штучних

космічних об'єктів та визначати таку характеристику цих об'єктів, як швидкість їх руху вздовж напрямку зондування. Коротко її суть наступна [45].

Для визначення висотного розподілу радіальної складової швидкості  $V_p(h)$  руху плазми використовується режим імпульсного (з частотою заповнення  $f_0$ ) зондування навколоземного космічного простору, переносу спектру прийнятого сигналу розсіяння на проміжну частоту  $f_{пр}$ , підсилення його до значень  $U(t)$  та перетворення у цифровий вигляд. Період повторення  $\Delta t$  імпульсів опитування АЦП по відношенню до періоду прийнятого сигналу на проміжній частоті встановлюється за умови, щоб будь-яка пара суміжних відліків сигналу  $U(t)$  знаходилася у квадратурній залежності.

У процесі приймання на протязі сеансу вимірювань цих даних у пам'яті обчислювача реєструються тисячі розгортки. Відбиття ж від космічного об'єкту, який пролітає через вузький промінь радара, найчастіше спостерігається протягом декількох секунд і формує слід на значно меншій кількості розгортки.

Надійне відстеження динаміки космічних об'єктів потребує аналізу сигналу протягом кожної окремої радіолокаційної розгортки, і це дає можливість обчислити радіальну швидкість за допомогою виразу

$$V_p = -\frac{cf_{пр}}{2f_0} \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi - \Delta\phi}, \quad (3.5)$$

де  $\Delta\phi$  визначається з аналізу зміни довжини  $T_{пр}$  періоду повторення прийнятого сигналу на величину  $\Delta T$  внаслідок появи доплерівської добавки. Методика ж, згідно якій шляхом аналізу інформації вздовж розгортки дальності є можливість для отримання значення  $\Delta\phi$ , є такою.

Наприклад, на проміжній частоті 1 МГц спостерігається (рис. 3.4) дуже слабкий сигнал, некогерентно розсіяний на іонізованих частках іоносфери, на який було накладено сигнал когерентного відбиття від космічного об'єкту протяжністю  $T_{імп}$ , що при  $T_{імп} = 650$  мкс відповідає відстані по дальності  $cT_{імп}/2 \approx 100$  км. Таке відбиття (навіть для малорозмірного об'єкту) має в десятки разів більшу амплітуду у порівнянні з сигналом НР.

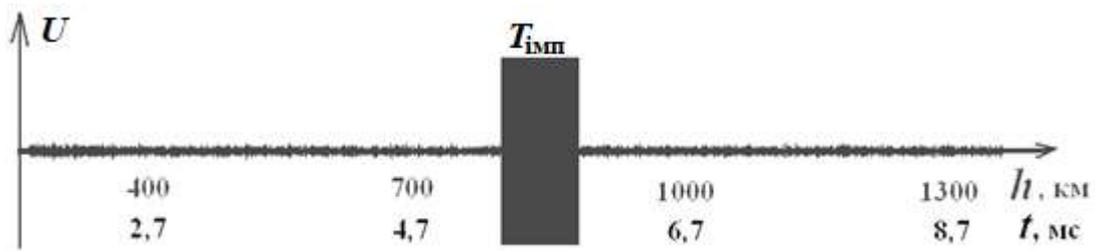


Рисунок 3.4 – Осцилограма прийнятого сигналу в одній із радіолокаційних розгорток дальності

Якщо змінити масштаб зображення та відобразити моменти дискретизації сигналу (з частотою  $4f_{\text{пр}} = 4$  МГц) (рис. 3.5), можна спостерігати доплерівський зсув частоти у даному разі зі знаком плюс (рух у напрямку до радара). Як результат, період вхідного сигналу зменшився, саме тому в моменти опитування АЦП відліки  $U_i$  (крапки на рисунку) на його виході поступово змінюють своє значення зі збільшенням величини радіолокаційної дальності  $t$ .

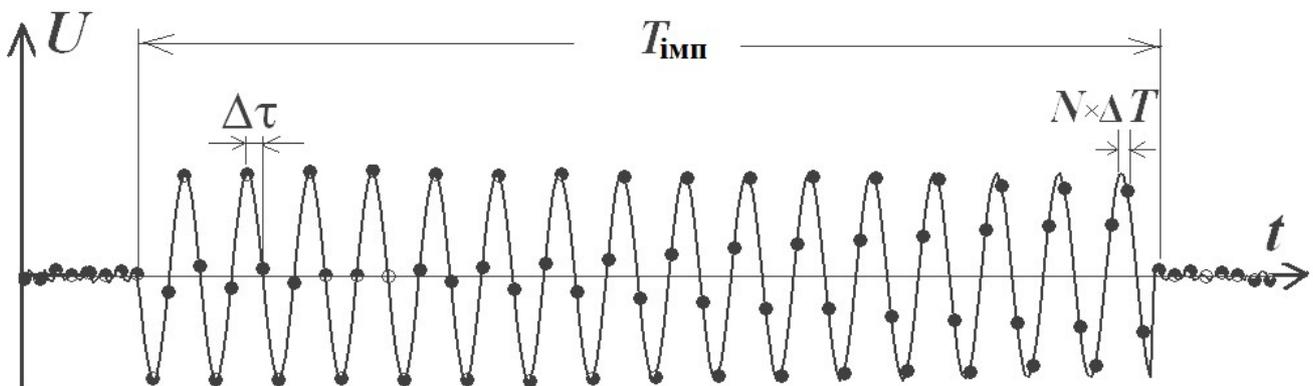


Рисунок 3.5 – Моменти дискретизації прийнятого сигналу відбиття

Згідно із запропонованою методикою, у пристрої обробки радара НР фазовий аналізатор повинен проводити розрахунок значень обвідної прийнятого сигналу (з використанням двох сусідніх відліків, що представляють собою квадратурні складові) на початку кожного  $i$ -го періоду як  $\sqrt{U_i^2 + U_{i+1}^2}$ , та у його кінці як  $\sqrt{U_{i+4}^2 + U_{i+4+1}^2}$ . Тут  $i = 1, 2, \dots, N$  – це набір цифрових відліків кількістю  $N = T_{\text{імп}}/\Delta\tau$ , що належать до сигналу когерентного відбиття від штучного об'єкту.

Наступний крок з використанням цієї обвідної дає можливість аналізатору визначати миттєве значення фаз для кожного періоду за виразами  $\arcsin\left(\frac{U_i}{\sqrt{U_i^2 + U_{i+1}^2}}\right)$  та  $\arcsin\left(\frac{U_{i+4}}{\sqrt{U_{i+4}^2 + U_{i+4+1}^2}}\right)$ . Для випадку, що зображений на рис. 3.5, друге значення буде відрізнятися від першого із-за наявності доплерівського зсуву.

Використавши наступну формулу

$$\Delta\varphi = \frac{1}{N-5} \cdot \sum_{i=1}^{N-5} \left[ \arcsin\left(\frac{U_{i+4}}{\sqrt{U_{i+4}^2 + U_{i+4+1}^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{U_{i+1}}{\sqrt{U_i^2 + U_{i+1}^2}}\right) \right], \quad (3.6)$$

можна різницю фаз, що спричинена ефектом Доплера і отримана в кожному періоді цього сигналу на проміжній частоті, статистично усереднити впродовж часу  $T_{\text{імп}}$ , тобто тільки під час присутності сигналу відбиття від космічного об'єкта. Використовуючи цю усереднену різницю фаз  $\Delta\varphi$ , яка пов'язана зі скороченням (рух об'єкту у напрямку Землі) або подовженням (рух у напрямку від Землі) періоду  $T_{\text{спр}}$  прийнятого сигналу, визначають радіальну складову швидкості  $V_R$  руху штучних об'єктів за виразом (3.5).

### 3.3. Спосіб визначення горизонтальної складової швидкості руху космічних об'єктів

До недоліків попереднього методу відноситься те, що цей алгоритм розраховано на визначення радіальної складової  $V_R$  швидкості руху об'єктів лише в одному напрямку зондування, тобто, наприклад, вздовж променя, що діє вертикально.

Розглянемо один із способів, згідно з яким радар НР може розрахувати ще й горизонтальну складову швидкості руху штучних космічних об'єктів. Для цього

залучається радіолокаційна апаратура, що дозволяє проводити одночасне зондування простору у вертикальному і похилому напрямках [46, 47]. Синхронне отримання сигналів відбиття від об'єктів космосу за допомогою двох антен (рис. 3.6), які спрямовано у різні напрямки, дає можливість розрахувати ще одну складову швидкості цих об'єктів.

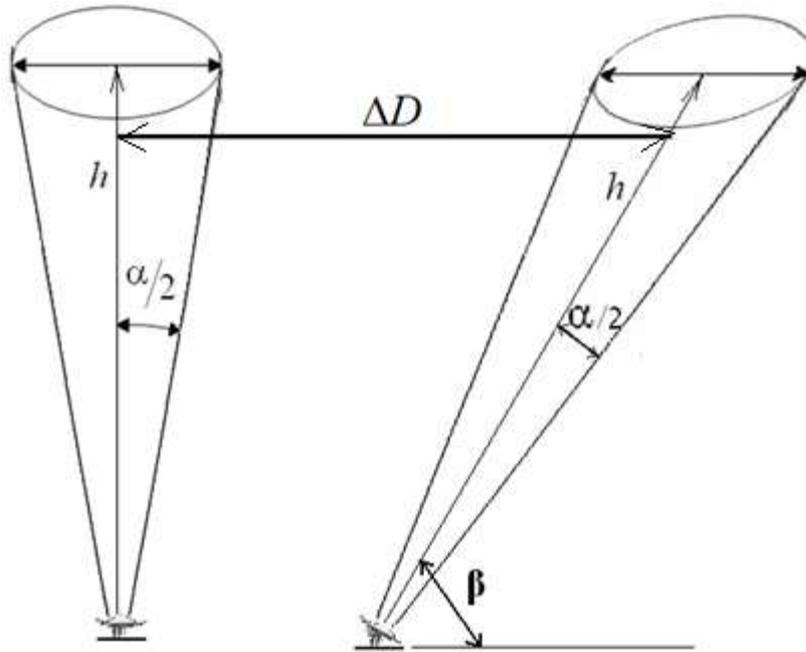


Рисунок 3.6 – Позиціонування діаграм спрямованостей двох антен

Алгоритм дії в цьому випадку, коли фіксується контрастне когерентне відбиття, передбачає розрахунок горизонтальної швидкості  $V_r$ , якщо є можливість зафіксувати різницю у часі  $\Delta t$  при почерговому перетині об'єктами діаграм спрямованості цих двох антен та використати формулу

$$V_r = \frac{\Delta D}{\Delta t}, \quad (3.7)$$

де  $\Delta D$  – відстань між центрами діаграм спрямованості задіяних антен на висоті  $h$  прольоту об'єкту.

Правда, такі системи можуть дати інформацію для розрахунку швидкості об'єктів лише у тому випадку, коли центри діаграм спрямованості двох антен опиняться на шляху траєкторії прольоту цих об'єктів. Але із-за вузьких діаграм

(одиниці градусів) можна таким чином відслідковувати траєкторію для дуже малої кількості об'єктів.

Перше удосконалення цього методу у тому, щоб використовувати тільки одну, вертикально спрямовану антену, але мати в структурі системи обробки радара НР допоміжний обчислювач. Він буде працювати паралельно з корелятором і на фоні інформації, що реєструється для визначення радіальних значень швидкості плазмових утворень, проводитиме додатковий аналіз сигналів відбиття від штучних космічних об'єктів з метою розрахунку їхньої швидкості у горизонтальному напрямку.

Поставлена задача вирішується тим, що у цьому методі визначення горизонтальної складової швидкості  $V_T$  штучних космічних об'єктів, що попадають у центр діаграми такої, наприклад, вертикально спрямованої антени, у процесі зондування іоносфери все так же буде використовуватися радіопередавач, який з періодом  $T_n$  випромінюватиме радіоімпульси тривалістю  $T_{\text{імп}}$ . У цей час на приймальній стороні радара буде використовуватися пристрій, що складається з радіоприймача, який за рахунок супергетеродинного перетворення переноситиме прийнятий сигнал відбиття на проміжну частоту  $f_{\text{пр}}$ . На виході радіоприймача АЦП завдяки імпульсам опитування з періодом слідування  $\Delta\tau = \frac{1}{4f_{\text{пр}}}$  (коли відстань між імпульсами дорівнює чверті періоду прийнятому сигналу на проміжній частоті) забезпечить квадратурну вибірку цифрових відліків

У пам'яті обчислювача на сигналі, прийнятому протягом дії радіолокаційних розгортки дальності кожного короткого сеансу накопичення даних (як правило, протягом 1 хв. кожний) з цифрованих відліків формується двомірний масив значень напруги в координатах "висота-номер розгортки". Після закінчення сеансу в цьому масиві виділяються ті  $m$  розгортки, в яких на висоті  $h$  на фоні сигналу НР присутнє контрастне когерентне відбиття від космічного об'єкту. Кількість цифрових відліків вздовж розгортки в цьому випадку залежить від тривалості сигналу відбиття. При довжині імпульсу зондування  $T_{\text{імп}}$  вони становлять  $n = \frac{T_{\text{імп}}}{\Delta\tau}$ . Таким чином, розмірність тієї частини масиву, де присутнє відбиття у

вигляді напруги  $U_{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ , а  $j = 1, 2, \dots, n$ ) становить  $m \times n$ , де  $i$  – номер розгортки, а  $j$  – номер цифрового відліку відбитого від об'єкту сигналу на  $i$ -й розгортці (номер висоти).

Ці елементи дають можливість вздовж кожної  $i$ -ї розгортки квадратурні значення напруги перетворити в потужності (квадрат обвідної) сигналу відбиття як

$$P_{i,j} = U_{i,j}^2 + U_{i,j+1}^2. \quad (3.8)$$

Якщо ці значення вздовж кожної розгортки статистично усереднити згідно формули

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{i,j}, \quad (3.9)$$

то обчислювач отримає узагальнену (від розгортки до розгортки) залежність у часі  $P_i$  потужності сигналу відбиття, на якій тепер можна виділити часовий інтервал

$$\Delta t = T_n \cdot (k_2 - k_1), \quad (3.10)$$

де від розгортки за номером  $k_1$  до розгортки  $k_2$  значення цієї потужності перевищує рівень половини від свого максимального значення. Цей інтервал визначає час перебування об'єкту в *активній* зоні діаграми спрямованості антени. Знаючи на висоті  $h$  ширину  $\Delta d$  діаграми вертикально спрямованої антени, що по рівню половинної потужності обмежена кутом розкриття  $\alpha$  (активна зона), за виразом

$$\Delta d = 2h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (3.11)$$

обчислювач розрахує горизонтальну складову швидкості руху об'єкту як

$$V_r = \frac{\Delta d}{\Delta t}. \quad (3.12)$$

Можливість отримання зазначеного результату підтверджується наступним. Так, радаром НР в одному із сеансів на фоні сигналу розсіяння та космічного шуму зареєстровано чітке контрастне відбиття від космічного об'єкту з центром на висоті  $h = 495$  км (що відповідає радіолокаційній затримці  $t_3 = 2h/c = 3,3$  мс).

Цей випадок у вигляді осцилограми напруги для частини однієї із розгортки, що мають період  $T_{\Pi} = 41$  мс, представлено на рис. 3.7. Тривалість цього відбиття вздовж розгортки пов'язана з тривалістю імпульсу зондування (на рис. ліворуч, на початку розгортки), що дорівнює  $T_{\text{імп}} = 660$  мкс (тобто відповідає протяжності по висоті  $\sim 100$  км).

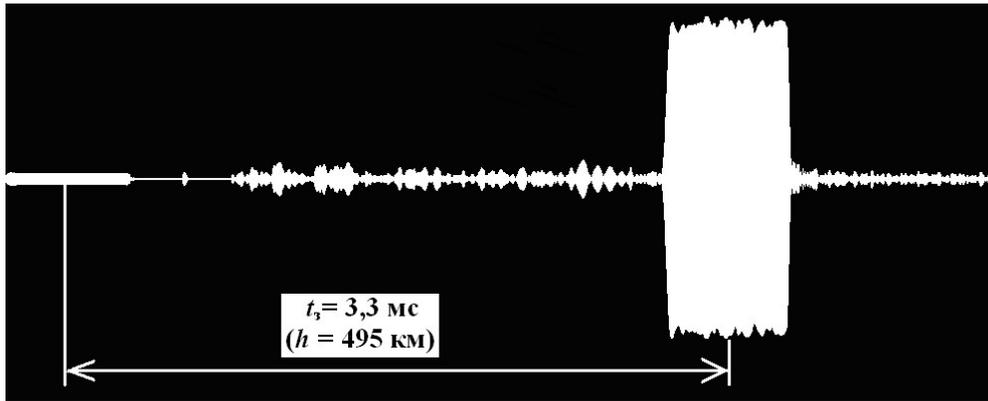


Рисунок 3.7 – Осцилограма прийнятого сигналу в одній із радіолокаційних розгортки дальності при наявності когерентного відбиття

Зображення на рис. 3.8 (для наочності приводиться тільки кожен сотий відлік) демонструє вже групу із  $m = 80$  розгортки, які в пам'ять обчислювача були занесені після перетворення у числовий масив сигналу на проміжній частоті  $f_{\text{пр}} = 1$  МГц. Оскільки період слідування імпульсів опитування АЦП мав значення  $\Delta\tau = 0,25$  мкс, кількість квадратурних відліків вздовж розгортки в цілому становила  $n = T_{\text{імп}} / \Delta\tau = 2640$ .

Якщо розглянути виділену для аналізу зону у вигляді розрахованих за допомогою виразу (3.6) потужностей сигналу відбиття  $P_{i,j}$ , де  $i = 1, 2, \dots, 80$ , а  $j = 1, 2, \dots, 2640$  (рис. 3.9) та порівняти її з формою діаграми спрямованості антени, то можна спостерігати наступне.

Усереднення вздовж розгортки за допомогою виразу (3.9) значень потужностей  $P_{i,j}$  дозволяє отримати потужність сигналу відбиття  $P_i$  у вигляді функції, що

залежить від номеру розгортки. По цій залежності, зафіксувавши з урахуванням максимального значення  $P_{i \max}$  рівень половинної потужності  $P_{i 0,5} = P_{i \max}/2$ , можна знайти той діапазон часу (від розгортки  $k_1$  до розгортки  $k_2$ ), в якому об'єкт перебував впродовж часу  $\Delta t$ . У даному випадку  $k_2 - k_1 = 34$ , тобто  $\Delta t = T_{\Pi} \cdot (k_2 - k_1) = 1,394$  с.

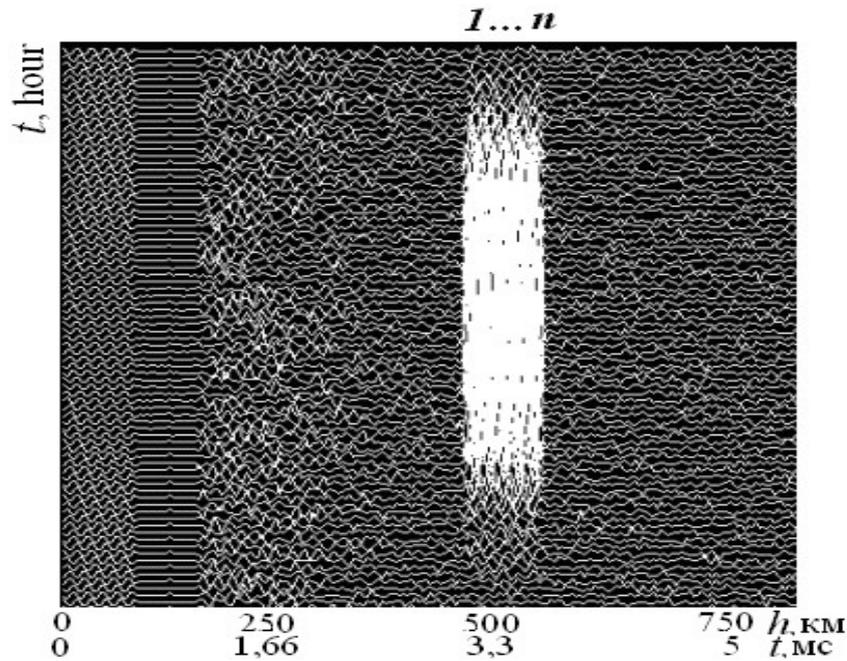


Рисунок 3.8 – Когерентне відбиття на групі радіолокаційних розгортки

Тепер знаходимо ширину  $\Delta d$  діаграми спрямованості антени на висоті 495 км, що обмежена кутом розкриття  $\alpha = 1,2^\circ$  [46], за формулою (3.11):  $\Delta d = 2h \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) = 10,37$  км. Горизонтальну складову швидкості руху об'єкту визначаємо за виразом (3.12) як  $V_{\Gamma} = \Delta d / \Delta t = 7,439$  км/с. Якщо враховувати, що на висоті 495 км перша космічна швидкість об'єкта згідно з виразом (3.3) має дорівнювати 7,619 км/с (у випадку кругової орбіти), або бути більшою (при еліптичній орбіті), реальна ж швидкість цього об'єкту є меншою на 2,4 %, що може свідчити про значний вплив факторів, що збурюють та уповільнюють рух космічного об'єкту.

Наступним удосконаленням методу є визначення горизонтальної швидкості руху за допомогою антени, яка не обов'язково формує вертикально спрямовану діаграму. Адже у більшості експериментів при дослідженні параметрів іоносфери задачею є фіксація хвильових процесів вздовж магнітних силових ліній, сформованих полем Землі під різними кутами нахилу. Тому в загальному випадку використовуються антени з похило спрямованими діаграмами, але чим більшим є кут нахилу променя до горизонту, то час прольоту літальних об'єктів через промінь антени при тій же швидкості збільшується.

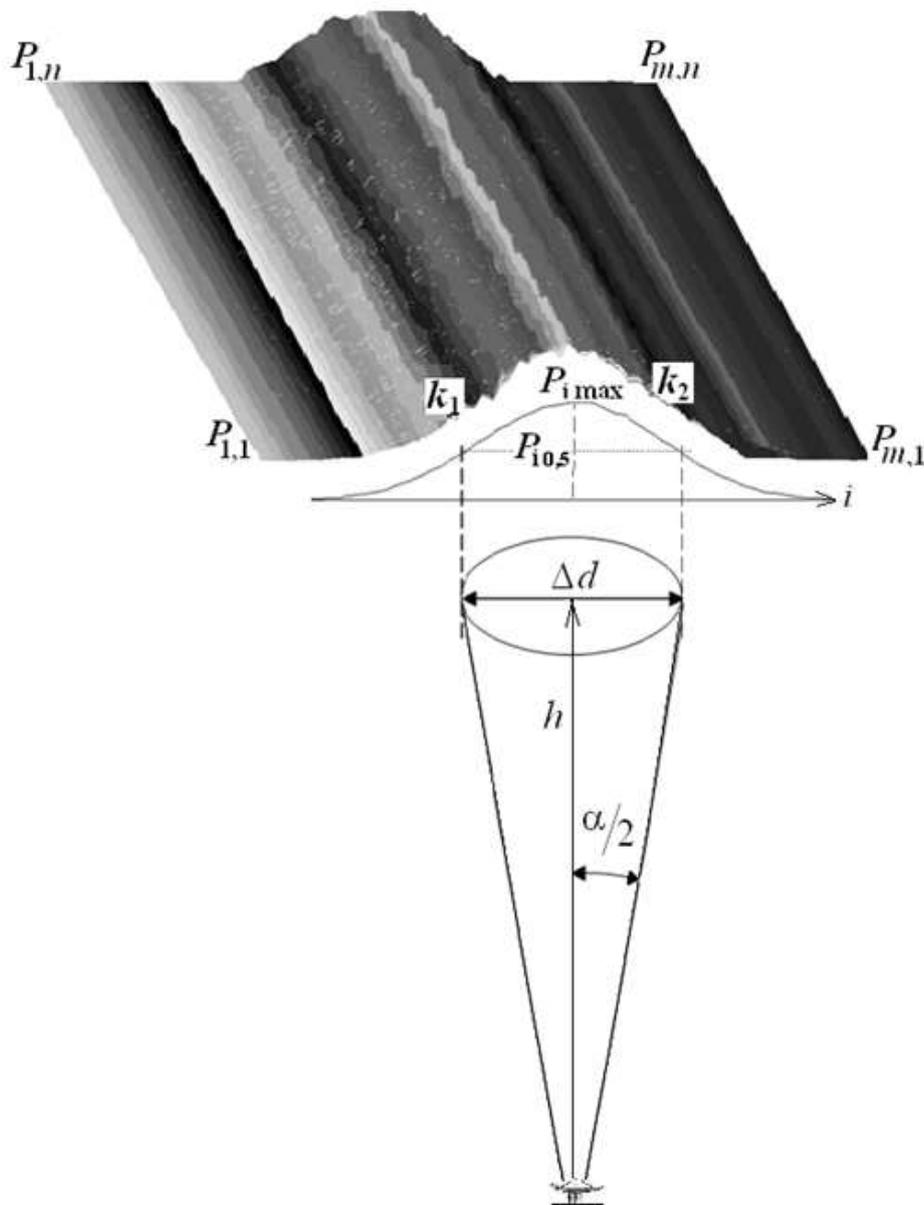


Рисунок 3.9 – Формування сигналу відбиття у діаграмі спрямованості вертикально розташованої антени

З метою узагальнення процесу [48] визначення горизонтальної складової швидкості  $V_{\Gamma}$  штучних космічних об'єктів, що попадають у центр діаграми спрямованості антени, обмеженій кутом розкриття  $\alpha$  по рівню половинної потужності, алгоритм дій наступний.

Все так же при залученні системи тактування з імпульсами опитування, період слідування  $\Delta t$  яких відповідає співвідношенню  $\Delta t = 1/4f_{\text{пр}}$ , буде забезпечена квадратурна вибірка цифрових відліків напруги  $U_i$  на прийнятому вздовж радіолокаційної розгортки дальності сигналі. Як результат, за допомогою обчислювача системи обробки на протязі сеансу накопичення в пам'яті даних з цифрованих відліків сформується двомірний (дальність-розгортки) цифровий масив напруги. На базі цих відліків вздовж кожної  $i$ -ї розгортки квадратурні значення напруги обчислювач перетворить у потужності сигналу відбиття як квадрат обвідної та статистично усереднить їх для отримання узагальненої, від розгортки до розгортки (рис. 3.10), часової залежності потужності сигналу відбиття згідно з формулою

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (U_{i,j}^2 + U_{i,j+1}^2). \quad (3.13)$$

Вздовж цієї залежності буде виділено часовий інтервал  $\Delta t = T_{\text{п}} \cdot (k_2 - k_1)$ , протягом якого від розгортки за номером  $k_1$  до розгортки  $k_2$  значення цієї потужності  $P_i$  перевищуватиме рівень половини від свого максимального значення. Цим визначається час перебування об'єкту в активній зоні діаграми спрямованості антени та розраховується горизонтальна складова швидкості руху об'єкту як

$$V_{\Gamma} = \Delta d / \Delta t, \quad (3.14)$$

де  $\Delta d$  – довжина шляху прольоту об'єкту крізь діаграму на дальності  $h$ .

Але у цьому випадку враховується значення кута нахилу променя антени. Тому для розрахунку на дальності  $h$  цієї довжини шляху прольоту об'єкту крізь активну зону обчислювач радара буде використовувати вираз

$$\Delta d = \frac{2h \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)}{\sin \beta}, \quad (3.15)$$

де  $\beta$  – кут нахилу променя антени радара до горизонту.

Таким чином, з допомогою розглянутих вище методів показана можливість радарів НР контролювати параметри руху не тільки ппизмових утворень, але і тих штучних та природних елементів у навколоземному космічному просторі, що попадають у поле зору променя радіолокаційної системи. Одночасно з отриманням інформації, що реєструється з метою визначення значень швидкості руху часток іоносферної плазми, такий контроль дозволяє проводити ще й аналіз сигналів відбиття від штучних космічних об'єктів та розраховувати складові швидкості їх руху, що свідчить про сучасні можливості радарів НР.

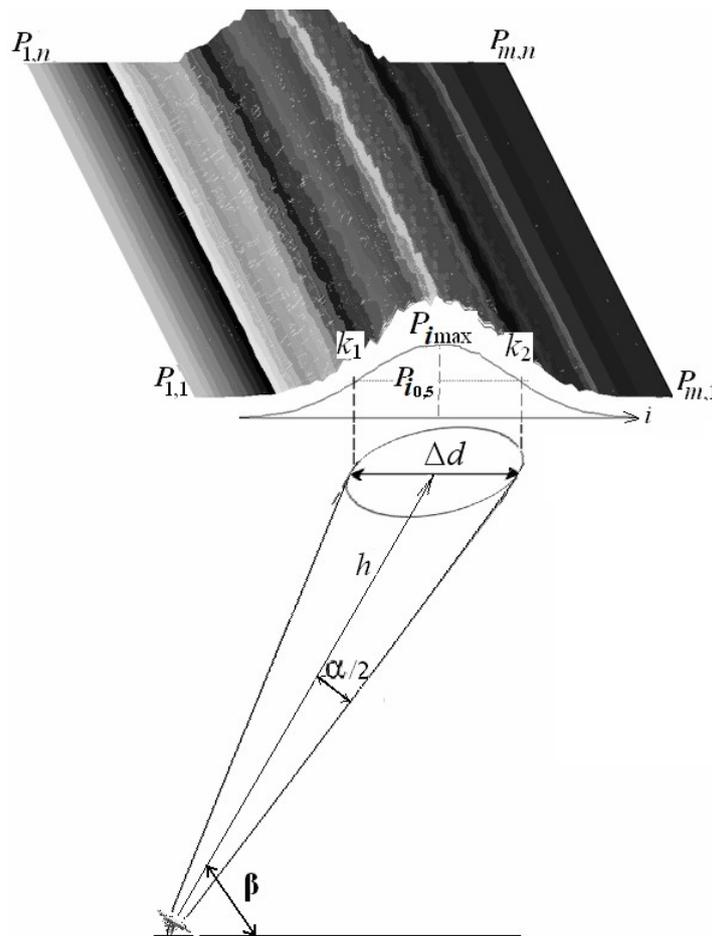


Рисунок 3.10 – Формування сигналу відбиття у діаграмі спрямованості похило розташованої антени

**Розділ 4****РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ  
ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ У МЕТОДІ НР**

Використовуючи радіофізичний метод НР та залучаючи аналіз сигналу, який представляє собою некогерентне розсіяння радіохвиль на просторово-часових неоднорідностях плазми [13, 49, 50], можна отримати висотно-часові розподіли потужності НР сигналу, а також його спектрів і автокореляційних функцій [51, 52]. Ці параметри сигналу НР пов'язані з наступними параметрами іоносферної плазми: концентрацією електронів, електронною та іонною температурами, швидкістю дрейфу плазми, іонним складом іоносферної плазми тощо.

У даному розділі розглянемо випадки розрахунку по отриманому сигналу розсіяння таку характеристику іоносферної плазми, як електронна концентрація при використанні апаратури радарів НР Інституту іоносфери. Ці випадки можливі завдяки автономності каналів збудження і ортогональності вібраторів антени, у результаті чого вони дозволяють випромінювати і приймати сигнали з круговою або/та лінійною поляризацією, оперативно змінюючи, за бажанням, тип поляризації та напрям повороту її площини.

**4.1. Аналіз особливостей характеру поведінки радіохвиль,  
їх приймання і обробки**

Розглянемо таку особливість у характері поведінки радіохвилі, як обертання її площини поляризації [53, 54] при проходженні через анізотропне середовище. Деякі питання використання сигналів зондування, що мають лінійну чи кругову поляризацією у методі НР, з використанням апаратури радарів розглядалися у попередніх розділах та, наприклад, у [3, 55].

Лінійно-поляризована поперечна хвиля (рис. 4.1, *a-b*) може бути описана як суперпозиція двох поляризованих по колу хвиль з протилежним напрямком обертання, але з однаковими хвильовими векторами і амплітудою. В ізотропному

середовищі проекції вектора електричної компоненти цих двох радіохвиль на площину поляризації коливаються синфазно, і якщо отримувати їх суму, то вона буде дорівнювати вектору електричної компоненти лінійно-поляризованої хвилі.

Якщо фазова швидкість компонент у середовищі різна (має місце так звана циркулярна анізотропія середовища), то одна із хвиль відстає від іншої, що призводить до появи різниці фаз між коливаннями зазначених проекцій на обрану площину. Ця різниця фаз змінюється при наступному поширенні хвилі (в однорідному середовищі – лінійно зростає).

Таким чином, безпосередньою причиною повороту площини поляризації є *різна швидкість* розповсюдження кругових компонент, що і визиває набіг різниці фаз між циркулярно поляризованими складовими лінійно-поляризованої хвилі. Для електромагнітних коливань таке середовище називається оптично активним (або гіротропним).

Циркулярна анізотропія середовища може залежати від накладених на середовище зовнішніх полів. Кут повороту  $\beta$  площини поляризації лінійно залежить за інших рівних умов від пробігу  $d$  в активному середовищі (рис. 4.1, в).

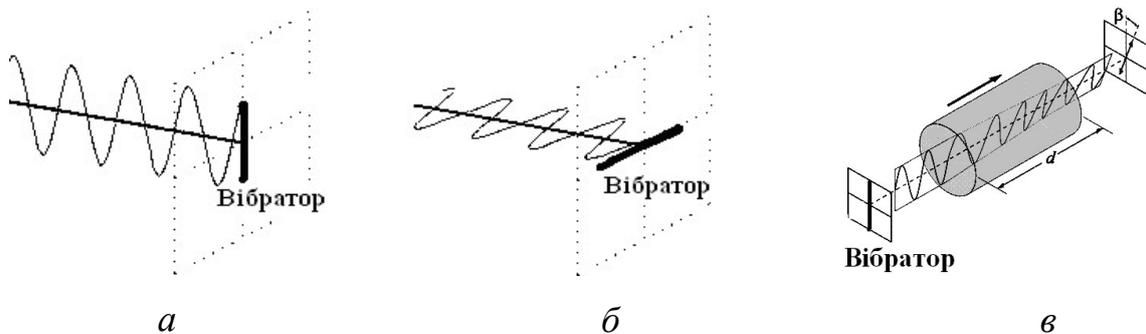


Рисунок 4.1 – Приклади випромінювання лінійно поляризованої радіохвилі з вертикальною (а) і горизонтальною (б) поляризаціями та приклад обертання площини поляризації електромагнітної хвилі в плазмі (в) при накладанні магнітного поля (ефект Фарадея).

