

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та  
аспірантської підготовки  
Кафедра автоматизованих систем  
моніторингу навколишнього середовища

**Магістерська кваліфікаційна робота**

на тему: Розробка та аналіз можливості використання антенної фазованої  
решітки в сучасних системах радіозондування

Виконала студентка 2 курсу групи МК- 62  
спеціальності 8.05010105 Комп'ютерний  
еколого-економічний моніторинг,  
Козакова Юлія Юріївна

Керівник к.т.н., доц.  
Вельміскін Дмитро Іванович

Консультант \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Рецензент к.геогр. н., доц.  
Лужбін Анатолій Михайлович

Одеса 2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_  
Освітньо-кваліфікаційний рівень \_\_\_\_\_  
Напрямок підготовки \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_

магістерської та аспірантської підготовки \_\_\_\_\_  
автоматизованих систем моніторингу \_\_\_\_\_  
навколишнього середовища \_\_\_\_\_  
магістр \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
8.05010105 Комп'ютерний еколого-економічний  
моніторинг \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри автоматизованих систем  
моніторингу навколишнього середовища**

\_\_\_\_\_ Перелигін Б.В.  
"31" жовтня 2016р.

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

КОЗАКОВІЙ ЮЛІЇ ЮРІЇВНІ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та аналіз можливості використання антенної фазованої решітки в сучасних системах радіозондування

керівник роботи Вельміскін Дмитро Іванович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від „ 14 ” вересня 2016 року № 270-с

2. Строк подання студентом роботи 31.01.2017р.

3. Вихідні дані до роботи Розроблений та обумовлений метод багатопроменевого вимірювання, дозволяючий підвищити точність вимірювання кутів координат радіозонду.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Пристрій та принцип роботи фазованих антенних решіток.

2. Розробка алгоритму випромінювання координат РЗ на базі АФАР

3. Метод і алгоритм підвищення точності і достовірності вимірювань координат комплексами на базі АФАР

4. Алгоритм корекції діаграми направленості і пеленгаційних характеристик АФАР

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Електронна презентація магістерської роботи



## АНОТАЦІЯ

Представлена магістерська робота Козакової Юлії Юріївни, на тему «Розробка та аналіз можливості використання антенної фазованої решітки в сучасних системах радіозондування».

Вона складається з двох частин: теоретичної та практичної.

Мета даної роботи - це розробка активної фазованої антенної решітки, і в наслідку чого, застосувати розробку у системах радіозондування.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішення наступних завдань:

- виявити унікальність розробки проекту;
- підібрати необхідні матеріали для реалізації завдання;
- з'єднати схеми з пристроєм введення / виводу інформації.

У даній магістерській роботі була розглянута можливість корекції фазового розподілу активної фазованої антенної решітки з метою зменшення помилок супроводу через неправильно сформованої діаграми направленості.

Розроблено програмне забезпечення, що реалізує алгоритм формування початкового фазового розподілу для створення неспотвореної діаграми направленості активної фазованої антенної решітки.

Магістерська робота виконана на 72сторінках, складається з одинадцятирисунків, таблиць в магістерській роботі немає, а джерела літератури двадцять вісім. Також магістерська робота складається з вступу, чотирьох глав і висновку та переліку посилань.

Ключові слова в магістерській роботі наступні: активна фазована антенна решітка, радіолокаційна система, діаграммоутворююча схема, мікроелектронний аерологічний радіолокатор, діаграма направленості.

## SUMMARY

Presented master thesis Yulia Yurievna Kozakova, entitled "Development and analysis of the possibility of fusing phased antenna lattice in modern systems radiozonduvannya."

It consists of two parts: theoretical and practical.

The purpose of this work - is the development of active phased antennas, and in consequence, the development of applied systems radiozonduvannya.

To achieve this objective requires the following tasks:

- Identify the unique design of the project;
- Pick up the necessary materials for the realization of the task;
- Connect the circuit with the device input / output information.

In this master's work was considered the possibility of correcting phased distribution of the active phased array in order to reduce errors due to incorrect maintenance of the existing chart orientation.

The software that implements the algorithm for initial distribution phase for creating diagrams undistorted orientation of the active phased array.

Master's work performed at 72 pages, consisting of eleven figures, tables in the master's work there, and twenty-eight sources of literature. Also master's work consists of an introduction, four chapters and a conclusion and list of references.

Keywords master's work following: active phased array, radar system, diagramm outvoryuyuchacircuit microelectronicaerological radar, chart orientation.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ПРИСТРІЙ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК.....	10
1.1 Переваги фазованих антенних решіток.....	13
1.2 Принцип гойдання променя фазованих антенних решіток.....	15
1.3 Двовимірні решітки.....	20
1.4 Розташування випромінювачів в плоских активних фазованих антенних решітках.....	21
2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ РАДІОЗОНДУ НА БАЗІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ.....	23
3 МЕТОД І АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ДОСТОВІРНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ КООРДИНАТ КОМПЛЕКСАМИ НА БАЗІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ .....	25
3.1 Ознаки виявлення головної пелюстки активної фазованої антенної решітки .....	25
3.2 Алгоритми підвищення точності вимірювання кутів і метод багатопробного вимірювання .....	30
3.3 Особливості проведення автоматичного пошуку радіозондів.....	45
4 АЛГОРИТМ КОРЕКЦІЇ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ І ПЕЛЕГАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ.....	53
4.1 Вплив початкового фазового розподілу і фазових помилок на активні фазовані антенні решітки.....	54
4.2 Математична модель активної фазованої решітки.....	56

ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	65
Додаток А Графічна частина магістерської роботи.....	68

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ФАР – фазована антенна решітка

АФАР – активна фазована антенна решітка

РЛС – радіолокаційна система

ДУС – діаграммоутворююча схема

МАРЛ – мікроелектронний аерологічний радіолокатор

ДН – діаграма направленості

АФР – амплітудно-фазовим розподілом

АС – антенні системи



## ВСТУП

Однією з найбільш важливих систем отримання інформації про стан атмосфери для складання прогнозів погоди є система аерологічних станцій, обладнаних комплексами радіозондування. Дозволяють проводити вимірювання параметрів атмосфери (температури, вологості) з визначенням точних координат місцезнаходження радіозонда (похилій дальності або висоти, кута місця і азимута) і розрахунку по ним швидкості і напрямку вітру. Вимірювання температури і вологості виробляються радіозондом, обладнаним відповідними датчиками, підвішеним до оболонки наповненою воднем або гелієм. Положення радіозонда в просторі під час польоту визначається за допомогою радіолокатора.

Аерологічної радіозондування атмосфери для прогнозування погоди використовується у всьому світі. Випуски виробляються з таким розрахунком, щоб всі випущені радіозонди знаходилися приблизно на висоті Тропопауза (близько 9 км) у 00 і 12 годині за Гринвічем. При досягненні висоти, відповідної тиску 100Мб і при досягненні максимальної висоти, отримані дані температури, вологості, тиску, швидкості і напрямку вітру оперативно передаються в системи розрахунку прогнозу погоди. Для створення достовірних прогнозів погоди дуже важливо забезпечувати достовірність даних, одержуваних за допомогою аерологічних комплексів радіозондування атмосфери.

Велика частина станцій України оснащена комплексами, що дозволяють отримувати дані з високою роздільною здатністю. Комплекси аерологічної радіозондування на поточний момент залишаються єдиним засобом вимірювання параметрів атмосфери, що дозволяють виходити такі дані.

За останні роки вимоги до радіолокаційної системи різного цільового призначення різко підвищилися.

Збільшення швидкості польоту і маневреності літальних апаратів, бойової потужності, широке застосування різного роду перешкод призвели до необхідності різкого зростання швидкості огляду простору, дальності РЛС, підвищення точності, роздільної здатності та перешкодозахищеності їх. Сучасна РЛС повинна бути багатофункціональною, здатної виконати різні завдання по ряду цілей (виявлення, супровід, наведення ракет).

Забезпечити виконання комплексу цих вимог за допомогою найбільш поширених до останнього часу дзеркальних антен, навіть при істотному збільшенні їх габаритів, виявляється скрутним. Справа в тому, що дзеркальні антени поряд з багатьма достоїнствами (простота конструкції, хороший діапазон, малі втрати) мають і ряд недоліків.

До них відносяться:

- обмеження по випромінюваній потужності, що визначаються електричною міцністю фідерного тракту і опромінювача;
- обмежені можливості по хитанню (скануванню) діаграми направленості, як в сенсі допустимого кута гойдання (без спотворень її), так і в сенсі реалізації технічних способів електричного гойдання діаграми направленості;
- обмежені можливості формування бажаної діаграми направленості;
- обмежені можливості створення багатофункціональних систем.

На перших встановлених на мережі радіолокаторах мікроелектронного аерологічного радіолокатора (МАРЛ) точність супроводу радіозондов і проведення супроводу Сонця при вертикальних кутах до  $40^\circ$  склала близько  $0,2^\circ$ . При кутах більше  $60^\circ$  похибка вимірювання доходила до  $0,5^\circ$ .

Для отримання даних у вигляді стандартних телеграм у відповідних кодах TEMR, похибка супроводу  $0,2^\circ$  не призводить до більших помилок, але для отримання даних радіозондирования високого дозволу при вертикальних кутах до  $90^\circ$  і отримання якісної інформації у вигляді коду BUFR, така точність недостатня. Більш того, не витримувалися технічні умови, згідно з

якими середньоквадратичні значення помилок вимірювання кутів не повинні перевищувати  $0,1^\circ$ .

Для проведення якісного радіозондирования, отримання достовірних даних з підвищеною точністю, необхідно було нові алгоритми і методи вимірювань координат зі зменшеним впливом дискретності фазовращателів на точність вимірювання кутів.

При експлуатації на деяких аерологічних станціях виникла проблема із захопленням радіозонда з початку випуску. Проблема пов'язана з взаємним розташуванням радіолокатора і місця випуску. Місце випуску закрито від радіолокатора деревами і будівлею. Для проведення вдалого випуску необхідно, щоб радіолокатор починав автоматичне супровід в момент, коли радіозонд, що піднімається на оболонці, з'являється в області видимості радіолокатора, що не завжди можливо. При невдалому початку випуску, в разі, якщо зонд не вдалося почати супроводжувати, його необхідно знайти протягом 5 хв, якщо ж радіозонд за цей час не знайдений, то випуск вважається зірваним. Для виключення ситуацій з неможливістю захоплення радіозонда з місця випуску, а також для полегшення пошуку радіозонда при його втраті, була потрібна розробка методів і алгоритмів проведення автоматичного пошуку на початку супроводу. Технологічні розкид при виробництві активних фазованих антенних решіток приводили до формування викривленої діаграми, погіршення дискримінаційних характеристик, до неякісного супроводу з постійними втратами радіозонда і отриманням недостовірних результатів радіозондирования.

Деякі аерологічні станції з цієї причини припинили використовувати новий комплекс. Для усунення помилок настройки активних фазованих антенних решіток необхідно було програмно реалізувати алгоритми настройки та контролю діаграми спрямованості і пеленгаційних характеристик комплексу.

## 1 ПРИСТРІЙ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК

Фазовими антенними решітками називається решітка випромінювачів, в якій переміщення променя в просторі проводиться шляхом введення змінних фазових зрушень між струмами, що живлять окремі випромінювачі.

Управління фазовим, а в загальному випадку амплітудно-фазовим розподілом в фазованих антенних решіток виробляється, як правило, електричним шляхом, що дозволяє швидко управляти формою діаграми направленості радіолокаційної системи і положенням її в просторі.

В якості випромінювачів зазвичай використовують слабо спрямовані антен – вібратори, щілини, рупори, відкриті кінці хвилеводів, спіралі, діелектричні стрижні і т.п. Можливі також решітки, що складаються з складних антен, наприклад, з ряду великих дзеркал. Харчування випромінювача або групи їх здійснюється окремими каналами від одного загального джерела або окремих самостійних джерел для кожного з каналом. У кожному з каналів стоять керуючі пристрої, що дозволяють в загальному випадку змінити фазу і амплітуду струму в кожному випромінювачі. Завдяки цьому, зокрема, можна змінювати фазовий розподіл в антені і здійснювати хитання діаграми направленості в просторі.

Слід зазначити що багатoelementні антенні решітки-полотна були відомі в радіозв'язку ще в 20-і роки. Це - синфазні горизонтальні антени, що використовуються і в даний час. Антенні полотна використовувалися і в початковому етапі радіолокації.

Однак ці грати не були електрично керованими, так як в той час не було відповідних елементів управління. Крім того, складність фідерної системи труднощі налаштування антен-полотен «відлякували» розробників. Тому в міру переходу радіолокації в сантиметровий діапазон хвиль решітки

були витіснені дзеркальними антенами. Останні в сантиметровому діапазоні виявилися більш простими, ніж решітки.