У загальному випадку для гармонійних хвиль кінець вектора електричної компоненти описує еліпс у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі: це еліптична поляризація. Важливими окремими випадками є лінійна поляризація і кругова поляризація, при якій кінець вектора амплітуди описує коло

у площині коливань (рис. 4.2). Кругова поляризація (як і еліптична) у залежності від напрямку обертання вектора може бути позитивною (або правою) і негативною (або лівою).

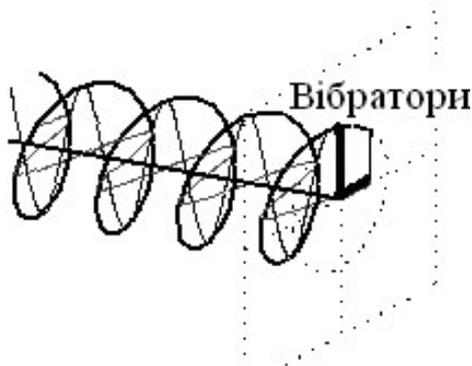


Рисунок 4.2 – Випромінювання радіохвилі з позитивною круговою поляризацією

Наприклад, при русі супутника або космічного корабля, а також за рахунок зміни електронної концентрації по закономірному чи випадковому характеру кут повороту площини поляризації змінюється. Це призводить до появи поляризаційних завмирань при прийманні сигналу на антену з лінійною поляризацією. Такі завмирання, наприклад, чітко спостерігалися під час приймання сигналів першого штучного супутника Землі через іоносферу.

Розсіяння радіохвиль на неоднорідностях іоносфери, а також інтерференція прямих і розсіяних хвиль призводять до коливань амплітуди радіосигналів. Загалом, площина поляризації обертається на кут, який залежить від концентрації електронів, напруженості геомагнітного поля, висоти та кута між напрямком поширення хвилі і силовими лініями магнітного поля. Кут повороту збільшується обернено пропорційно квадрату частоти випромінювання.

#### **4.2. Режим випромінювання та приймання сигналу з лінійною поляризацією**

Прямий спосіб визначення абсолютних значень концентрації електронів іоносферної плазми полягає в тому, що використовується режим випромінювання та приймання лінійно поляризованої хвилі довжиною не менше 1 м і не більше

6 м. Довжина хвилі харківського радара НР ( $\lambda_0=1.9$  м) дозволяє проводити такі вимірювання, на відміну від УВЧ радарів, які складають більшість світових радарів НР. Абсолютне значення концентрації електронів отримується з розрахованого кута повороту хвилі, який визначається екстремальними (максимумами та мінімумами) значеннями на висотному профілю вимірної потужності НР сигналу, що має хвилеподібний характер через ефект Фарадея.

Тривалість зондувальних імпульсів має вибиратися із того, що чим вона менше, тим більш якісним є проявлення фарадеєвських завмирань у профілі потужності НР сигналу, але її зменшення викликає і збільшення статистичної похибки вимірюваних параметрів.

Структура РЛС для технічної реалізації такого режиму показана на рис. 4.3, справа. В її складі також є балансний міст, який налаштовано на сигнал з робочою довжиною хвилі  $\lambda_0$ . Складові лінійно поляризованого сигналу, який приймається антеною, виділяються, складуючись, на виході 3 моста, куди відповідно підключено входи приймача.

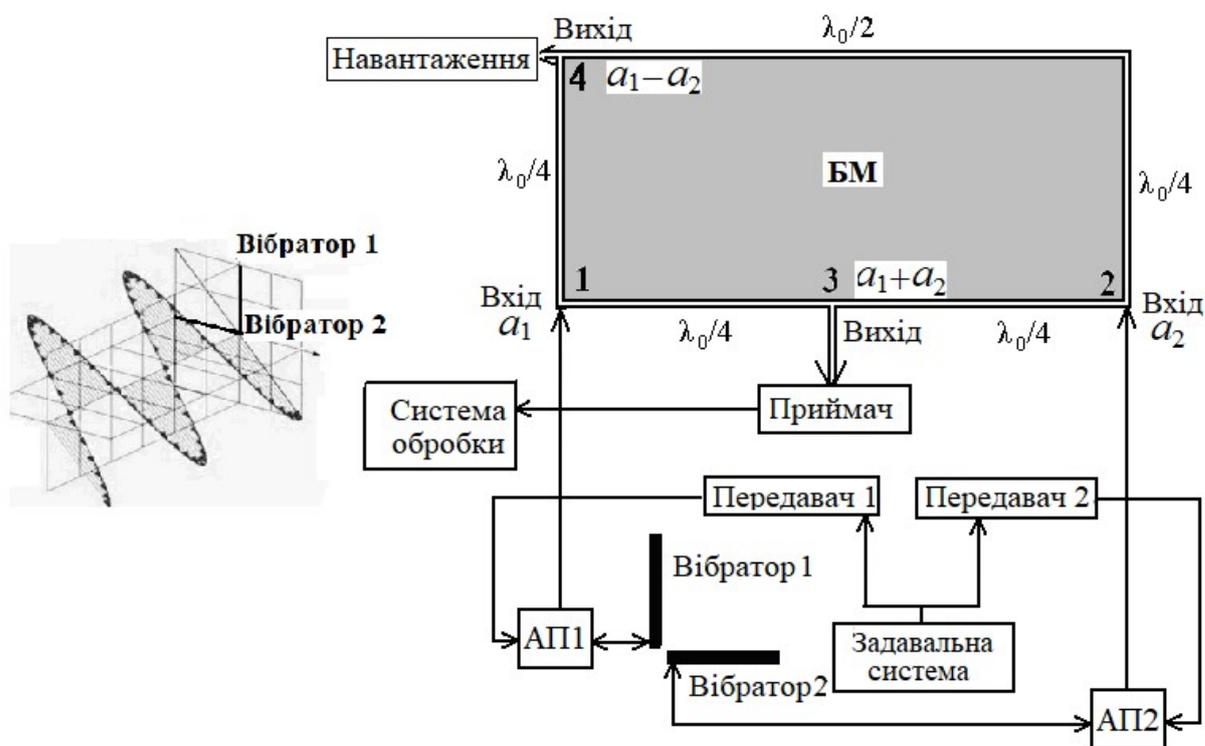


Рисунок 4.3 – Діюча схема зондування іоносфери та наступного приймання лінійно поляризованого сигналу НР за допомогою БМ

У принципі, лінійно поляризований сигнал можна отримати, використовуючи лише один із передавальних трактів, але паралельна робота двох імпульсних передавачів дозволяє за рахунок підвищеної потужності зменшити статистичну похибку вимірювань параметрів НР сигналу, тобто більш точно визначити концентрацію електронів.

Збудження обох передавачів здійснюється від одного джерела радіочастотного сигналу — задавальної системи, в якій формується радіоімпульсний сигнал. За допомогою підстроювальних фазообертачів устанавлюється нульовий зсув фази сигналу на вібраторі 1 відносно сигналу на вібраторі 2, за допомогою яких відбувається випромінювання та приймання НР сигналу. У цьому випадку отримуємо випромінювання лінійно поляризованого сигналу, який починає свій рух у діагональній площині (рис. 4.3, зліва).

Бажано, щоб сигнал, прийнятий на лінійно-поляризовану антену, утворював ідеальний результат, як це зображено на рис. 4.4. Значення  $2\Delta h$  — це відстань, на якій площина поляризації повертається на  $180^\circ$ . Визначивши чисельні значення, які характеризують відстань  $2\Delta h$  між вузлами графіку (між локальними мінімумами або максимумами), для кожної  $i$ -ї висоти можна визначити свою плазмову частоту  $f$  як [3]

$$f(\text{МГц}) \approx \sqrt{\frac{3380}{2\Delta h_i (\text{км})}}. \quad (4.1)$$

У табл. 4.1 нараховані деякі варіанти величин  $2\Delta h$  і відповідні їм значення  $N_e$  та  $f = f_{\text{пл}}$ , що мають місце для випадку роботи харківського радара НР: практично справжню поведінку висотного розподілу потужності сигналу НР дає результат моделювання з використанням локальних максимумів пунктирною кривою; точкова крива вище максимуму іонізації відповідає використанню тривалості зонда 600 мкс.

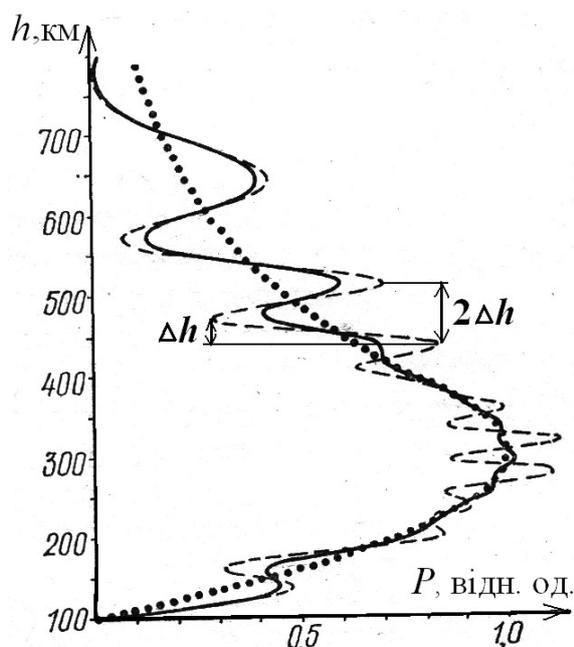


Рисунок 4.4 – Висотний профіль потужності НР сигналу за відсутності ефекту Фарадея (точки); висотний профіль (лінія) при застосуванні лінійної поляризації та за відсутності шумоподібної завади; випадок оптимальної тривалості зондувального імпульсу (пунктир)

$2\Delta h$ , км	$N_e$ , $\text{м}^{-3}$	$f_{\text{пл}}$ , МГц
21	$2,0 \times 10^{12}$	12,7
28	$1,5 \times 10^{12}$	11
42	$1,0 \times 10^{12}$	9
68	$0,61 \times 10^{12}$	7
94	$0,45 \times 10^{12}$	6
210	$0,2 \times 10^{12}$	4
380	$0,11 \times 10^{12}$	3
840	$0,05 \times 10^{12}$	2

Табл. 4.1 – Табличні дані для визначення плазмової частоти  $f_{\text{пл}}$  за допомогою лінійно-поляризованої антени та по значенню  $2\Delta h$

Слід зауважити, що з використанням значень  $2\Delta h_i$  можна розрахувати весь висотний розподіл електронної концентрації, якби це дозволили результати експерименту, отримані так, як це зображено в ідеальному варіанті на рис. 4.4. Усереднені значення електронної концентрації для інтервалу висот між точками, що рознесені на значення  $\Delta h_i$  (відповідне куту повороту на  $90^\circ$ ), у цьому випадку дорівнюють [56].

$$N_e(h_i) = \frac{16,8 f_0^2}{M(h_i)} \cdot \frac{\pi/2}{\Delta h_i}, \quad (4.2)$$

де  $M(h_i)$  – складова напруженості геомагнітного поля Землі уздовж напрямку зондування. При цьому передбачається, що для інтервалу висот від 150 до 350 км в районі Харкова можна прийняти значення  $M \approx 31$  А/м, яке незначно змінюється з

висотою (0,17 А/м на 10 км). Якщо ж при цьому розподіл  $N_e(h)$  в інтервалі  $\Delta h_i$  відповідає моделі лінійного шару, то, враховуючи, що для харківського радіолокатора НР  $f_0 = 158$  МГц, маємо

$$N_e(h_i) \left[ \text{м}^{-3} \right] \approx \frac{4,2 \cdot 10^{16}}{2\Delta h_i}. \quad (4.3)$$

Цей режим використовується у випадку, коли немає можливості отримати інформацію про значення критичної частоти в максимумі шару F2. Така ситуація має місце, наприклад, через наявність в нижній іоносфері екранувального шару E<sub>s</sub>, дифузного розсіяння або інших перешкоджаючих факторів, що не дозволяють калібрувати дані в процесі використання способу “профілю потужності” (див. нижче).

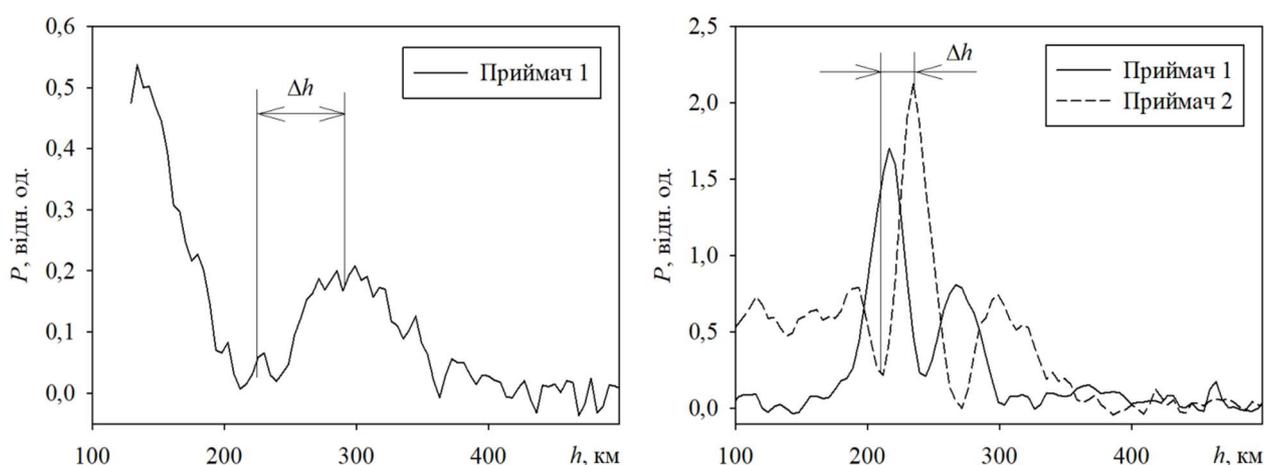


Рисунок 4.5 – Висотні профілі потужності НР сигналу на виходах приймачів, підключених до ортогональних вібраторів антени, при використанні лінійної поляризації в реальних денних умовах за низькою (зліва) та помірною (справа) сонячною активністю

Недоліком способу є похибка у визначенні місця розташування вузлових точок через шумоподібний характер НР сигналу та наявність космічного та апаратного шумів. Особливо це стосується профілів потужності НР сигналу, отриманих

в умовах низького відношення сигнал/шум та/або при недостатньо короткому імпульсі зондування, а також з малим часом накопичення даних (наприклад, при статистичному усередненні у коротких – 1 хв і менше – сеансах вимірювання), як це показано на рис. 4.5. У тому числі при малих значеннях електронної концентрації (або короткій довжині хвилі) кут повороту площини поляризації так незначно змінюється вздовж висоти, що застосування цього способу для визначення  $N_e(h)$  стає мало неефективним.

### **4.3. Режим випромінювання та приймання сигналу з круговим обертанням площини поляризації**

У тому випадку, щоб уникнути неприємного явища завмирання сигналу внаслідок обертання площини поляризації, у радіолокації в метровому діапазоні радіохвиль працюють з сигналами з круговою поляризацією. При цьому найбільш використовуваним у методі НР є спосіб визначення параметрів іоносфери з вимірюванням повного профілю потужності НР сигналу, отриманого без фарадеївських завмирань. Апаратна реалізація [3] та способи обробки у разі використання довгого зондувального радіоімпульсу наступні (рис. 4.6, справа).

У цьому режимі передавачі 1 і 2 збуджуються від одного джерела радіочастотного сигналу (задавальної системи), а за допомогою фазообертача вводиться зсув фази на вході одного з передавачів таким чином, щоб різниця фаз високочастотного заповнення сигналів, що випромінюються ортогональними вібраторами, складала  $90^\circ$ , тобто формувалася кругова поляризація (рис. 4.6, зліва).

Для приймання НР сигналу використовується той же балансний міст. За допомогою фазообертача на вході плеча 1 моста встановлюється нульова різниця фаз між сигналами від ортогональних вібраторів (з урахуванням їх шляху проходження в антено-фідерному тракті) таким чином, щоб з виходу моста 4 на вхід приймача 1 надходив сумарний сигнал від входів 1 і 2 моста, а на виході 3 через

різницю між  $a_1$  і  $a_2$  сигнал був відсутній. Таким чином приймальний тракт налаштовується на приймання сигналу з круговою поляризацією відповідно до напрямку обертання, встановленого для зондувального сигналу.

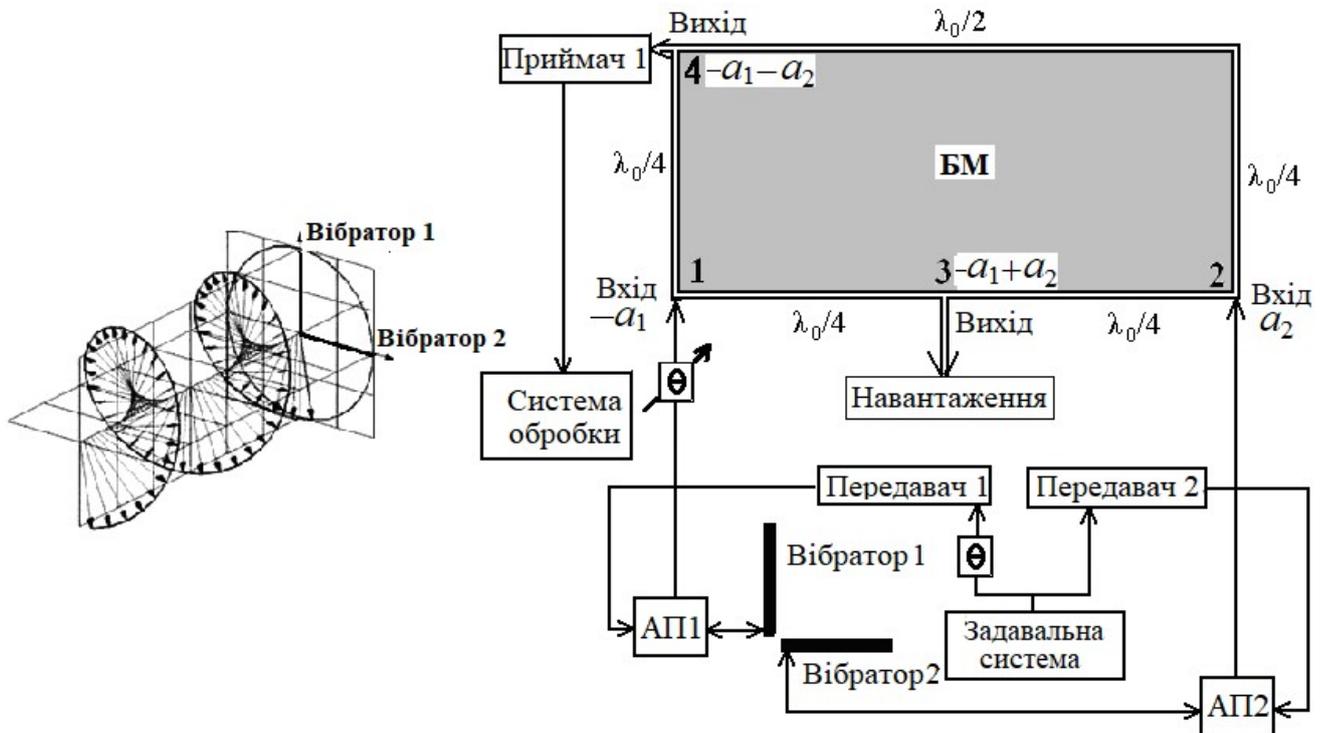


Рисунок 4.6 – Застосовування кругової поляризації для зондування (зліва) та схема РЛС для такого випадку (справа)

Результат приймання сигналу під час кожної радіолокаційної розгортки з періодом 40 мс (тобто обчислений у системі обробки висотний розподіл потужності суміші НР сигналу та шуму) показано на рис. 4.7 (верхня панель). Нижня панель на рис. 4.7 ілюструє висотний профіль потужності прийнятого сигналу  $P(h)$ , який отримано в результаті статистичного усереднення всіх розгорток.

Тривалість сеансу зазвичай становить  $\Delta T = 15$  хв для визначення основних параметрів іоносферної плазми, зокрема концентрації електронів, кінетичних температур плазми, її дрейфу та ін.

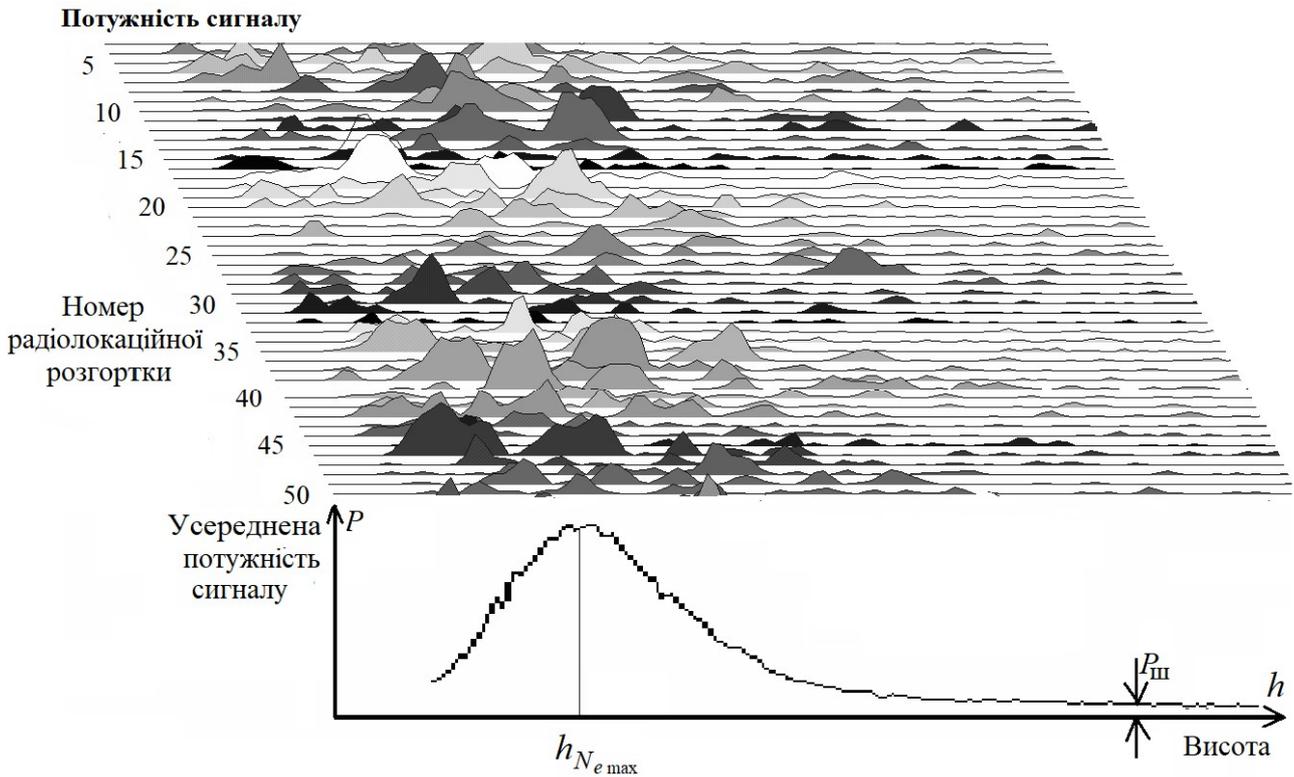


Рисунок 4.7 – Висотно-часовий розподіл потужності суміші НР сигналу та шуму у кожній розгортці дальності РЛС та розподіл за висотою усередненого результату на протязі сеансу вимірювання

Процедура розрахунку висотного профілю концентрації електронів  $N_e(h)$  складається з таких кроків [3]: а) отримання значень потужності  $P_c(h)$  НР сигналу уздовж напрямку зондування як різницю між потужністю  $P(h)$  суміші сигнал+шум на кожній ділянці розгортки і усередненою потужністю шуму  $P_{ш}(h)$  на ділянках у кінці розгортки, де НР сигнал відсутній; б) отримання нормованого висотного профілю концентрації електронів з використанням множника  $[1+T_e(h)/T_i(h)]$ , де  $T_e$  і  $T_i$  – температури електронів та іонів, отримані з застосуванням кореляційної обробки НР сигналу (див. п. б); в) калібрування результатів з використанням критичної частоти  $f_oF2$  шару F2 іоносфери.

Таким чином, концентрація електронів для сеансів з накопиченням результатів вимірювань кореляційних функцій (зокрема потужностей) протягом часу  $\Delta T$  розраховується за виразом

$$N_e(h_i) = \left\{ 1,24 \times 10^{10} \times q(h_i) h_i^2 \left[ 1 + \frac{T_e(h_i)}{T_i(h_i)} \right] \right\}_{\text{norm}} \times (f_o F2)^2, \quad (4.4)$$

де  $q(h_i) = P_c(h_i)/P_{\text{ш}}$  – відношення потужностей НР сигналу і шуму;  $h_i = i\Delta h$  – висота центру  $i$ -ї висотної ділянки довжиною  $\Delta h$ ,  $i = 1, 2, \dots$ .

Особливістю такої процедури є необхідність у залученні даних критичної частоти  $f_o F2$ , отриманих за допомогою додаткового радіофізичного приладу – іонозонду [57] одночасно з даними НР вимірювань (рис. 4.8).

Недоліки такого підходу в тому, що інформація про критичну частоту, що отримується з іонограм іонозонда, нерідко буває неточною, особливо коли вона отримана у вигляді розмитого зображення (наприклад, у разі дифузного розсіяння в іоносфері). Лінії іонограми можуть утворювати складний рисунок, виглядати як переривчасті зображення, а іноді зовсім неможливо визначити  $f_o F2$  через наявність екранувального шару  $E_s$ , що утворює заглиблення (долини) у шарах.

До того ж можливий просто вихід іонозонду із ладу, що ставить під загрозу проведення всього унікального експерименту.

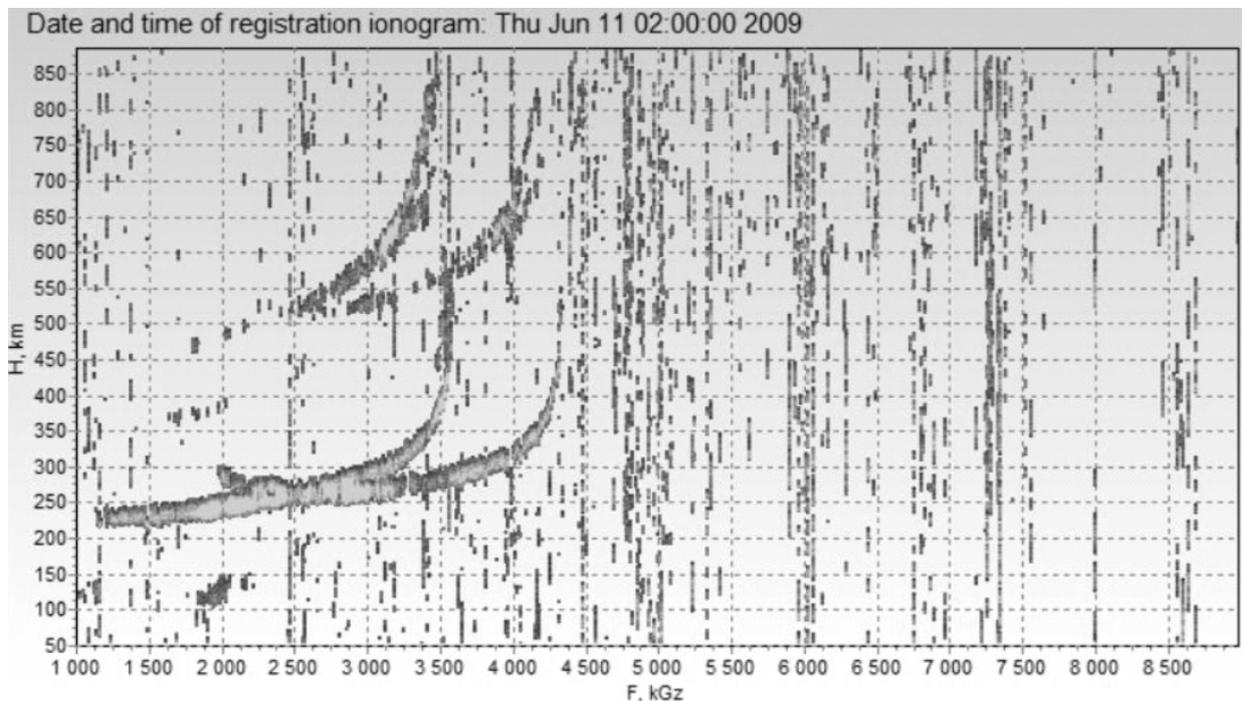


Рисунок 4.8 – Вигляд іонограми, отриманої за допомогою іонозонду

#### **4.4. Розрахунок повного вмісту електронної концентрації з використанням сигналів супутникових системи GPS і ГЛОНАСС**

Після запуску на орбіту супутників глобальних навігаційних супутникових систем GPS та ГЛОНАСС вони стали активно використовуватися в тому числі і для дослідження іоносфери, а саме – для розрахунку повного електронного вмісту TEC (Total Electron Content), що є одним з ключових параметрів іоносфери.

Для забезпечення функціонування сучасних систем навігації та орієнтування об'єктів у просторі в наявності є різноманітна апаратура споживачів глобальних супутникових навігаційних систем. З її допомогою можна з високою точністю визначати координати, швидкість і орієнтацію об'єктів, розташованих у будь-якій точці земної кулі.

Підсистема супутників системи ГЛОНАСС складається з 24 навігаційних супутників, що знаходяться на кругових орбітах висотою 19100 км, нахилом  $64,8^\circ$  і періодом обігу 11 годині 15 хвилин у трьох орбітальних площинах, рознесених по довготі на  $120^\circ$ . У кожній орбітальній площині розміщуються по 8 супутників.

Супутникове угруповання системи GPS обертається навколо Землі по кругових орбітах з однією висотою близько 20200 км і періодом обігу 11 годин 58 хвилин. Нахил орбіти  $55^\circ$  – загальне для всіх супутників системи. Супутники системи GPS обертаються навколо Землі в 6 різних площинах, по 4 апарати в кожній.

Однієї з основних проблем при використанні навігаційної апаратури є схильність сигналів з космічних апаратів до зовнішнього впливу в залежності від стану навколишнього середовища і кількості завад. Помітний вплив на точність навігаційних можливостей цих систем роблять умови проходження сигналів від супутників до споживачів. Як показують дослідження, найбільший вплив на похибки вимірювання відстаней за зміною характеристик сигналів системи супутників робить іоносфера (рис. 4.9).

Супутники цих систем випромінюють дві, а останнім часом вже і три когерентні частоти, що дозволяє розраховувати повний електронний вміст ТЕС уздовж променя від супутника до приймача споживача. Розрахунок ТЕС базується на дисперсійній залежності показника заломлення радіохвиль, що поширюються через іоносферу, і враховує електронну концентрацію на шляху поширення цієї радіохвилі. Середовище поширення впливає на характеристики даного сигналу, тому аналіз змін його характеристик дозволяє отримати характеристики середовища, через який він пройшов, і, таким чином, здійснювати її дистанційне зондування.

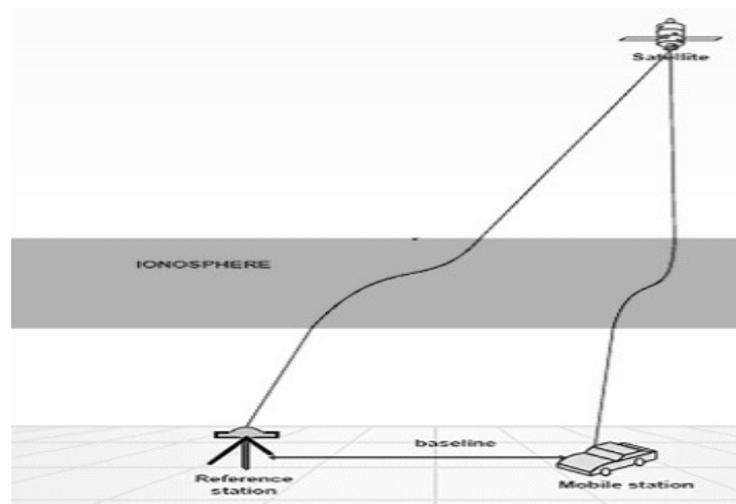


Рисунок 4.9 – Зв'язок системи GPS з користувачами

Дальність радіотехнічних вимірювань у цьому випадку характеризується часом поширення сигналу від об'єкту вимірювання до вимірювального пункту. При беззапитних вимірюваннях пряме визначення дальності до супутника можливе тільки за чіткої синхронності шкал часу всіх учасників цієї системи. Дальністю при цьому називають значення  $r = vt$ , де  $v$  – швидкість поширення радіохвилі;  $t$  – інтервал часу між моментом випромінювання сигналу, обумовленим системним часом супутників і моментом його приймання за шкалою часу споживачів.

Таким чином, значення групового запізнення сигналів за рахунок впливу середовища безпосередньо залежить від повного електронного вмісту в іоносфері

вздовж шляху поширення сигналів [58, 59]. Цей електронний вміст задається через співвідношення

$$\Delta r_{ГЗ} = \frac{40,3}{f_c^2} \int_r N_e(r) dr = \frac{40,3}{f_c^2} \Sigma N_e, \quad (4.5)$$

де  $\Delta r_{ГЗ}$  – групове запізнення, м;  $f_c$  – центральна частота сигналу супутника, Гц;  $N_e(r)$  – розподіл електронної концентрації вздовж напрямку сигналу в іоносфері протяжністю  $r$ , м<sup>-3</sup>;  $\Sigma N_e$  – інтегральна концентрація електронів в об’ємі плазми вздовж цього шляху, яка має назву ТЕС.

У нашому ж випадку можна використати цю інформацію і за значеннями групового запізнення  $\Delta r_{ГЗ}$  знайти величину  $\Sigma N_e$  як

$$\Sigma N_e = \frac{\Delta r_{ГЗ} \cdot f_c^2}{40,3}. \quad (4.6)$$

Рівняння (4.5) показує, що так як групове запізнення  $\Delta r_{ГЗ}$  сигналу залежить від частоти  $f_c$  сигналу, то і час його проходження через іоносферу буде різним для двох частот. Оскільки система GPS передає навігаційні сигнали ще й на двох частотах  $f_{c1}$  і  $f_{c2}$ , то, вимірюючи різницю фаз  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  між сигналами, коли вони проходять через одне середовище, можна визначити різницю і в часі проходження. Співвідношення між різницею фаз і ТЕС наступне:

$$\text{ТЕС} = \frac{f_1}{r_{ec} \left( \frac{f_{c1}^2}{f_{c2}^2} - 1 \right)} \Delta\varphi. \quad (4.7)$$

Як завжди у випадку вимірювання фази, вимірювання  $\Delta\varphi$  стає неоднозначним, шойно воно перевищує  $2\pi$ . Ця задача вирішується шляхом розрахунку змін у часі різниці фаз. Різниця фаз загалом змінюється не лише тому, що змінюється іоносфера, а й тому, що супутники рухаються, а отже, вимірний шлях постійно змінюється. А так як приріст різниці фаз між двома зразками набагато менший, ніж сама різниця фаз, тому він завжди однозначний і менший за  $2\pi$ . Це припущення може бути виправданим, якщо частота дискретизації вимірювань сигналів GPS є достатньо високою.

Отже, через це корисні дані в процесі вимірювань GPS отримують із приростів  $\Delta\phi$  і вони складаються з приростів TEC або диференціального TEC, що називається  $\Delta\text{TEC}$ .

А так як вимірювання GPS дають лише різницю у вигляді  $\Delta\text{TEC}$  для кожного вимірюного шляху між супутником і приймачем, то це не є тривимірною концентрацією електронів  $N_e$ . Однак її можна оцінити за умови, що доступна достатня кількість одночасно вимірюваних шляхів перетину, як показано на малюнку нижче. Це робиться за допомогою процедури інверсії.

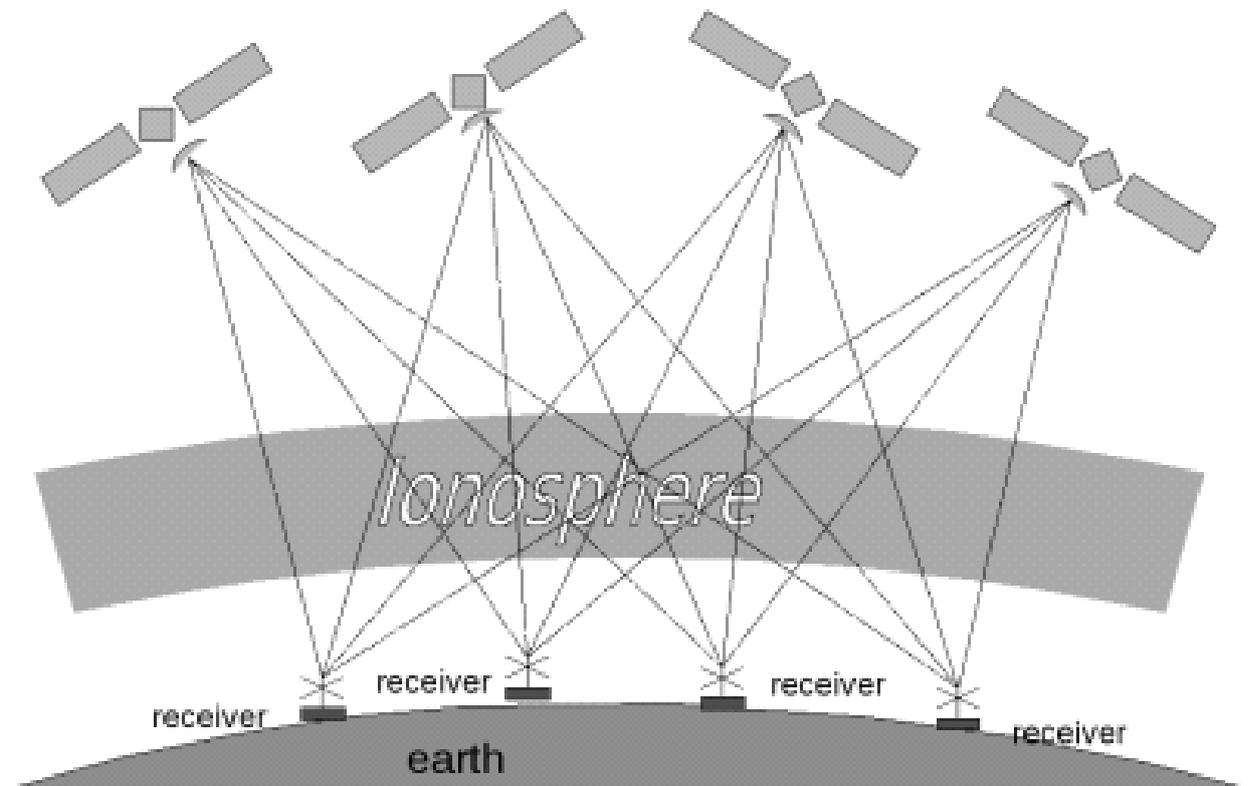


Рисунок 4.10 – Отримання колективної інформації від системи супутників

Процедура інверсії шукає розподіл концентрації електронів як функцію їх тривимірного розташування для кожного шляху між будь-яким супутником і будь-яким приймачем. Використовуючи диференціальний вміст електронів  $\Delta\text{TEC}$ , складається система інтегральних рівнянь на базі даних від кожного супутника, які лінійно комбінуються зі своїми ваговими коефіцієнтами.

Далі процедура інверсії намагається знайти рішення для знаходження електронної концентрації, яке відповідає цій системі рівнянь. Воно починається з початкового рішення (яким може бути модель іоносфери IRI та профіль висоти електронного максимуму) і ітеративно модифікує його, щоб мінімізувати похибку рішень даної системи рівнянь та знайти вже реальний розподіл значень електронної концентрації вздовж висоти.

Враховуючи те, що у поле зору приймача споживача ГЛОНАСС/GPS завжди знаходиться як мінімум 8 безперервно переміщуваних супутників, значення TEC уздовж траси поширення сигналів “супутник-приймач” може бути обчислено ще й за такими формулами:

– з використанням кодових вимірювань:

$$P_2 - P_1 = \frac{40,4(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} \cdot TEC + [B^s + B_r] + \varepsilon_p, \quad (4.8)$$

– з використанням фазових вимірювань:

$$L_1 - L_2 = \frac{40,4(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} \cdot TEC + [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + b^s + b_r + \varepsilon_L, \quad (4.9)$$

де  $B^s$ ,  $B_r$  – міжчастотне відхилення в апаратурі супутника і приймача для псевдодальностей  $P_1$  і  $P_2$ ;  $b^s$ ,  $b_r$  – міжчастотне відхилення в апаратурі супутника і приймача для фазових вимірювань  $L_1$  і  $L_2$ ;  $\lambda_{1,2}$  – довжина хвиль сигналів супутника;  $N_{1,2}$  – початкова неоднозначність фазових вимірювань;  $f_{1,2}$  – несуча частота;  $\varepsilon$  – випадкова похибка.

У загальному вигляді формулу розрахунку значення TEC можна записати

як  $I = \int_0^l n_e dl$ , де  $I$  – повний електронний вміст,  $n_e$  – зональна електронна концент-

рація,  $l$  – відстань по прямій лінії між приймачем і передавачем.

Щоб мати змогу реалізувати алгоритми оцінювання TEC по вищевказаним процедурам, в Обсерваторії Інституту іоносфери для приймання сигналів супут-

ників була придбана та запущена в експлуатацію двочастотна базова GNSS станція, яка має 120 каналів слідкування за супутниками GPS і ГЛОНАСС, та яка призначена для використання в якості додаткового інструменту моніторингу іоносфери.

Також в обсерваторії Інституту іоносфери ведуться дослідження, пов'язані з обробкою та аналізом іонограм, отриманих за допомогою встановленого цифрового іонозонду (рис. 4.11), призначеного для проведення постійного моніторингу іоносфери. Пристрій дає можливість отримати часові варіації таких параметрів іоносфери, як критичну частоту шару F2, концентрацію електронів у максимумі шару F2, висоту максимуму цього шару.



Рисунок 4.11 – Цифровий іонозонд обсерваторії Інституту іоносфери

Як показує практика, отримані подібними пристроями дані добре узгоджуються із сучасними уявленнями про фізичні процеси в іоносфері і добре корелюють з індексами сонячної та геомагнітної активностей, що завантажуються з сервера Центру прогнозування космічної погоди Національного океанічного та атмосферного управління. У результаті є можливість будувати діаграми розкиду цих параметрів відносно індексу сонячної активності  $F_{10.7}$ . Результати їх аналізу

після розподілу за сезонами використовуються для уточнення регіональної моделі іоносфери Central Europe Regional Ionospheric Model, що розроблена в Інституті іоносфери, та яка призначена для розвитку глобальної комп'ютерної емпіричної моделі електронної концентрації та температур іонів і електронів.

Така модернізація іоносферного обладнання Інституту дозволяє за рахунок використання сучасного цифрового обладнання суттєво розширити метрологічні характеристики апаратури та мати можливість для її підключення також і до міжнародної мережі дігізондів.

#### 4.5. Особливості визначення $N_e(h)$ при використанні константи радара НР

В роботі [3] детально описана процедура, як з використанням радара НР, результати з якого лише епізодично піддаються калібруванню по даним роботи іоносферної станції, можливий особливий алгоритмічний підхід до визначення електронної концентрації іоносферної плазми. Для цього використовується особливий параметр, що характеризує технічний стан радіолокаційної системи, як константа  $C$  радара. Вона визначається згідно з виразом

$$C = \frac{P_C(h_{F2}) \cdot h_{F2}^2 \cdot [1 + T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{N_{eF2}}. \quad (4.10)$$

Ця константа визначається для параметрів спокійної денної іоносфери та відповідає інформації, що належить до висоти  $h_{F2}$  максимуму шару F2.

В результаті, маючи розраховане за допомогою рівняння (4.10) значення  $C$ , тепер можна для будь-якої висоти і для будь-якого відрізка часу одержувати електронну концентрацію електронів навіть під час відсутності поточних значень  $f_{F2}$ , а саме

$$N_e(h) = \frac{P_C(h) \cdot h^2 \cdot [1 + T_e(h)/T_i(h)]}{C}. \quad (4.11)$$

Авторами проведено детальний аналіз характерних особливостей поведінки

цієї константи у випадку нестабільності її значень. Така ситуація може відбуватися [60] при зміні стану приймальної системи радару НР через зміну температури навколишнього середовища, коливання у мережі напруги живлення, варіювання характеристик радіокомпонентів та ін. Також вона залежить [61] від зміни режимів випромінювання передавача, від тривалості і форми зондувальних імпульсів, тощо. І, на кінець, у [62] рекомендовано враховувати зміну значень константи на протязі доби у процесі нагрівання/охолодження протяжних вздовж території обсерваторії (сотні метрів) антено-фідерних хвилеводів радару НР, тому її пропонується використовувати вже у вигляді функції.

Моменти зміни значень константи запропоновано фіксувати, аналізуючи та використовуючи складові рівня космічного шуму, який поступає на вхід радару. Це дозволяє отримувати допоміжну інформацію, по якій рекомендовано проводити періодичний контроль і уточнення константи у зв'язку з вказаною зміною технічних систем радару НР, не залучаючи до роботи іонозонд.

#### **4.6. Удосконалений режим приймання та обробки лінійно поляризованих сигналів**

У новому режимі [24, 63, 64] запропоновано визначати абсолютні значення електронної концентрації, використовуючи лінійно поляризований сигнал зондування та додатково введені пристрої.

Якщо звернутися до рис. 4.12, що відображає схему такої обробки, то можна відзначити наступне.

У цьому варіанті робоча схему приймального тракту і її налаштування зостаються незмінними. Кабельне з'єднання вібраторів з плечима 1 і 2 все таке ж, і при робочому напрямку обертання зонда прийнятий сигнал НР надходить тільки у плече 4, куди підключений штатний приймач 1. З цього випливає, що при лінійно поляризованому зонді у плече 3 надійде складова сигналу протилежного напрямку обертання. Тобто при роботі з лінійною поляризацією, яка представлена

двома круговими, на виходах 4 і 3 будуть присутні сигнали з рівними амплітудами, тобто *вільні від ефекту Фарадея*. У той же час, якщо розглядати результати їх перемноження, то вони залежать від кута повороту площини поляризації. Використовуючи це та залучаючи відповідну процедуру взаємної обробки сигналів НР з цих виходів, пропонується більш точно визначати півперіод повороту сигналу розсіяння, застосовуючи аналіз отриманої функції, що описує це обертання. Та має вигляд як  $\arccos \varphi(h)$ .

Для реалізації такого плану з виходів 4 і 3 БКМ сигнали на проміжній частоті (наприклад, 1 МГц) необхідно подати на приймачі 1 і 2 та з їх виходів перемножити в аналоговому форматі на цій проміжній частоті. Наступна задача полягає у тому, щоб виділити залежну від кута повороту низькочастотну складову результату цього множення (обвідну), яка від розгортки до розгортки повинна ще й статистично усереднюватися та проходити через фільтр низької частоти (ФНЧ).

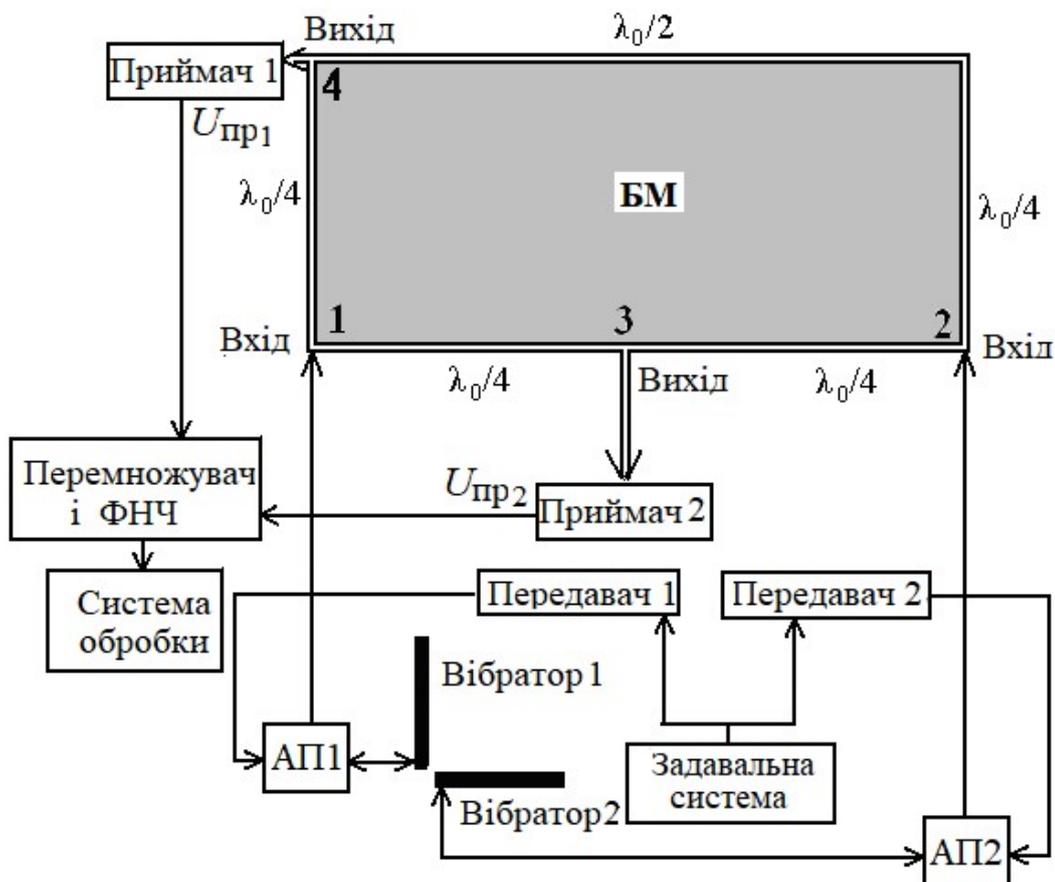


Рисунок 4.12 – Варіант допоміжної обробки лінійно поляризованого сигналу НР

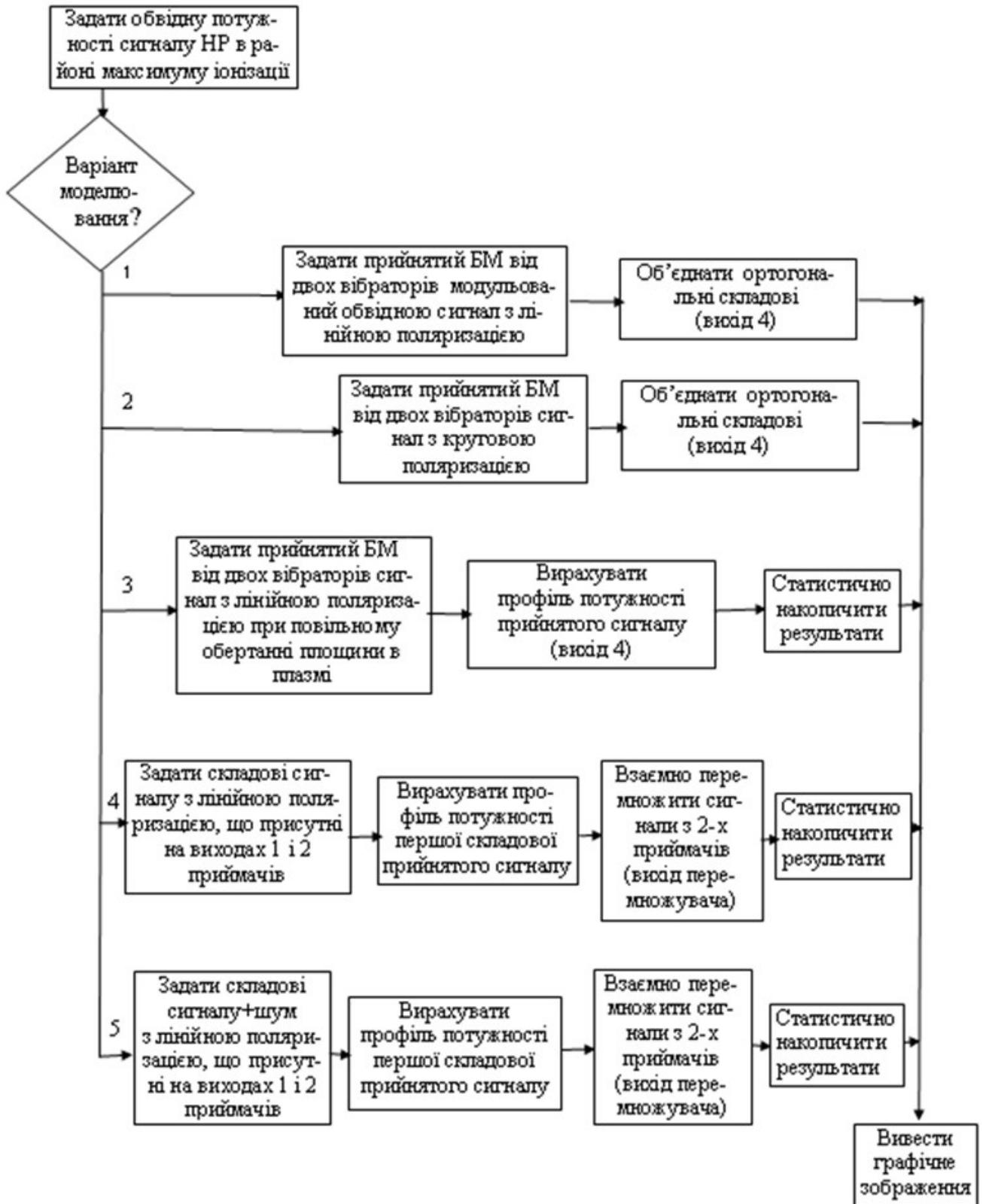


Рисунок 4.13 – Послідовність дій при моделюванні процесу обробки складових прийнятого сигналу

У цьому випадку робота пристрою взаємного перемноження сигналів відповідає роботі фазометра, якщо інтервал вимірювання (тривалість сигналу зондування) досить малий. Якщо на одному з входів балансного моста (1 або 2) сигнал відсутній, сигнали з його виходів 4 і 3 надходять у фазі або протифазі відповідно. В інших випадках різниця фаз змінюється. Враховуючи статистичне накопичення результатів множення ( $\mathbf{M}$ ), отримуємо вираз, який описує цей процес:

$$\mathbf{M}(h) = \langle A_3(t) \sin(\omega t + \psi) \times A_4(t) \sin(\omega t + \varphi + \psi) \rangle = 0,5 A^2(t) \times \cos(\varphi) = P(h) \times \cos \varphi,$$

де  $\varphi = \varphi(h)$ ,  $h = ct/2$ ,  $t$  – радіолокаційна затримка, що відповідає висоті  $h$ ,  $A_3(t) = A_4(t) \rightarrow A(h)$ ,  $\psi$  – випадкова для сигналу НР фаза коливань.

Як видно, перший множник описує висотний розподіл потужності НР сигналу, а другий є знакозмінним. Розташування нулів у ньому залежить лише від характеру висотного розподілу електронної концентрації  $N_e(h)$ . Вимірювання потужності в одному каналі (після приймача 1 або приймача 2) дає можливість отримати обвідну функцію вигляду  $\arccos \varphi(h)$ .

Можливість використання цих складових сигналу з лінійною поляризацією для безпосереднього вимірювання електронної концентрації  $N_e(h)$ , причому з більшою точністю, можна показати на прикладі комп'ютерного моделювання. При цьому для перевірки дієвості запропонованого процесу обробки сигналу НР задана наступну послідовність дій (алгоритм на рис. 4.13).

#### **4.6.1. Моделювання режиму приймання поляризованого сигналу при відсутності обертання сигналу в плазмі**

Спочатку розглянемо випадок приймання лінійно поляризованого сигналу при умові, що цей сигнал проходить через середовище, яке не змінює положення площини поляризації (рис. 4.14).

*Примітка.* Враховуючи, що у випадку використання робочої частоти випромінювання 158 МГц (режим роботи харківського радара НР) на один період хвилеподібної обвідної при повному фарадеївському повороті лінійно поляризованої

хвилі може припадати до 15000 періодів робочої, на подальших графіках для наочності зображень зменшено це відношення, щоб на фрагментах розгорток лінії було легко спостерігати.

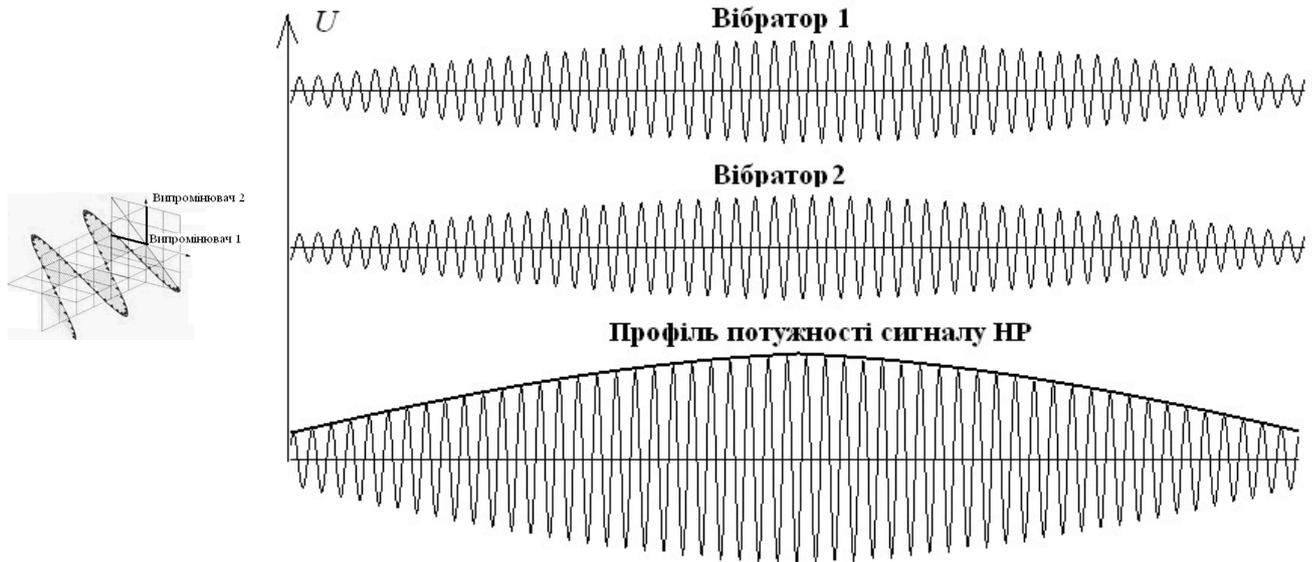


Рисунок 4.14 – Фрагменти сигналів, присутніх на входах БМ і на його виході 4 при лінійній поляризації

#### *Моделювання режиму приймання сигналу з лінійною поляризацією*

При незмінному положенні площини поляризації (рис. 4.13, варіант 1) у одній із розгорток на входах БМ (вхід 1 і 2) буде присутня напруга  $U$ , зображена на рис. 4.14, верх. На його виході 4 ці складові дадуть спільний результат у вигляді рис. 4.14, низ.

#### *Моделювання режиму приймання сигналу з круговою поляризацією*

У другому випадку (рис. 4.13, варіант 2), коли сигнал має кругову поляризацію, що задається за допомогою двох передавачів радара НР (рис. 4.15, на входах БМ буде присутня напруга  $U$ , зображена на рис. 4.15, верх. На його виході 4 ці складові дають аналогічний спільний результат у вигляді рис. 4.15, низ.

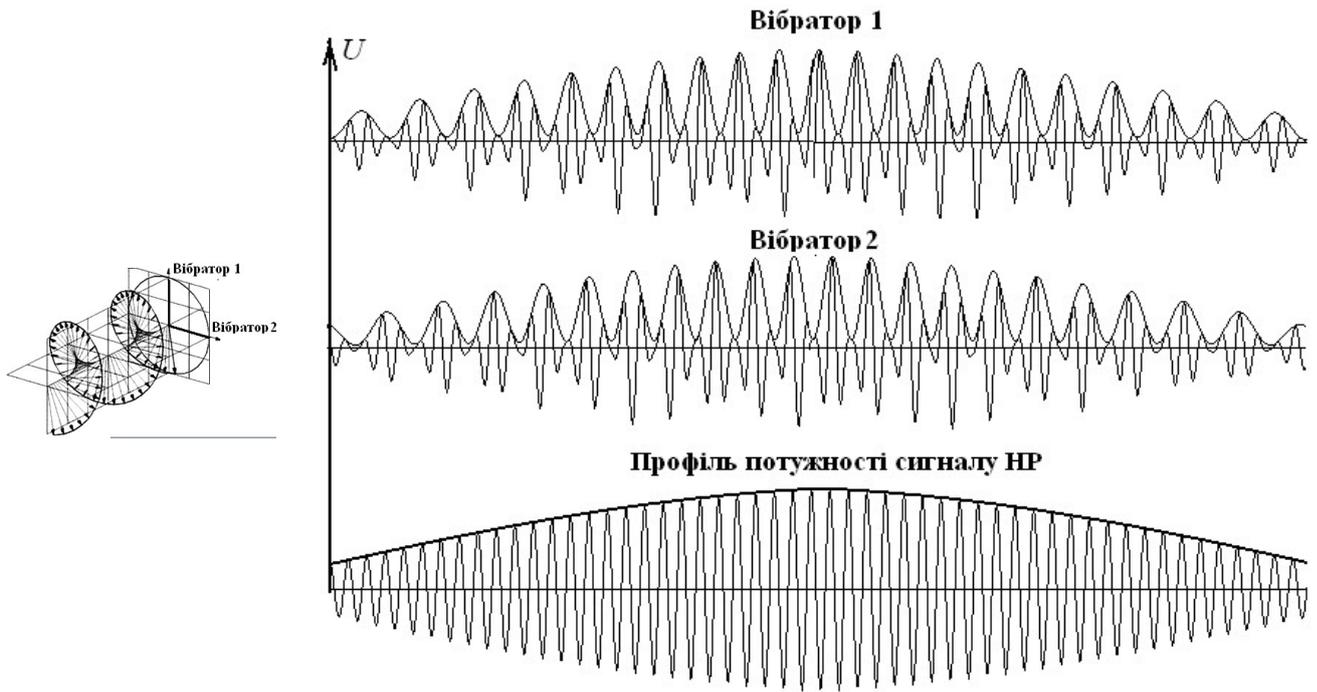


Рисунок 4.15 – Фрагменти сигналів, присутніх на входах БМ і на його виході 4 при круговій поляризації

#### **4.6.2. Моделювання режиму приймання лінійно поляризованого сигналу при наявності обертання сигналу в плазмі**

У випадку технічного виходу іонозонду із ладу один із передавачів (каналів) радара вимикається, тому відбувається випромінювання лінійно поляризованого сигналу, який обертається повільно, у тому числі у залежності від значень електронної концентрації (рис. 4.16). При цьому (рис. 4.13, варіант 3) на входах БМ буде присутня напруга  $U$ , зображена на рис. 4.16, верх. З його виходу 4 після перетворення у потужність  $P$  в одній із розгортки отримаємо вигляд рис. 4.16, середина.

У кінці сеансу статистичного накопичення (100 розгортки) вона буде мати вигляд рис. 4.14, низ. По її характерним точкам (нечітким максимумам або мінімумам) і оцінюються значення  $2\Delta h$ .

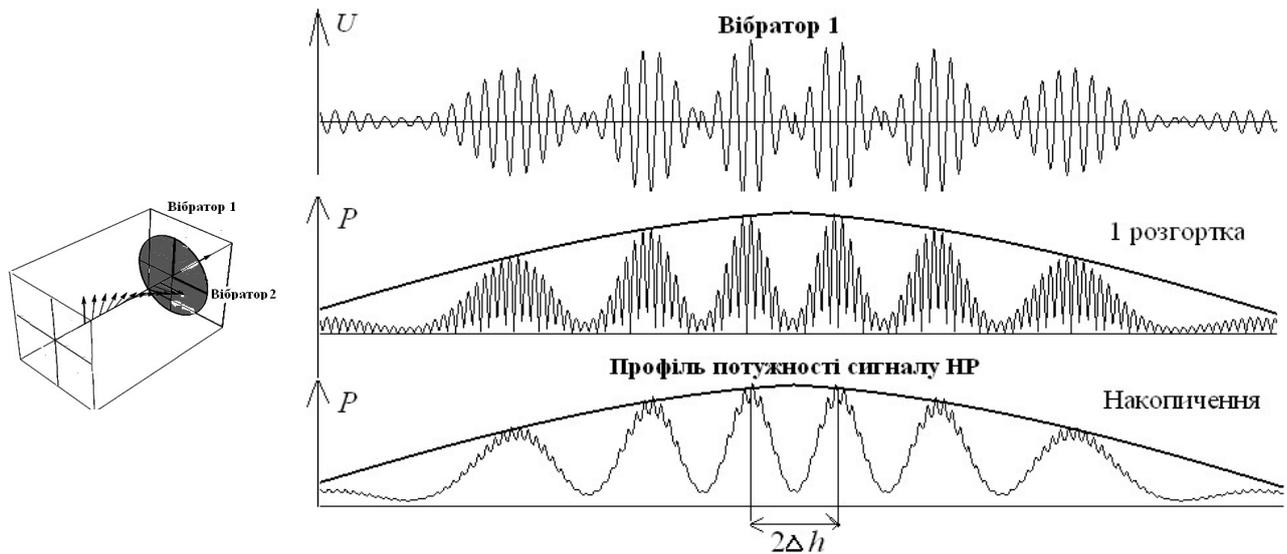


Рисунок 4.16 – Фрагменти сигналу, присутнього на вході 1 БМ і після визначення його потужності при лінійній поляризації у одній і декількох розгортках

*Моделювання модернізованого режиму приймання складових сигналу з лінійною поляризацією*

Якщо ж змоделювати сигнали (рис. 4.13, варіант 4), що прийняті на два випромінювача, та задіяти операцію взаємного множення напруг  $U_{\text{пр1}}$  і  $U_{\text{пр2}}$ , присутніх на виходах двох приймачів після їх перенесення на проміжну частоту (для зручності графічних спостережень оставлена та ж умовна частота), для однієї розгортки буде отримано результат  $U_{\text{пр1}} \times U_{\text{пр2}}$ , зображений на рис. 4.17, середина. Після виділення обвідної цього результату отримаємо знакозмінну лінію, зображену на рис. 4.17, низ. Для порівняння на рис. 4.17, верх приведено потужність сигналу  $P$ , що аналогічна отриманій на рис. 4.16, середина.

Порівняння верхньої і нижньої епюр на рис. 4.16 демонструє, що можливість виділення з їх допомогою значення  $2\Delta h$  у нижньому випадку значно краща. А от процес моделювання, коли задано деякий час (рис. 4.17) для статистичного накопичення (використано 100 розгорток), демонструє ще кращу форму отриманої обвідної, тобто більш надійне виділення  $2\Delta h$  у місцях перетину цією обвідною нульової осі.