Намітився в 50-60-х роках повернення до антенних решіток пов'язаний з трьома обставинами:

- різким підвищенням вимог до радіолокаційних систем (РЛС) і відповідно до їх антенним системам;
- розробкою ряду нових високочастотних елементів, що дозволяють електрично управляти фазами і амплітудами струмів окремих випромінювачів решітки;
- появою сучасних електронних обчислювальних машин, здатних скоординувати роботу багатьох сотень і навіть тисяч випромінювачів фазованих антенних решіток.[1]

Впровадження фазованих антенних решіток в радіолокаційну техніку відкриває такі можливості:

1. Електричне сканування променя в широкому секторі. Можливість здійснення програмного огляду простору. Час переміщення променя в секторі – порядку декількох мікросекунд.

2. Отримання діаграми направленості заданої форми, яка може змінюватися в процесі роботи шляхом регулювання амплітуд і фаз збудження випромінювачів.

3. Отримання недосяжних в колишніх радіо-локаційних систем значень випромінюваної потужності шляхом когерентного складання в просторі полів, створюваних безліччю випромінювачів, живити від окремих генераторів. При цьому, потужність, що передається по окремих каналах, невелика і завдання підвищення електричної міцності фідерного тракту не виникає.

4. Можливість формування за допомогою однієї антени багатьох променів. Ця обставина разом з високою швидкістю перекидання променя відкриває можливість конструювання багатоцільових, багатофункціональних РЛС.

5. Можливість здійснення спеціальних методів обробки сигналів, прийнятих окремими випромінювачами антени. Це дозволяє отримати велику інформацію що приходите до антени електромагнітних хвиль і поліпшити в певній мірі характеристики РЛС, а також створити адаптивні антени різного призначення.

6. Забезпечення високої надійності антени. Це забезпечується застосуванням спеціальних систем контролю працездатності фазованої антенної решітки, що дозволяють швидко знайти місця пошкоджень; застосуванням резервування і модульної конструкції, що дозволяють звести до мінімуму час простою при ремонті. Вихід з ладу до 20% елементів лише кілька погіршує характеристики антен, не викликаючи її повної відмови. Крім того, фазована антенна решітка може бути зроблена значно більш стійкою проти ядерних вибухів, ніж, наприклад, дзеркальна антена. Ґрати можна вмонтувати в залізобетонне укриття, а лицьову сторону її покрити щільним радіопрозорим діелектриком, здатним витримати велике надлишковий тиск.

На жаль, в даний час фазовані антенні решітки поки ще пов'язане з серйозними труднощами.

До їх числа відносяться:

- висока вартість фазованої антенної решітки, обумовлена складністю випромінюючої системи, дорогого керуючого пристрою (ЕОМ) і необхідністю розробки великої кількості принципово нових вузлів дорожнечою цих вузлів;

- поява значних фазових помилок в розкритті через нестабільність роботи керуючих пристроїв, дискретності фазирования, що не ідентичності НВЧ приладів, що включаються в тракти фазованих антенних решіток. Це змушує приймати ряд заходів щодо стабілізації фазового розподілу, що призводить до ускладнення схеми решітки та додаткового підвищення її вартості;

- значні втрати потужності, викликані складністю трактів і труднощами узгодження при скануванні в широкому секторі кутів. Значні втрати призводять до низького коаксіального-хвильового переходу антени;

- труднощі розширення смуги пропускання.

Не дивлячись на те, що перераховані труднощі помітно стримують розробку фазованих активних решіток, останнім вважається найбільш перспективним класом радіолокаційних антен. Їх впровадження дозволить істотно поліпшити основні характеристики РЛС. [3]

### 1.1 Переваги багатохвильової та фазованої антенної решітки

Фазовані антенні решітки можуть бути класифіковані за різними ознаками - по геометрії розташування випромінювачів решітки, за способом їх збудження, за способом гойдання променя і т.д.

Залежно від геометрії розташування випромінювачів в просторі фазовані антенні решітки можна розділити на одновимірні, двовимірні і тривимірні.

До одновимірним ґратам відносяться лінійні, дугові, кільцеві решітки.

Двовимірні решітки можуть бути:

- плоскими, коли випромінювачі розташовані в одній площині в межах прямокутника, кола. Багатокутника;
- циліндричний, сферичними, конічними - випромінювачі розташовані відповідно на циліндрі, сфері, конусі.

Тривимірні решітки. У найпростішому варіанті це системи з двох паралельно розміщених площинних решіток. [2]

За характером розміщення випромінювачів в самій решітці діляться на еквідистантно і нееквідистантні.

За способом збудження фазовані антенні решітки можна розділити на решітки з фідерним і оптичним харчуванням. Фідерне живлення може здійснюватися по послідовній або паралельною схемою.

При оптичному харчуванні випромінювачі решітки збуджуються через простір хвильовий, випромінюваної випромінювачем.

За способом гойдання променя решітки діляться на два основних класу-решітки з частотним скануванням і решітки з фазовим скануванням. По режиму роботи фазовані антенні решітки можуть бути суміщеними або роздільними, працюючим на прийом або передачу. Не залежно від того, чи є решітка приємний, передавальною або суміщеної, можна виділити три типи схем фазованих антенних решіток:

- пасивна;
- активна;
- напівактивна.

Пасивна фазована антенна решітка – є найпростішою. Випромінювачі збуджуються від загального джерела через систему пасивних фазовращателів.

Активна фазована антенна решітка – ця схема є більш складною і дорогою, так як в каналі харчування кожного елемента решітки мається фазіруемый генератор або підсилювач потужності.

Напівактивна фазована антенна решітка – ця схема має в певній мірі переваги і недоліки схем з пасивними і активними елементами. Вона складається з сукупність решіток з пасивними елементами, званих підгратці, кожна з яких забезпечена підсилювачем потужності.

Багатопротеневі антенні решітки забезпечують формування багатопротеневої діаграми направленості. Вони складаються складаються з власне решітки випромінювачів і спеціальної діаграммообразующей схеми, що має ряд незалежних входів. При порушенні різних входів діаграммоутворюючої схеми (ДУС) на розкритті антени утворюються різні амплітудно-фазові розподілу, кожному з яких відповідає своя парцінальна діаграма направленості.

Зазвичай ДУС створюють так, що напрямки нульового випромінювання окремих діаграм направленостей (ДН) збігаються так, що



напрямки нульового випромінювання окремих ДН збігаються з напрямками максимумів сусідніх ДН. При цьому з'єднання ДН перетинаються на рівні 4 дБ.

При поєднанні ДУС використовуються багатополосники типу подвійних хвилеводних трійників, щілинних мостів, напрямки ответвителей і т.п., а також фазообертачі на фіксовані зрушення фази. Розрізняють паралельні і фіксовані зрушення фази.

Паралельна схема - схема з подвійним хвилеводними трійниками. При побудові цієї ДУС використовуються наступні дві властивості подвійного трійника. Якщо бічні плечі приєднані до узгодженої навантаженні, то:

Енергія з плеча Н ділиться порівну між бічними плечима і не надходить в плече Є. коливання в поперечних перерізах бічних плечей, рівновіддалених від площини симетрії трійника, синфазних;

Енергія з плеча Є ділиться порівну між бічними плечима і не надходить в плече Н. коливання в поперечних перерізах бічних плечей. Рівновіддалених від площини симетрії трійника, протифазних. Порівнюючи між собою паралельні і послідовні ДУС, зазначимо таке.

Достоїнствами паралельної схеми є відсутність поглинаючих навантажень і помітно менше число ділянок потужності.

Крім того, при збільшенні числа випромінювачів необхідну кількість багатополосників і фазовращателів різко зростає.

Послідовна ДУС може бути реалізована при будь-якому числі випромінювачів в решітці. Недоліки її - велике число спрямованих відгалужувачів і зниження коефіцієнту корисної дії через втрати потужності і поглинаючих навантажень. Можливі два способи використання багатопроменевих решіток.

При першому способі, до всіх входів антени одночасно підключаються передавачі або приймачі. У просторі формується многолучевая ДН. При цьому досягається одночасна обробка інформації, що надходить по різних каналах, що збільшує швидкодію системи.

При другому способі передавач послідовно підключається до кожного входу. При цьому відбувається скачкообразування переміщення променя в просторі. Застосування електронного комутатора дозволяє здійснити електричне хитання променя. Цей спосіб сканування називають матричним або амплітудним способом. Система управління при такому способі відмовляється досить простий, бо необхідні для різних положень променя амплітудно-фазові розподілу в розкриві решітки «запам'ятовуються і зберігаються».

## 1.2 Принципи гойдання променю

Розглянемо лінійну еквідистантним решітку з рівномірним амплітудним і лінійним фазовим розподілом. Множник такої системи має вигляд

$$f_{\text{сист}}(\theta) = \frac{\frac{\sin(N(kd\sin\theta - \varepsilon))}{2}}{\sin\frac{1}{2}(kd\sin\theta - \varepsilon)} \frac{\frac{\sin(N(kd\sin\theta - \varepsilon))}{2}}{\sin\frac{1}{2}(kd\sin\theta - \varepsilon)}, \quad (1.1)$$

де  $N$  - число елементів решітки,

$d$  - відстань між ними,

$\varepsilon$  - зсув фази живлення між сусідніми елементами.

У напрямках, що визначаються кутами, набіг фази на ділянці компенсує (з точністю до величини, кратної  $2\pi$ ) зсув фази харчування і поля всіх елементів складаються синфазно.

Як видно зі співвідношення, величина залежить від зсуву фаз  $\varepsilon$  і довжини хвилі. при зміні цих двох величин змінюється і кут відхилення променя. Це дозволяє осушесвтіть електричне хитання діаграми спрямованості.

У антенних решітках застосовуються два основних способи електричного гойдання променя: частотний (шляхом зміни частоти

харчування) і фазовий (шляхом зміни за допомогою фазовращателів величини  $E$  при незмінній частоті харчування)

Іноді впливають також амплітудний спосіб гойдання, реалізований шляхом комутації входів і багатопроменевих антенних решітках або в лінзах Люнеберга, і часовий спосіб, реалізований в широкосмугових фазованих антенних решітках (ФАР).

Існує два основних способи гойдання променя ФАР:

- частотний спосіб гойдання;
- фазовий спосіб гойдання.

При зміні несучої частоти генератора  $f$  напрям головного максимуму переміщується як за рахунок зміни величини, так і за рахунок залежно від частоти величини  $\varepsilon$ . Ефективна частотного способу гойдання характеризується углочастотною чутливістю

Сучасні СНЧ генератори допускають перебудову по частоті в межах декількох відсотків від несучої. Для того, щоб при такій зміні частоти виконання переміщення променя в досить широкому секторі, частота повинна бути порядку 5-10%, а іноді й більше.

У антенах з частотним хитанням використовують дві схеми збудження випромінювачів - послідовна і паралельна. У послідовній схемі випромінювачі харчуються бігучою хвилею і зсув по фазі  $\varepsilon$  буде

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda_{\Phi}} l \quad \varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda_{\Phi}} l ,$$

(1.2)

де  $l$  - довжина відрізка фідера між суміжними випромінювачами (зокрема, величина  $l = d$ ).

Схеми послідовного харчування конструктивно прості. Основний недолік цих схем - порівняно велика загасання і обмеження по пропускається потужності, так як вся потужність йде по одному тракту до всіх

випромінювачам. Крім того, в послідовній схемі вимоги до точності виготовлення елементів системи є вельми жорсткими.

Пов'язано це з тим, що в цих системах помилки в амплітудно-фазовому розподілі. Обумовлений неточностями виготовлення, накопичуються в міру руху хвилі вздовж системи.[6]

При паралельній схемі частотного гойдання харчування випромінювачів проводиться через окремі фідери, довжина яких різна і лінійно збільшується при переході від одного випромінювача до іншого. Якщо різниця довжин сусідніх фідерів позначити через  $l$ , то величини  $\epsilon$  і визначаються співвідношеннями відповідно. Звідси випливає, що чим більше  $l$ , тим укучастотна чутливість вище.

До достоїнств способу відноситься його простота, в самій антені відсутні елементи, якими потрібно керувати в процесі її гойдання променя проводиться швидко і точно.

До недоліків способу належать: необхідність мати перебудовувані в достатній смузі частот передавальне і приймальне пристрою і діапазонний фідерний тракт. Частота коливань використовується як керуючий параметр, що створює певні труднощі при використанні широкосмугових сигналів. Серйозним недоліком частотного способу гойдання є також низька перешкодозахищеність – кожному напрямку відповідає цілком певна частота. Тому використовуваний зазвичай для захисту від активних перешкод шлях перебудови РЛС по частоті неприємний для мети, що рухається в радіальному напрямку, так як це призведе до відхилення променя і втрати мети.[4]

При фазовому способі гойдання променя фаза випромінювачів змінюється по заданому закону за допомогою електрично-керованих фазоврацателів, ліній затримки та інших фазосдвигаючих пристроїв. Зміна фазового зсуву між випромінювачами призводить до зміни напрямку головного максимуму ДН решітки. Також як і в схемах частотного гойдання,

існують дві основні схеми решіток з фазовим керуванням - послідовна і паралельна. Можлива також і змішана схема.