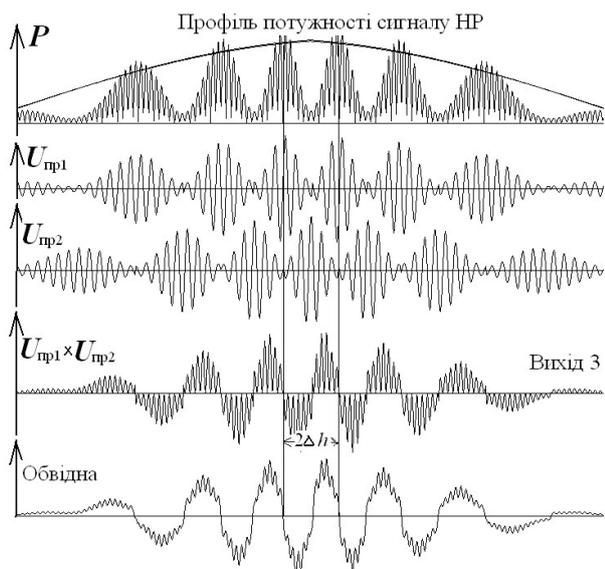


Рисунок 4.17 – Фрагменти прийнятих сигналів, визначення їх потужності, перемноження цих сигналів та отримання результуючої обвідної

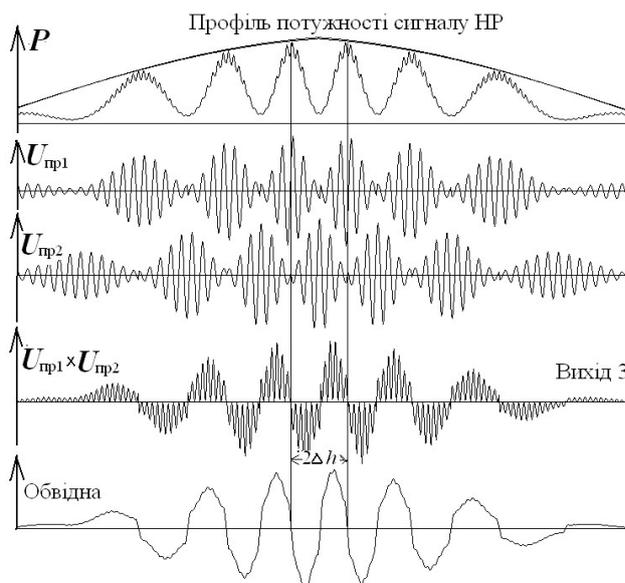


Рисунок 4.18 – Фрагменти прийнятих сигналів, визначення їх потужності, перемноження цих сигналів та отримання результуючої обвідної при статистичному накопиченні даних (100 розгортки)

*Моделювання модернізованого режиму приймання складових сигналу з лінійною поляризацією в реальних умовах роботи радара НР*

Останній варіант моделювання (рис. 4.13, варіант 5) мав за мету показати, чи дієвий спосіб отримання вищевказаної обвідної в реальних умовах роботи радара, коли сигнал НР приймається на фоні адитивних шумів (наприклад, при відношенні сигнал/шум, що дорівнює одиниці).

Цей випадок (рис. 4.19), особливо коли використовується статистичне накопичення даних (рис. 4.20), все так же демонструє, що навіть при наявності шумів точність визначення величини  $2\Delta h$  у процесі фіксації точок перетину графічної лінії (низ) з нульовою віссю значно вища, ніж точність, коли потрібно визначитися, де ж знаходяться центри максимумів (мінімумів) на хвилеподібних графіках потужності сигналу НР. До того ж, легко визначати електронну концентрацію не тільки для області максимуму іонізації, але і для сусідніх висотних діапазонів, тому що цей метод дає змогу надійно розрізняти положення нулів і на них.

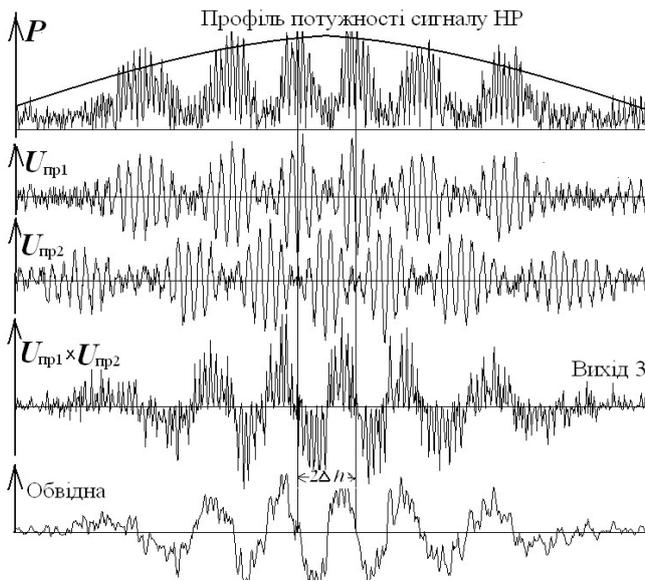


Рисунок 4.19 – Фрагменти прийнятих сигналів, визначення їх потужності, перемноженні цих сигналів та отримання результуючої обвідної при наявності шумоподібних іоносферних завад

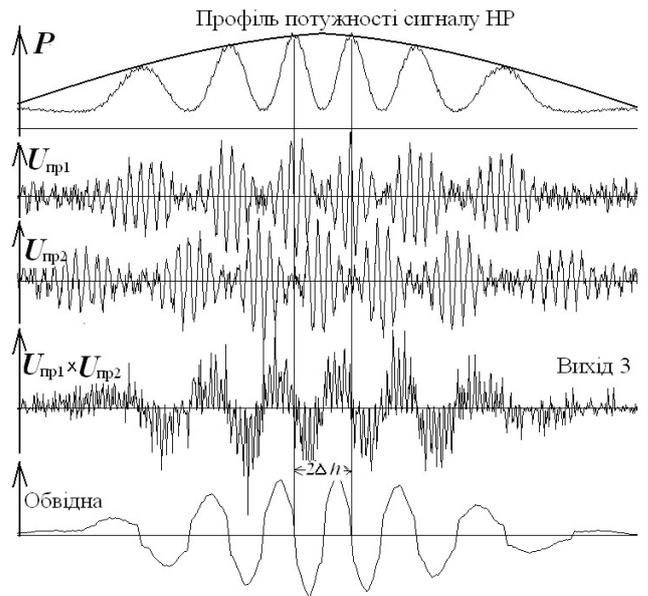


Рисунок 4.20 – Фрагменти прийнятих сигналів, визначення їх потужності, перемноження цих сигналів та отримання результуючої обвідної при статистичному накопиченні даних (100 розгортки) при наявності шумоподібних іоносферних завад

## Розділ 5

### ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА КОРЕКЦІЇ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ СИГНАЛУ НР

При проведенні радіолокаційного експерименту по прийнятій суміші, яка включає в себе сигнал некогерентного розсіяння та космічний шум, у кожній радіолокаційній розгортці дальності при імпульсному зондуванні отримані відліки напруги стробуються згідно заданій протяжності ряду висотних ділянок (зазвичай впродовж напрямку випромінювання через 50 – 100 км). Відносно цих ділянок на кожній з них визначають автокореляційні функції прийнятого сигналу, з яких виділяють нормовані коефіцієнти кореляції (КК) флуктуацій іонізованих часток іоносферної плазми.

Нижче будуть розглянуті деякі підходи до уточнення значень цих нормованих коефіцієнтів кореляції з оглядом на особливості проходження сигналу розсіяння через елементи апаратури радара НР.

#### **5.1. Загальний алгоритм отримання сигналу некогерентного розсіяння, розрахунок його АКФ та наступного визначення параметрів іоносфери**

Ставлячи перед собою задачу детального аналізу особливостей використання обчислювальних процедур у методі НР, розглянемо узагальнену блок-схему, яка ілюструє процес одержання, аналізу, перетворення сигналу розсіяння з розрахунком його статистичних та динамічних характеристик і визначення по ним геофізичних параметрів іоносферної плазми.

На практиці при функціонуванні апаратури радара НР і його обчислювальної системи склався традиційний розподіл функцій, при додержанні якого реалізують процедури отримання й обробки іоносферної інформації. Цей розподіл відображають [2] подані на рис. 5.1 дві групи алгоритмів, що охоплюють процеси первинної та вторинної обробки даних.

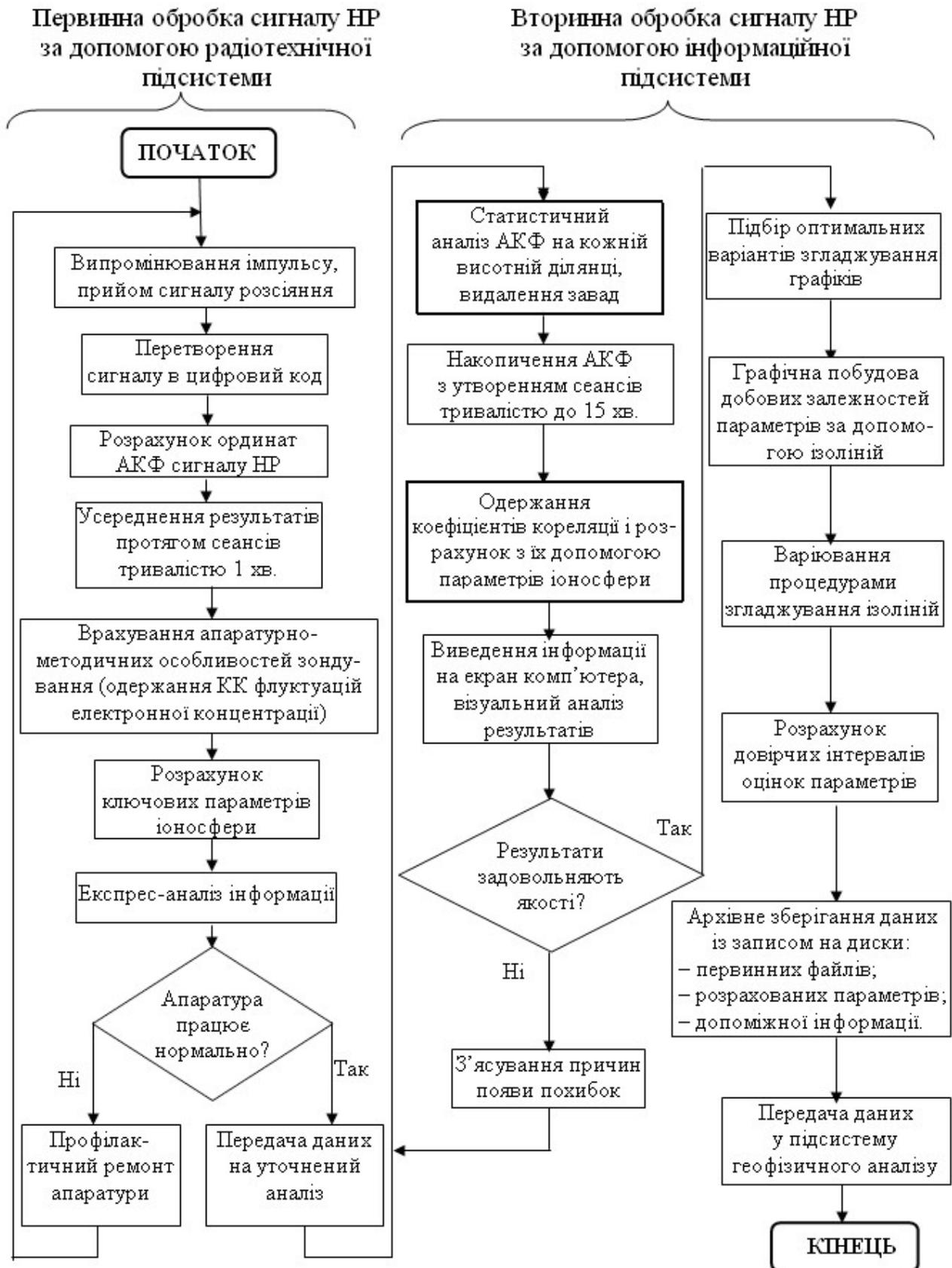


Рисунок 5.1 – Узагальнена блок-схема, що ілюструє процес отримання, аналізу, перетворення сигналу розсіяння, розрахунку його статистичних характеристик з наступним визначенням геофізичних параметрів іоносферної плазми в методі НР

*До першої групи* відносяться алгоритми, згідно з якими функціонує радіотехнічна підсистема радару НР, що працює у реальному часі і реалізує процедури кодування та випромінювання сигналів зондування, приймання і декодування суміші сигнал+шум, яка надходить на вхід приймача, виділення сигналу розсіювання, розрахунок його статистичних характеристик (АКФ або спектрів), отримання за ними КК флуктуацій електронної концентрації.

При цьому для підвищення точності розрахунків у межах інтервалів стробування (виділених висотних ділянок) вводиться інтегрування характеристик відеосигналу, яке здійснюється протягом сеансу, як правило, однохвилинної тривалості.

По закінченні сеансу накопичення даних здійснюється прискорений розрахунок (експрес-аналіз) параметрів іоносфери та візуальне відображення інформації на контрольному екрані ПК. Ця інформація є основою для метрологічного аналізу черговим персоналом станції поточного робочого стану радіолокаційної апаратури.

Подана на рисунку процедура відображає процес функціонування систем радару в автоматизованому режимі. Якість одержуваних даних у цьому випадку у визначальному ступені залежить від відповідальності осіб, що контролюють задану послідовність операцій і координують процес проходження радіофізичного експерименту.

*Друга група* алгоритмів відображає процедури наступного, більш ретельного (тобто – більш точного) розрахунку, що здійснюється за допомогою ПК в інформаційній підсистемі. У цих процедурах, приміром, реалізуються багатоступінчасті ітераційні алгоритми статистичного аналізу й одержання проміжних результатів з накопиченням інформації для виявлення завад і тих складових, що не задовольняють якості, для їх видалення. За рахунок такого підходу надається можливість комбінування варіантами обробки, щоб мати можливість одержання досить точних значень основних параметрів іоносферної плазми.

## 5.2. Попередня обробка та перетворення сигналу НР

Метод НР дозволяє визначати параметри іоносфери шляхом аналізу коефіцієнтів кореляції флуктуацій електронної плазми, отриманих на базі розрахованих ординат кореляційної функції  $r\{\tau; f(\theta; x)\}$  сигналу розсіяння, який отримують під час радіолокаційного експерименту. Розглянемо особливості процедур первинної обробки сигналу розсіяння, які для досягнення потрібної статистичної точності реалізують розрахунок висотного розподілу ординат його АКФ і проводять усереднення результатів протягом сеансу деякої тривалості. Для формування цих висотних залежностей робота систем радару НР має полягати у такому [1–3].

З виходу АЦП цифровані відліки надходять до спеціалізованого багатоканального обчислювального пристрою – корелятора [4]. При перемноженні у ньому відліків, які проходять через ряд ліній затримок ( $t_{\text{зат}} = k\tau_q; k = 0, 1, 2, \dots, K$ ), на його виході утворюються розраховані значення  $K + 1$  ординат автокореляційної функції  $R_c(\tau)$ , де  $\tau = t_{\text{зат}}$ .

Відомо, що форма АКФ на проміжній частоті описується виразом

$$R_c(\tau) = R(\tau) \cos(\omega_{\text{пр}} + \Delta\omega)\tau. \quad (5.1)$$

Найбільш інформативним у ньому є перший співмножник  $R(\tau)$ , точність оцінки якого визначається як технічними особливостями апаратури обробки (кількістю та особливостями кореляційних каналів), так і локальними параметрами іоносфери. Другий же співмножник пов'язаний зі значенням проміжної частоти  $\omega_{\text{пр}} = 2\pi f_{\text{пр}}$ . Ця частота визначається системою гетеродинів радару НР, але при прийманні може відрізнитися на величину доплерівського зсуву  $\Delta\omega$ .

Можна відмітити, що коли період  $\tau_q$  при проходженні тактових імпульсів  $U_T$  задати кратним періоду проміжної частоти  $f_{\text{пр}}$ , тобто накласти умову [1]

$$\tau_q = m/f_{\text{пр}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (5.2)$$

то інтервал затримок між відліками на кривій АКФ буде кратним періоду другого множника, а отже, кореляційну функцію прийнятого сигналу розсіяння можна одержувати без попереднього детектування, замінюючи  $R_c(\tau) = R_{\cos}(\tau)$ .

Обчислення кореляційної функції суміші сигнал плюс шум для кожного обраного таким способом висотного діапазону, поданого  $n$  відліками напруги, відбувається при статистичному, від розгортки до розгортки, накопиченні значень ординат функції. Необхідно відзначити, що при фіксованій довжині висотних ділянок у розрахунках синхронно зі збільшенням номера ординати буде зменшуватися і кількість перемножуваних пар відліків. Цю ситуацію необхідно врахувати при наступному нормуванні статистично накопичених даних. Також необхідно врахувати спосіб стробування інформації для утворення висотних інтервалів  $\Delta h$  потрібної протяжності.

На рис. 5.2 зображено, як з інформації, що надходить з виходів корелятора, з урахуванням її статистичного накопичення вздовж іоносферних ділянок, які з висотою роблять більш протяжними, після врахування рівня шуму отримують висотний розподіл нормованих КК сигналу розсіяння виду  $r_c(\tau, h)$ .

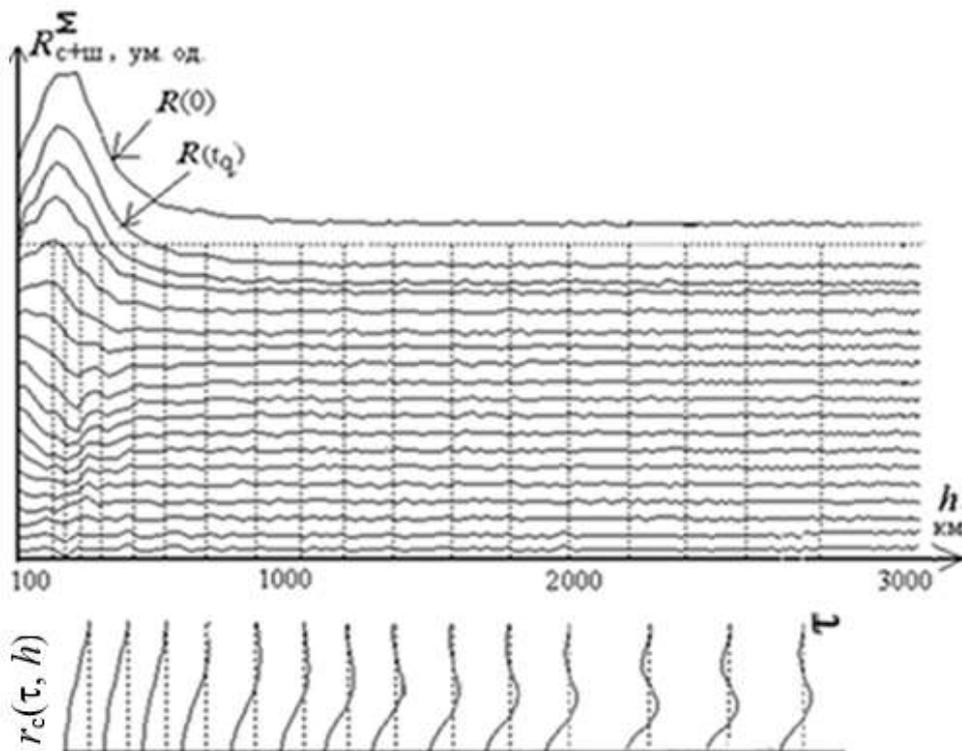


Рисунок 5.2 – Усереднення інформації на протязі інтервалів  $\Delta h$  збільшеної протяжності

### 5.3. Уточнення кореляційних функцій сигналу НР з урахуванням апаратурних особливостей іоносферного зондування

Розглянемо обчислювальні операції, мета яких складається у подальшому уточненні статистичних (кореляційних) характеристик сигналу розсіяння. Ці операції повинні відбуватися з урахуванням ступеня впливу [2, 3] апаратурних факторів і особливостей зондування, обумовлених використанням різних режимів випромінювання, приймання та обробки одержаних сигналів.

Особливості імпульсного зондування призводять до того, що коефіцієнти кореляції  $r_c(\tau, h)$  сигналу розсіяння, який реєструється на вході радіоприймального пристрою, відмінні від коефіцієнтів кореляції  $r_{Ne}(\tau, h)$  флуктуацій електронної концентрації, що мають місце у точці розташування іоносферної плазми. Від коректності і старанності виконання операцій приведення  $r_c(\tau, h)$  до  $r_{Ne}(\tau, h)$  залежить достовірність подальших результатів ідентифікації параметрів плазми по кореляційним функціям.

Як показує практика вимірювань, точність математичних перетворень в основному залежить від тих операцій, що пов'язані з урахуванням таких технічних факторів [4]:

- форми АЧХ смугових фільтрів приймального каналу;
- структури імпульсів зондування і їх тривалості  $T_i$ ;
- особливостей перехідних процесів в антено-фідерній системі радара НР;
- особливостей аналого-цифрового перетворення сигналу розсіяння.

Мова нижче піде про ті процедури, що використовуються для математичних операцій над кореляційними функціями в указаних випадках.

#### 5.3.1. Уточнення кореляційних функцій сигналу розсіяння з урахуванням характеристик смугових фільтрів приймального каналу

Як перший приклад, розглянемо спосіб корекції при розрахунку коефіцієнтів кореляції сигналу НР, що пов'язаний з аналізом і врахуванням ширини смуги

пропускання фільтрів приймальної системи радару НР. Ці фільтри використовуються для виділення сигналу розсіяння на фоні шумів і для придушення імпульсних завад, проте самі вони є причиною зміни значень вхідного сигналу.

Як відомо, сигнал НР являє собою шумоподібний процес з нормальним законом розподілу амплітуд. Він характеризується шириною спектра, який змінює вздовж висоти свої значення від  $\Delta f_{\text{низ}} = 5$  кГц до  $\Delta f_{\text{верх}} = 20$  кГц [2] (при робочій частоті харківського радару НР  $f_0 = 158$  МГц) в залежності від зміни концентрації електронів (кисню  $O^+$ , гелію  $He^+$  та водню  $H^+$ ) та кінетичних температур ( $T_i$  і  $T_e$ ). Ця ширина також залежить від часу доби (день, ніч), сезону року (зима, літо), рівня сонячної активності та багатьох інших факторів (рис. 5.3).

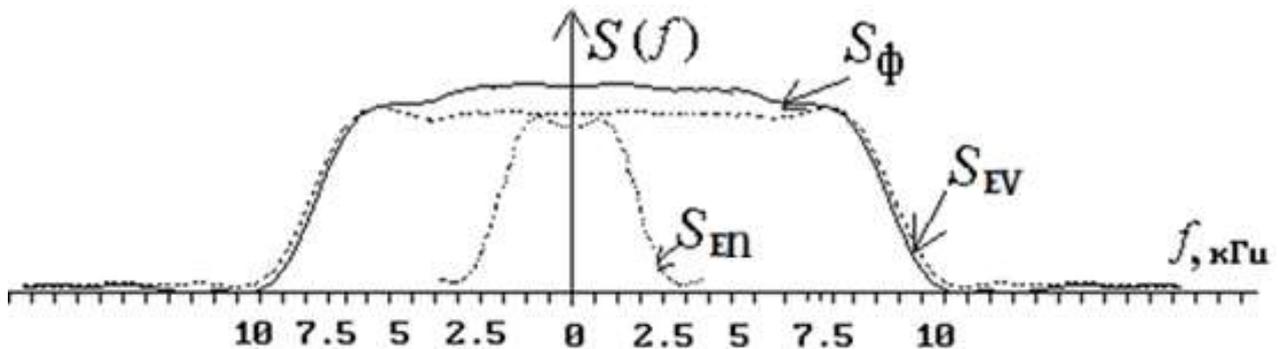


Рисунок 5.3 – Характеристики смугового фільтра приймальної системи радару ( $S_\phi$ ), а також сигналу розсіяння з нижніх ( $S_{en}$ ) і верхніх ( $S_{ev}$ ) висотних діапазонів

Подібний характер зміни характеристик сигналу задає необхідність фільтрації прийнятого сигналу погодженими за шириною смуги аналоговими фільтрами. Задача фільтрації – забезпечити максимальні значення відношення сигнал/шум за рахунок усунення спектральних компонентів завад поза смугою, зайнятою корисним сигналом

Особливістю процедури обробки є те, що радар може розрахувати параметри іоносферної плазми для нижньої іоносфери майже без похибок на висотах 100...400 км, де ширину полоси фільтру  $S_\phi = 20$  кГц приймальної системи радару вибирають більшою за ширину спектру  $S_E$  ( $\sim 5$  кГц) реального, отриманого експериментальним шляхом сигналу.

Тобто, на нижніх висотах похибка, яку вносить процес проходження сигналу через відносно широкосмуговий фільтр, дуже мала, хоча при такому фільтрі різко падає відношення сигнал/шум. А от на висотах вище 400 км розраховані параметри все менше будуть відповідати реальному стану плазми, якщо ширина спектра сигналу НР буде наближатися та перевищувати ширину полоси пропускання фільтру.

Цю ситуацію враховують, надаючи перевагу тому типу фільтру, що є найбільш оптимальним для тих ділянок висоти, які найбільше цікавлять експериментаторів у даному радіофізичному експерименті. А щоб скорегувати похибки, які вносить підключений тип фільтру, програма на останніх висотних ділянках, де вже відсутній сигнал розсіяння та має місце шумоподібний фон, обчислює АКФ цього шуму для точного визначення характеристик даного типу фільтру.

На рис. 5.4 наведені значення такого шуму вдовж розгортки на висотах від 2000 км і вище, коли в експериментах використовувалися 4 різних типа фільтрів. Програма обробки цих масивів показала, що використовувалися відповідно фільтри Кауера 3-го порядку – 13 кГц (*a*) і 15 кГц (*б*), Чебишева 3-го порядку – 20 кГц (*в*) і Гаусса 4-го порядку – 10 кГц (*г*).

Таким чином, маючи дану інформацію, пропонується відповідно враховувати апаратні особливості приймальної системи радара НР. А так як сигнал розсіяння у процесі проходження через радіоприймальну систему зазнає змін, які можна описати процедурою перемножування обвідної спектру  $S_E$  сигналу НР з амплітудно-частотною характеристикою  $S_\Phi$  смугового фільтру приймача, пропонується наступне. Враховуючи те, що в нашому випадку обробка сигналу розсіяння проводиться за допомогою кореляторів, у часовій площині це еквівалентно процедурі апаратної згортки відповідних коефіцієнтів кореляції, тобто  $r_E(\tau)$  і  $r_\Phi(\tau)$  з отриманням наступного результату:

$$r_E^{(1)}(\tau) = r_E(\tau) \otimes r_\Phi(\tau), \quad (5.3)$$

де  $\otimes$  – процедура згортки, коли  $r_E(\tau)$  змінюється на різницю  $\Delta(\tau) = r_E(\tau) - r_E^{(1)}(\tau)$ .

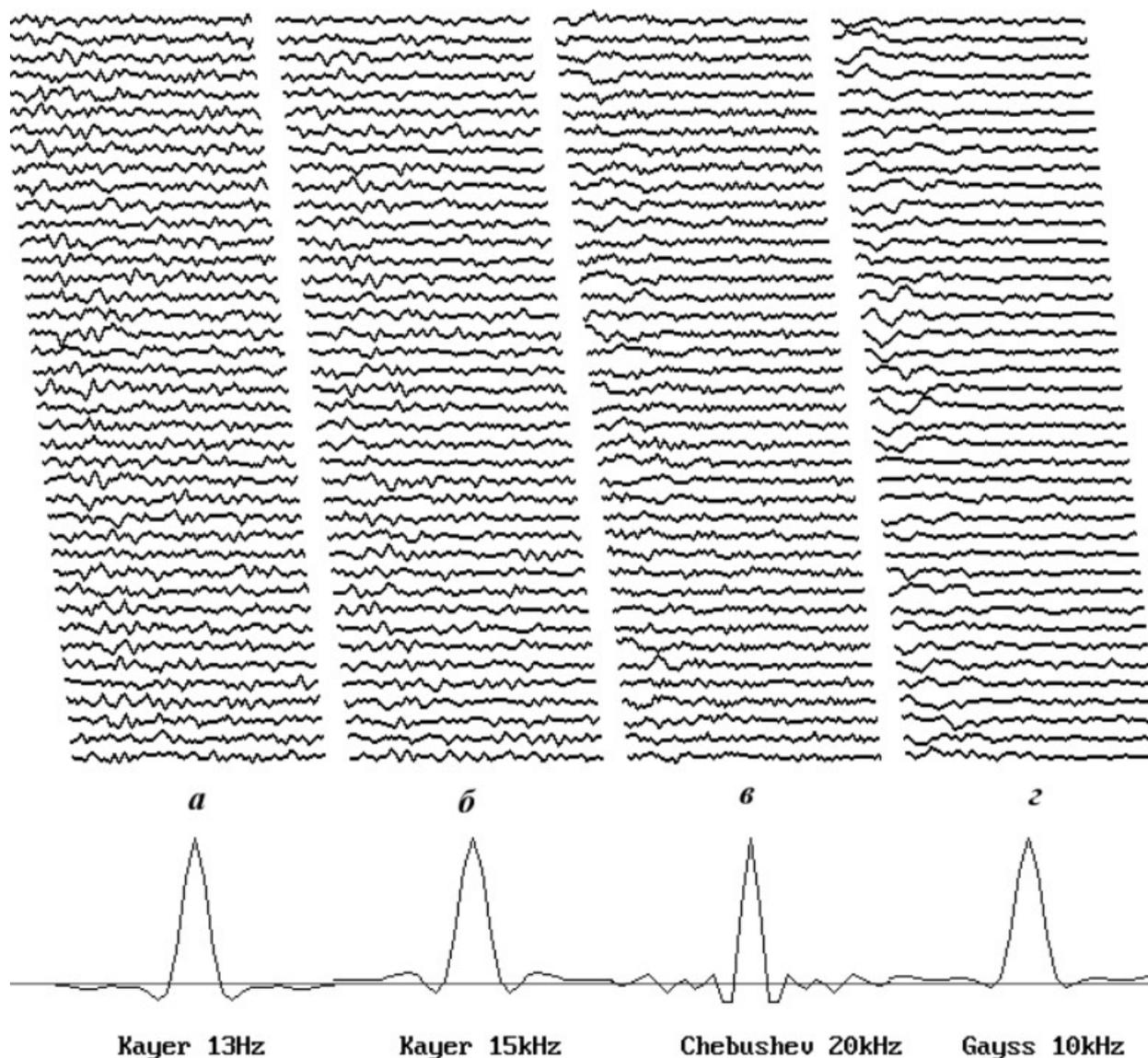


Рисунок 5.4 – Визначення характеристик фільтрів приймальної системи радара НР з використанням шумоподібного сигналу

Для компенсації цього ефекту, тобто відновлення коефіцієнтів (приведення до входу), система обробки повинна проводити зворотну операцію – антизгортку функцій  $r_E^{(1)}(\tau)$  і  $r_\Phi(\tau)$ , щоб отримати неспотворені КК  $r_E(\tau)$  флуктуацій іоносферної плазми. А вже по закінченні корекції, використовуючи спосіб найменших квадратів, система обробки почергово буде порівнювати відновлену експериментальну криву  $r_E(\tau)$  з набором теоретичних коефіцієнтів  $r_T(\tau)$  та, формуючи по-

верхню функції нев'язки, на двохкоординатній сітці знаходити місце розташування базового вузла (де фіксується найменше відхилення кривих) для фіксації значень  $T_i$  і  $T_e$  (алгоритм, приведений на рис. 5.5).