У послідовній схемі на ділянках живильної лінії між сусідніми випромінювачами включені однакові фазообертачі. Кожен фазовращатель змінює фазу на один і той же кут. Тому для управління фазовращателями потрібен тільки один керуючий сигнал. Система управління ґратами виявляється досить простий, що є основним достоїнством послідовної схеми.

Недоліки схеми - мала пропускаемая потужність, великі втрати і мала величина допусків через накопичення помилок фазовращателей. Останнє вимагає високої стабільності роботи фазовращателей і їх джерел живлення. У зв'язку із зазначеними вадами послідовна схема застосовується головним чином в невеликих антенах з механічними фазовращателями, стабільність яких висока, втрати малі, а пропускаемая потужність досить велика.

У паралельній схемі з фідерним харчуванням загальний канал за допомогою ділянок потужності розгалужується на  $N$  паралельних гілок, в які включені фазообертачі. Основна перевага схеми з паралельним включенням фазовращателей полягає в тому, що через кожен фазовращатель проходить  $1 / N$  частину потужності. Тому обмеження по потужності значно ослаблені, а загальні втрати енергії приблизно дорівнюють втратам в одному фазовращателе в послідовній схемі.

Основний недолік схеми - складність системи управління, оскільки кожен фазовращатель повинен управлятися за своїм законом.

### 1.3 Двовимірні решітки

Для забезпечення двовимірного гойдання променя можуть застосовуватися різні комбінації пристрою одновимірним хитанням променя.

Фазочастотну способ. Хитання променя в горизонтальній площині здійснюється за рахунок зміни частоти. Для підвищення углочастотной чутливості випромінювачі харчуються за допомогою лінії змійковому типу. Хитання променя у вертикальній площині здійснюється фазовим способом.

Фазо-фазовий спосіб. При цьому способі хитання променя в обох площинах здійснюється за допомогою фазовращателів.

Для управління ґратами може застосовуються схема автономного управління, або схема управління по рядках і стовпцях.

У схемі автономного управління гойдання променя по двох координатах проводиться шляхом незалежного створення в кожному фазообертачі, включає в канали випромінювачів, необхідного фазового зсуву. У цьому випадку число керуючих сигналів одно  $MN-1$ , де  $MN$  число елементів решітки.[5]

У схемі управління по рядках і стовпцях, всі елементи, що лежать в одному стовпці, отримують однаковий фазовий зсув  $-E$ ,  $-2e$ , що змінюється від стовпця до колонку для качання променя в горизонтальній площині. У межах кожного рядка випромінювачі також мають одну і ту ж фазу, але від рядка до рядка отримують необхідний фазовий зсув,  $2$ , ... для качання променя у вертикальній площині. При цьому буде потрібно значно менше число керуючих сигналів. Ця схема управління широко застосовується в плоских ФАР.

#### 1.4 Розташування випромінювачів в плоских фазованих антенних решітках

Дуже важливим питанням. Вирішуваним при створенні плоских ФАР, є вибір способу розташування елементів в розкриві. Елементи можуть розміщуватися регулярним і нерегулярним чином. Серед регулярних способів розміщення елементів найбільше поширення мають два закони: за вузлам прямокутної сітки, по вузлах трикутної сітки.[6]

Ці закони характеризуються рівномірним розташуванням випромінювачів площині, тобто на кожен випромінювач фазованої антенної решітки доводиться однакова частина площі розкриву для трикутної сітки.

Порівняємо прямокутну і трикутну сітки з погляду небезпеки виникнення побічних головних максимумів при скануванні. З цією метою

скористаємося методом еквівалентної лінійної решітки. Відповідно до цього методу ДН двовимірної ФАР в довільній площині  $\varphi = \varphi_0$  дорівнює ДН еквівалентної лінійної решітки, що представляє собою відрізок прямої  $\varphi = \varphi_0$  в межах розкриву з випромінювачами, місце розташування яких визначається шляхом проєкції координат реальних випромінювачів на цю пряму зі збереженням амплітуд і фаз збудження.

Для прямокутної сітки найбільша відстань між елементами еквівалентних лінійних решіток виходить при  $\varphi = 0$  і  $\varphi = \pi / 2$  і дорівнює відповідно  $dx$  і  $dy$ , всі інші напрямки дають боєм «густі» еквівалентні решітки.

Для трикутної сітки особливо не сприятливою є площину  $\varphi = \pi / 2$ .

Відстань між елементами у відповідній еквівалентної решітці найбільшу одно  $(d\sqrt{3}) / 2$ .

Отже, при використанні трикутної сітки загальне число елементів ФАР може бути менше, ніж число елементів у ФАР з прямокутною сіткою. Збільшені розміри елемента трикутної сітки полегшують конструктивне розміщення фазує пристроїв близько випромінювачів решітки. Однак при розміщенні випромінювачів у вузлах трикутної сітки виникають труднощі в управлінні фазою по рядках і стовпцях. Тому в даний час використовується переважно прямокутна сітка.

Як вже зазначалося вище, крім регулярного можливо і нерегулярне розміщення випромінювачів в решітці. Останнє дозволяє домогтися практично повного придушення побічних головних максимумів при відносно невеликому числі слабо направлених випромінювачів, у багато разів меншому числа випромінювачів в ФАР з регулярною структурою. Цей спосіб аналогічний використанню лінійних нееквівалентних антенних решіток.

Серйозними недоліками розріджених решіток з нерегулярним розташуванням випромінювачів є низький коефіцієнт використання площі, а

## 2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ РАДІОЗОНДА НА БАЗІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Однією з важливих характеристик для проведення радіозондування атмосфери є точність вимірів кутів, від якої залежить точність обчислення висоти положення радіозонда. У комплексі МАРЛ існують чинники, що погіршують точність супроводу по кутах. Нижче розглядаються причини викликають таке погіршення і наводяться алгоритми, що дозволяють звести до мінімуму їх вплив і підвищити точність вимірювання кутів даними радіолокатором.

Алгоритм вимірювання кутових координат, реалізований у комплексі МАРЛ, виглядає наступним чином:

За можливим координатам розташування цілі, розраховується фазовий розподіл напрямку променя АФАР за алгоритмом. Фазовий розподіл для кута місця:

$$\phi(\varepsilon)_i = \frac{\sin(\varepsilon)x_i f(\lambda)}{22,5} \quad (2.1)$$

Фазовий розподіл для азимута

$$\phi(\beta)_i = \frac{\sin(\beta)y_i f(\lambda)}{22,5} \quad (2.2)$$

де фази для і-х елементів решітки;

$\beta$ ,  $\varepsilon$  - розрахунковий кут місця і азимут;

$x$ ,  $y$  - координати елемента решітки;

$f(x)$  - функція параметра сигналу.



За відхилення променя від одно сильної лінії обчислюється помилка наведення на ціль,  $\beta_c$  і  $\varepsilon\beta_c$ .

З заданим коефіцієнтом  $k$  зворотного зв'язку помилка вводиться в розрахунок фазового розподілу скоригованого напрямку променя:

для кута місця

$$\phi(\varepsilon)_i = \frac{\sin(\varepsilon - k_{oc} * E_{\beta,\varepsilon})x_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (2.3)$$

для азимута

$$\phi(\beta)_i = \frac{\sin(\beta - k_{oc} * B_{\beta,\varepsilon})y_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (2.4)$$

Алгоритм повторюється в циклі, зменшуючи значення помилки, при цьому розраховане напрям променя буде вказувати на мету. При виконанні даного алгоритму помилка наведення постійно мінімізується, швидкість зменшення помилки залежить від значення коефіцієнта  $k$ . За становище радіозонд приймається останнім обчислене значення кутів.

Описаний алгоритм показав задовільні результати при експлуатації комплексу МАРЛ, але обробка отримуваних даних показала, що помилки супроводу по куту місця в деяких випадках досягала  $0,2^\circ$ .

Основна причина помилок супроводу в тому, що управління фазовим розподілом АФАР відбувається дискретно з кроком управління фазою кожного випромінювача рівний  $22,5^\circ$ . Відповідно, управління променем відбувається також дискретно.

### 3 МЕТОД І АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ДОСТОВІРНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ КООРДИНАТ КОМПЛЕКСАМИ НА БАЗІ АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Однією з важливих характеристик для проведення радіозондування атмосфери є точність вимірів кутів, від якої залежить точність обчислення висоти положення радіозонда.

У комплексі МАРЛ існують чинники, що погіршують точність супроводу по кутах. Нижче розглядаються причини викликають таке погіршення і наводяться алгоритми, що дозволяють звести до мінімуму їх вплив і підвищити точність вимірювання кутів даними радіолокатором.

#### 3.1 Ознака визначення головної пелюстки

Діаграма спрямованості будь-антени, крім головної пелюстки має бічні пелюстки. Для АФАР МАРЛ бічні пелюстки, як вказувалося в розділі 1, досягають 21% від головного максимуму. Відповідно, при застосуванні методу равносигнальної зони для супроводу радіозонда, пеленгаційної характеристики виникають і поза центром головної пелюстки. Це призводить до того, що можливе захоплення і супровід на кутах не відповідають реальному стану радіозонда. [7]

Для виключення такої ситуації і можливості індикації правильності супроводу радіозонда, в комплексі МАРЛ був реалізований алгоритм визначення положення радіозонда в головному пелюстку.

Особливість розробленого алгоритму і його відмінність від інших можливих способів визначення положення радіозонда в головному промені в тому, що він не залежить від рівня випромінюваного радіозондом сигналу. В принципі, при відомому рівні сигналу немає необхідності застосовувати спеціальні алгоритми, так як рівень сигналу завжди максимальний в головному пелюстку, але рівень сигналу відрізняється для різних

радіозондов, більш того, при польоті радіозонда, рівень сигналу змінюється на десятки децибел через зміни положення радіозонда в просторі і відповідно зміни максимуму діаграми випромінювання радіозонда.

Алгоритм визначення головного променя, що не залежить від рівня сигналу, заснований на відмінності діаграм спрямованості для ближньої і далекої зони супроводу. Ширину променя для вузької діаграми по горизонталі можна розрахувати за наближеною формулою наступним чином:

$$(3.1)$$

Для широкої діаграми, що використовує 8 елементів (4 по вертикалі, 4 по горизонталі), не враховуючи впливу виключених елементів та враховуючи що розміри антени обмежені включеними елементами, ширину діаграми спрямованості по горизонталі приблизно можна уявити як:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{d_e} = \frac{0,17857\text{м}}{0,429\text{м}} = 0,4162\text{rad} = 23,85^\circ. \quad (3.2)$$

З даного розрахунку видно, що горизонтальна складова діаграми для широкого променя більш ніж в два рази ширше ніж для вузького променя. Бічні пелюстки обох діаграм сильно зміщені один щодо одного.

Покажемо, що ставлення обох діаграм (при скануванні в діапазоні кутів, без дифракційних максимумів) буде максимально тільки в максимумі діаграми спрямованості основного променя. Діаграма спрямованості для горизонтальної лінійки випромінювачів має вигляд:

$$M(\beta) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{i(2\pi/\lambda)nK \sin(\beta)} \quad (3.3)$$

Якщо розглянути логарифм відносини по азимуту діаграм для вузького і широкого променів при однаковому скануванні, то отримаємо що результуюча функція є також діаграмою спрямованості, представленої сумою двох лінійок з трьох елементів:

$$10 \log(M_{\beta, \epsilon}) = 10 \log\left(\sum_m \sum_n A_{n,m} e^{i(x_{n,m} \Phi_\beta + y_{n,m} \Phi_\epsilon)}\right) - 10 \log\left(\sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^4 A_{n,m} e^{i(x_{n,m} \Phi_\beta + y_{n,m} \Phi_\epsilon)}\right) \quad (3.4)$$

з максимумом в тому ж напрямку що й основна діаграма спрямованості. Результуюча діаграма спрямованості для азимутального перетину має вигляд, показаний на рис. 3.1 .

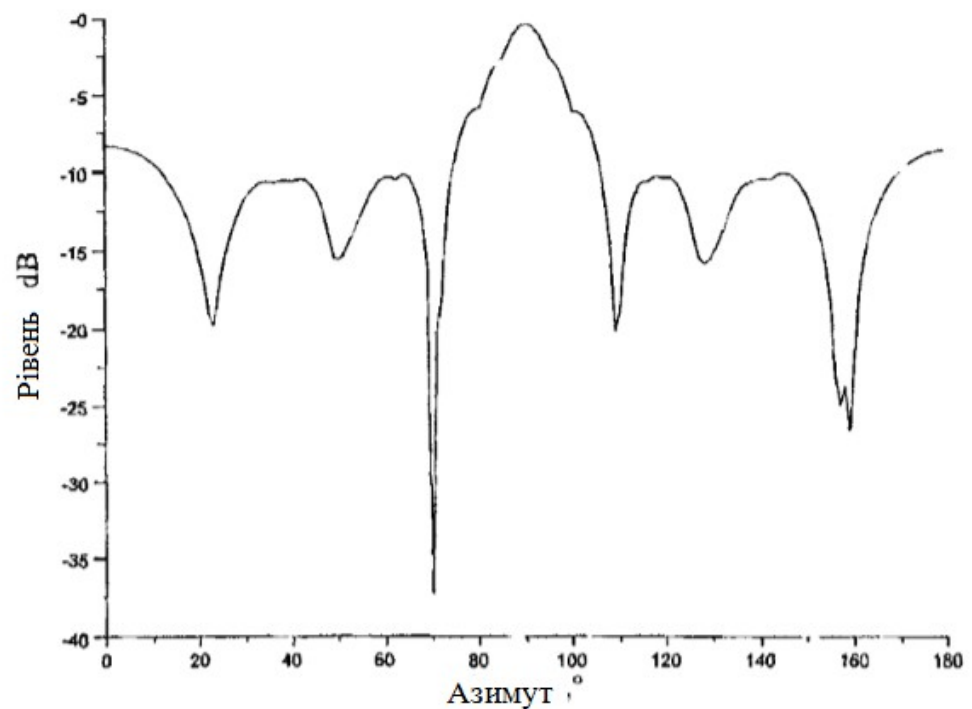


Рисунок 3.1 – Разностна діаграма по азимуту для вузького і широкого променя

Зроблені вище висновки щодо азимутального перетину справедливі і для угломестной перерізи діаграм спрямованості. Результуюча діаграма спрямованості для угломестной перетину має вигляд, показаний на рис. 3.2

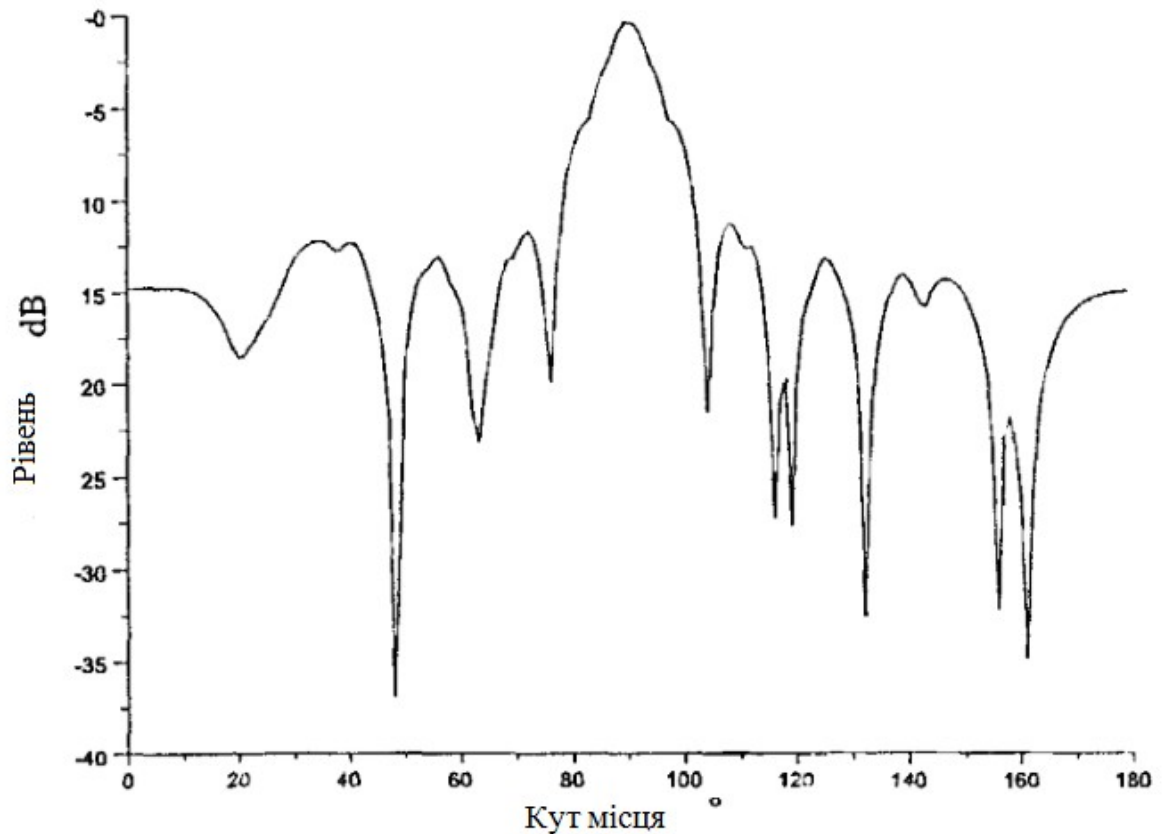


Рисунок 3.2 – Разностна діаграма по куту місця для вузького і широкого променя

У застосування до АФАР використовуваної в комплексі МАРЛ і рівню сигналу одержуваного з логарифмічного приймача комплексу, можна сказати що при вимірюванні відносини вузькою та широкою діаграм, максимум цього відношення буде знаходитися тільки в центрі головних пелюсток діаграм. Використовуючи наведені вище дані, в комплексі можна досить просто реалізувати перевірку супроводу радіозонда головним пелюсткою.

При перемиканні з широкою діаграми спрямованості на вузьку, змінюється посилення решітки, а також і розташування бічних пелюсток.

Вимірювання рівнів сигналів в головних пелюстках обох діаграм показує, що ставлення вимірних сигналів буде максимальним щодо відносин рівнів сигналів в інших точках можливого захоплення цілі. Ставлення потужностей головних пелюсток залежить від кількості включених елементів для широкої і вузької діаграм спрямованості.

У комплексі МАРЛ ближня зона реалізована на 8 елементах, таким чином це відношення дорівнює  $64/8 = 8$ .

Знаючи це відношення, і постійно проводячи вимірювання рівня прийнятого сигналу радіозонда широкої і вузької діаграмами спрямованості, в будь-який момент часу можна сказати знаходиться радіозонд в головному пелюстці або в бічному. [8]

Існує кілька особливостей при використанні цього методу визначення головної пелюстки:

1. При близькому розташуванні радіозонда до радіолокатора, через фізичні обмеження вхідних каскадів антени, можливо обмеження посиленого вхідного сигналу максимальним значенням величини пропускання малошумлячих підсилювачів, і чим більше підсилювачів беруть участь в створенні діаграми спрямованості, тим більше буде обмеження. Це призведе до того, що коли в побудові діаграми беруть участь всі підсилювачі (вузька діаграма спрямованості), рівень сигналу може виявитися такою ж величини як і при частковому включенні АФАР (широка діаграма спрямованості). Обмеження можна прибрати зменшивши посилення сигналу. Для цієї мети використовується вбудований аттенюатор, що дозволяє послабити сигнал, що приймається на 30 дБ.

2. При достатньому видаленні радіозонда, для правильного спрацьовування даної ознаки, необхідно аттенюатор вимикати.

3. При видаленні радіозонда на відстань більше 10 км АФАР на широкій діаграмі починає сприймати сигнал як шум, і даний алгоритм перестає працювати. Але на таких відстанях оцінку головної пелюстки вже немає необхідності перевіряти, так як кутові переміщення радіозонда на

великої дальності не великі і за умови повної працездатності радіолокаційного комплексу, а також те, що в ближній зоні супроводу радіолокатор показував стійкий захоплення головним пелюсткою, втрата зонда при наявності сигналу і перехід на бічній пелюстка не можливий.

Завдяки введенню даного алгоритму, при проведенні радіозондування комплексом МАРЛ, були виключені ситуації помилкового захоплення і супроводу.[9]

### 3.2 Алгоритми підвищення точності вимірювання кутів і метод многолучевого вимірювання

Фактори що впливають на точність вимірювання кутових координат. Одним з факторів, що впливають на точність вимірювання кутових координат, є зміна довжини хвилі сигналу, що передається.

З метою економії, для проведення аерологічного радіозондування атмосфери використовують розроблений в Росії, недорогий радіозонд МРЗ-3, що дозволяє з достатньою точністю вимірювати температуру і вологість, і передавати дані на наземний приймальний комплекс, при цьому, вимоги до параметрів передавальної частини радіозонда не надто високі. Наприклад, яку випромінює радіочастота в процесі польоту може змінюватися від 1670 МГц до 1690 МГц.

Робота комплексу на одній фіксованій частоті призведе до того, що радіозонд буде неможливо супроводжувати до максимальних вилучень від комплексу. Для успішного проведення радіозондирования до максимально можливих діяльностей, для комплексу МАРЛ, розроблена система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) НВЧ приймача. АПЧ реалізована програмно і працює за принципом пошуку максимального рівня сигналу при скануванні по частоті в робочому діапазоні та установки центральної частоти приймача на максимальний рівень.[12]

Крок зміни частоти становить 0,5 МГц. Рівень сигналу вимірюється АЦП комп'ютерної плати блоку обробки комплексу.

Розглянемо похибки в напрямку кута при розрахунку фазового розподілу АФАР, що виникають при перебудові центральної частоти приймача. Припустимо, при догляді частоти радіозонда, приймальня система підлаштується під необхідну частоту, але при цьому розрахунок фазового розподілу для кутового положення діаграми спрямованості проводиться без урахування зміни центральної частоти.

Розглянемо вплив зміни несучої частоти на точність вимірювання кутів комплексом МАРЛ.

Положення променя для лінійки випромінювачів можна записати наступним чином:

$$\sin(\theta) = \frac{1}{Kd} \frac{\sum_{i=-n}^n A_i i \phi_i}{\sum_{i=-n}^n A_i i^2}. \quad (3.5)$$

де  $K = 27\Gamma/\Lambda$ - фазова постійна.

$$\sin(\theta_0) + \cos(\theta_0) \delta\theta_\lambda = \frac{\lambda + \delta\lambda_i}{2\pi d} \frac{\sum_{i=1}^m A_i i \phi_i}{\sum_{i=1}^m A_i i^2}. \quad (3.6)$$

З огляду на, що відхилення від центральної частоти може складати 10 МГц, при центральній частоті 1680 МГц отримаємо:

$$\delta\theta_\lambda = 0,006 \operatorname{tg}(\theta_0). \quad (3.7)$$

При середньому куті місця супроводу радіозонда рівному  $30^\circ$  помилка супроводу досягне значення  $0,2^\circ$ , відповідно при великих кутах помилка буде зростати. Таким чином, щоб виключити помилку супроводу, викликану зміною частоти радіозонда, необхідно в формулах розрахунку фазового



розподілу (3.6) і (3.7) обов'язково використовувати не постійне фазовий число  $K$ , а обчислюється відповідно з отриманої частотою сигналу.

Ще одним фактором, що впливає на правильність вимірювання координат, є відмінність систем координат комплексу і АФАР. Як вказувалося раніше, АФАР розташована під кутом  $30^\circ$  по відношенню до осі радіолокатора.

За умови, що азимут променя дорівнює нулю щодо полотна антени, при вимірюванні кутів не виникає ніяких помилок. Азимутом на пряму на ціль буде азимут напрямку полотна антени, а кут місця положення радіозонда буде дорівнює куту місця направлення щодо полотна антени плюс  $30^\circ$ . Але при відхиленні азимута щодо полотна антени виникають помилки у визначенні положення променя.

І чим більше відхилення, тим більше помилка. Щоб не допустити помилок супроводу застосований матричний метод перетворення сферичних координат в три виразів:

$$\begin{aligned} \cos(\epsilon)\cos(\beta) &= \cos(\epsilon_{arr})\cos(\beta_{arr}), \\ \cos(\epsilon)\sin(\beta) &= \cos(\epsilon_{arr})\sin(\beta_{arr})\cos(\delta_{arr}) - \sin(\epsilon_{arr})\sin(\delta_{arr}), \\ \sin(\epsilon) &= \cos(\epsilon_{arr})\sin(\beta_{arr})\sin(\delta_{arr}) + \sin(\epsilon_{arr})\cos(\delta_{arr}), \end{aligned} \quad (3.8)$$

отримуємо залежність кутів вимірюваних щодо АФАР кутах вимірюваних щодо комплексу:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \arcsin(\cos(\epsilon_{arr})\sin(\beta_{arr})\sin(\delta_{arr}) + \sin(\epsilon_{arr})\cos(\delta_{arr})), \\ \alpha &= \arccos\left(\frac{\cos(\epsilon_{arr})\cos(\beta_{arr})}{\cos(\epsilon)}\right), \end{aligned} \quad (3.9)$$

- Кут місця в системі координат радіолокатора, азимут в системі координат радіолокатора. Ще одним фактором є дискретність зміни

положення променя при налаштуванні фазовращателів. Нижче розглядається алгоритм дозволяє зменшити вплив дискретного зміни кутів.