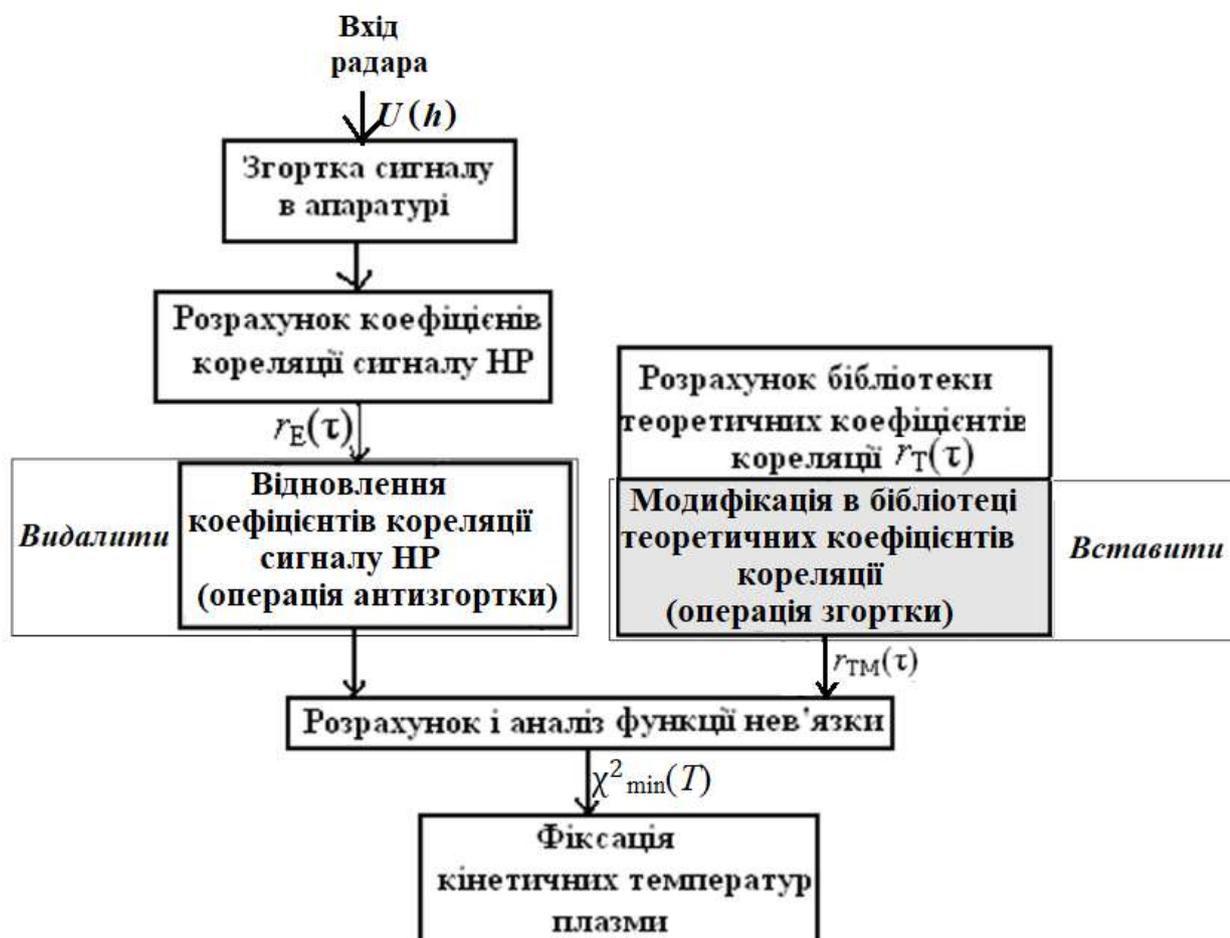


Рисунок 5.5 – Модернізація алгоритму розрахунку параметрів плазми в процесі порівняння експериментально отриманих кореляційних функцій на фоні її теоретичних аналогів

У процесі отримання нормованих КК, коли враховуються апаратурні особливості приймальної системи радара, необхідно для цієї операції антизгортки використовувати межі інтегрування вздовж затримки  $\tau$  від мінус безкінечності до плюс безкінечності, що є практично неможливим із-за недостатньої кількості ординат КК експериментальних кривих. На практиці у наявності є лише 10-20 ординат, і ця кількість залежить від довжини імпульсу зондування. Так, наприклад, харківський радар НР використовує довжину імпульсу біля  $T_i = 600$  мкс, тому

при кроці по кореляційній затримці у 30 мкс неможливо отримати більше 20 ординат, які ледве покривають діапазон, на якому присутній лише один період експериментальної кореляційної кривої (а бажано мати багато періодів аж до повного затухання функції). Збільшення ж довжини імпульсу небажане, адже це пов'язано з погіршенням висотного розрізнення.

Розробниками у [65] з метою зменшення похибок розрахунків параметрів іоносферної плазми запропоновано варіант удосконалення процедури врахування цього апаратного фактору. Щоб при такому імпульсі зондування обійти некоректну операцію антизгортки КК амплітудно-частотної характеристики  $r_{\phi}(\tau)$  смугового фільтру приймача з КК експериментальної кривої  $r_E(\tau)$  із-за недостатньої кількості її ординат, взамін цієї операції система обробки радара використовуватиме не відновлення експериментальних (видалений блок на рис. 5.5), а модифікацію (вставлений сірий прямокутник) теоретичних КК  $r_T(\tau)$  шляхом їх згортки з КК смугового фільтру  $r_{\phi}(\tau)$  у вигляді

$$r_{TM}(\tau) = r_T(\tau) \otimes r_{\phi}(\tau). \quad (5.4)$$

Для цих кривих кількість ординат  $r_T(\tau)$  і  $r_{\phi}(\tau)$  вздовж осі кореляційних затримок  $\tau$  за допомогою аналітичних формул можна нарахувати в достатній кількості, залишивши після закінчення згортки лише 10-20 ординат кривої  $r_{TM}(\tau)$  для заповнення бібліотеки.

### **5.3.2. Уточнення кореляційних функцій сигналу розсіяння з урахуванням довжини імпульсу зондування**

У методі НР необхідно проводити процедуру врахування наступного апаратного фактору, а саме – пов'язаного з такою характеристикою режиму роботи радіопередавача радара, як протяжність його випромінювання на початку кожної радіолокаційної розгортки дальності. У результаті утворюється імпульс зондування певної довжини, який, в свою чергу, подовжує спектр прийнятого сигналу. Тому постановка задачі в тому, щоб враховувати ще й особливості імпульсного

режиму випромінювання радіопередавача, ігнорування характеру якого призводить до подальших похибок обчислень параметрів іоносферної плазми.

У разі використання радара НР як імпульсної системи точність розрахунку параметрів залежить ще й від фізичних характеристик цього сигналу. Так, у роботі [13] акцентується, що при імпульсному режимі зондування ширина та форма спектру отриманого сигналу розсіяння може мало відрізнитися від спектру флуктуацій електронної концентрації лише у тому випадку, коли використовується зондувальний сигнал значної довжини. І похибки, внесені кінцями такого імпульсу, можна вважати незначними. Тобто автор пропонує, що можливою спотвореністю кінцевого результату у цьому випадку можна знехтувати, якщо ширина спектру імпульсу не буде перевищувати  $1/5$  частину флуктуаційного спектру електронної концентрації.

Для перевірки цього твердження і визначення діапазонів можливого розширення результуючого спектру у цьому виданні наводяться результати, отримані дослідниками в [4]. Ними було проведено програмне моделювання процедури згортки спектра флуктуацій електронної концентрації  $S_{Ne}(f)$ , який отримано для різних іоносферних рівнів, зі спектром  $S_i(f)$  імпульсу зондування прямокутної форми та довжиною  $T_i = 600$  мкс у випадку його радіовипромінювання на частоті  $f_0 = 158$  МГц з періодом 25 Гц.

На рис. 5.6, *a* демонструється отримуваний з обвідної амплітудно-часової характеристики цього імпульсу модуль спектра, розрахованого відносно центральної частоти зондування  $f_0$  при зазначених вище параметрах. Також для двох різних висот були розраховані аналітичні спектри флуктуацій електронної концентрації, що показані на рис. 5.6, *б* (внутрішні лінії). Були обрані висотні ділянки денної іоносфери з центрами на висоті 250 км ( $T_i = 1000$  К,  $T_e = 1000$  К), та на висоті 1500 км ( $T_i = 3000$  К,  $T_e = 3000$  К).

На основі цих даних була реалізована згортка наведених спектрів і отримана інформація як результат цієї операції, що демонструється на рис. 5.6, *б* (зовнішні лінії). Як можна спостерігати, із-за особливостей імпульсного режиму зондування параметри отриманого спектру сигналу розсіяння зазнають суттєвих

змін у вигляді розширення, тим більшого, чим коротша довжина імпульсу  $T_i$  радара НР буде використана.

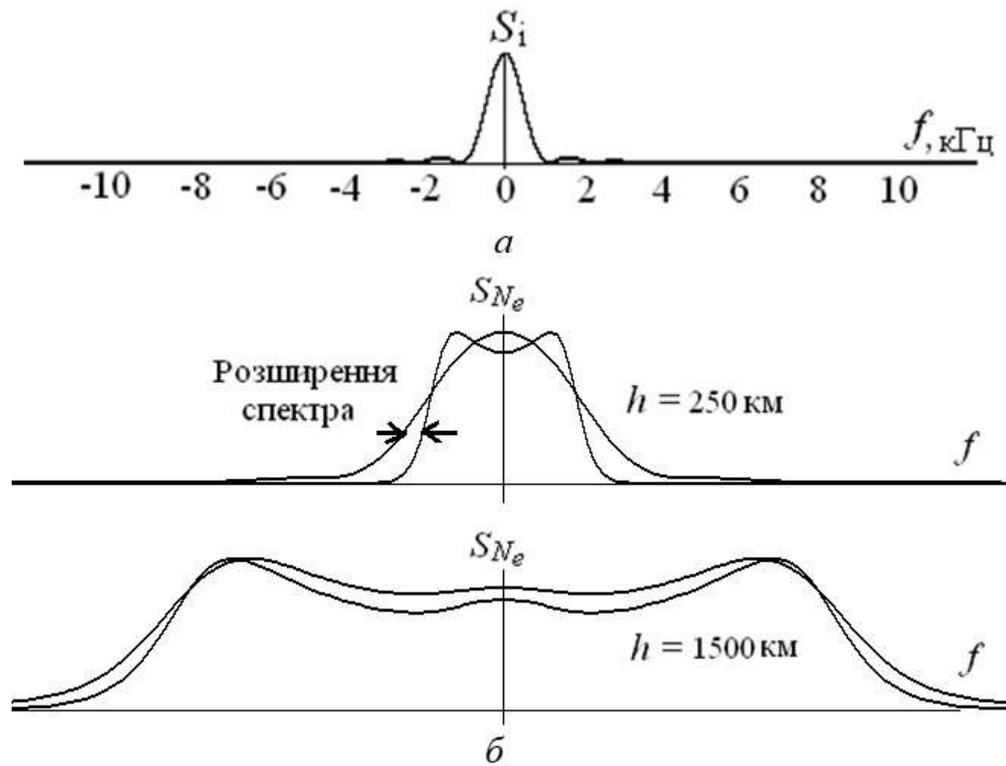


Рисунок 5.6 – Вплив спектру імпульсу зондування (а) на спектр сигналу розсіяння (б)

Таким чином, відносно наведеного режиму випромінювання харківського радара НР можна сказати наступне. Вплив імпульсу зондування у нашому випадку дійсно у тому, що на вході радара формується сигнал розсіяння, який набуває додаткового відносного розширення спектру від 4% до 18%, яке автори ранніх робіт пропонували не враховувати.

З оглядом на такі результати розробники поставили задачу [66] обов'язкової модифікації процесу вимірювань іоносферних параметрів щодо врахування ширини спектру зондувального сигналу радіопередавача для випадку імпульсного режиму випромінювання радара НР. Для цього запропоновано введення додаткових технічних зв'язків у структурі радара, у результаті яких імпульс поточного режиму випромінювання після генерування також надходитиме і в систему обробки радара для подальшого врахування його фізичних параметрів. Це дозволить системі обробки з його допомогою уточнювати еталонні (бібліотечні) кореляційні функції, тобто приводити їх до того ж вигляду, як і експериментальні, що

радіоприймач радару отримує згідно впливу реальної довжини задіяного імпульсу зондування.

На рис. 5.7 наведено алгоритм функціонування такого варіанту обчислювальних процедур, коли відбувається не відновлення експериментальних КК, а модифікація (сірий прямокутник) теоретичних КК.

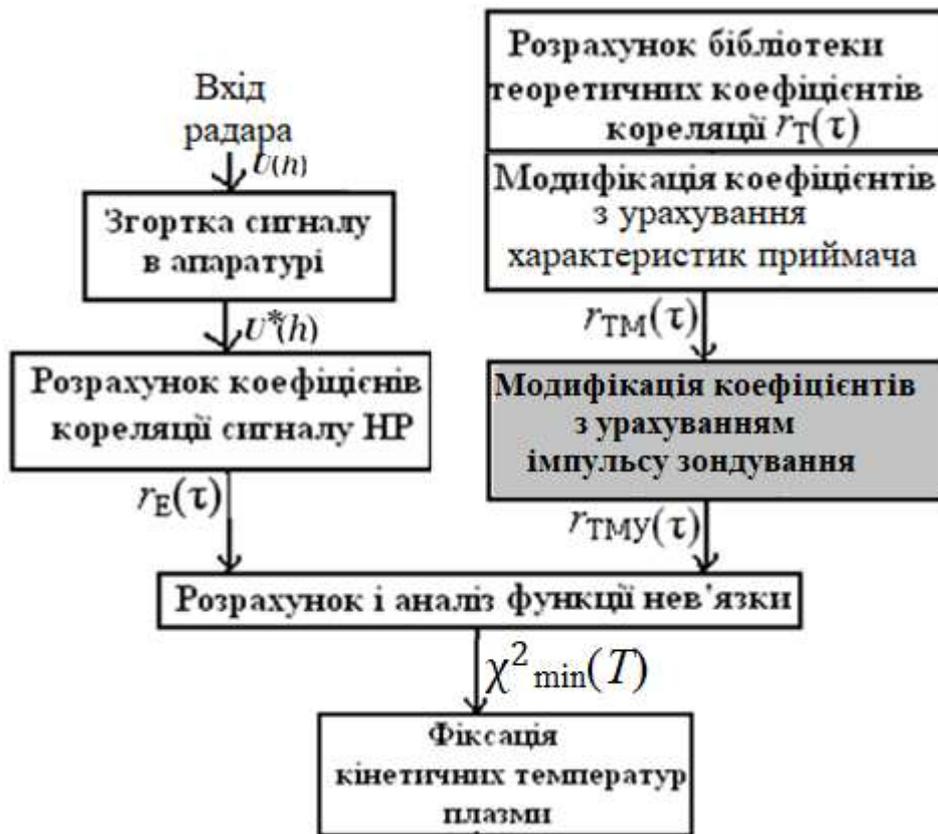


Рисунок 5.7 – Блок врахування в алгоритмі розрахунку параметрів імпульсу зондування

При такому підході ординати кореляційних характеристик  $r_E(\tau)$  з метою розрахунку функції нев'язки подаються до порівняння з еталонними функціями  $r_{TMU}(\tau)$ , для отримання яких і вводять дане врахування фізичних параметрів імпульсу зондування. Це врахування визначають, виходячи з уточнення  $r_{TM}(\tau)$  до значень  $r_{TMU}(\tau)$  шляхом розв'язання рівняння виду

$$r_{TMU}(\tau) = r_{TM}(\tau) \cdot r_i(\tau), \quad (5.5)$$

для якого ординати кореляційної функції  $r_i(\tau)$  отримують з обвідної амплітудно-часової характеристики даного імпульсу.

22 - 9 - 2020 11 : 55 : 29

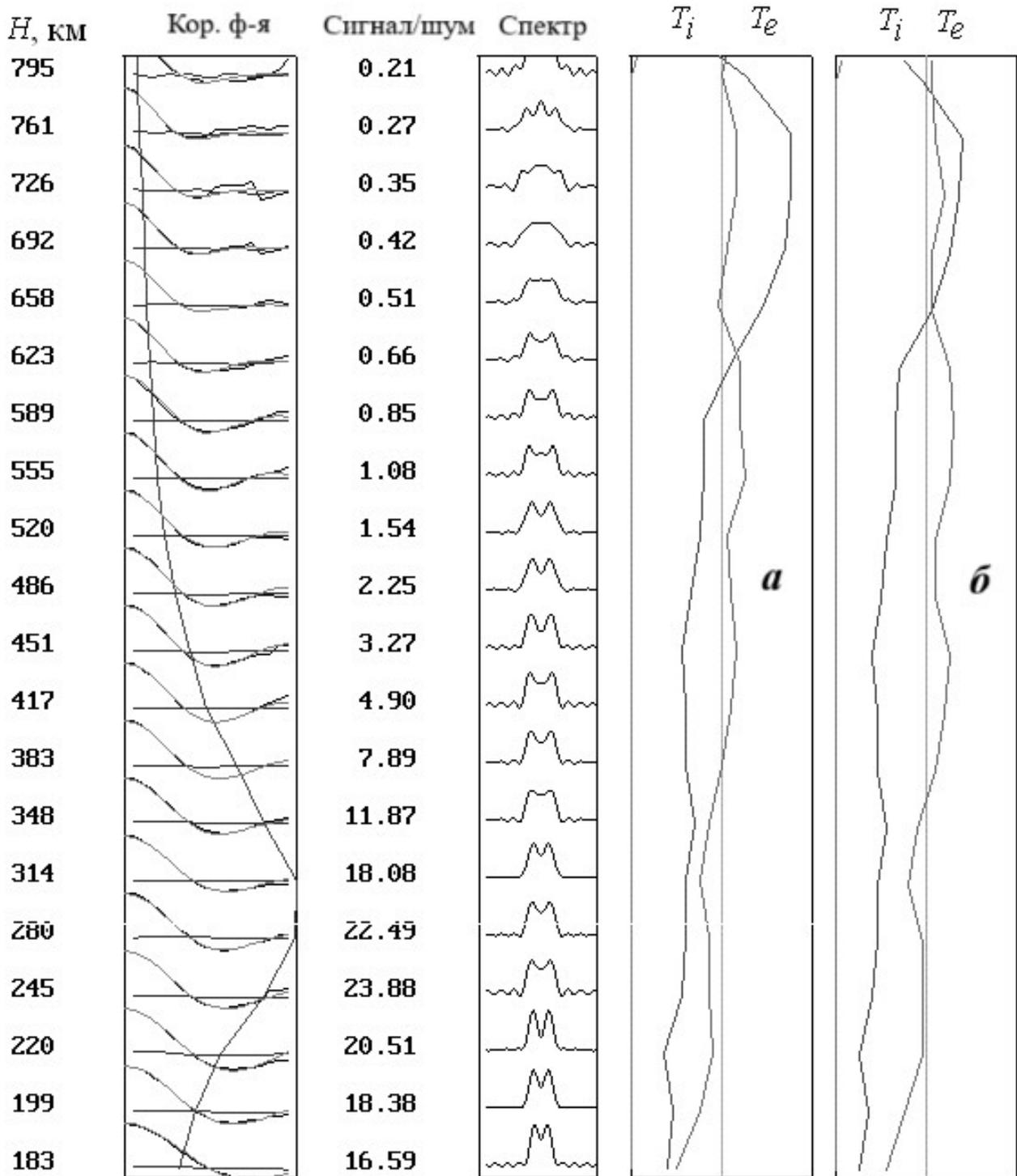


Рисунок 5.8 – Розрахунок кінетичних температур іоносферної плазми при врахуванні (*б*) та ні (*а*) характеристик імпульсу зондування

Такий підхід сприяє покращенню процесу розрахунку параметрів іоносферної плазми. Так, з метою перевірки дієвості даного способу, пов'язаною з необ-

хідністю уточнення еталонних КК з оглядом ще й на особливості режиму випромінювання радіопередавача, було реалізовано два варіанти розрахунку кінетичних температур іоносферної плазми за висотним розподілом кореляційних функцій сигналу НР, отриманих у полудень 29 вересня 2020 року в одному із сеансів вимірювань тривалістю 1 хв (рис. 5.8).

У першому варіанті (а) проводився розрахунок з використанням немодифікованих на імпульс зондування еталонних бібліотечних функцій, а у другому (б) – після проведення відповідної модифікації. На прикладі цього розрахунку параметрів можна спостерігати загальну тенденцію, що має місце при обробці і для будь-яких інших сеансів. Було виявлено, що коли не враховувати фізичні параметри імпульсу, то будуть отримані недостовірні значення (у сотні градусів) температур  $T_e$  і  $T_i$ , які тим більше будуть спотворені, чим коротший імпульс зондування.

### ***5.3.3. Уточнення кореляційних функцій сигналу розсіяння з урахуванням особливостей антенних перемикачів радара НР***

У процесі отримання експериментальних КК ще один із варіантів корекції полягає у тому, що необхідно врахувати вплив на точність отримуваних результатів при визначенні форми експериментальної кореляційної кривої ще однієї технічної особливості режиму роботи імпульсного (тобто моностатичного, з однією антеною) радара НР. Це – наявність у структурі його антено-фідерної системи антенних перемикачів, які призначені для зміни шляхів проходження сигналів (детально див. п. 2.10).

На початку радіолокаційної розгортки, тобто у момент випромінювання імпульсу, вони перекривають два входи балансного мосту (відповідно – і входи приймачів), а після випромінювання відкривають їх для обробки відбиття. І найбільш істотний вплив (зі зміною характеристик сигналу розсіяння) відбувається у ті моменти, коли закінчується випромінювання імпульсу зондування і

безпосередньо починається приймання сигналу відбиття з нижніх областей іоносфери. Тобто точність розрахунку параметрів залежить ще й від технічних особливостей цих перемикачів, які характеризуються змінним у часі (нелінійним) коефіцієнтом  $K_p(h_i)$  передачі сигналу розсіяння через свої елементи.

На рис. 5.9, *а* представлено знятий експериментаторами [3] поточний коефіцієнт передачі, який характеризує властивості конкретного газового розрядника, встановленого у структурі перемикачів. Як ми можемо спостерігати, ця характеристика є нелінійною, особливо у діапазоні висот 80-330 км. Перед цим закінчується випромінювання зондувального імпульсу і починається приймання сигналу, що надходить з нижніх областей іоносфери. І цей суттєвий вплив (з відповідною зміною характеристик сигналу розсіяння) не дає змоги при розрахунках ординат АКФ, коли перемножуються сусідні (з різних моментів часу) відліки напруги, отримати їх точні значення.

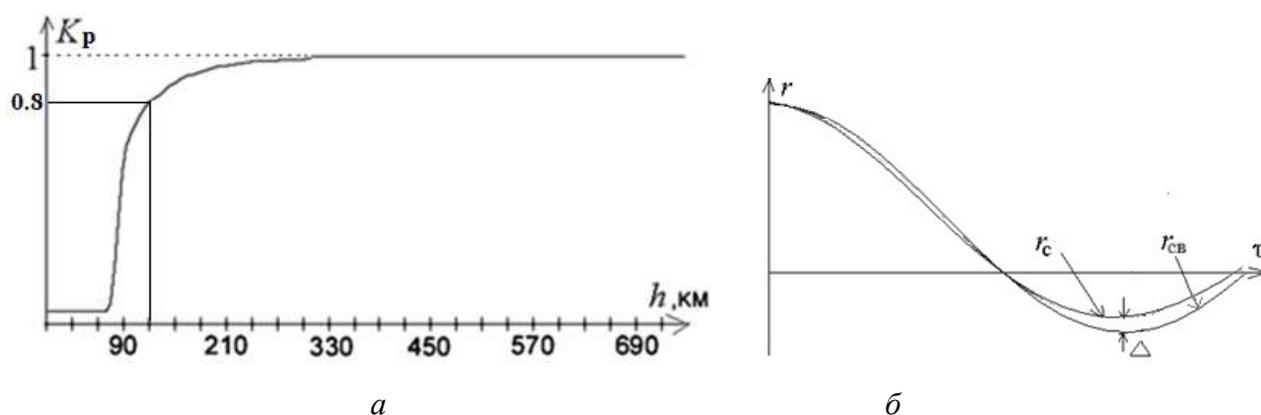


Рисунок 5.9 – Характеристика швидкості деіонізації газу антенного розрядника (*а*) та вплив характеристики антенного комутатора на форму АКФ сигналу розсіяння (*б*)

При проведенному програмному моделюванні були отримані наступні результати (рис. 5.9, *б*). Вони показали, що коли сигнал розсіяння проходить через перемикач, то його кореляційна функція на конкретній висоті 130 км, яка відповідає значенню  $K_p = 0.8$ , змінилася. На його вході вона мала вигляд  $r_{cв}$ , а от на його виході – вигляд  $r_c$ , тобто стала відрізнятися (стиснулася) на відповідну різницю  $\Delta$  у кожній парі однойменних ординат, що було визвано їх перемноженням на АКФ коефіцієнта передачі розрядника.

Щоб компенсувати це спотворення, запропоновано проводити відновлення шляхом застосування зворотної операції. Тобто АКФ сигналу необхідно поділити на АКФ цього коефіцієнта. Для реалізації цього перед початком порівняння з еталонними отримані  $k$  ординат експериментальної кореляційної функції  $r_c(k\tau, h_i)$  повертають (відновлюють) до неспотворених перемикачем значень  $r_{cb}(k\tau, h_i)$  (рис. 5.7, виділений прямокутник) шляхом розв'язання рівняння виду

$$r_{cb}(k\tau, h_i) = \frac{r_c(k\tau, h_i)}{K(h_i) \cdot K(h_i + c \frac{k\tau}{2})}. \quad (5.6)$$

Таким чином, в алгоритмах обробки сигналу розсіяння (рис. 5.10) для відновлення ординат експериментальних АКФ пропонується ввести ще один допоміжний блок (прямокутник сірого кольору), який дозволить реалізувати запропоновану корекцію.



Рисунок 5.10 – Блок врахування в алгоритмі розрахунку параметрів характеристик антенного перемикача радара НР

На рис. 5.11 представлено результати співставлення параметрів іоносфери при їх обчисленнях, коли не враховували (*a*) та враховували (*б*) корекцію АКФ сигналу розсіяння з оглядом на характеристики антенних комутаторів. Як можна бачити, на нижніх висотах (100-230 км) іоносфери похибки досягають 50%.

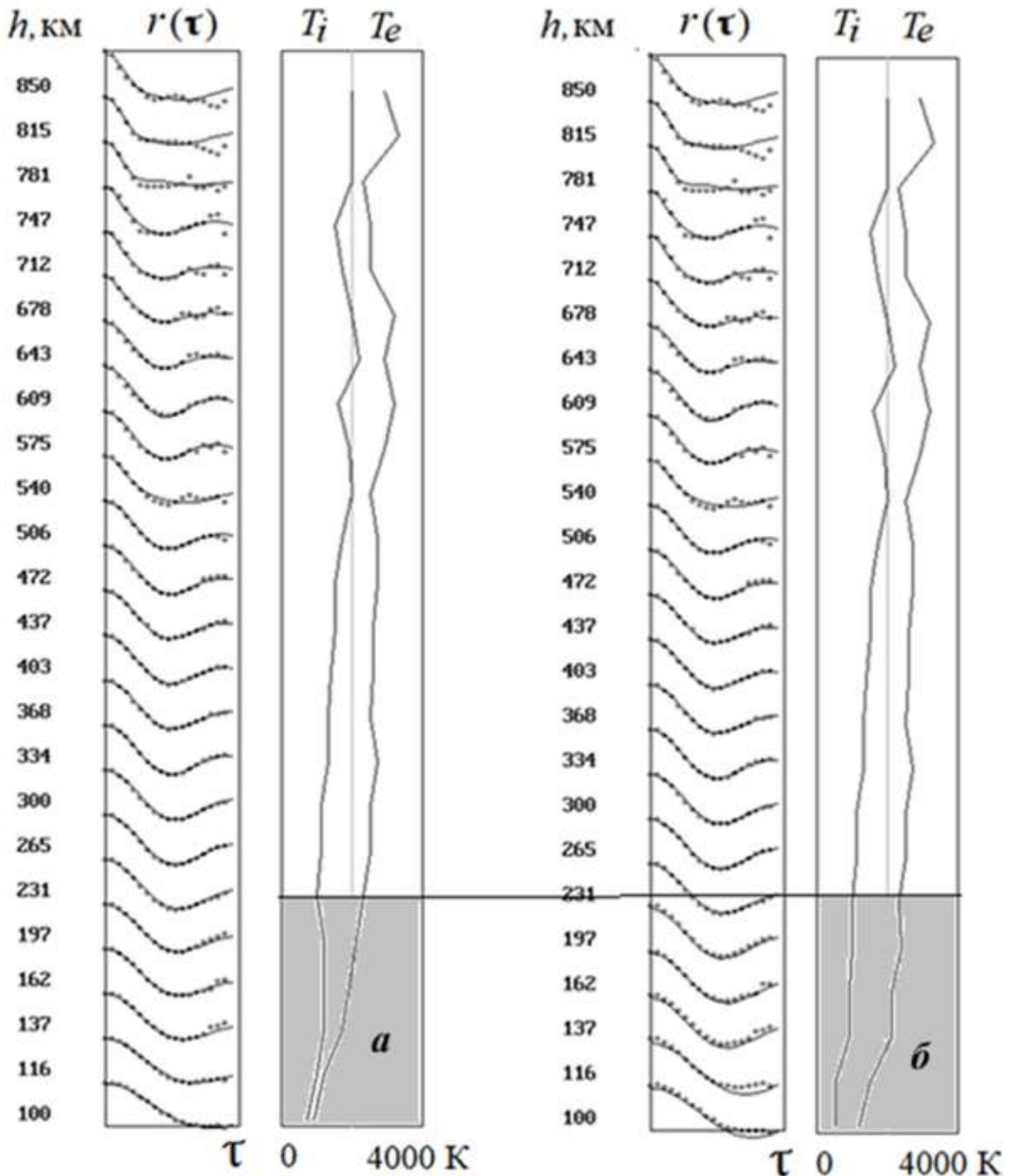


Рисунок 5.11 – Результати розрахунку параметрів нижньої іоносфери без (*a*) та з урахуванням (*б*) антенного комутатора

### 5.3.4. Врахування особливостей аналого-цифрового перетворення сигналу НР

І, нарешті, розглянемо спосіб врахування ще одного апаратурного фактору, а саме – вплив на точність отримуваних результатів при розрахунку експериментальної кореляційної кривої такої технічної особливості, як варіювання у часі характеристик аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що на виході радіоприймача імпульсного радара НР переводить сигнали з аналогового виду в цифровий код. Із-за нестабільності своїх живлячих опорних напруг він має так званий “дрейф нуля” перетворювача. Тобто точність подальшого розрахунку параметрів плазми залежить ще й від технічних особливостей цього пристрою, який вносить періодично змінювану у часі добавку до сигналу розсіяння.

У цілому, апаратурну реалізацію цифрового перетворення сигналу  $U(h)$ , який повертається з іоносфери як сигнал, некогерентно розсіяний на просторово-часових неоднорідностях плазми, пояснює структурна схема АЦП, що приведена у [2, 3]. Коротко ж специфіка його роботи у тому, що має місце похибка перетворення, пов’язана з нестабільністю, як затверджується, різнополярної опорної напруги  $\pm U_0$ . Це визвано, в основному, зміною температури навколишнього середовища, що приводить до зміни характеристик радіокомпонентів у блоках живлення. Також від температури залежать характеристики резистивного дільника та схем компараторів блоку АЦП.

Все це проявляється в неточному позиціонуванні центру вхідного двупольного сигналу НР стосовно потенціалу “0” АЦП, за який приймається потенціал на вході центрального дільника перетворювача. У результаті такої неузгодженості на виході АЦП із-за такого неспівпадіння буде неточне цифрове відображення значень вхідного сигналу, що призводить до подальших похибок обчислень коефіцієнту кореляції сигналу розсіяння.

Існує варіант приведення до мінімуму значення даної похибки. Він полягає у тому, що ще до початку радіофізичного експерименту АЦП піддається тестуванню. За допомогою генератора шумоподібного сигналу на його вхід подається

контрольний сигнал, а елементами регулювання у ланці живлення  $\pm U_0$  з використанням статистичного накопичення встановлюють на виході перетворювача нульові на даний момент результати.

У нашому ж варіанті запропоновано враховувати ненульове значення на виході АЦП безпосередньо під час експерименту. Для цього пропонується ввести додатковий канал обробки, задачею якого є статистичне усереднення на кожній висотній ділянці рівнів напруги сигналу розсіяння, який, як відомо, має характер шумоподібного процесу. Приймаючи цей накопичений уздовж розгортки результат за контрольний, він дозволяє проводити у реальному часі корегування (відновлення) коефіцієнтів кореляції сигналу НР.

Так, під час роботи апаратури радара НР були проведені експерименти по накопиченню напруги на протязі декількох сотень розгорток вздовж шкали дальності для аналізу отриманих результатів. Вони показали (рис. 5.12), що після проходження сигналу розсіяння через АЦП результат цього накопичення не завжди має нульове значення, тобто в реальності дійсно існує так званий ефект зміни положення нуля. При цьому в залежності від часу доби можливий “відхід” результату як у позитивну (день, *a*), так і в негативну (ніч, *b*) площини.

Щоб компенсувати вплив цього ефекту, пропонується у реальному часі, за допомогою апаратурно удосконаленого корелятора реєструвати дане відхилення значень АЦП та з його залученням проводити операцію відновлення, тобто від АКФ сигналу розсіяння віднімати АКФ отриманої добавки у вигляді “паразитного” рівня.

Це врахування виконують для *k* ординат кореляційних функцій  $r_{св}(k\tau)$  сигналу розсіяння перед початком їх порівнянням з еталонними кореляційними функціями  $r_{тв}(k\tau)$  шляхом модифікації до значень

$$r_{свм}(k\tau) = r_{св}(k\tau) - \bar{U}(h_i) \cdot \bar{U}\left(h_i + c \frac{k\tau}{2}\right), \quad (5.7)$$

де  $\bar{U}(h_i)$  – результат статистичного накопичення на кожній висотній ділянці  $h_i$  рівня напруг сигналу розсіяння (рис. 5.13, виділені прямокутники сірого кольору).