Метод багатопроменевого вимірювання кутових координат. Алгоритм вимірювання кутових координат, реалізований в комплексі МАРЛ, виглядає наступним чином:

– по можливим координатами розташування цілі, розраховується фазовий розподіл напрямку променя АФАР за алгоритмом описаного в розділі 1:

фазовий розподіл для кута місця:

$$\phi(\varepsilon)_i = \frac{\sin(\varepsilon)x_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (3.10)$$

фазове розподілення для азимута:

$$\phi(\beta)_i = \frac{\sin(\beta)y_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (3.11)$$

– по відхиленню променя від равносигнальної лінії обчислюється помилканаведення на ціль (формула (3.8) і (3.9));

– з заданим коефіцієнтом кіс зворотного зв'язку помилка вводиться в розрахунок фазового розподілу скоригованого напрямку променя: для кута місця:

$$\phi(\varepsilon)_i = \frac{\sin(\varepsilon - k_{oc} * E_{\beta,\varepsilon})x_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (3.12)$$

для азимута:

$$\phi(\beta)_i = \frac{\sin(\beta - k_{oc} * B_{\beta,\varepsilon})y_i f(\lambda)}{22,5}, \quad (3.13)$$

Алгоритм повторюється в циклі, зменшуючи значення помилки, при цьому розраховане напрямком променя буде вказувати на мету.

При виконання даного алгоритму помилка наведення постійно мінімізується, швидкість зменшення помилки залежить від значення коефіцієнта. За стан радіозонда приймається останнім обчислене значення кутів. [11]

Описаний алгоритм показав задовільні результати при експлуатації комплексу МАРЛ, але обробка отриманих даних показала, що помилки супроводу по куту місця в деяких випадках досягали  $0,2^\circ$ . Основна причина помилок супроводу в тому, що управління фазовим розподілом АФАР відбувається дискретно з кроком управління фазою кожного випромінювача рівній  $22,5^\circ$ .

Відповідно, управління променем відбувається також дискретно. У розділі 1, при аналізі АФАР, показано зв'язок між похибками в розподілі фази і зміщенням головного променя діаграми (3.10).

Кут напрямку променя на радіозонд при розглянутому вище алгоритмі буде прагнути до величини:

$$\alpha_{\text{зонд}} = \alpha_{\text{нач}} + \frac{nU_{\text{err}}}{k_{\text{ос}}} , \quad (3.14)$$

де  $\alpha_{\text{нач}}$  - кут при початковому розподілі фаз в напрямку радіозонда;

$U_{\text{err}}$  - помилка в напрямку;

$n$  - кількість ітерацій;

$k_{\text{ос}}$  – коефіцієнт зворотнього зв'язку.

При досягненні значення розподілу фаз близького половині кроку перемикавання, розподіл зміниться, відповідно зміниться і кут напрямку променя, і для направлення на радіозонд кут складе:

$$\alpha_{\text{зонд}_2} = \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha - \frac{nU_{\text{err}}}{k_{\text{ос}}} \quad , \quad (3.15)$$

$\alpha$  - крок переключення променю.

Максимальна помилка направлення на радіозонд складе:

$$\delta_{\text{макс}} = \alpha_{\text{зонд}_2} - \alpha_{\text{нач}} = \Delta\alpha - \frac{nU_{\text{err}}}{k_{\text{ос}}} \quad ,$$

$$\delta_{\text{макс}} = \frac{\Delta\alpha}{2} \quad . \quad (3.16)$$

Для АФАР комплексу МАРЛ, за формулами (3.11), (3.12) були побудовані залежності величини кроку зміщення променя від значення самого кута.

На рис. 3.3 і 3.4 наведені залежності кроку перемикавання від зсуву кута при різних початкових положеннях променя.

За побудованими залежностями видно, що максимальна величина помилки становить близько  $0,64^\circ$  (рис. 3.1), що підтверджує розрахунки отримані в розділі 1.

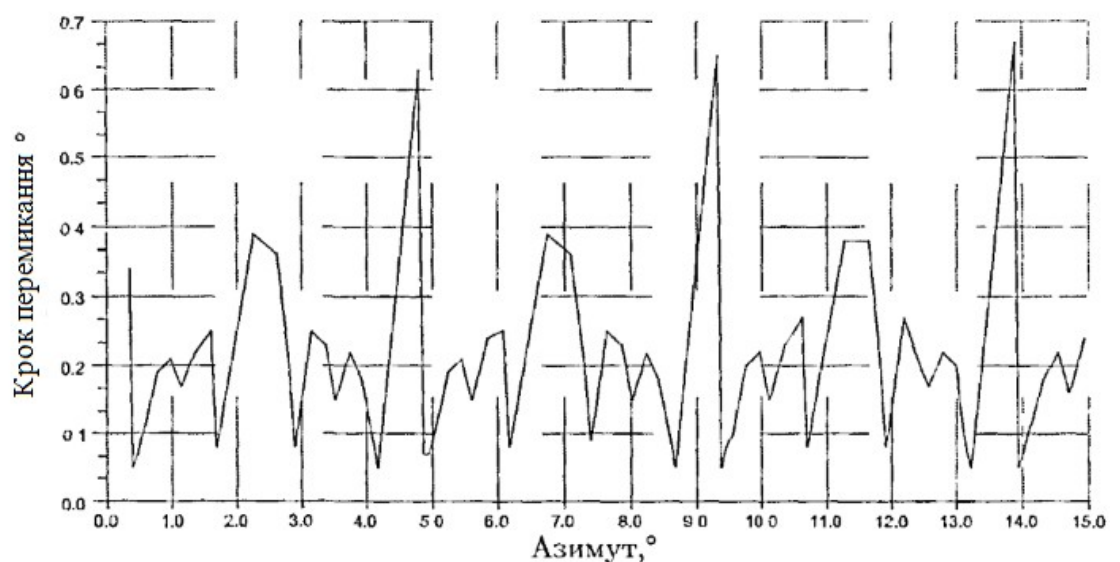


Рисунок 3.3 – Величина кроку перемикавання азимута при положенні кута місця  $0^\circ$  до нормалі

Супровід радіозонда радіолокатором МАРЛ в далекій зоні обмежена межами зміни електронного кута  $3^\circ$ .

У зв'язку з цим, за графіком на рис. 3.3 можна визначити, що при зазначених межах зміни кута, величина кроку перемикання може доходити до  $0,4^\circ$ . [10]

За цими даними також видно що величина кроку зміщення променя не постійна і залежить від напрямку променя АФАР за іншою координаті, і при зміщенні вертикального кута на  $20^\circ$ , крок зміщення променя по горизонтальній координаті не перевищуватиме  $0,1^\circ$  (рис. 34).

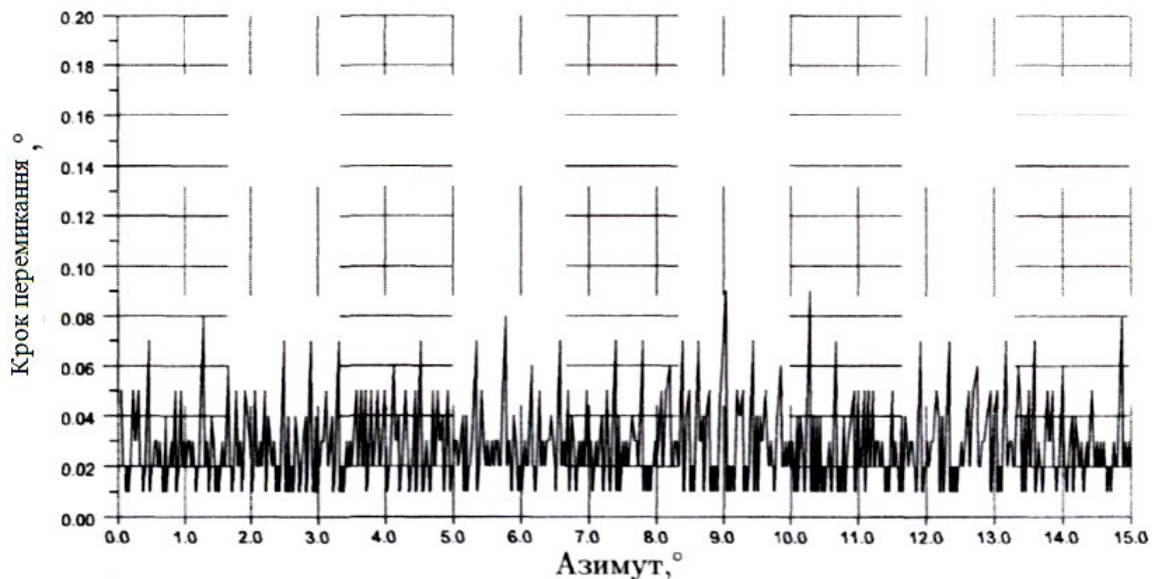


Рисунок 3.4 – Величина кроку перемикання азимута при положенні кута місця  $20^\circ$  до нормалі.

Точність вимірювання кута при такому положенні електронного променя АФАР складе половину величини кроку перемикання і буде дорівнює  $0,2^\circ$ . Для кута місця ситуація аналогічна, рис. 3.5.

По осі X відхилення кута в градусах від рівносигнальної лінії, по осі Y – напруга помилки в вольтах.

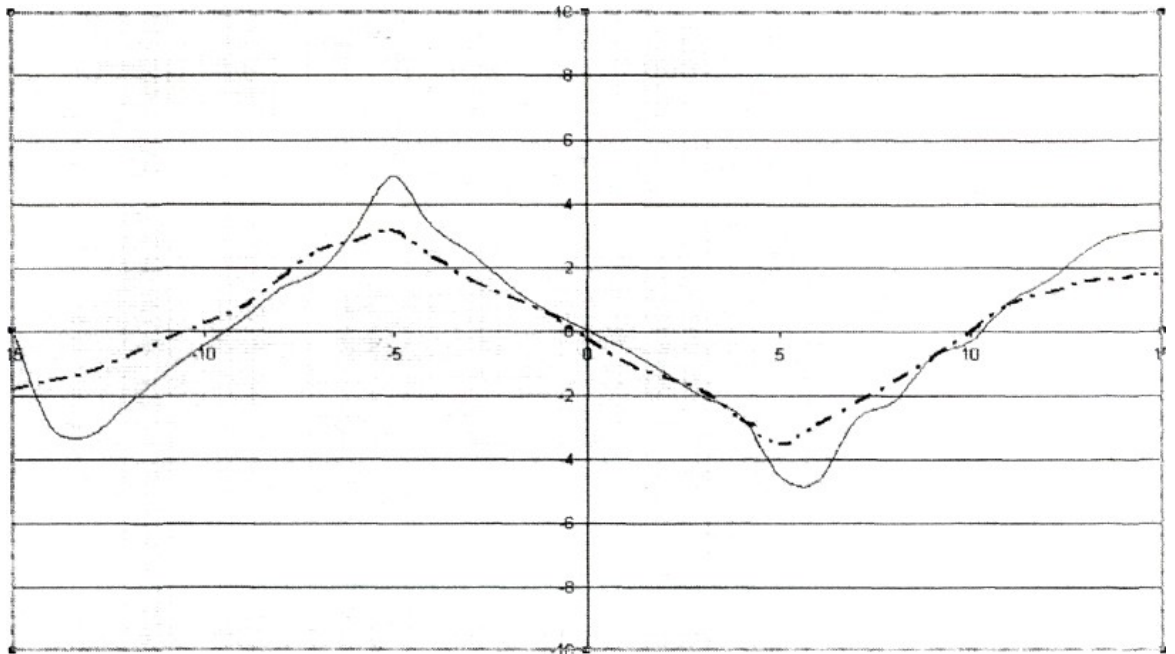


Рисунок 3.5 – Зміна нахилу пеленгаційної характеристики в залежності від рівня сигналу

Також можна порахувати точність вимірювання висоти при заданій дальності і такому зміні кута місця, при видаленні радіозонда на 200 км., помилка виміру по висоті складе близько 700 метрів, а це в свою чергу негативно позначиться на результатах зондування.

Для виключення впливу дискретності перемикання променя, після аналізу конструктивних особливостей АФАР і комплексу МАРЛ в цілому, був розроблений і реалізований алгоритм, що дозволяє підвищити точність вимірювання кутів.

Для зменшення впливу величини кроку перемикання фази на точність визначення положення променя в розрахунки потрібно ввести нахил пеленгаційної характеристики, який показує залежність величини зміщення радіозонда від равносигнальної лінії і крок перемикання для кожного положення променя.

При відомому нахилі пеленгаційної характеристики і заздалегідь відомою величиною кроку перемикання для кожного кута, можна давати

точне положення радіозонда при кожному измеренном значенні помилки. Але нахил пеленгаційної характеристики залежить від рівня сигналу приходить з радіозонда, а цей рівень різний для різних радіозондов і змінюється з видаленням радіозонда від радіолокатора.

Ввести величину кроку перемикавання в розрахунок кутів також не виходить через те, що обчислення значення кроку перемикавання для кожного кута призводить до великих обчислювальних витрат, а використання таблиці заздалегідь обчислених значень до збільшення використовуваного обсягу пам'яті, за конструктивними особливостями комплексу МАРЛ, через низьку продуктивність бортового комп'ютера – реалізувати неможливо.

Тому був розроблений алгоритм, що дозволяє проводити вимірювання нахилу пеленгаційної характеристики під час супроводу радіозонда, звести до мінімуму вплив величини кроку перемикавання і що не вимагає великих обчислювальних потужностей.[13]

Алгоритм полягає в послідовній серії вимірювань пеленгаційних помилок при зміні кута щодо заданого положення променя із заданою дискретністю. Положення променя для кожного з послідовних перемикань складе:

$$\alpha_n = \alpha_{нач} + \Delta\alpha + \delta\alpha_n , \quad (3.17)$$

де  $\alpha_n$  - положення променя після перемикавання;

$\Delta\alpha$  - помилка в положенні променя обумовлена дискретністю перемикавання;

$\delta\alpha$  – величина зміни кута.

Результуюче положення променя складе:

$$\alpha_{рез} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \alpha_n . \quad (3.18)$$

Помилка в кінцевому положенні променя буде залежати від кількості перемикань, величини зміни кута і помилки в положенні променя при кожній

зміні. При зміні променя на рівні за значенням, але протилежні за знаком величини, помилку можна записати як:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^N \Delta\alpha_n. \quad (3.19)$$

Так як помилка перемикання променя нерівномірна і може складати від  $0,01^\circ$  до  $0,64^\circ$ , то можна підібрати значення величини зміни кутів послідовного перемикання і кількість перемикачів таким чином, що помилка середнього положення променя буде мінімальна.

Для реалізації алгоритму була обрана серія з п'яти перемикачів з величиною перемикання дорівнює  $1^\circ$ :

- за формулами (3.13), (3.14), розраховується фазовий розподіл для можливого кута знаходження радіозонда;
- додатково розраховується фазовий розподіл, що дає зміна обчисленого значення кута на  $1^\circ$  і на  $2^\circ$ ;
- відповідно до розрахованими значеннями, положення променя АФАР послідовно змінюється на  $+2^\circ$ ,  $+1^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-1^\circ$ ,  $-2^\circ$  відносно заданого кута по азимуту і куту місця, кожен раз після зміни положення променя вимірюються кутові помилки. Так як величина зміни кута відома і зміна відбувається за обома кутах, то помилка зміни кута на  $1^\circ$  і на  $2^\circ$  складе не більше  $0,1^\circ$ ;
- вимірюються значення помилок, по 5 виміряним точкам, для кута місця і азимута, будується екстрапольована пеленгаційної характеристика поблизу поточного положення кута;
- обчислюється середнє значення кутових помилок. При цьому вплив величини кроку перемикання після обчислень зменшено за рахунок серії вимірювань кутових помилок (по суті, відбувається усереднення положення радіозонда щодо основного напрямку променя АФАР);



– з огляду на заданий кут, усереднену помилку і вимірний нахил пеленгаційної характеристики, обчислюється дійсний стан кута.

Використовуючи (3.15) - (3.16) і (3.17) - (3.19), оцінимо загальну помилку обчислення напрямлення на радіозонд:

помилка напрямку при перемиканні на відповідні кути складе:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha_{\text{макс}_0}; \\
 \alpha_2 &= \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha_{\text{макс}_{+1}} + 1^\circ; \\
 \alpha_3 &= \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha_{\text{макс}_{-1}} - 1^\circ; \\
 \alpha_4 &= \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha_{\text{макс}_{+2}} + 2^\circ; \\
 \alpha_5 &= \alpha_{\text{нач}} + \Delta\alpha_{\text{макс}_{-2}} - 2^\circ.
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Результатний кут:

$$\alpha_{\text{рез}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5}{5}
 \tag{3.21}$$

На рис. 3.6 бачимо величину кроку перемикання, при зміні кута місця про значенні азимута  $0^\circ$  до нормалі.

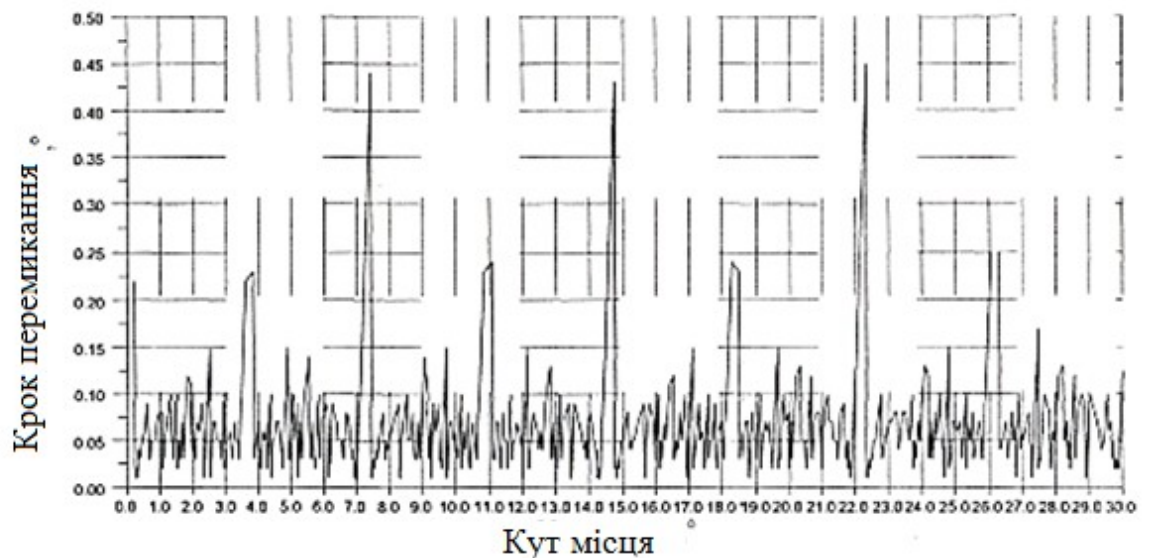


Рисунок 3.6 – Величина кроку перемикання при зміні кута місця при значенні азимута  $0^\circ$  до нормалі

Помилка напрямлення променя буде дорівнювати:

$$\delta_{\text{макс}} = \frac{1}{2} \left( \frac{4\Delta\alpha_{\text{макс}\pm 1,2}}{5} + \frac{\Delta\alpha_{\text{макс}0}}{5} \right). \quad (3.22)$$

З огляду на відповідні максимальної помилку перемикання променя  $0,45^\circ$ , рис. 3.6, помилки перемикання кутів рівні  $0,05^\circ$ , отримаємо що значення максимальної помилки при такому способі вимірювань складе

$$\delta_{\text{макс}} = \frac{1}{2} \left( \frac{4 * 0,05}{5} + \frac{0,45}{5} \right) = 0,065. \quad (3.23)$$

Для перевірки розрахунків було проведено моделювання алгоритму, де шукали величину кроку перемикання при зміні кута місця при значенні азимута  $1^\circ$  до нормалі та величину кроку перемикання при зміні кута місця при значенні азимута  $2^\circ$  до нормалі. Результати моделювання представлені на рис. 3.7 та на рис. 3.8.

За рисунком видно, що помилка перемикання не перевищує  $0,065^\circ$ , що підтверджує вищенаведені розрахунки.[14]

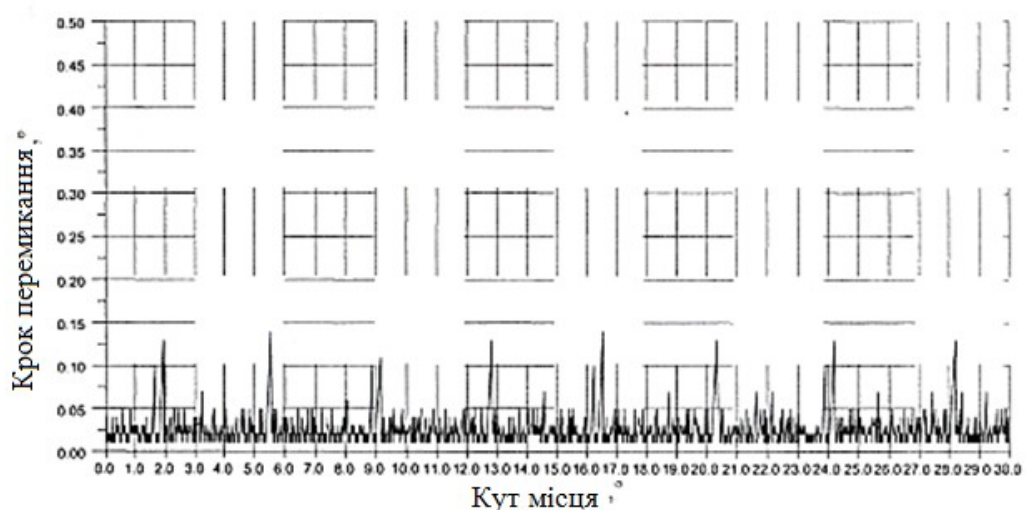


Рисунок 3.7 – Величина кроку перемикання при зміні кута місця при значенні азимута  $1^\circ$  до нормалі

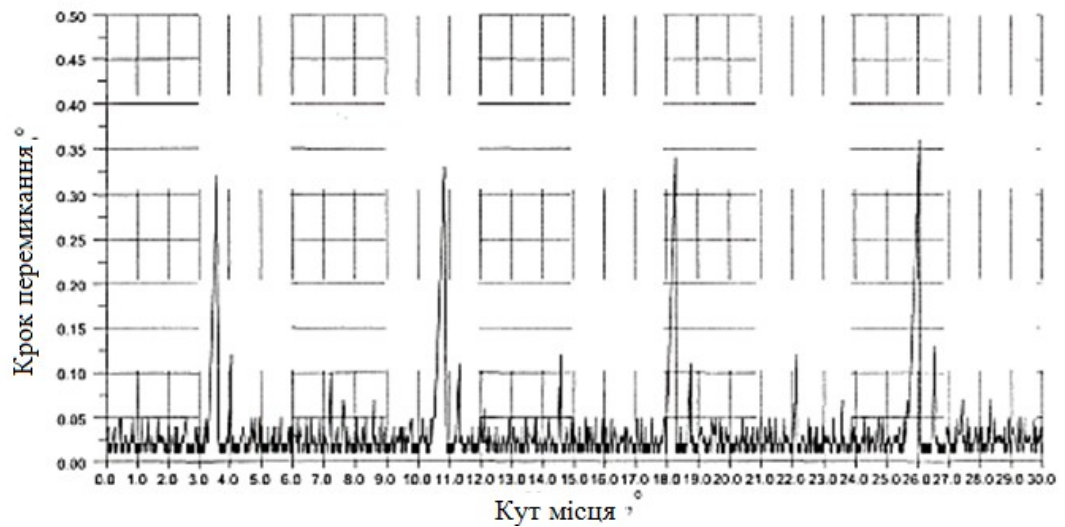


Рисунок 3.8 – Величина кроку перемикання при зміні кута місця при значенні азимута  $2^\circ$  до нормалі

На рис. 3.9 зображена отримана помилка при зміні кута місця для алгоритму з послідовним перемиканням променю.

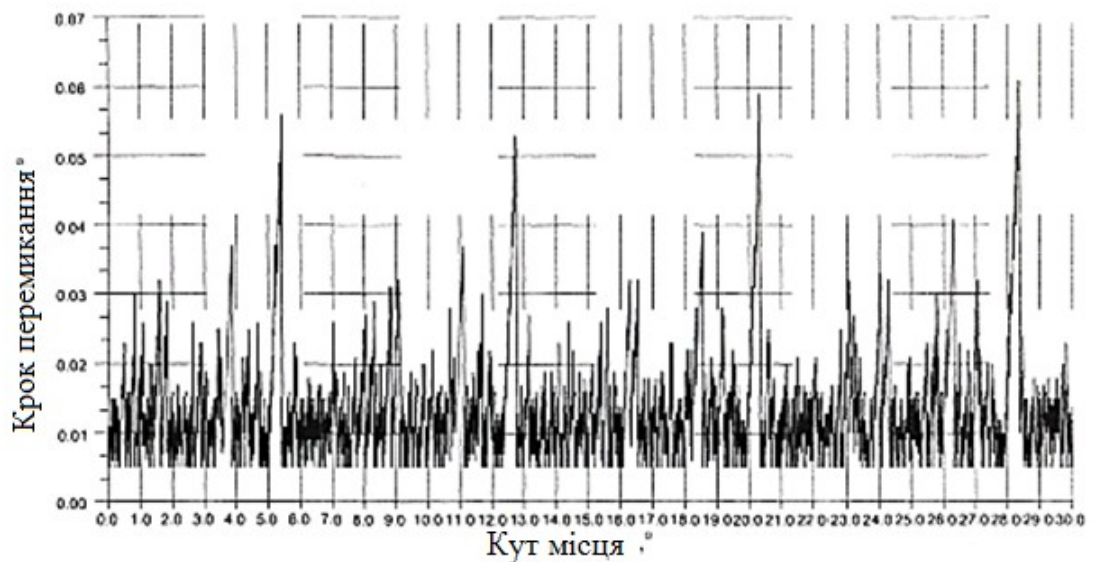


Рисунок 3.9 – Помилка підключення при зміні кута місця для алгоритму з послідовним перемиканням променю

Одним з критеріїв оцінки працездатності і точності супроводу по кутах радіолокатора є супровід Сонця і оцінка якості супроводу. Тому в якості одного з випробувань запропонованого алгоритму було проведення супроводу Сонця.