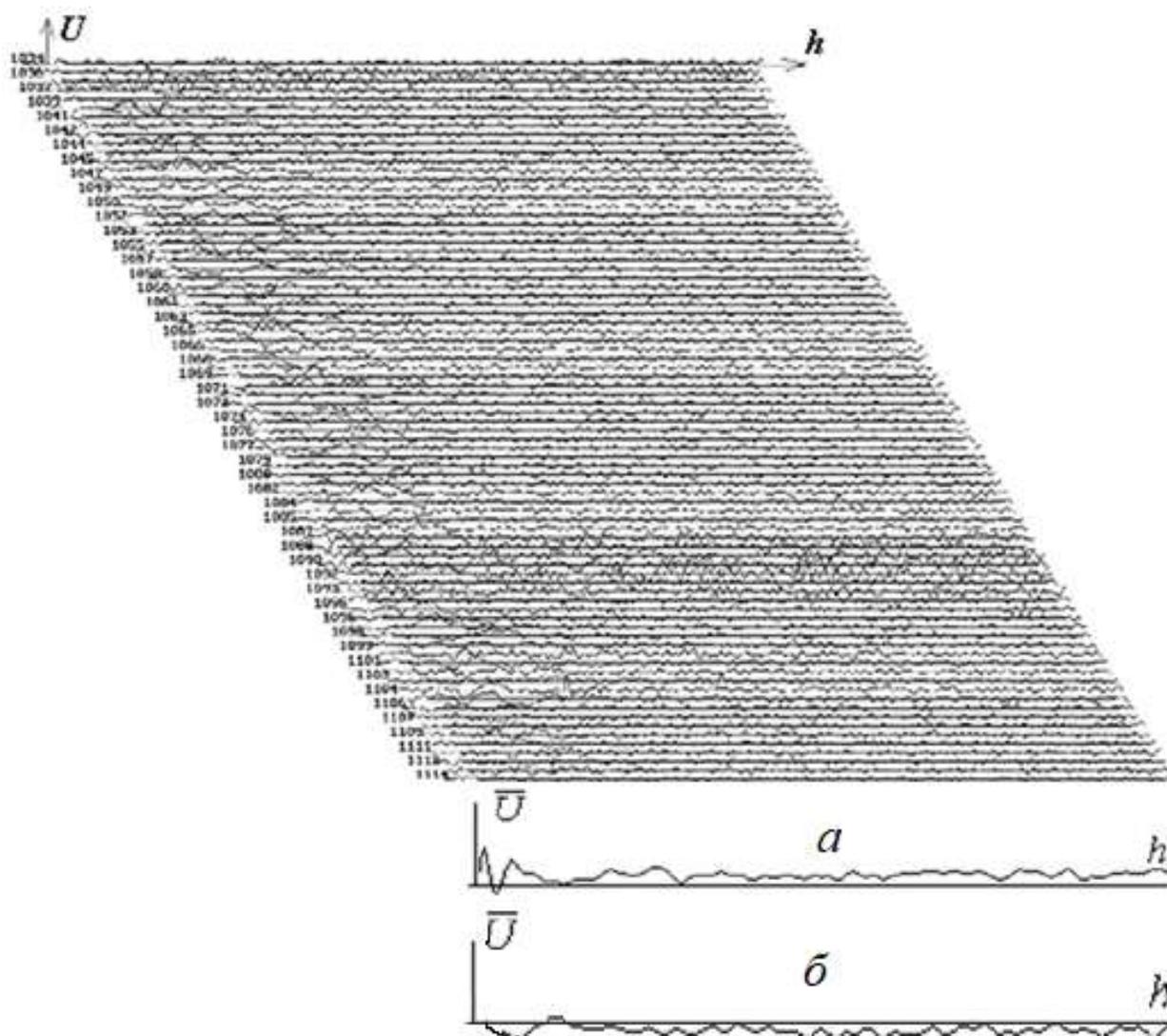


Рисунок 5.12 – Набір розгорток дальності напруги сигналу НР+шум та їх усереднення для різних пор доби

Таким чином, приведені у даному розділі процедури апаратурної корекції значень КК сигналу розсіяння дають можливість врахувати та компенсувати зміну форми експериментальних кореляційних кривих не тільки із-за наявності фільтра радіоприймача, короткої обвідної імпульсу зондування та технічних характеристик антенного перемикача, але й із-за наявності у структурі імпульсного радіолокатора блоку АЦП з нестабільними у часі технічними характеристиками. Все це дозволяє в подальшому реалізувати більш точну оцінку стану іоносферного середовища.

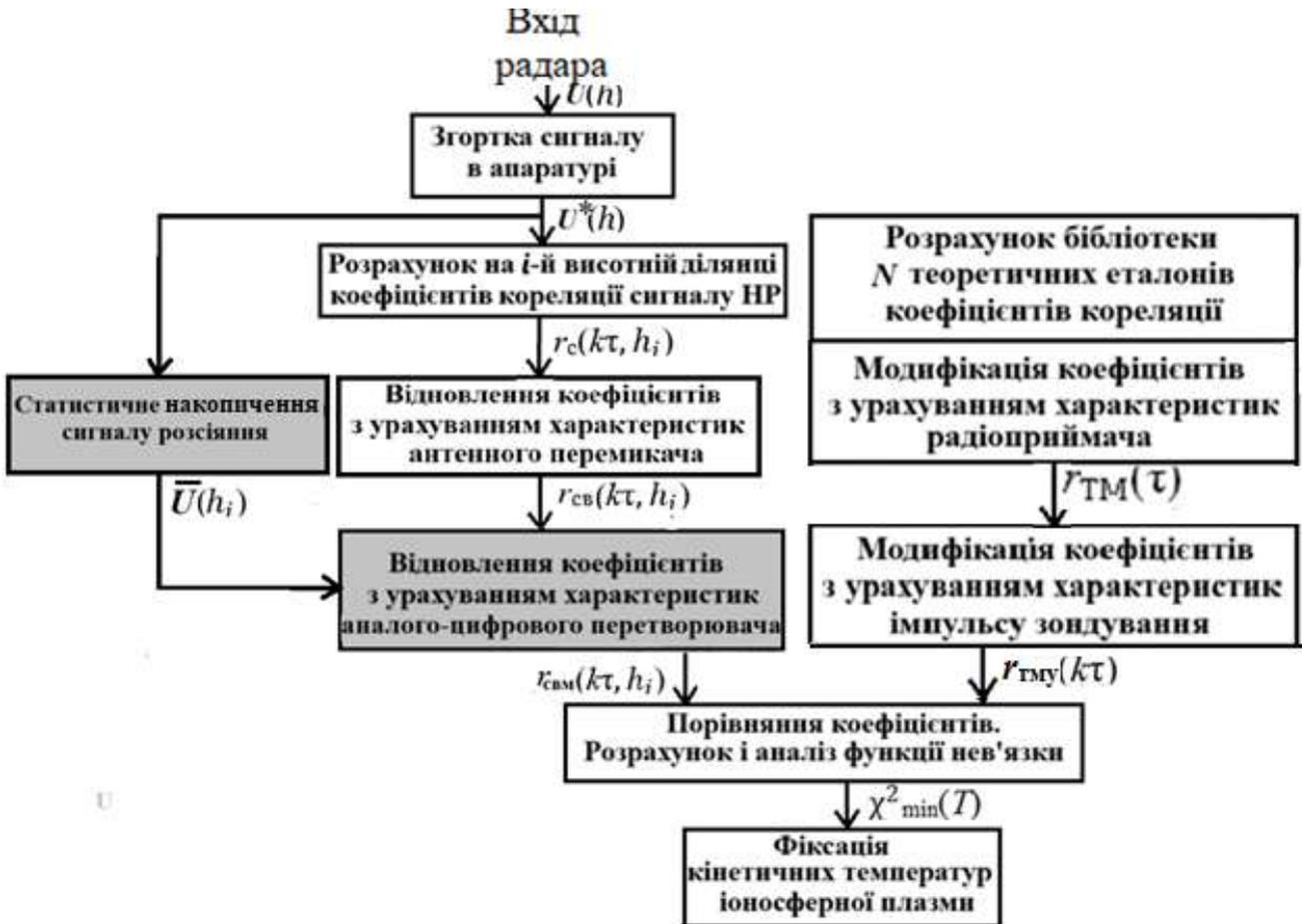


Рисунок 5.13 – Блок врахування в алгоритмі розрахунку параметрів особливостей процесу аналого-цифрового перетворення

### 5.3.5. Додатковий статистичний аналіз форми кореляційних функцій сигналу НР

Однією із задач у методі НР є попередня статистична обробки та аналіз сигналу розсіяння, прийнятого на фоні імпульсних завад і відбиттів від дискретних об'єктів. З огляду на необхідність підвищення ефективності та довірчості математичних перетворень сукупності радіолокаційних даних цю задачу розглядають як дуже важливу процедуру, що з формальної точки зору представляє собою статистичний аналіз часових рядів і локалізацію завад.

Це означає, що коли від похибок розрахунку АКФ залежить достовірність наступних математичних обчислень, то вкрай необхідно розглянути процедури мінімізації цих похибок з метою підтримки якості кореляційного аналізу.

Так, у процесі проведення радіофізичного експерименту з використанням методу НР передбачається залучення процедур попереднього детального аналізу, уточнення даних і усунення аномальних результатів у вхідній інформації. Це сприяє максимальному наближенню до теоретично обґрунтованого мінімуму похибок розв'язків задач під час проведення параметричної ідентифікації стану іоносферної плазми.

Через похибки вимірювань, специфічний характер геофізичних явищ, а також через завади, викликані збоями в апаратурі та відбиттями від космічних об'єктів, які попадають під час сеансу (протягом одиниць-десятків хвилин) у зону діаграми спрямованості антени радара НР, цифрові послідовності завжди будуть являти собою спотворені вибірки.

Якщо немає можливості для організації процедури додаткового аналізу сигналу на вході корелятора, то можна реалізувати процедуру аналізу вихідних даних наприкінці сеансу накопичення, коли вже утворяться висотні розподіли  $K$  ординат АКФ  $R_c$  сигналу НР, або будуть розраховані коефіцієнти кореляції  $r_{Ne}$  флуктуацій електронної концентрації.

Алгоритми програмної фільтрації детально описані в [2, 3] і включають такі операції:

1. Відстеження та контроль мінімальних і максимальних значень числового ряду.
2. Локалізація двох і більше сусідніх аномальних відліків числового ряду.
3. Розкладання даних на сеанси короткої тривалості.
4. Відновлення пропущених за якихось причин значень числового ряду та ще ряд інших.

## Розділ 6

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ  
ЗА ДОПОМОГОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ КОРЕЛЯЦІЇ  
ФЛУКТУАЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ**

Як уже було сказано, до параметрів іоносфери належать висотно-часові варіації електронної концентрації  $N_e(h, t)$  та радіальні складові швидкості переносу плазми  $V(h, t)$ . Також до них відносяться іонні  $T_i(h, t)$  та електронні  $T_e(h, t)$  температури, а також інформація про висотно-часові варіації відносного вмісту на нижніх висотах молекулярних іонів  $M^+(h, t)$ , вмісту іонів гелію  $He^+(h, t)$ , водню  $H^+(h, t)$  і кисню  $O^+(h, t)$ . У процедурах обчислення саме цих параметрів задіяні математичні перетворення, що базуються на розв'язанні зворотної задачі розсіювання, про яку піде мова у цьому розділі.

Як показує практика, у цьому випадку для наближення до однозначного розв'язання задачі необхідно мати досить високу точність подання вихідних даних – КК флуктуацій  $r(\tau)$  електронної концентрації іоносферної плазми. Наведені у попередніх розділах перетворення в достатній мірі врахували зміну з висотою іонного складу плазми, та ще й дозволили робити розрахунки в умовах, коли у багато разів змінюється співвідношення сигнал/шум.

В цілому операція розпізнавання вектора  $\theta$  іоносферних параметрів задається як

$$\theta = \Psi^{-1}\{R(\tau; f(\theta; x))\} = \Psi^{-1}\{Z[F(f(\theta; x))]\}. \quad (6.1)$$

Тут  $F$  – операція формування сигнальної функції  $S$  з сигналу  $f(\theta; x)$ , що надходить до радара НР. Такий сигнал містить інформацію про вектор іоносферних параметрів, яку можна одержати шляхом Фур'є-перетворення сигналу розсіяння і наступного нормування АКФ цього сигналу;  $Z$  – операція  $R$  з уточнення сигнальної функції, а саме – перетворення АКФ сигналу розсіяння у КК флуктуацій

електронної концентрації (шляхом урахування апаратурно-методичних особливостей імпульсного зондування);  $\Psi^{-1}$  – процедура розв’язання зворотної задачі, яку відображує оператор перетворення КК у вектор іоносферних параметрів.

Через те, що  $\Psi^{-1}$  – невідома аналітична функція, вираз (6.1) необхідно замінити процесом порівняння оцінюваної експериментальної кореляційної функції  $Z[F(f(\theta; x))]$  з аналогічними функціями  $\Psi(\theta)$  в їх характерних точках (при фіксованих  $\tau$ ), тобто з функціями, які отримуються у результаті розв’язань прямої задачі. Для організації такого процесу порівняння зазвичай використовується різницевий функціонал вигляду

$$\chi^2(\theta) = \{Z[F(f(\theta; x))] - \Psi(\theta)\}^2, \quad (6.2)$$

отримувани значення якого у точці мінімуму дозволяють вийти на очікувані параметри вектору  $\theta$ .

Розглянемо ті з процедур, що реалізовані у практиці роботи харківського радара НР [1–4].

### 6.1. Однокомпонентна іоносферна плазма

Коли йдеться про однокомпонентну іоносферну плазму, то звичайно мають на увазі область F2 іоносфери, для якої характерна перевага іонів атомного кисню  $O^+$ . Як правило, ця область вдень займає висоти 200...400 км, уночі ж – 250...500 км. У цьому діапазоні для кожного елементу висоти нормована іонна частина спектра некогерентного розсіяння, утворювана флуктуаціями електронної концентрації, описується виразом [2–4]

$$s_1(\theta) = \frac{1+t}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\alpha_1 e^{-\theta^2}}{\{k_D + 1 + t[1 - \varphi(\theta)]\}^2 + \pi t^2 \theta^2 e^{-2\theta^2}}, \quad (6.3)$$

де  $\theta = \alpha_1 \Delta\omega = \alpha_1 (\omega - \omega_0)$  – нормована частота;  $\omega_0 = c \frac{2\pi}{\lambda_0}$  – робоча частота ра-

дара;  $\omega$  – частотні складові спектра НР;  $\alpha_1 = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{\frac{m}{2k_B T_i}}$ ;  $m$  – маса іонів (для іонів атомного кисню  $m = m_{O^+} = 16$  а.о.м.);  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана;  $k_D$  – квадрат добутку дебаєвського радіуса екранування  $r_D$  і модуля хвильового вектора сигналу зондування (див. [3]). При  $\lambda_0 \approx 1,9$  м (тобто для робочої

довжини хвилі радара НР Інституту іоносфери)  $\varphi(\theta) = 2\theta e^{-\theta^2} \int_0^{\theta} e^{x^2} dx$  – за-

лежність, отримана у результаті перетворення функції провідності іонів і електронів.

Обвідна нормованої кореляційної функції  $r_T$  сигналу НР, що розраховується за допомогою аналітичних залежностей та ідентична КК флуктуацій електронної концентрації іонної частини спектрального розподілу [надалі по тексту – теоретична (модельна) АКФ], з кроком по затримці  $\tau_q$  визначається як

$$\begin{aligned} r_T(T_i, T_e; k\tau_q) \Big|_{k=0, 1, \dots, K} &= \frac{2}{\alpha_1} \int_0^{\infty} s_1(\theta) \cos\left(\frac{\theta}{\alpha_1} k\tau_q\right) d\theta = \\ &= \frac{2(1+t)}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\theta^2} \cos\left(\frac{\theta}{\alpha_1} k\tau_q\right)}{\{1+t[1-\varphi(\theta)]\}^2 + \pi t^2 \theta^2 e^{-2\theta^2}} d\theta, \quad k = \overline{0, K}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

## 6.2. Багатокомпонентна іоносферна плазма

Іонна структура  $\gamma$  вище максимуму шару F2 (вище діапазону 400...500 км) вважається такою, що у ній домінуюча роль від іона атомного кисню  $O^+$  ( $m_{i3} = m_{O^+}$ ) переходить до більш легких іонів гелію  $He^+$  ( $m_{i2} = m_{He^+} = 4$  а.о.м.) і водню  $H^+$  ( $m_{i1} = m_{H^+} = 1$  а.о.м.). Тому якщо враховувати розподіл елементів по

мірі зростання їх мас, структуру іонного складу можна записати вже у такому вигляді:

$$\gamma_1 = \frac{[\text{H}^+]}{N_e}, \quad \gamma_2 = \frac{[\text{He}^+]}{N_e} \quad \text{і} \quad \gamma_3 = \frac{[\text{O}^+]}{N_e} = 1 - \gamma_1 - \gamma_2. \quad (6.5)$$

Нормована функція іонної частини спектрального розподілу некогерентного розсіяння для випадку 3-х компонентної іоносферної плазми виглядає як

$$s_3(\theta) = \frac{1+t}{\sqrt{\pi}} \times \frac{\alpha_N \sum_{n=1}^3 \gamma_n \sqrt{\frac{m_{in}}{m_{i1}}} e^{-\frac{m_{in}}{m_{i1}} \theta^2}}{\left\{ 1+t \left[ 1 - \sum_{n=1}^3 \gamma_n \varphi \left( \sqrt{\frac{m_{in}}{m_{i1}}} \theta \right) \right] \right\}^2 + \pi t^2 \theta^2 \left( \sum_{n=1}^3 \gamma_n \sqrt{\frac{m_{in}}{m_{i1}}} e^{-\frac{m_{in}}{m_{i1}} \theta^2} \right)^2}. \quad (6.6)$$

Як результат, вираз (6.6) дозволяє перейти до опису випадку  $N$ -компонентного іонного складу. Для цього у виразі (6.5) необхідно в доданках, які використовують коефіцієнти  $\gamma_n$ , встановити межі накопичення від  $n = 1$  до  $n = N$ . Для такого варіанта іонної структури форма обвідної модельної АКФ уже буде визначатися відповідно до залежності

$$r_T(T_i, T_e, \gamma_1, \dots, \gamma_N; k\tau_q) \Big|_{k=0, 1, \dots, K} = \frac{2}{\alpha_N} \int_0^\infty s_N(\theta) \cos\left(\frac{\theta}{\alpha_N} k\tau_q\right) d\theta. \quad (6.7)$$

Як узагальнення, нижче показано результати модельних розрахунків аналітичних АКФ і спектрів у залежності від значень іоносферних параметрів), а також у залежності від висоти (рис. 6.1) [2, 4].

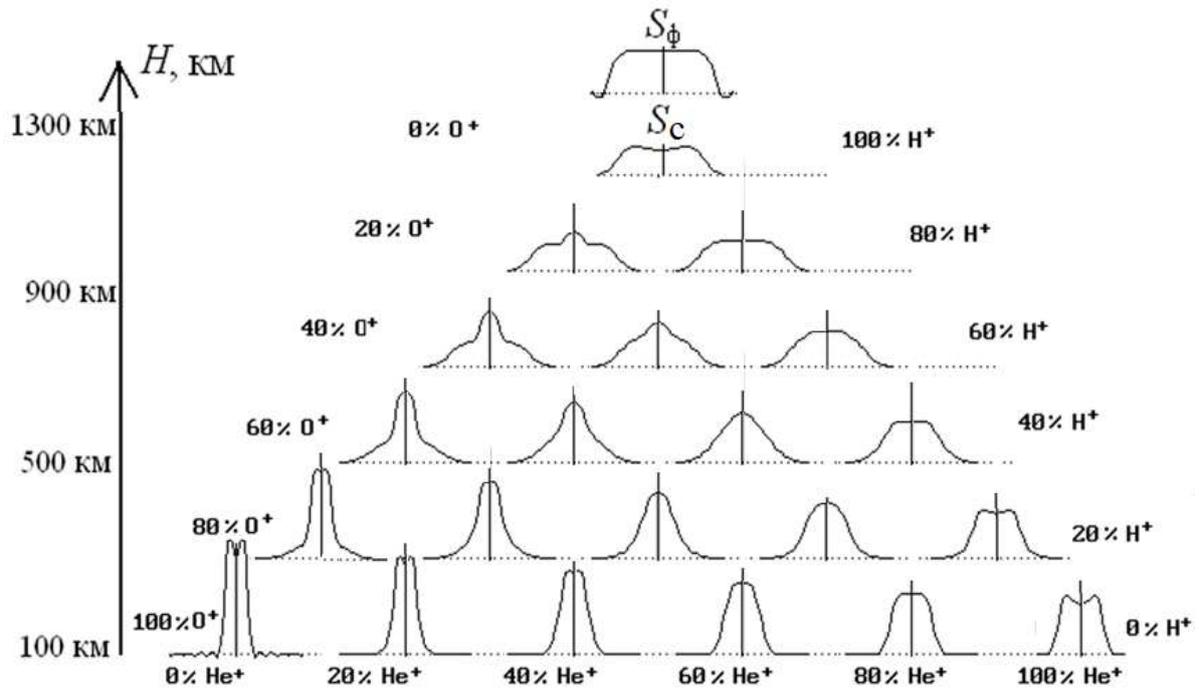


Рисунок 6.1 – Залежність форми спектру сигналу розсіяння від значень іоносферних параметрів та від висоти

### 6.3. Реалізація розв'язків зворотної задачі розсіяння у методі некогерентного розсіяння радіохвиль

Пряма задача з теорії електродинаміки полягає у тому, що дає можливість за параметрами іонізованої середовища розрахувати спектр  $s(\vec{\theta})$  та АКФ сигналу  $r(\tau)$ , розсіяного цим середовищем. Але нас цікавить зворотна задача – знаходження складових вектора іоносферних параметрів за значеннями  $r(\tau)$ . На жаль, немає аналітичного виразу типу

$$\vec{\theta} = \varphi [r(\tau)]. \quad (6.8)$$

Тому суть зворотної задачі обрана така, щоб на ПК реалізувати процедури покрокового порівняння експериментальної АКФ з рядом модельних (теоретичних) кривих, що розраховуються при розв'язанні прямої задачі.

Загалом це завдання розпізнавання форм чи образів АКФ. Вона заснована на порівнянні геометричного зображення експериментальної АКФ з максимально можливим числом її теоретичних аналогів, отриманих із фізичних уявлень про іоносферну плазму в процесі розв'язку прямої задачі. Тобто потрібно визначити такий стан іоносфери з його вектором параметрів, при якому величина можливої помилки у визначенні цього вектору в зворотній задачі буде мінімальною.

В результаті процес визначення параметрів іоносфери методом пошуку мінімуму середньоквадратичного відхилення між експериментальною та обчисленим заздалегідь набором  $S$  теоретичних АКФ зводиться до реалізації виразу виду

$$\Delta(\theta) = \sum_{n \in S} \sum_{i=1}^k [r_e(\tau_i; \theta) - r_T^n(\tau_i; \theta)]^2 \Rightarrow \min. \quad (6.9)$$

Методи розв'язку задачі мінімізації різняться вибором напрямку спуску (метод градієнтного спуску, метод покоординатного спуску), а також способом руху вздовж обраного напрямку (наприклад, спосіб подвоєння кроку).

### 6.3.1. Метод градієнтного спуску

Одним з поширених методів мінімізації, пов'язаних з обчисленням градієнту, є метод спуску по напрямку антиградієнта, що значно скорочує час пошуку розв'язків (рис. 6.2). Оскільки антиградієнт у точці  $x_k$  показує напрямок якнайшвидшого зменшення функції, то природним є зміщення з точки  $x_k$  у цьому напрямку.

Недолік цього методу полягає у тому, що надійність оцінювання параметрів з його використанням залежить від кількості локальних мінімумів на поверхні функції нев'язки (ФН), яких може бути дуже багато у випадку присутності адитивної добавки до сигналу НР у вигляді шумової складової. Тобто існує небезпека "застрягти" в деякому локальному мінімуму, а значить – помилково приписати йому значення глобального мінімуму. Тобто, рух відбувається швидко, але ненадійно.

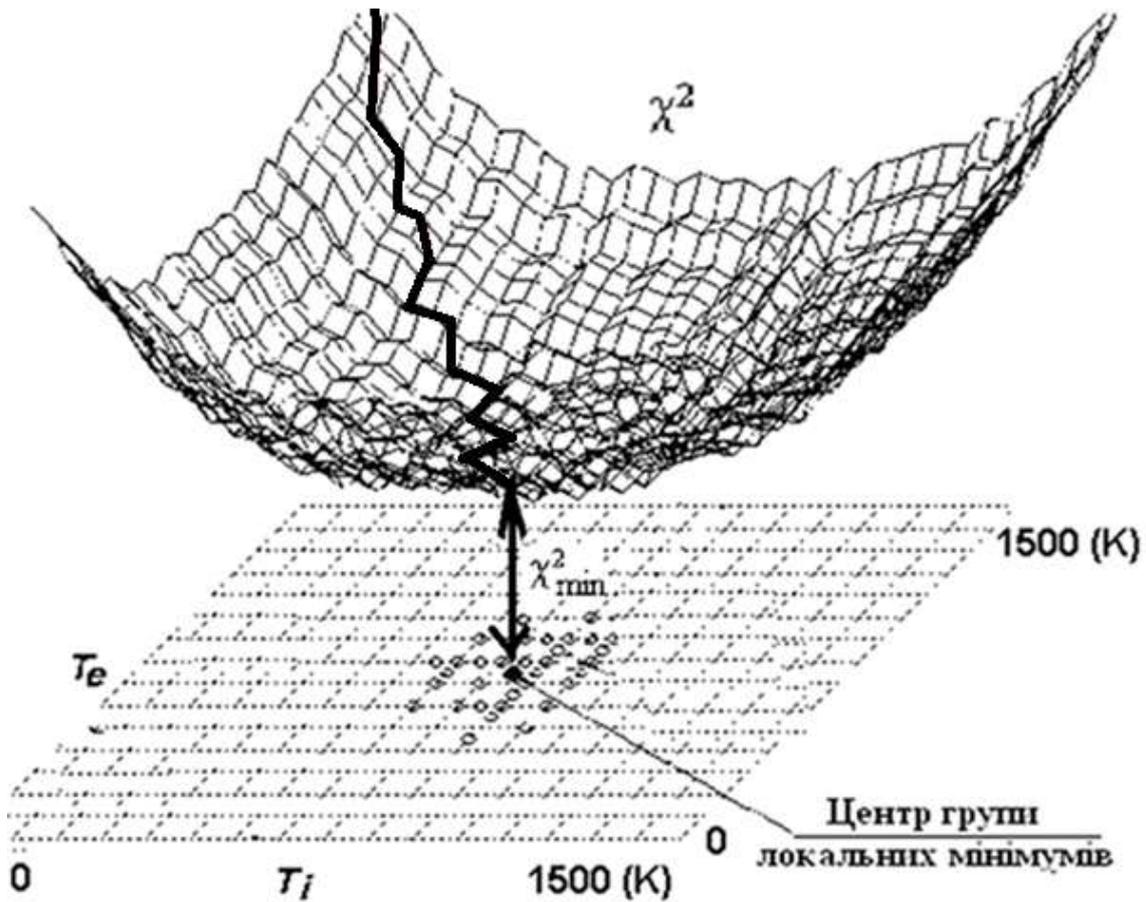


Рисунок 6.2 – Градієнтний метод спуску по двокоординатній поверхні функції нев’язки

### 6.3.2. Спуск по параметрам методом Монте-Карло

Так як метод градієнтного спуску не завжди застосовується на практиці, тому що сигнал розсіяння, спотворений шумами різної природи, характеризується появою безлічі локальних мінімумів на поверхні функції нев’язки, іноді залучають метод Монте-Карло [14]. Він використовується для розв’язання задач в областях фізики, математики, економіки та теорії управління і базується на використанні елементів моделювання випадкових значень. Мають місце дві особливості цього методу – простота структури обчислювального алгоритму і керування похибкою обчислень, пропорційна значенню  $\sqrt{D/m}$ , де  $D$  – деяка стала,  $m$  – кількість заданих випробувань.

Хоча указаний метод при швидкому пошуку має невисоку точність, проте він дозволяє реалізувати алгоритми розв’язання таких математичних задач, як

інтегрування (зокрема, розрахунок багатомірних інтегралів) і знаходження мінімуму функції. У випадку знаходження мінімумів кореляційних функціоналів відносно методу НР теж є можливість використання методу Монте-Карло.

Для формування ФН методом Монте-Карло в якості бібліотечних задаються  $m$  випадкових, рівномірно розподілених уздовж координат значень  $T_i$  і  $T_e$  (на рис. 6.3 показано випадок  $m = 11$ ), для яких за допомогою прямої задачі обчислювалися теоретичні кореляційні функції. Ординати цих функцій, реалізуючи процес розв'язання зворотної задачі, порівнюються з заданою експериментальною кривою, потім обчислюються середньоквадратичні відхилення та фіксується найменше значення  $\chi^2_{\min}$ , яке відповідає оцінкам температур  $T_{i\text{оц}}$  і  $T_{e\text{оц}}$ , прийнятим як остаточна відповідь у процесі такого пошуку параметрів.

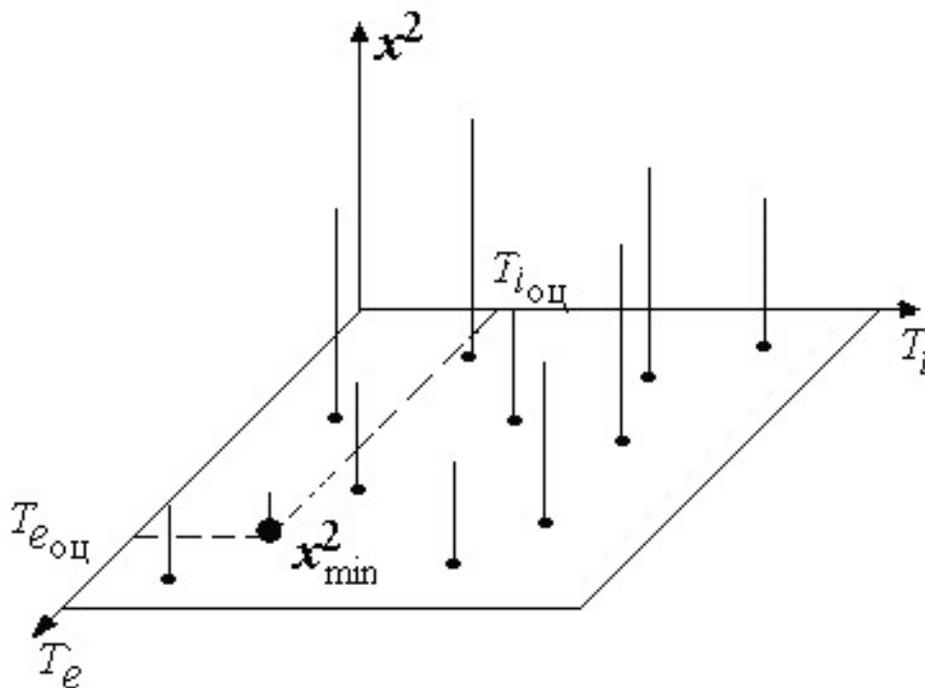


Рисунок 6.3 – Формування елементів функції нев'язки методом Монте-Карло

Відмінною рисою цього методу є те, що процедуру пошуку  $\chi^2_{\min}$  можна неодноразово повторювати, задаючи все нові варіанти випадкового розподілу значень по поверхні ФН, збільшуючи цим довірчість проведення пошуку положення глобального мінімуму.

### 6.3.3. Метод покоординатного спуску

Цей метод передбачає прямий перебір всіх можливих значень складових вектору параметрів по кожній координаті, з аналізом всіх результатів порівняння відхилень кривих одна від одної і пошуком мінімального відхилення.

Суть цієї процедури полягає в тому, що:

- здійснюється покоординатний перебір значень  $T_i$  і  $T_e$  (на верхніх висотних ділянках – одночасно і значень елементів іонного складу) з найбільш коротким кроком, і з бібліотеки зчитуються теоретичні АКФ;
- кожна теоретична АКФ порівнюється з експериментальною і знаходиться коефіцієнт збігу форм кривих;
- аналізуються значення коефіцієнтів, відшукується найменший, і фіксуються ті значення  $T_i$  і  $T_e$ , за допомогою яких була обчислена теоретична крива.

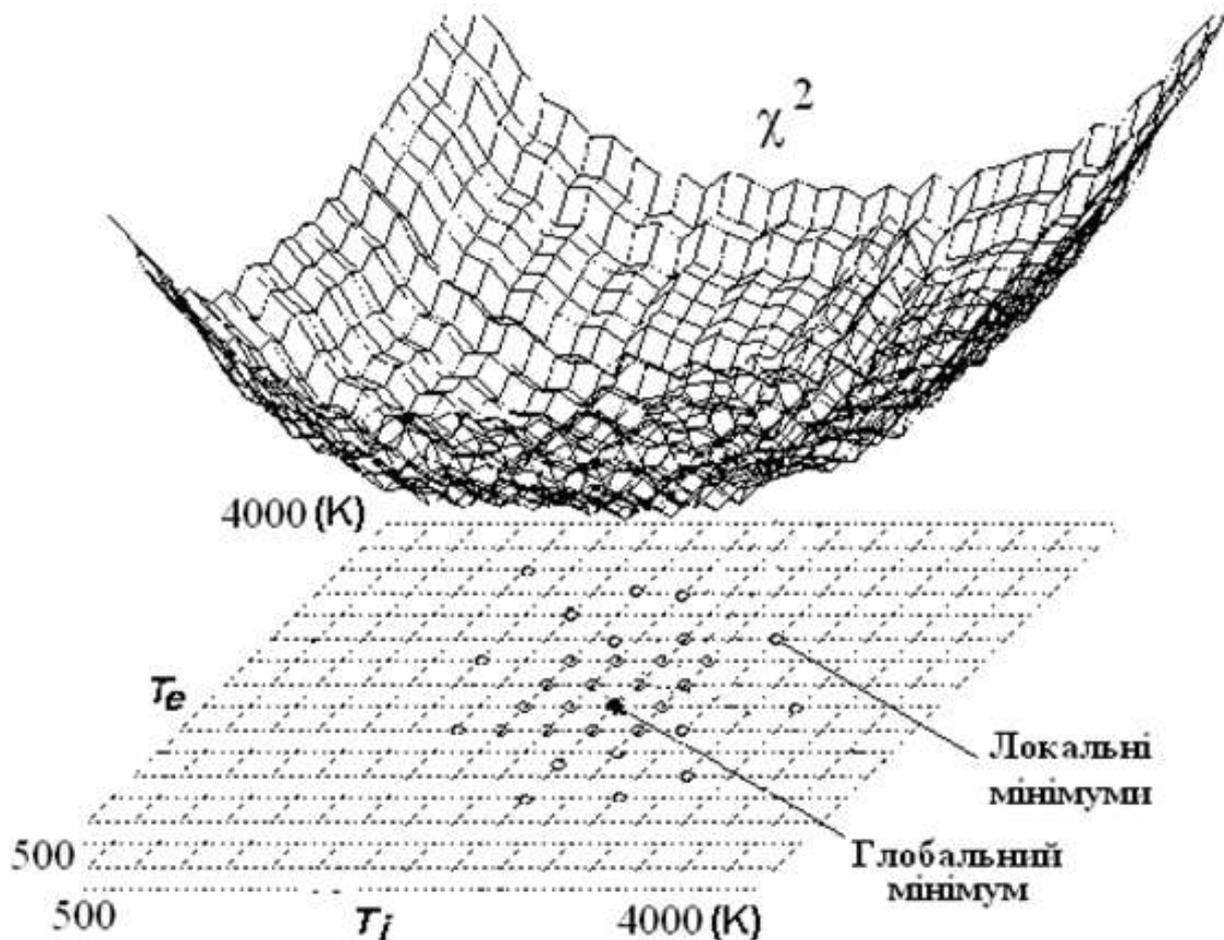


Рисунок 6.4 – Поверхня функції нев'язки  $\chi^2$  та пошук місцезнаходження глобального мінімуму

#### **6.4. Метод уточненого розрахунку кінетичних температур іоносферної плазми при однокомпонентному іонному складі**

Для уточнення методів та швидкості розрахунку іоносферних параметрів використовують різноманітні підходи. Це і регуляризація розв'язків зворотної задачі, коли інформація з нижніх, найбільш надійних іоносферних ділянок використовується при прийнятті рішень відносно верхніх ділянок. Це і статистичне усереднення ряду розв'язків, що під час розрахунків знаходяться в області глобального мінімуму.