На рис. 3.10 наведено графік залежності середньоквадратичного відхилення при супроводі Сонця старим і новим алгоритмами. За графіками видно, що точність вимірювання кута місця при супроводі Сонця підвищилася.

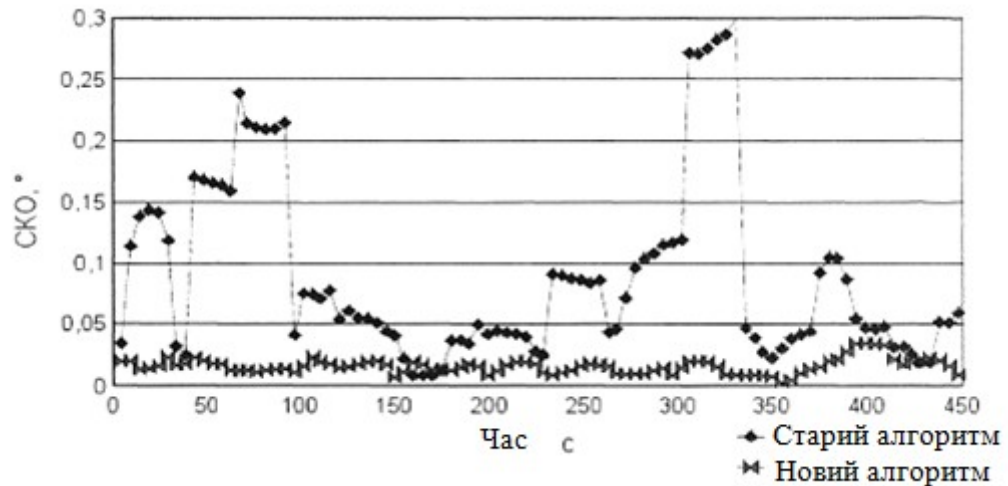


Рисунок 3.10 – Середньоквадратичне відхилення при супроводі Сонця старим і новим алгоритмами.

Як випробувань були також проведені порівняльні випуски радіозондов на АВК-1 і МАРЛ при використанні двох різних алгоритмів вимірювання кутів. На рис. 3.11 наведено порівняльний графік для МАРЛ з різними алгоритмами і АВК-1. На графіку показано середнє абсолютних значень відхилення точок даних від середнього значення траєкторії в градусах, які відповідають даним польоту радіозонда на висоті приблизно 16 км (від 3200 секунд).

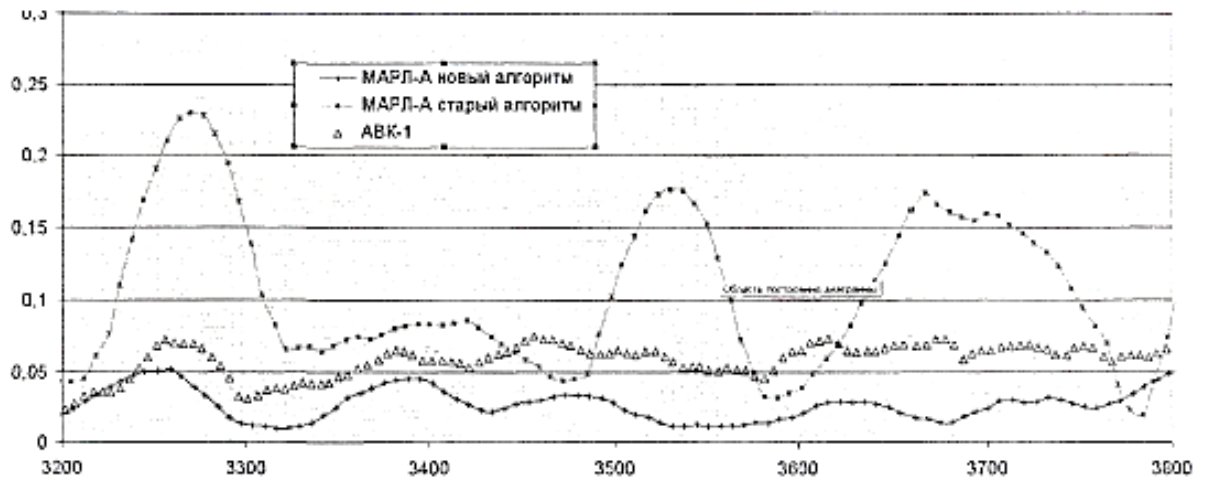


Рисунок 3.11 – Середнє абсолютних значень відхилення точок даних від середнього значення траєкторії

За побудованими залежностями видно, що новий алгоритм вимірювання кутів дає точність майже в 4 рази краще, ніж попередній алгоритм і практично в 2 рази краще, ніж АВК-1.

При порівнянні з АВК-1 треба також враховувати, що випробування проводилися при проведенні спареного випуску, при одночасному супроводі двома системами, АВК-1 і МАРЛ, двох радіозондів, підвішених на одну оболонку.

Так як радіозонд, супроводжуваний комплексом МАРЛ, підвішений на 10 метрів нижче, а при польоті радіозонди здійснюють коливальні рухи, які збільшують відхилення по кутах, то можна сказати, що помилка супроводу у МАРЛ з новим алгоритмом в порівнянні з АВК-1 значно менше. [17]

Таким чином, результати випробувань показали, що система вимірювання кутів, що використовує дану алгоритм, підвищує точність вимірювання для радіолокатора МАРЛ приблизно в 4 рази по відношенню до попередньої системи вимірювання кутів і як мінімум в 2 рази по відношенню до системи вимірювання, яка застосовується в радіолокаторі АВК-1.[16]

### 3.3 Особливості проведення автоматичного пошуку радіозондів

Одна з основних проблем при випусках радіозондів - це відсутність прямої видимості радіозонда і наявність додаткових радіоперешкод з різних напрямків.

Такі ситуації можливі при проведенні аерологічних випусків зі станцій, що знаходяться у великих населених пунктах. На цих станціях, як правило, є проблеми із завадами базових станцій сотових операторів, а майданчик для випуску радіозонда знаходиться на відстані близько 200м і закрита будівлями.

Розглянемо ситуації, які можуть виникнути при проведенні автоматичного пошуку.[18]

Будемо вважати, що команда до початку автоматичного пошуку може бути дана оператором тільки з клавіатури управляючого комп'ютера.

Тоді можливі три варіанти початку проведення автоматичного пошуку:

– включення автоматичного пошуку в момент пуску радіозонда. Тоді, за винятком, може бути, першої точки, всі крапки являються однозначними розрахункам положень радіозонда;

– включення автоматичного пошуку із затримкою після початку випуску радіозонда. Всі виміряні значення також дійсні, але частина значень загублена. При такому варіанті виникає необхідність відновлення пропущених даних за допомогою апроксимації початкової ділянки траєкторії;[19]

– включення автоматичного пошуку до випуску радіозонда.

Це найбільш складний варіант, так як необхідні передпольотний процедури (Перевірка радіозонда, прив'язування до оболонки) займають додатковий час. Під час підготовчих робіт радіозонд може перебувати в приміщенні або за радіонепрозачним перешкодою (наприклад двері газогенераторної станції) і радіолокатор буде фіксувати сигнал, відбитий від місцевих предметів.

Положення радіозонда при цьому може не змінюватися, а кути, виміряні радіолокатором, мінятися досить значно. Така різноманітність умов, які можуть відбуватися при запуску радіозонда, призводить до необхідності моделювання траєкторії польоту радіозонда в реальному масштабі часу. Розглянемо способи визначення положення радіозонда в просторі при реалізації алгоритмів автоматичного пошуку.

Визначення положення радіозонда в просторі проводиться з використанням механічного обертання антени по азимуту і одночасному скануванням кута місця електронним променем. Реалізація алгоритмів в АРВК МАРЛ істотно ускладнюється обмеженнями обчислювальної потужності і можливостями передачі даних бортового комп'ютера комплексу. При проектуванні комплексу для комп'ютера був обраний контролер, що забезпечує роботу в широкому діапазоні температур, при цьому високі вимоги до швидкодії не висувалося.

Комп'ютер виконаний на базі промислового контролера фірми "Octagon", що працює на процесорі 1386, під керуванням операційної системи MS-DOS. Процесор контролера здатний перебудовувати фазовий розподіл АФАР з метою створення необхідної діаграми спрямованості, але швидкодії для вирішення інших завдань у нього недостатньо, відповідно істотним недоліком такого комп'ютера є його невисока продуктивність.

Особливість першого реалізованого в комплексі МАРЛ алгоритму автоматичного пошуку полягає в тому, що вірогідне положення радіозонда, для кожного повного обороту антени по азимуту, визначається на бортовому комп'ютері радіолокатора. Для пошуку використовується вузька діаграма спрямованості, ширина діаграми по азимуту становить  $12^\circ$ , а за кутом місця  $10^\circ$ . Антена сканує простір з роздільною здатністю  $5^\circ$  по куту місця і  $6^\circ$  по азимуту. Сектор сканування по куту місця становить  $85^\circ$ , а по азимуту  $360^\circ$ . Таким чином, швидкість отримання даних за оборот антени становить 1020 вимірювань або з урахуванням швидкості обертання дорівнює  $60^\circ$  в секунду - 170 вимірювань в секунду.

Для обчислення положення необхідно наявність інформації про азимут, кута-місця і рівні сигналу. Загальний пакет даних, що передаються з бортового комп'ютера дорівнює 100 бітам. Для передачі всіх вимірювань на комп'ютер управління необхідна пропускна здатність  $170 * 100 = 17000$ біт / сек. Пропускна здатність каналу передачі даних з бортового на керуючий комп'ютер становить 19200біт / сек. При цьому процесор контролера повинен встигнути обробити і передати такий потік даних з необхідною швидкістю, але часу на обробку практично не залишається. Таким чином, передача кожного виміряного значення рівня сигналу, при заданих кутах для діаграми спрямованості, не може бути реалізована через низьку швидкості обробки і передачі даних на нижній комп'ютер. Тому алгоритм автоматичного пошуку був реалізований на бортовому комп'ютері і полягає в наступному:[20]

- по попередньо розрахованим фазовим розподілом для вузького променя, для значень від  $-5^\circ$  до  $+80^\circ$  по куту місця, в постійну пам'ять бортового комп'ютера записується таблиця значень;

- при виконанні випуску включається механічне обертання антени по азимуту;

- для кожного табличного значення виставленого кута, в процесі обертання, вимірюється рівень сигналу. При такому способі управління, рух променя відбувається за пилкоподібної траєкторії. Різниця між виставленими значеннями по куту місця становить  $5^\circ$  а по азимуту  $6^\circ$ . Так як ширина діаграми спрямованості по азимуту становить  $12^\circ$ , а за кутом місця  $10^\circ$ , то цього цілком достатньо для того, щоб знайти максимум рівня сигналу;

- на кожному оберті знаходиться максимум виміряного рівня сигналу;

- значення рівня і кутів передаються на комп'ютер обробки. Передача пакета даних відбувається 1 раз за оборот;[22]

- автоматичний пошук триває до тих пір, поки максимум рівня сигналу, виміряний за три оберти поспіль, не буде знаходитися в межах різниці обох кутів дорівнює 0;



– проведення автоматичного пошуку закінчується, промінь радіолокатора виставляються в спрямування отриманих кутів, включається автоматичне супровід.

Алгоритм показав хороші результати при відсутності перешкод великої потужності і в даний час використовується на деяких аерологічних станціях. При наявності джерела перешкод, з'являється ймовірність знаходження радіолокатором цього джерела і помилкового спрацьовування алгоритму. Для виключення помилкових спрацьовувань за іншими джерелами сигналів необхідно застосовувати додаткові критерії і способи обробки даних, але введення додаткової обробки вимагає більшої кількості обчислень. Бортовий комп'ютер цього не дозволяє.

Для зменшення впливу перешкод запропонований алгоритм, який використовує можливість проводити реконфігурацію АФАР і використовувати для побудови діаграми спрямованості не всі випромінювачі антеною решітки, а тільки їх частина. При цьому діаграма і пеллеіаціонні характеристики по угломестной координаті антени розширюються, зменшується кількість вимірювань, необхідних для знаходження зонда по вертикальному куту, відповідно зменшується число необхідних для передачі пакетів даних. З'являється можливість передавати кожне значення кута.

Для точного знаходження положення радіозонда на додаток до кутів повинні використовуватися пелегаційнні помилки. Для реалізації алгоритму була побудована діаграма спрямованості, сформована з 10 центральних елементів, розташованих в одну лінію по горизонталі.