В основі ще одного алгоритму закладено варіант покоординатного спуску у випадку обробки інформації з висотних ділянок нижньої іоносфери, де має місце однокомпонентний іонний склад, тобто присутні лише іони кисню  $O^+$ . Суть удосконалення у тому, щоб у радарі НР систему обробки задіяти для отримання рішень зворотної задачі при застосуванні все такого ж повного перебору параметрів, але з використанням значно швидшої процедури.

Поставлена задача вирішується у тому напрямку, щоб система обробки радара в процесі визначення присутніх у цьому висотному інтервалі лише кінетичних температур плазми використовувала бібліотечну пам'ять, яка на декілька порядків менша, що значно скорочує час функціонування зворотної задачі. Це можливо, якщо у ній зберігати теоретичні кореляційні криві з використанням великого кроку  $\Delta T$  по кінетичним температурам, наприклад – через сотні градусів. Цей крок, щоб покращити точність розрахунків параметрів, у подальшому буде зменшуватися з використанням аналітичних виразів, не збільшуючи об'єм цієї пам'яті.

Цю процедуру демонструє рис. 6.5, де зображено сітку температур, у вузлах якої у бібліотечній пам'яті зберігаються кореляційні функції, розраховані з використанням аналітичної формули (6.4).

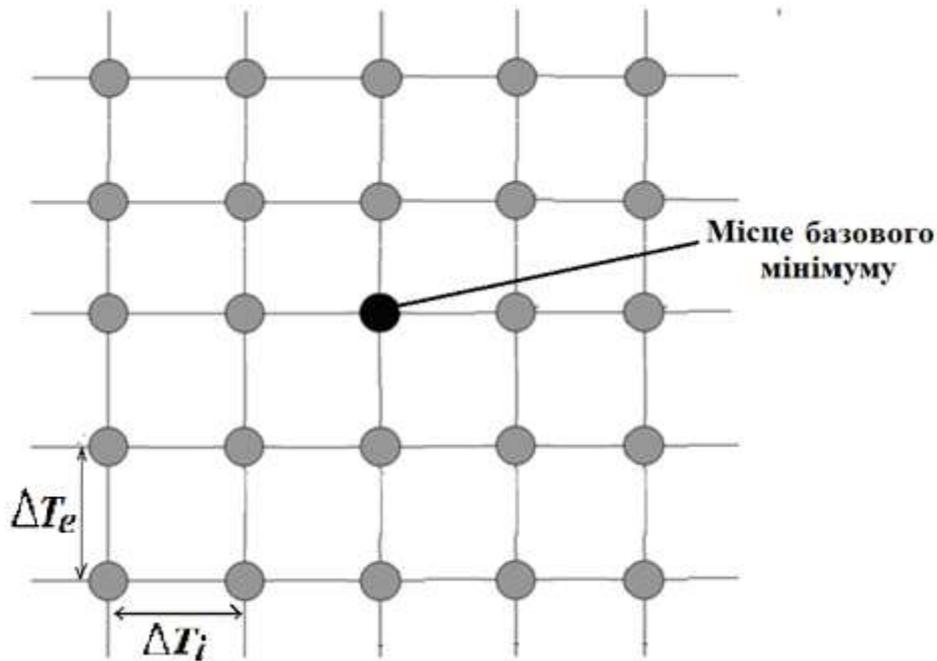


Рисунок 6.5 – Місце знаходження серед всіх вузлів бібліотеки  
основного базового мінімуму

Тобто система обробки все так же впродовж радіолокаційних розгорток дальності для кожної ділянки, що виділяються вздовж висоти, по мінімуму функції нев'язки для знайденого найкращого базового вузла буде фіксувати по  $\chi^2_{\min}$  значення температур  $T_i$  і  $T_e$ . Але потім система організовує допоміжний ітераційний процес, кожний раз зменшуючи крок  $\Delta T$  вдвічі. Для цього після знаходження мінімуму функції нев'язки по відношенню до значень зафіксованого базового вузла розрахунок продовжується вже у його околицях.

Суть у тому, щоб під час першої ітерації навкруги базового вузла на першому кроці аналітично розраховувалися 8 проміжних вузлів (рис. 6.6). Для них визначаються коефіцієнти кореляції, які отримують з бібліотеки як арифметичну півсуму, утворену між значенням для базового вузла та значенням найближчого з навколишніх вузлів.

Цим реалізується поява значень для проміжних, оточуючих базовий сусідніх вузлів при укороченому у два рази кроку  $\Delta T$ .

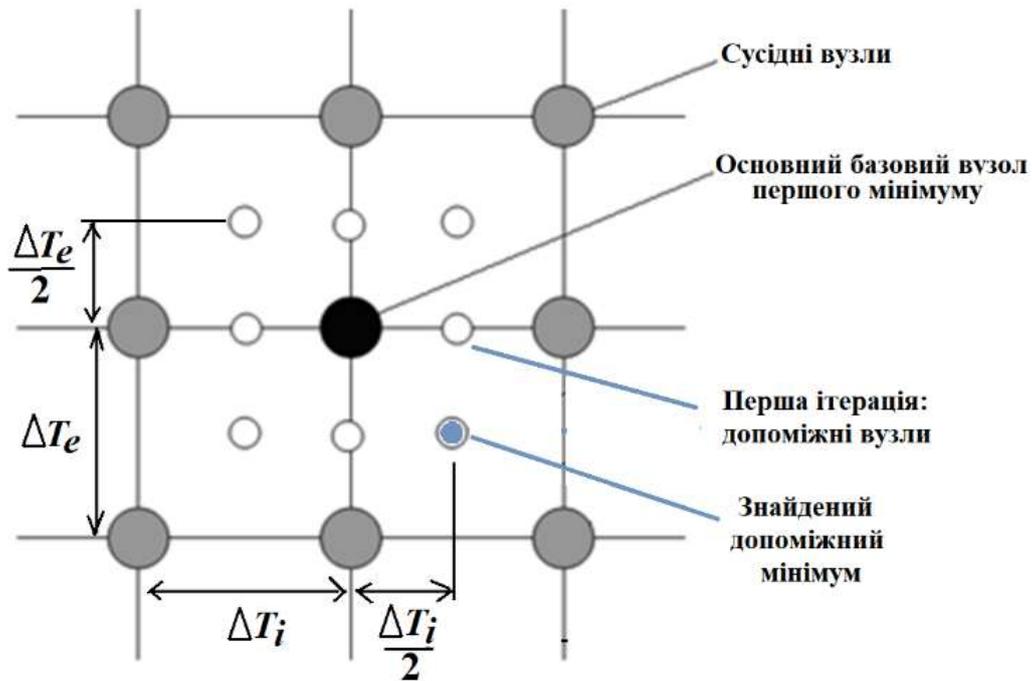


Рисунок 6.6 – Процес фіксації а) основного базового вузла, б) допоміжних вузлів навколо базового в процесі першої ітерації та в) першого допоміжного мінімуму серед них

Тобто, щоб не втратити точність розрахунку параметрів, комп'ютер повинен організувати допоміжні ітераційні процеси, кожен раз зменшуючи крок  $\Delta T$  вдвічі. А так як для зменшеного кроку по температурам в бібліотеці немає кореляційних кривих, вони будуть формуватися у реальному часі не при залученні складної та повільної формули (6.4), а з використанням указанного арифметичного усереднення. З його допомогою в околицях зафіксованого базового вузла будуть розраховуватися значення ординат кореляційної функції для проміжних вузлів, тобто коефіцієнти кореляції будуть задаватися як усереднення між значеннями для базового та сусідніх з ним вузлів бібліотеки. Після цього реалізується додатковий пошук серед таким чином створених нових, навколо розташованих вузлів для уточнення значень температур.

А вже під час наступної ітерації (рис. 6.7) сформується нові допоміжні вузли та знову зафіксується положення найкращого допоміжного мінімуму в результаті пошуку найкращого співпадіння експериментальної кривої з цими розрахованими у нових вузлах коефіцієнтами кореляції.

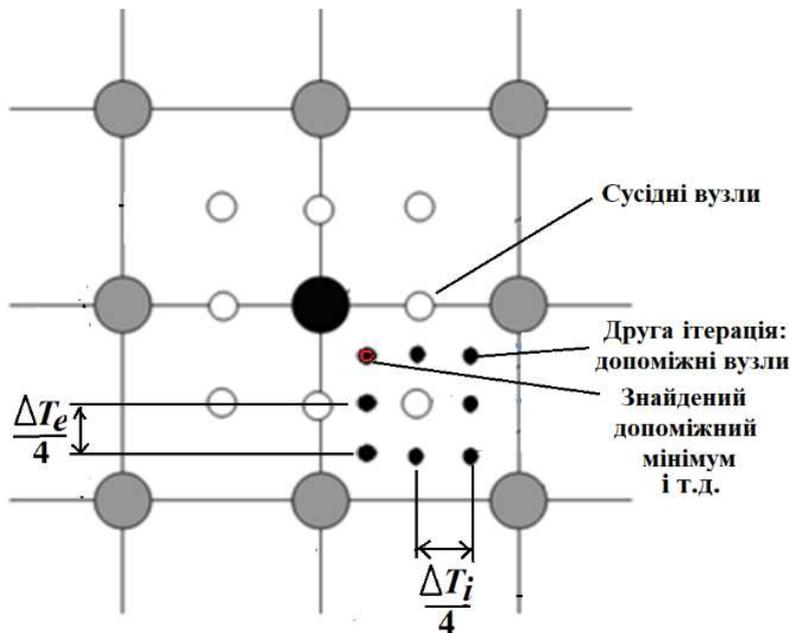


Рисунок 6.7 – Процес фіксації а) допоміжних вузлів в процесі другої ітерації та б) другого допоміжного мінімуму серед них

Дана процедура знаходження півсуми коректна, тому що з теорії НР відомо наступне: зберігається аналогічна лінійна залежність при зміні температур  $T_i$  і  $T_e$ , якщо по лінійному закону змінювати значення коефіцієнтів кореляції.

З метою такого уточнення значень температур  $T_i$  і  $T_e$  можна неодноразово повторювати процес ітерації, тобто “подрібнювати” вузли в околицях нових базових вузлів з формуванням наступних проміжних значень коефіцієнтів кореляції і пошуку з їх допомогою нових допоміжних мінімумів, аж доки ітерація не зменшить крок  $\Delta T$  до величини, наприклад, в одиниці градусів. Всього для створення у цьому випадку, наприклад, 8 нових груп уточнюючих вузлів знадобляться стільки ж комп’ютерних ітерацій, які лиш незначно збільшать загальний час виконання зворотної задачі.

Ефективність даної розробки полягає у тому, що в процесі розв’язання зворотної задачі вона залучає значно менший об’єм пам’яті, при цьому реалізує все той же повний покоординатний перебір бібліотечних коефіцієнтів кореляції. А от за рахунок ітераційного процесу з аналітичним уточненням коефіцієнтів не дає погіршити, а ще й покращує точність ідентифікації кінетичних температур іоносферної плазми.

На рис 6.8 наведена блок-схема алгоритму з цим додатково введеним ітераційним алгоритмом, згідно якому відбувається розрахунок параметрів іоносфери уточненим методом. В процесі його виконання на екрані ПК залучається наглядна візуалізація результатів, що дозволяє досліднику відстежувати процес розрахунків.

Згідно цього алгоритму на першому етапі необхідно з кожного файлу, де зберігається результат накопичення на протязі сеансу АКФ сигналу розсіяння, зчитати дані та вздовж висоти для кожної  $i$ -ї серед  $N$  виділених висотних ділянок розрахувати нормовані автокореляційні функції і відношення сигнал/шум.

На другому етапі відбувається пошук мінімуму з фіксацією  $T_i$  і  $T_e$ , тобто серед бібліотеки теоретичних нормованих АКФ для кожної висотної ділянки відбувається їх порівняння з формою експериментальної АКФ.

У подальшому реалізуються декілька ітераційних процесів, коли вузли бібліотеки подрібнюються та серед них знаходяться уточнені мінімуми. Досягнувши потрібної точності, наприклад, коли  $\Delta T_i$  і  $\Delta T_e$  мають значення одиниць-десятиків градусів, процес розрахунку закінчується.

Нижче (рис. 6.9) наведено приклад розрахованого висотного розподілу ординат  $r(\tau)$  кореляційних функцій, відношення  $q(h)$  сигнал/шум та результати порівнянь температури іонів  $T_i(h)$  і температури електронів  $T_e(h)$  іоносферної плазми. Висотний розподіл температур приведено для двох випадків – при відключенні додаткових ітераційних циклів уточнення в блоці пошуку параметрів (графік температур зліва) та при їх використанні (графік температур справа).

Як можна бачити, на цьому прикладі демонструється більш фізично достовірний (плавний) висотний хід параметрів, якщо вони отримані із залученням більш дрібного кроку по параметрам. Також на графіках приведено форми розрахованих експериментальних нормованих ординат  $r(\tau)$  АКФ сигналу розсіяння, отриманих для всіх висотних ділянок (суцільні лінії). На них накладено форми бібліотечних АКФ (крапки), які найкраще (по формі) співпали з експериментальними.

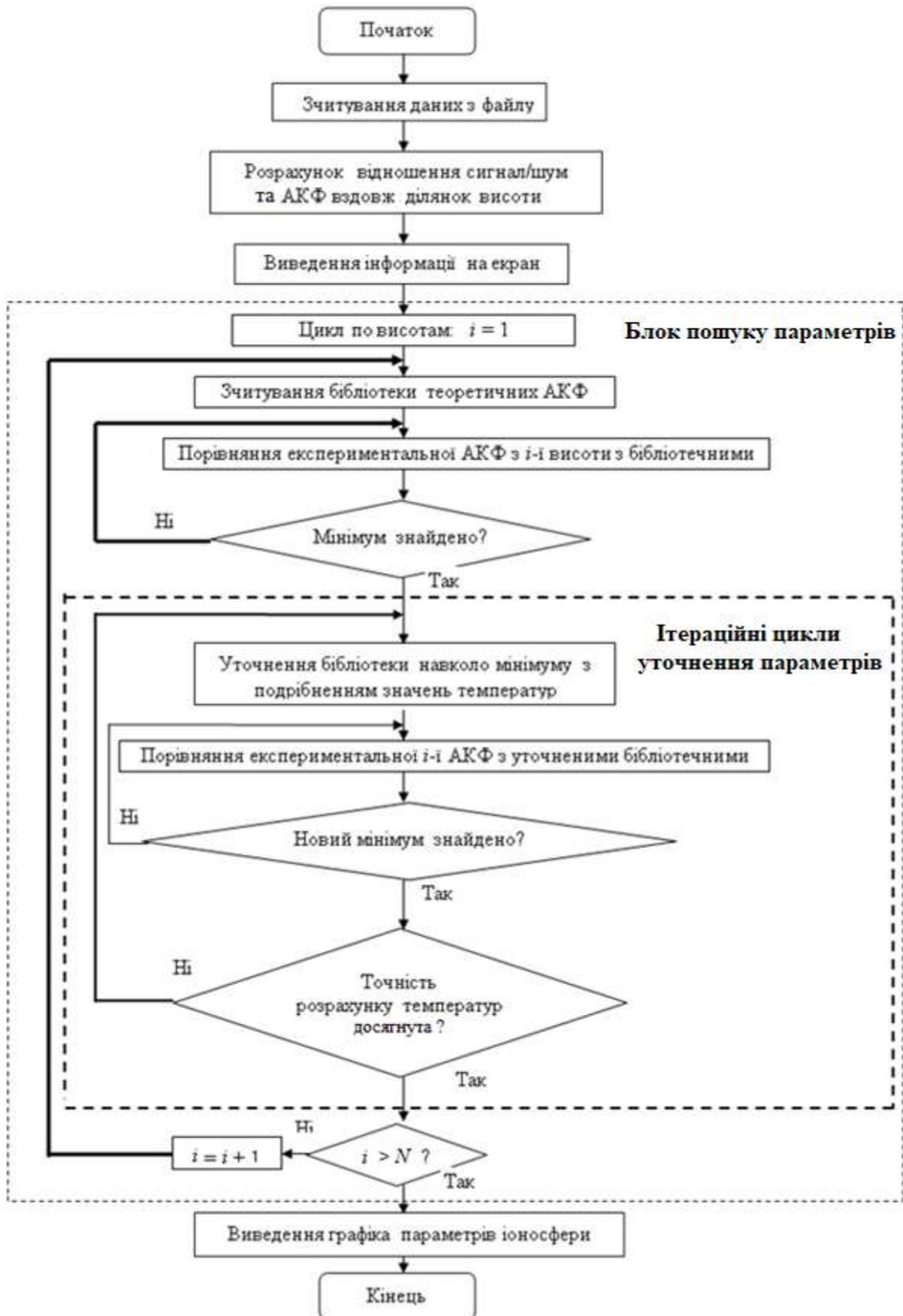


Рисунок 6.8 – Блок-схема алгоритму уточненого розрахунку параметрів іоносфери

Таким чином, результати розрахунків параметрів іоносфери запропонованим методом у порівнянні зі звичайним показали, що точність висотного ходу параметрів стала вища. При цьому із-за використання значень із більш короткої бібліотеки (а значить – при економії об'єму пам'яті комп'ютера), які уточнювались швидкими методами, час комп'ютерного розрахунку параметрів у сеансі скоротився у декілька разів.

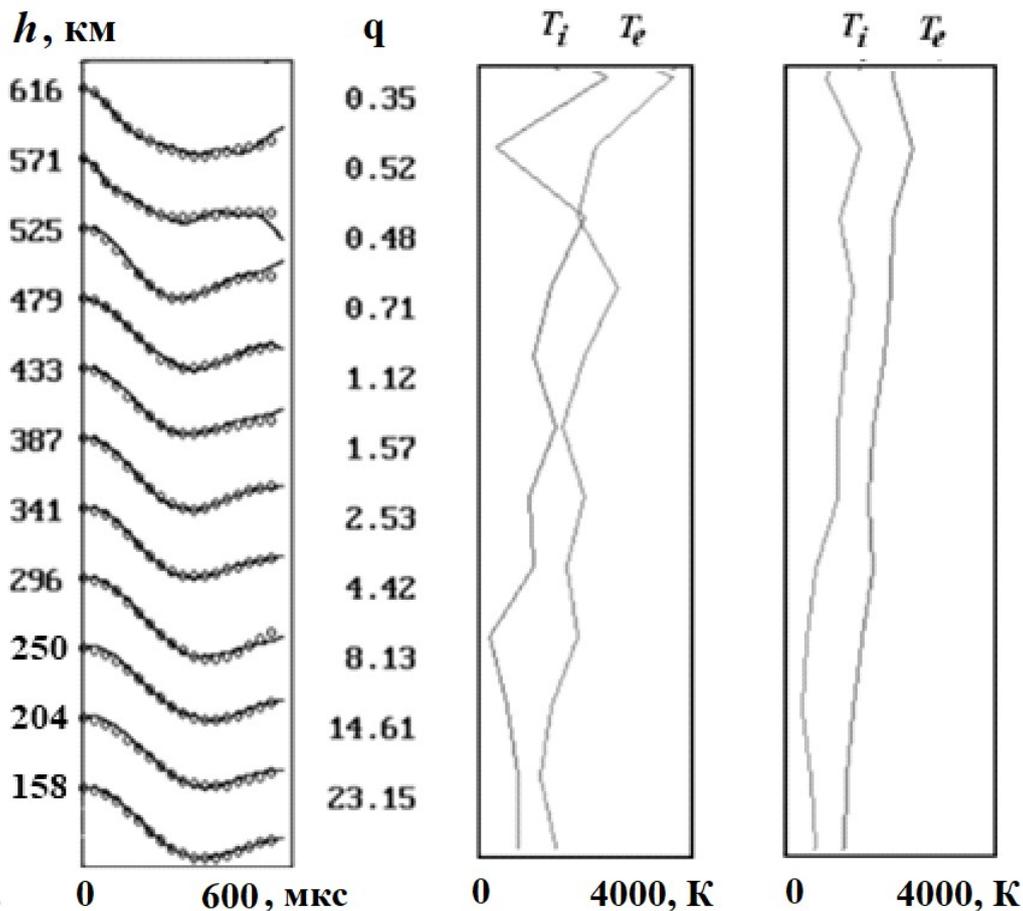


Рисунок 6.9 – Порівняльні результати розрахунку параметрів іоносфери у випадку використання кисневої бібліотеки при використанні (справа) і ні (зліва) процесу ітерацій

### 6.5. Приклади програмної реалізації розв'язків зворотної задачі розсіяння

В якості ілюстрації наведемо приклад програмної реалізації процесу розрахунку параметрів при роботі обчислювальної системи харківського радара, під час якого ПК в автоматичному режимі дозволяє згідно закладеному в нього для

кожного сеансу алгоритму (рис. 6.10 – зліва) обчислювати параметри іоносфери. А для візуалізації і контролю оператором цього процесу на екран комп'ютера в той же час виводиться і проміжна інформація (рис. 6.10 – справа).

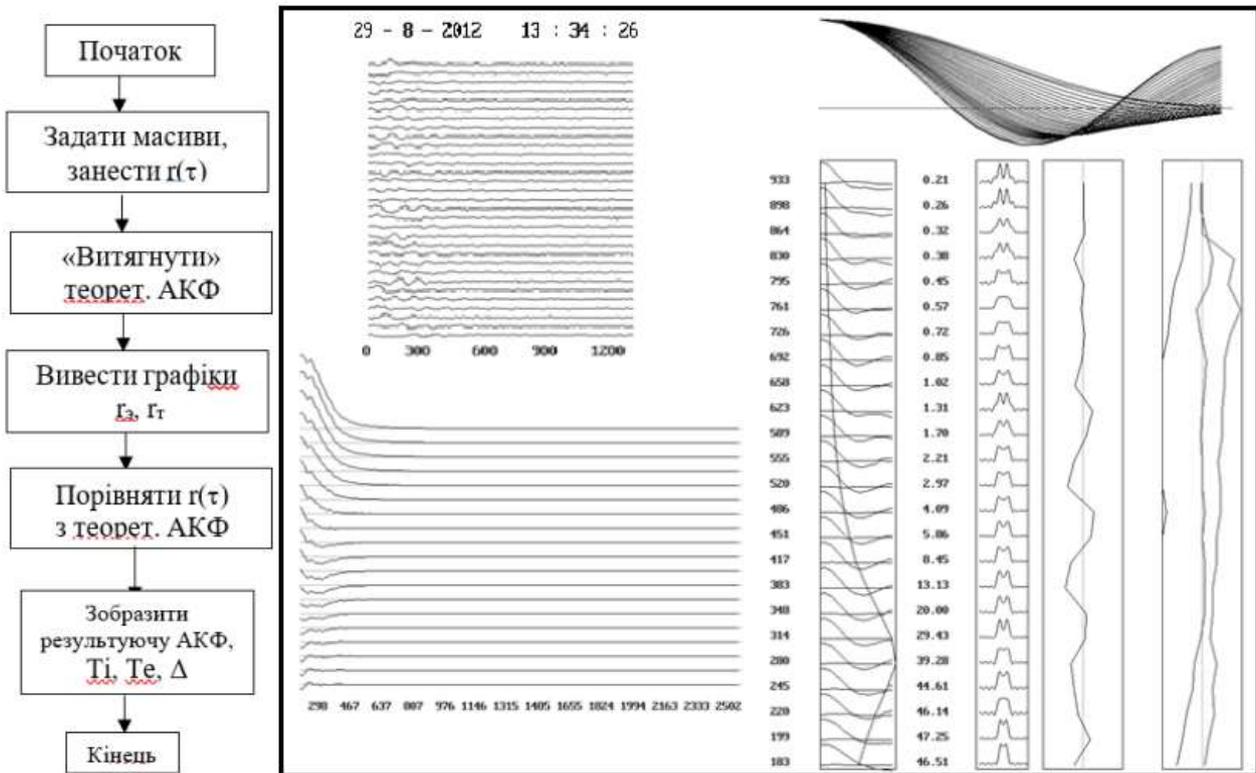


Рисунок 6.10 – Процес автоматичної обробки даних з візуалізацією результатів обробки

Проміжна інформація при цьому представляє наступне.

Зліва зверху на екран ПК виводиться фрагмент у вигляді масиву, що являє собою отримані у кожній розгортці дальності висотно-часові залежності варіацій амплітуд  $U_{c+\text{ш}}(h, t)$  прийнятої суми сигнал+шум (рис. 6.11). Даний фрагмент дозволяє досліднику контролювати, чи не мають місце похибки вимірювань, чи реальний сигнал розсіяння при проведенні експериментів зафіксовано у даному випадку. Факт реальності підтверджують збільшені значення розмаху шумоподібного сигналу на початку радіолокаційної розгортки, ніж у її кінці.

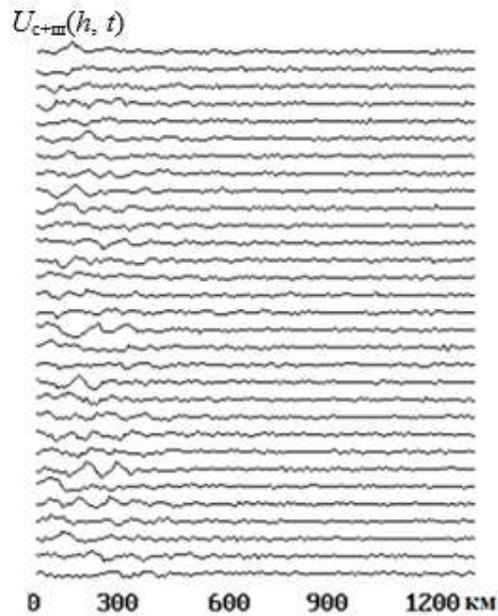


Рисунок 6.11 – Зображення контрольного фрагменту прийнятого сигналу розсіяння

Наступним фрагментом зліва знизу є зображення (рис. 6.12) висотних розподілів значень ординат коефіцієнтів кореляції  $r_{Ne}$  флуктуацій електронної концентрації, обчислених по сигналу НР, що пройшов через кожний окремий канал корелятора. Аналіз ступеня їх гладкості свідчить про те, що за допомогою попередніх програм скомпенсовані всі можливі завади, викликані збоями апаратури чи відбиттями від космічних об'єктів, які попадають у зону діаграми спрямованості антени радара НР.

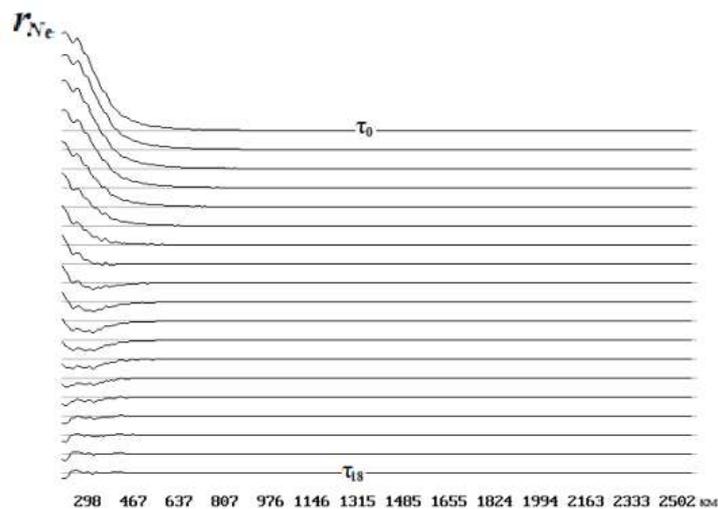


Рисунок 6.12 – Висотний розподіл коефіцієнтів кореляції  $r_{Ne}$  флуктуацій електронної концентрації, обчислений по сигналу розсіяння

Також в якості контрольної інформації на екран ПК справа зверху виводиться набір теоретичних (модельних) нормованих кореляційних функцій  $r_T(\theta_S; \tau_k)$  (рис. 6.13), які розраховуються заздалегідь та зберігаються у бібліотечній пам'яті комп'ютера або обчислюються у процесі розв'язання прямої задачі для різних значень складових  $S$  вектора  $\theta$  іоносферних параметрів.

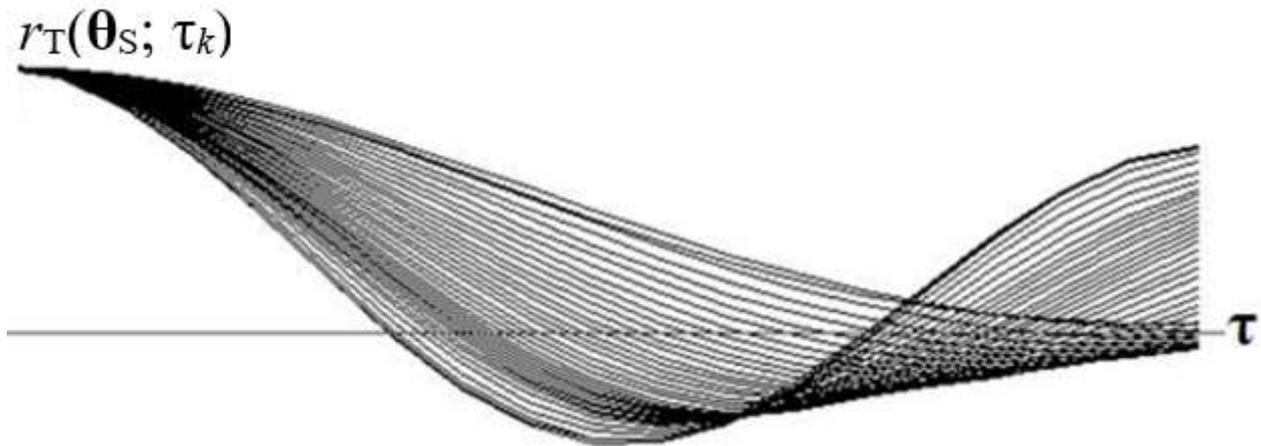


Рисунок 6.13 – Ряд модельних АКФ, отриманих для випадку метрового діапазону радіохвиль

І, на кінець, останнє зображення справа знизу демонструє (рис. 6.14), який на фоні електронної концентрації  $N_e$  вигляд має висотний розподіл експериментальних коефіцієнтів кореляції  $r_{Ne}$ , отриманих по ним спектрів  $S(f)$  сигналу розсіяння, та яке при цьому було відношення сигнал/шум  $S/N$ . Також наводить результати розрахунку висотного розподілу температур іонів  $T_i$  і електронів  $T_e$  та складу плазми у вигляді іонів водню  $H^+$  і кисню  $O^+$ .

У цілому, використання розглянутих у попередніх розділах методик дає можливість на радарі НР харківської обсерваторії з достатнім ступенем ймовірності одержувати висотний розподіл параметрів з похибками всього 1–10 %, що є цілком прийнятно для випадку зондування іоносфери до висот 1000–1500 км.

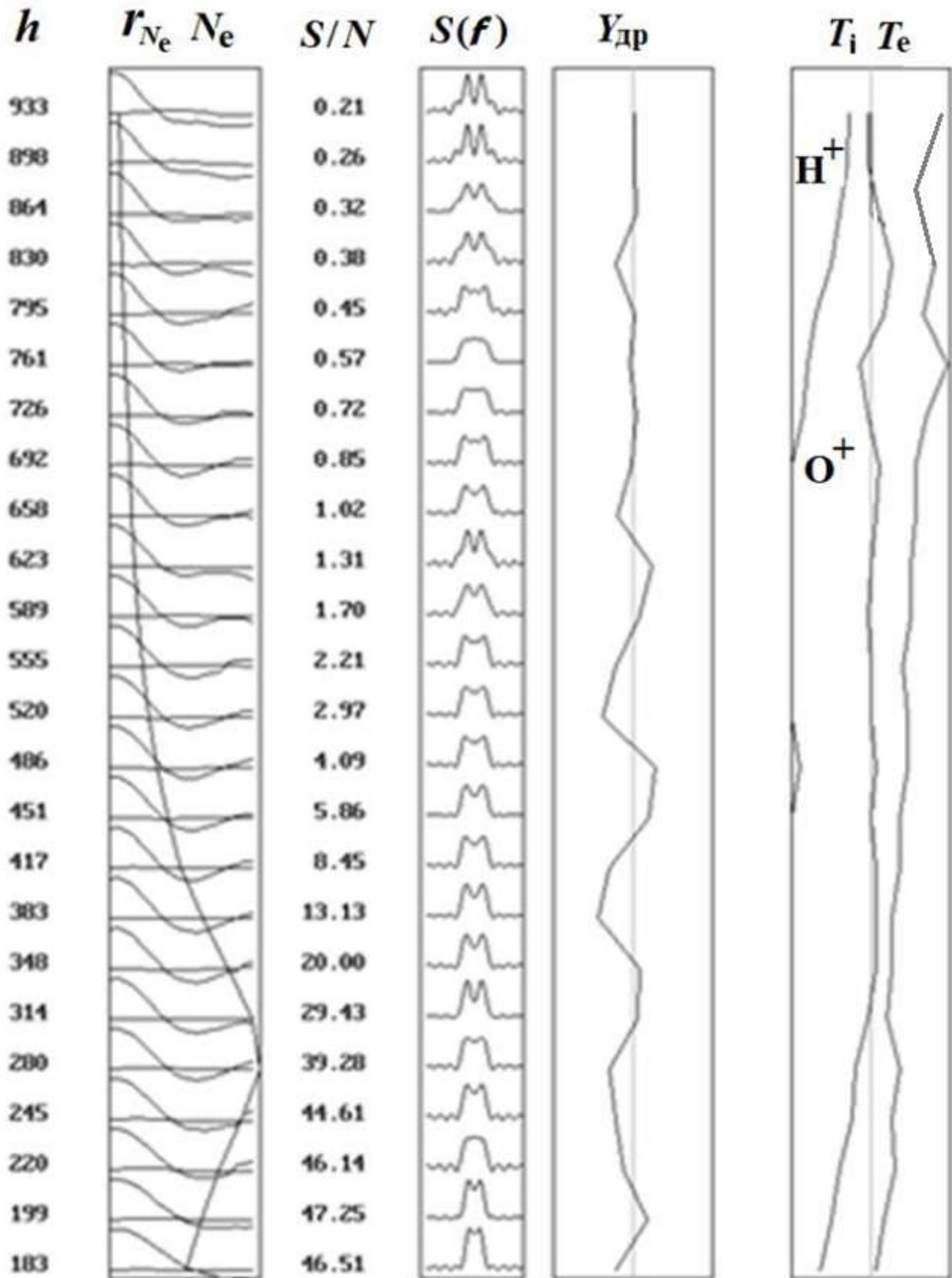


Рисунок 6.14 – Приклад розрахунків зміни параметрів з висотою в одному із сеансів іоносферних вимірювань

## 6.6. Пакет комп'ютерних програм нового покоління для формування бази даних щодо стану іоносфери над Україною

В Інституті іоносфери за допомогою пакету комп'ютерних програм нового покоління розроблено базу даних (БД), в якій відображається різноманітна геофізична інформація (рис. 6.15). Тепер з його допомогою зберігання даних, отриманих за допомогою радара НР Інституту іоносфери, здійснюється на віддаленому сервері, який доступний через комп'ютерну локальну мережу.

**IION Institute of Ionosphere Database**

The main task of the ISR data express processing program is to give to the user an information (text and graphics) about the data presented in the database: size, quality (noise situation and operating modes of receiving and transmitting equipment for the radar), geophysical conditions during measurement of ionospheric parameters, etc.

The system is based on the original software that works together with PostgreSQL database management system, Gnuplot data visualization program, Apache web-server and 7-Zip file archiver.

ISR data express processing program is accelerated by simplified algorithms (results only for 100% the oxygen approximation, automatic interference rejection and other simplifications) for fast online processing only. For full processing it is necessary to use the software developed by the Institute of ionosphere such as Kentavr and UPRISE.

You can order more detailed information about data or suggest your own ways for cooperation by contacting us.

**Dates of measurements with Kharkiv ISR:**

2021
June: 9, 10 (10 -> solar eclipse), 16, 17, 18
September: 14, 15, 16, 17
December: 21, 22, 23, 24

Рис. 6.15 – Фрагмент сторінок веб-інтерфейсу БД Інституту іоносфери (<http://database.iion.org.ua>)

Її нова структура використовує систему керування базами даних PostgreSQL і оригінальне програмне забезпечення. Структура таблиць БД відтворює структуру даних, отриманих за допомогою радара НР, а саме – формати файлів системи первинної обробки на базі сигнальних процесорів TMS320 і програмованого багатоканального корелятора.

Дані в таблицях містять службову інформацію (дата і час сеансу вимірювань, кількість радіолокаційних розгорток, розраховані і усереднені статистичні характеристики прийнятого сигналу) та кореляційні функції – автокореляційні та взаємнокореляційні – прийнятого радаром НР сигналу, а також висотно-часовий розподіл різноманітних параметрів іоносфери (рис 6.16), які у кольоровому представленні виглядають значно виразніше.

Для можливості імпорту та експорту даних радара НР написано крос-платформні консольні додатки на мові C++ з використанням фреймворку Qt. Ці програми можуть працювати під керуванням усіх операційних систем, які застосовуються в Інституті іоносфери (Windows, Linux і Mac OS X).

Для отримання інформації про наявність записів у БД розроблено відповідну програму, яка представляє собою CGI-додаток, що працює спільно з веб-сервером Apache на боці сервера.

Така структура інформаційно-обчислювальної системи на базі радара НР і локальної комп'ютерної мережі дає можливість для реалізації у реальному часі багатоканальної прискореної експрес-обробки даних збільшеного об'єму при проведенні дистанційного дослідження навколоземного космічного простору

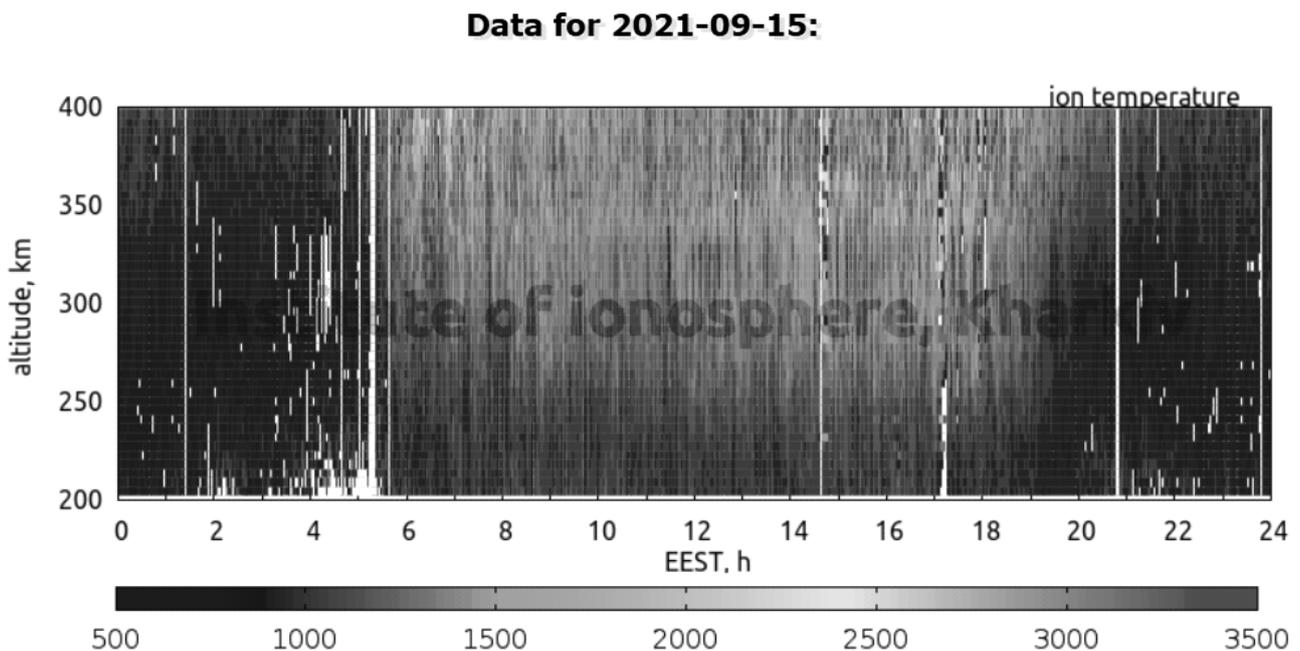


Рисунок 6.16 – Приклади зображень добової поведінки отриманих параметрів іоносферної

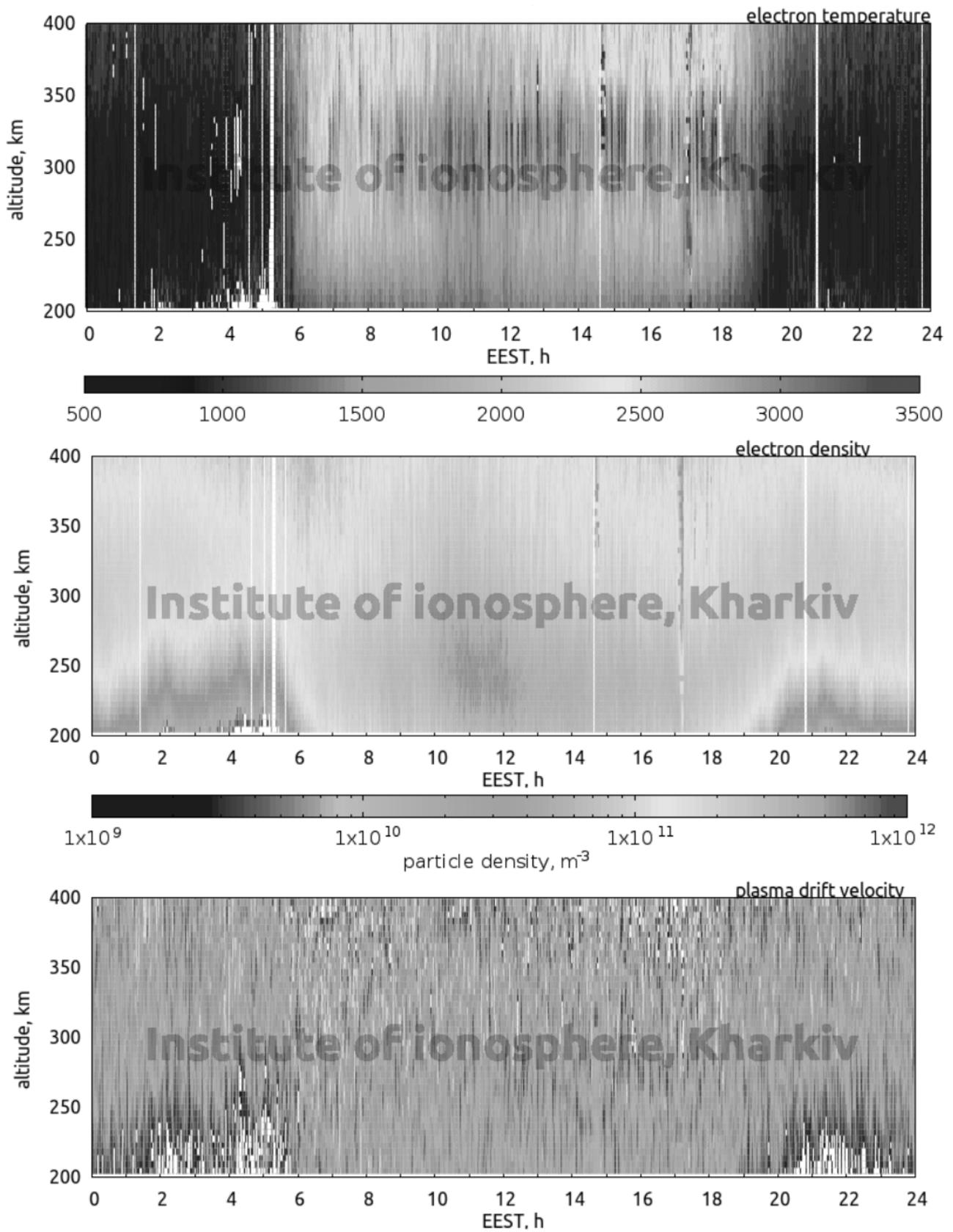


Рисунок 6.16 – Продовження

## ВИСНОВКИ

У теперішніх умовах активного використання для потреб людства навколоземного космічного середовища все більше зростає науковий та практичний інтерес до досліджень стану та динаміки його іонізованої частини – іоносфери – щодо прагнення до подальшого збільшення обсягу та поліпшення якості геофізичної інформації, отриманої експериментальним шляхом. У зв'язку з цим в монографії розглянуто підхід стосовно подальшої оптимізації процесу зондування іоносферного середовища, модифікації обчислювальних процедур та модернізації і подальшого удосконалення пристроїв обробки по відношенню до сигналу розсіяння, що в цілому обумовлює актуальність викладеного матеріалу.

Розгляд сукупності окреслених задач сприяє вирішенню важливої науково-прикладної проблеми – підвищення ефективності визначення параметрів іоносфери при обробці сигналу розсіяння в процесі її дистанційного моніторингу методом НР.

Як показує аналіз, труднощі одержання достатнього ступеня точності при оцінці висотно-часового розподілу параметрів сигналу НР пов'язані з рядом апаратно-методичних обмежень методу, що звичайно супроводжують процедури розрахунків статистичних характеристик цього сигналу – його спектрів або автокореляційних функцій. Тому пропонуються нові підходи щодо визначення структури зондувального сигналу, які дозволяють як одержати неспотворений висотний профіль перерізу розсіяння іонізованого середовища одночасно у діапазоні висот, як мінімум, 100 – 1500 км, так і підвищити завадостійкість та вірогідність алгоритмів подальшої ідентифікації ряду параметрів іоносферної плазми.

У процесі розв'язання цього комплексу задач у книзі розглянуто та розвинуто теоретичні положення щодо особливостей використання сигналів зондування у методі некогерентного розсіяння. В рамках цього матеріалу запропоновано новий принцип структурування зондувальних сигналів, а саме – їх синтез з заданими характеристиками у вигляді простих, складених багаточастотних і кодованих сигналів, призначених для проведення надійного моніторингу стану та динаміки іоносферної плазми вздовж протяжного висотного діапазону.

В книзі також сформульовані та обґрунтовані принципи використання технічних елементів імпульсних радарів НР і їх систем обробки інформації. На базі сучасних інформаційних технологій розроблено алгоритми функціонування радіопристроїв і процедури обробки даних, що адаптовані до особливостей некогерентного розсіяння радіохвиль в іоносферній плазмі. У руслі цього представлено варіанти апаратурної реалізації та конструктивних особливостей антено-фідерної системи формування складних кодованих імпульсів, їх випромінювання та приймання сигналу розсіяння. Також отримали подальший розвиток питання побудови систем обробки сигналів НР у вигляді спеціалізованих пристроїв – кореляторів. З їх допомогою запропоновано варіанти реалізації системи багатоканальної обробки, призначеної для розв'язання зворотної задачі з використанням принципу дії елементів штучних нейронних мереж.

Представлено способи визначення за допомогою радарів НР складових швидкості руху як плазмових утворень, так і штучних та природних космічних об'єктів, що знаходяться у навколоземному космічному просторі та попадають у поле зору радарів, представляючи цінну інформацію для спеціалістів у суміжних областях космічної галузі.

В монографії розглядаються різноманітні підходи обробки даних, які існують на даний час, наприклад – по результатам вимірювань, що калібруються по даним іонозонда, а також по мінімумам і максимумам профілю потужності сигналу НР, пов'язаних з фарадесьським обертанням сигналу зондування. Пропонуються нові варіанти відносно процесу розрахунку висотного розподілу абсолют-

них значень електронної концентрації іоносферної плазми за хвилеподібною формою висотного профілю, який є результатом перемножування кругових складових сигналу НР. Показано, як для розрахунку електронної концентрації залучається апаратура радару НР, що повинна вміти формувати сигнали зондування у вигляді лінійно поляризованої радіохвилі, а також сигнали, якими необхідно маніпулювати напрямком кругового обертання площини поляризації їх окремих елементів. Також висвітлено приклад розрахунку повного вмісту електронної концентрації з використанням сигналів супутникових системи GPS і ГЛОНАСС.

У книзі представлено варіанти врахування апаратурно-методичних особливостей імпульсного зондування та специфіки обробки радіофізичних даних у методі НР з оглядом на характеристики фільтру приймача, параметри імпульсу зондування та конструктивні особливості антенних перемикачів і аналого-цифрових перетворювачів. Показано результати щодо реалізації запропонованого підходу до уточнень кореляційних кривих, які продемонстрували покращені властивості алгоритмів оцінки стану іоносферного середовища у ході отримання та обробки радіофізичних даних. Цей підхід спрямовано на збільшення обсягу і поліпшення якості первісної інформації (АКФ сигналу розсіяння), на розробку і впровадження сучасних процедур їх статистичної обробки і наступної максимально однозначної інтерпретації, що в цілому дозволяє у повній мірі використати потенційні можливості методу НР.

Також приведені обчислювальні операції, які реалізують процедури розв'язання зворотної задач з теорії розсіяння, що використовуються для розрахунку параметрів іоносферної плазми за допомогою коефіцієнтів кореляції флуктуацій електронної концентрації. Розглядаються варіанти розрахунку параметрів як однокомпонентної, так і багатоконпонентної іоносферної плазми з використанням різних методів реалізації цієї задачі – методу градієнтного спуску, спуску по параметрам методом Монте-Карло та методу покоординатного спуску. В цілому ефективно модифіковано ці методи і алгоритми аналізу та обробки сигналу розсіяння, що сприяло подальшому розвитку теорії розв'язку зворотної задачі електродинаміки.

Також наведено приклади програмної реалізації розв'язків зворотної задачі розсіяння і фрагменти функціонування пакету комп'ютерних програм нового покоління для формування бази даних щодо стану іоносфери над Україною.

Наведені у монографії результати та алгоритмічні підходи можуть знайти застосування у вигляді як математичного забезпечення, так і практичного використання при проведенні багатьох експериментів у процесі радіолокаційного дослідження особливостей навколишнього середовища. Обґрунтовані підходи до аналізу результатів експериментів надзвичайно важливі при розв'язання практичних задач стосовно підвищення надійності будь-якої технічної інформації. Зокрема – в процесі організації контролю правильності функціонування супутникових систем, контролю стану радіотрас, перевірки умов роботи різних радіотехнічних і енергетичних систем, контролю антропогенного впливу на іоносферу, при вирішенні екологічних проблем України і т.п.

Матеріали даного видання призначені і для потреб навчального процесу, а саме – для підготовки бакалаврів, магістрів, аспірантів і молодих вчених в області космічної фізики, радіофізики, електроніки та спеціалізованих комп'ютерних систем. Інформація про радіофізичні методи досліджень, про сучасні наукові теорії і методи діагностики навколишнього середовища може бути використана в освітньому процесі, щоб сприяти поліпшенню освітніх стандартів при підготовці з числа молоді висококваліфікованих фахівців у галузі концепції “космічної погоди”.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогожкин Е.В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния : монография / Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, В.Н. Лысенко. – Х : НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с.
2. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн : монография / В.А. Пуляев, Д.А. Дзюбанов, И.Ф. Домнин. – Х : НТУ “ХПИ”, 2010. – 240 с.
3. Пуляев В.О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіювання в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляев, Є. В. Рогожкін, О. В. Богомаз. – Х : Вид-во НТУ “ХП”, 2014. – 264 с.
4. Пуляев В. О. Розрахунок статистичних характеристик сигналу некогерентного розсіювання : монографія / В. О. Пуляев, Є.В. Рогожкін, Л.Я. Ємельянов, О.В. Богомаз, С.В. Кацко, М.О. Шульга. – Вінниця: Європейська наукова платформа, 2021. – 234 с.
5. Таран В.И. Наблюдения ионосферы с помощью метода НР / В.И. Таран // Вестн. ХПИ : Исследование ионосферы методом НР – Х : ХПИ, 1979. – № 155, Вып. 1. – С. 3–11.
6. Емельянов Л.Я. Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Краткий исторический обзор / Л.Я. Емельянов, Т.Г. Живолуп // Вестн. НТУ “ХПИ” : Радиофизика и ионосфера – Х : НТУ “ХПИ”, 2011. – № 44. – С. 3–10.
7. Emelyanov L. Ya. History of the development of IS radars and founding of the Institute of Ionosphere in Ukraine / L. Ya. Emelyanov, T. G. Zhivolup // History Geo and Space Science. – 2013. – № 4. – P. 7 – 17.

8. Lichten SM, Neilan RE. Global networks for GPS orbit determination // In: Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. – Ottawa, Canada, 1990, – pp. 164–178.
9. R.R. Imanov and A.A. Bayramov. Development of field signal centers based on the modern telecommunication technologies // Advanced Information Systems, – Vol. 4, № 1. – 2020, – pp. 136–139.
10. Gordon W.E. Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration // Proc. IRE. – 1958. – Vol. 46, № 11. – pp. 1824–1829.
11. Evans J.V. The Millstone Hill ionospheric radar // Aeronomy Report. – 1967 – №19. – pp. 47–50.
12. Farley D.T. A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma // Journ. of Geophysical Research. – 1966. – Vol.71, № 17. – pp. 4091–4098.
13. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, № 4. – С. 139–175.
14. Farley D.T. Incoherent scatter correlation function measurements // Radio Science. – 1969. – Vol. 4, № 10. – pp. 935–953.
15. Foster J.C., Zherebtsov G.A., Taran V.I. Longitude Studies of the Sub-Auroral Ionosphere using the Millstone Hill, Kharkov and Irkutsk ISRs // Abstracts of 32<sup>nd</sup> Scientific Assembly of COSPAR. – Nagoya, Japan. – 1998. – pp. 121.
16. M. Baron. The EISCAT facility // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – Vol. 46, № 6-7. – 1984. – pp. 469–472.
17. Domnin I.F. Kharkiv incoherent scatter facility / I.F. Domnin, Ya.M. Chepurnyy, L.Ya. Emelyanov, S.V. Chernyaev, A.F. Kononenko, D.V. Kotov, O.V. Bogomaz, D.A. Iskra // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Radiophysics and Ionosphere. – 2014. – № 47 (1089). – pp. 28–42.
18. Charles E Cook, Marvin Bernfeld. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application Hardcover // Artech House. Boston|London. – January 1. – 1967. – p. 531.

19. L.E. Franks. Signal theory // University of Massachusetts, Amherst. Artech House. Boston|London. – 1981. – p. 317.
20. Hamish Meikle. Modern radar system. Second edition // Artech House. Boston|London. – 1969. – p. 701.
21. Maglevanny N.P., Taran V.I., Gordeev A.A. and others. Application of broadband sounding signals for measuring ionospheric parameters // Ionospheric Research. – № 27. Kharkov. – 1979. – pp. 46–59. (In Russian).
22. Andreev A.E. Features of the use of Barker codes in the HP method // Vestn. KhPI. Study of the ionosphere using the MS method. Kharkov: KhSU. 1987. – № 248, Issue. 5. – pp. 38-40. (In Russian).
23. Rogozhkin Ye. V., Emelyanov L. Ya., Pulyayev V. O., Domnin I. F., Miroshnikov A. Ye., and Kuzmenko N. O. Hardware and algorithmic features of radiation, reception and processing of signals using incoherent scatter technique // Radioelectronics and Communications Systems, 2022. – vol. 65, № 11 – pp. 609–620.
24. Rogozhkin E., Emelyanov L, Pulyayev V., Domnin I., Miroshnikov A., Kuzmenko N. Hardware and algorithmic features of radiation, receiving and processing of signals in the method of incoherent radiowave scattering // KPI, Kyiv. Magazine: News of higher educational institutions. Radio electronics, – 2023.
25. Pulyayev V., Emelyanov L., Rogozhkin E., Kuzmenko N. Hardware Methods for Calculating the Characteristics of Incoherent Scattering Signals in Radar Radiation // 2023 IEEE 4rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). October 02-06, 2023. – Kharkiv, Ukraine. – pp. 196-200.
26. D. T. Farley, Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // Radio Sci., 1972. – Vol. 7, no. 6. – pp. 661–666.
- 27 R.W. Gray, D.T. Farley. Theory of incoherent-scatter measurements using compressed pulses // Radio Sci., 1973. – Vol. 8, no. 2. – pp. 123–131.
28. L. Ya. Emelyanov , V. O. Pulyayev, N. O. Kuzmenko and D. A. Dzyubanov, “Improvement sounding modes in the incoherent scatter technique”, Radio Engineering (Radiotekhnika), vol. 1, no. 220, 2025, pp. 128–135.

29. Pulyayev V., Emelyanov L., Rogozhkin E., Kuzmenko N. Кодування сигналів та мережеві технології обробки у методі некогерентного розсіяння // 2025 IEEE 6rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)
30. Kohonen T. Essentials of the self-organizing map // Neural Networks. Volume 37, anuary 2013. – pp. 52-65.
31. Chervyakov, N.I.; Lyakhov, P.A.; Deryabin, M.A.; Nagornov, N.N.; Valueva, M.V.; Valuev, G.V. Residue Number System-Based Solution for Reducing the Hardware Cost of a Convolutional Neural Network // September 2020. Neurocomputing, 407. – pp. 439–453.
32. Hujakulov Hamidullo. Analysis of Neural Network Raining Technologies // Eurasian Journal of Academic Research. 2022. – Published February 18, Version 1. – pp. 197-199.
33. Luca Fanucci, Bruno Neri, Domenico Zito. A novel fully integrated antenna switch for wireless systems // Conference: European Solid-State Device Research, 2003, 33rd Conference on ESSDERC '03, October 2003.
34. Sanghyo Lee, Jong-Man Kim, Yong-Kweon Kim and Youngwoo Kwon. A single-pole nine-throw antenna switch using radio-frequency microelectromechanical systems technology for broadband multi-mode and multi-band frontends // Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, № 1. – Published 3 December 2007-2008.
35. <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an50.uk.html>.
36. Рогожкін Є.В., Ємельянов Л.Я., Мозгова О.Л. Пристрій захисту приймача // Деклараційний патент України на винахід № 41011ід 15.08.2001, бюл. № 7.
37. Рогожкін Е.В., Антонова В.А., Емельянов Л.Я., О возможности улучшения характеристик антенных коммутаторов в радиолокаторах некогерентного рассеяния // Радиотехника. 2001. – Вып. 121. – С. 61–64.
38. Рогожкін Є.В., Ємельянов Л.Я., Третьяченко О.О. Пристрій захисту приймача // Деклараційний патент України на винахід № 61721 від 17.11.2003, бюл. № 11.

39. E.V. Rogozkhin, V.A. Antonova, L.Y. Emelyanov Improvement in the Antenna Commutator Characteristics of Incoherent Scatter Radars // Telecommunications and Radio Engineering – 2003. – Vol. 59, N (7-9), – pp. 101–105.

40. Koloskov, O., Kashcheyev, A., Bogomaz, O., Sopin, A., Gavrylyuk, B., & Zalizovski, A. (2022) Performance Analysis of a Portable Low-Cost SDR-Based Ionosonde // Atmosphere, 14. – с. 159.

41. Пуляєв В. О., Ємельянов Л.Я., Рогожкін Є.В., Мірошніков А.Є. Спосіб визначення висотного розподілу радіальної складової швидкості руху плазми методом некогерентного розсіювання радіохвиль // Патент України на корисну модель № 131859 від 11.02.2019 р., бюл. № 3.

42. Ємельянов Л.Я., Черногор Л.Ф., Ляшенко М.В., Мірошніков А.Є., Аксьонова К.Д. Рух плазми в іоносфері: дослідження методом некогерентного розсіювання : монографія. – Х.: ТОВ “ПЛАНЕТА-ПРІНТ”, 2021. – 460 с.

43. Инженерный довідник по космічній техніці. Вип. 2-й, перероб. і доп. Під ред. А.В. Солодова. – М., 977, – 430 с. (на російській мові).

44. I. Gresham, A. Jenkins. Ultra-wideband radar: Regulations, Applications, and Challenges // Int. Microwave Symposium 2003, Philadelphia, Penn., June 2003 2. Th. Wixforth, W. Ritschel, – Multimode-Radar-Technologie für 24 GHz, auto & elektronik. – Vol. 3/2004. – pp. 56-58

45. Пуляєв В. О., Ємельянов Л.Я., Рогожкін Є.В. Спосіб визначення за допомогою радарів некогерентного розсіювання радіальної складової швидкості руху штучних космічних об'єктів // Патент України на корисну модель № 138959 від 10.12.2019 р., бюл. № 23.

46. Емельянов Л.Я. Обеспечение режима одновременного зондирования ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях с помощью радаров некогерентного рассеяния / Л.Я. Емельянов, Я.Н. Чепурный // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. – 2017. – № 47 (1268). – С. 44–50.

47. Пуляев В. О., Смелянов Л.Я., Чепурный Я.М. Спосіб визначення за допомогою радару некогерентного розсіяння горизонтальної складової швидкості руху штучних космічних об'єктів // Патент України на корисну модель № 143384 від 27.07.2020 р., бюл. № 14.

48. Кузьменко Н.О., Пуляев В.О. Спосіб визначення за допомогою радару некогерентного розсіяння горизонтальної складової швидкості руху штучних космічних об'єктів // Патент України на корисну модель № 155529 від 06.03.2024 р., бюл. № 10.

49. Таран В.И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. 2001. №5, Вып. 41. – С. 659–666.

50. Таран В.И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния Сообщение 1. Основные предпосылки и экспериментальные результаты // Вестник ХПИ: Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. 1979. № 155, Вып. 1. – С. 3–12.

51. Miroshnikov A., Pulyayev V., Emelyanov L., Rogozhkin E. Determination of the Incoherent Scatter Signal Statistical Characteristics // IEEE 39<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019). – Kyiv, Ukraine, April 16-18, 2019. – pp. 774–777.

52. Farley D.T. Incoherent scatter correlation function measurements // Radio Science. 1969. – Vol.4, № 10. – pp. 935–953.

53. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. // М : Радио и связь. 1990. – 288 с.

54. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ // М.: Высшая школа. 1988. – 432 с.

55. Rogozhkin E.V., Pulyayev V.A. Digital technologies for ionosphere probing by the incoherent radio-scattering technique // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*), 2019. – Vol. 76, № 6. – pp. 551–556.

56. Григоренко Е.И. Исследования ионосферы по наблюдениям эффекта Фарадея при некогерентном рассеянии радиоволн // *Ионосферные исследования*. 1979. №27. – С. 60–73.

57. Барабаш В.В., Лялюк А.И., Тиняков Г.М. Модернизация программного обеспечения автоматической станции вертикального зондирования “Базис” // *Вісник НТУ “ХПІ”*. Серія: “Радіофізика і іоносфера”. 2015. № 37(1146). – С. 50–53.

58. Hofmann-Wellenhof B. *Global Positioning System. Theory and Practice* / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins // Springer-Verlag, Wien New York. – 1994. – 356 p.

59. Дзюбанов Д.А. Пространственно-временное распределение полного электронного содержания ионосферы по регистрациям сигналов ИСЗ и по данным радара НР в Харькове во время сильной магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. / Д.А. Дзюбанов, І. Г. Захаров, М. В. Ляшенко и др. // Тез. докл. V Украинской конференции по космическим исследованиям. – К. : ИКИ НАНУ-НКАУ, 2005. – С. 55.

60. Пуляев В.О., Лисенко В.М. Спосіб визначення висотно-часового розподілу електронної концентрації іоносферної плазми при нестабільності константи радіолокатора // Патент на корисну модель 24531 від 10.07.2007 р., бюл. № 10.

61. Пуляев В.О., Лисенко В.М. Спосіб визначення висотно-часового розподілу електронної концентрації іоносферної плазми // Патент на корисну модель №27311 Україна від 25.10.2007 р., бюл. № 17.

62. Пуляев В. О., Богомаз О. В., Ляшеко М. В., Панасенко С. В. Спосіб визначення висотно-часового розподілу електронної концентрації іоносферної плазми // Патент України на корисну модель № 111634. 25.11.2016 р., бюл. № 22.

63. Пуляев В.О., Рогожкін Є.В. Спосіб обчислення висотного розподілу електронної концентрації іоносферної плазми // Патент України на корисну модель № 151831 від 21.09.2022 р., бюл. № 38.

64. Rogozhkin Ye. V., Emelyanov L. Ya., Pulyayev V. O., Domnin I. F., Miroshnikov A. Ye., and Kuzmenko N. O. Hardware and algorithmic features of radiation, reception and processing of signals using incoherent scatter technique

// *Radioelectronics and Communications Systems*, 2022, Vol. 65, № 11. – pp. 609–620.

65. Пуляєв В.О., Ляшенко М.В., Котов Д.В. Спосіб розрахунку кінетичних температур іоносферної плазми у методі некогерентного розсіяння // Патент України на корисну модель № 153522 від 19.07.2023 р. Бюл. № 29.

66. Пуляєв В.О., Ємельянов Л.Я., Панасенко С.В., Богомаз О.В., Котов Д.В. Спосіб розрахунку кінетичних температур іоносферної плазми у методі некогерентного розсіяння при врахуванні імпульсу зондування // Патент України на корисну модель № 158708 від 13.03.2025 р. Бюл. № 11.



*Наукове видання*

**Пуляев Валерій Олександрович,**  
доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

**Ємельянов Леонід Якович,**  
кандидат фізико-математичних наук, ст.н.с.,  
провідний науковий співробітник НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

**Котов Дмитро Володимирович,**  
кандидат фізико-математичних наук, доц.,  
директор НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

**Домнін Ігор Феліксович,**  
доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

**Богомаз Олександр Вікторович,**  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

**Колодяжний Вячеслав Володимирович,**  
молодший науковий співробітник НДІ Іоносфери НТУ “ХПІ”

# **МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ ЗЕМЛІ ТА ОБЧИСЛЕННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДАРІВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ**

Монографія

ISBN 978-617-8130-94-7



Відповідальний за випуск

*Пуляев В.О.*

Редактор

*Ємельянов Л.Я.*

Комп'ютерна верстка

*Пуляев В.О.*

Підп. до друку 18.09.25  
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.  
Умовно-друкованих аркушів 11,39. Гарнітура Таймс.  
Наклад. 150 прим.

Видавець: Мірошніченко Олег Анатолійович  
61002, м. Харків, вул. Дарвіна, 16, кв. 25,  
Свідоцтво Державного комітету телебачення  
і радіомовлення України  
серія ДК № 5818 від 28.11.2017 р.  
ел. пошта: merash@i.ua

Надруковано у друкарні "Impress"  
61002, Харків, вул. Григорія Сковороди, 56  
Тел.: (057) 714 42-11, 752-08-38  
[www. iimpress/biz.ua](http://www.iimpress/biz.ua)