Діаграма спрямованості в такому випадку має витягнуту по куту місця і стислу по азимуту форми. Змодельована діаграма спрямованості, показані перерізи діаграм спрямованості по головних осях, отримані на комплексі МАРЛ. Ширина діаграми направленості по куту місця дорівнює  $32^\circ$ , по азимуту  $10^\circ$ .

Швидкість передачі даних з бортового комп'ютера на комп'ютер обробки, як згадувалося вище, становить 19200 біт / сек, при довжині пакета

100 біт передача даних відбувається 19 разів на секунду. З огляду на вищесказане, можна зробити висновок що сформована діаграма спрямованості дозволяє за двома вимірами по куту місця, провести але азимуту 9 вимірів / сек.

Швидкість передачі даних з бортового комп'ютера на комп'ютер обробки, як згадувалося вище, становить 19200 біт / сек, при довжині пакета 100 біт передача даних відбувається 19 разів на секунду. З огляду на вищесказане, можна зробити висновок що сформована діаграма спрямованості дозволяє за двома вимірами по куту місця, провести але азимуту 9 вимірювань / сек.

З огляду на, що швидкість зміни кута по азимуту становить  $60^\circ$  / сек, дозвіл по азимуту складе  $7^\circ$ . Таким чином, необхідна точність по азимуту для супроводу радіозонда в ближній зоні буде досягнута. Для вимірювання положення радіозонда по куту місця необхідно, як було сказано вище, вимірювати і враховувати пеленгаційної помилку. Нахил пеленгаційної характеристики для ближньої зони з включеним аттенюатором, для радіолокатора МАРЛ може становити від 4 до 5 вольт на половину ширини діаграми спрямованості.

При цьому дані вимірних значень при проведенні автоматичного пошуку передаються на комп'ютер обробки, і з'являється можливість додаткової математичної обробки даних.

Як і в попередньому алгоритмі, великий вплив на роботу автопоиска надають дифракційні максимуми, що виникають при зміні кута нахилу променя по куту місця.

Але, так як є можливість додаткової обробки даних в комп'ютері, то інформація по дифракційним максимумів виявляється корисною і додатково використовується для підтвердження отриманих значень кутів. Зокрема, при проведенні автопоиска, при знаходженні радіозонда в головному промені, буде тільки один максимум за амплітудою сигналу, по куту місця і по азимуту, при знаходженні в дифракційних максимумах, максимумів по

амплітуді, по азимутальній координаті вже буде два, а по угломестной один . Знаючи точне знаходження дифракційних максимумів, можна зробити висновок про точний положенні радіозонда. Розроблений алгоритм автопоиска з використанням широкої діаграми спрямованості та інформації по пеленгаційної помилок описується наступним чином:

- 1) формується діаграма спрямованості, з шириною по куту місця  $32^\circ$  і по азимуту  $10^\circ$ ;
- 2) чи включається механічне обертання антеною по азимуту;
- 3) з частотою 19 разів на секунду відбувається періодичне перемикання вертикального кута на  $0^\circ$  і  $30^\circ$ ;
- 4) проводиться вимір рівня сигналу і величини пеленгаційних помилок. Крок вимірів по куту місця становить  $30^\circ$ , по азимуту  $7^\circ$ . Кожне вимірне значення віддаються на комп'ютер обробки;
- 5) у комп'ютері обробки, за отриманими даними значень кутів і пеленгаційних помилок, обчислюються ймовірні точки положення радіозонда в просторі на кожному обороті. За цим точкам вибудовується передбачувана траєкторія польоту, яка перевіряється за критерієм сталості вертикальної швидкості підйому. Виникаючі дифракційні максимуми також дають інформацію по положенню радіозонда, яка використовується в розрахунку траєкторії.
- 6) автоматичний пошук триває до тих пір, поки останні три точки максимумів сигналу не опиняться в секторі кутів  $3^\circ$ .

Відновлення траєкторії польоту радіозонда розділяється на два етапи. На першому етапі проводиться відбраковування завідомо неправдивих точок радіозонданачала випуску.

На другому – визначення моменту випуску радіозондаї при необхідності апроксимація траєкторії польоту.

Розглянемо докладно ситуації, що виникають при підготовці та випуску радіозонда. Як правило, радіозонд включають для передпольотної

перевірки в лабораторних умовах в приміщенні. При роботі автопошука в даному випадку, радіолокатор, що знаходиться в режимі автопоиска, фіксує положення радіозонда.

У приймальню частина комплексу надходить тільки перевідбиттів і ослаблений сигнал радіозонда. Амплітуда такого сигналу у багато разів менше амплітуди сигналу в прямої видимості і це дозволяє забракувати вимірні значення. Після включення, радіозонд переносять на метеорологічну майданчик для підготовки до пуску і перевірки функціонування і порівняння значень метеопараметров, вимірних зондом, з показаннями контрольних приладів на метеоплощадке.

На метеоплощадке радіозонд може бути вже видно в основному пелюстці діаграми. Однак значення виміряного кута місця не змінюються або стрибають від основної пелюстки до дифракційних максимумів, при цьому кути азимута і кута місця можуть приймати тільки фіксовані значення. Відповідно ці значення також можна відфільтрувати. Далі зонд прив'язують до оболонки наповненою воднем і випускають в атмосферу

Програма проведення автопоиска аналізує отримані дані. У режимі реального часу, але отриманих крапках будуються залежності вимірних кутів від часу.

Автопошук припиняється після того, як радіозонд буде перебувати в достатньому видаленні від радіолокатора і кутові переміщення стануть не більше  $3^\circ$  по обом кутах. Після цього відбувається захоплення радіозонда і далі його автоматичне супровід за принципом равносигнальної зони і 5-променевому алгоритму супроводження, дет.

З цього моменту всі отримані точки є свідомо правильними. Вплив перешкод виключається при додатковій обробці. Особливість джерела перешкод в тому, що він не змінює свого положення в просторі і відповідно в отриманих даних легко виділяється.

Дані автопоиска після захоплення повинні бути перевірені і скоректовані. Так як під час проведення автопоиска фіксуються тільки кути,

похила дальність для кожної точки знаходиться з умови, що швидкість підйому радіозонда на оболонці наповненою воднем змінюється в процесі польоту незначно, і може бути обчислена на початковій траєкторії підйому після автоматичного захоплення радіозонда. За відомою швидкості підйому і часу реєстрації вимірювання кута місця обчислюється передбачувана висота, далі будується залежність висоти від часу.[21]

Після обчислення висоти положення радіозонда вноситься поправка по висоті і знаходиться похила дальність до радіозонда для даних вимірювань автопоиска. За залежності висоти від часу і за початковою висоті точки випуску обчислюється час початку випуску.

Обидва алгоритми були апробовані на комплексах МАРЛ, встановлених на аерологічній мережі Росгідромету. Алгоритм, що використовує для пошуку вузький промінь, успішно застосовується в місцях з відносно низьким рівнем перешкод (аерологічні станції в Смоленську, Туапсе).

#### 4 АЛГОРИТМ КОРЕКЦІЇ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ І ПЕЛЕНГАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

В даний час в авіації і космонавтиці все більша увага приділяється проблеми діагностики технічного стану антенних систем (АС) РЛС на етапах як їх розробки, так експлуатації і ремонту. Аналіз численних публікацій показує, що однією з основних проблем залишається вплив обтічника антени на діаграму спрямованості і тим самим на точності характеристики БРЛС. Для вирішення завдань діагностики АС, укритих обтекателями, застосовні ті ж методи, що і для контролю АС. [25]

До них відносяться: радіоголографічна, модуляційні, комутаційні методи і методи реконструктивної діагностики.

За винятком радіоголографічна, все вище перераховані методи є спеціалізованими і застосовними тільки для контролю ФАР.

Радіоголографічна методи є універсальними і придатними для діагностики як антенних решіток, так і антен з безперервним амплітудно-фазовим розподілом (АФР). Крім вирішення діагностичних завдань необхідно здійснювати корекцію тих спотворень які вносить обтічник в діаграму спрямованості.[22]

У зв'язку з цим був розроблений алгоритм корекції АФР системи антена - обтічник на основі алгоритмів оптимального оцінювання АФР в розкриті антени за вимірюваннями поля в ближній зоні із застосуванням методів марковської теорії оцінювання випадкових процесів. Базою для оптимального оцінювання АФАР поля в розкриваючи антени є байесовський підхід теорії статистичних рішень. Байєсівський підхід, базується на отриманні оптимальних в статистичному сенсі оцінок невідомих параметрів, вважаючи останні випадковими величинами з відомим апріорним розподілом.

Моделями випадкових процесів, описують помилки відновлення і вимірювання полів, є гаусові випадковими величинами.

4.1 Вплив початкового фазового розподілу і фазових помилок на активну фазовану антенну решітку

Як вже було сказано, одним з основних завдань при налаштуванні радіолокаційного комплексу МАРЛ для проведення якісного радіозондування атмосфери, є установка початкового фазового розподілу АФАР з тим, щоб зменшити вплив комутаційних і комбінаційних пелюсток і таким чином сформувати діаграму спрямованості з максимальним коефіцієнтом спрямованої дії і неспотвореними пеленгаційної характеристиками.[28]

Спотворені пеленгаційної характеристики не дозволяють точно виміряти положення радіозонда в просторі, і в такий спосіб призводять до низької якості супроводу і недостовірних результатів. Незважаючи на те, що СВЧ блоки проходять настройку фазових затримок до установки на полотно антени, після установки всіх блоків і створення міжблочних з'єднань з'являється необхідність коригування фазових затримок до кожного елемента.

Складна взаємозв'язок між блоками створює свої затримки, що викликає необхідність додаткового налаштування блоків і довжини соединительних кабелів. [27]

Навіть в виробничих умовах така настройка являє собою досить складну задачу, а в польових умовах, при необхідності проведення ремонту та заміни високочастотних блоків, без спеціального устаткування, процедура настройки фазових затримок є нерозв'язним завданням. [24]

У зв'язку з цим виникла необхідність розробки алгоритму та методу програмної настройки діаграми спрямованості шляхом введення корекції початкових значень фаз фазообертача для кожного приймального елемента.

Розрахунок фазового розподілу створюваного в решітці, при наявності ненульового початкового розподілу  $\Phi_{нач}$  а ч докладно наводиться в [9]. Для антеною фазової решітки це розподіл записується в такий спосіб:

$$\Phi_{реал} = \Phi_{нач} + \nu \Delta \phi, \quad (4.1)$$

де  $\nu$  - число перемикання фазообертача з мінімальним зміною фази;

$\phi$  - крок зміни фази фазообертача.

З огляду на, що існують комутаційні фазові помилки, можна записати:

$$\Phi_{реал} = \Phi_{треб} + \Phi_{нач} + \delta \Phi, \quad (4.2)$$

$\Phi_{ТР}$  - необхідний розподіл;

$\delta \Phi$  - комутаційні фазові помилки.

Вираз для діаграми спрямованості з урахуванням початкового розподілу і комутаційних фазових помилок записується як:

$$M_{\beta, \epsilon} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{n,m} e^{i(\Phi(\beta, \epsilon, x, y)_{треб} + \Phi(\beta, \epsilon, x, y)_{нач} + \delta \Phi)}. \quad (4.3)$$

У літературі показано, що при певних умовах придушення комбінаційних і комутаційних пелюсток, незмінності форми діаграми спрямованості при зміні кутових координат, рівномірному амплитудном розподілі, можна визначити оптимальне початкове фазовий розподіл, яке компенсує комутаційні фазові помилки. Для лінійки випромінювачів такий розподіл можна записати:

$$\Phi_{нач} = K \gamma x^2, \quad \gamma = \frac{\lambda \Delta \phi}{2d^2 N 2\pi}, \quad (4.4)$$



$K$  - хвильове число;

$\Upsilon$  - відстань між випромінювачами.

Для решітки випромінювачів:

$$\Phi_{\text{нач}} = K(\gamma_x x^2 + \gamma_y y^2), \quad (4.5)$$

У ньому фазованою антеною решіткою в фазову помилку, окрім комутаційної, буде входити також і помилка фазирования. Для формування необхідної діаграми спрямованості по заданому напрямку, необхідно компенсувати комутаційні помилки і помилки фазирования, тобто необхідно щоб у натуральному вираженні різниця цих помилок дорівнювала 0:

$$\Phi(\beta, c, x, y)_{\text{нач}} - \delta\Phi = 0. \quad (4.6)$$

Таким чином, усунення викривлення діаграми спрямованості, що виникають при використанні АФАР, зводиться до установки початкового фазового розподілу, яке компенсує сумарні комутаційні і фазові помилки. Нижче наводиться алгоритм, розроблений для установки такого розподілу.

#### 4.2. Математична модель активної фазованої решітки

$$x = \begin{bmatrix} 0.756 & 0.311 & -0.045 & -0.401 & -0.757 & -0.312 & 0.044 & 0.400 \\ 0.667 & 0.311 & -0.045 & -0.401 & -0.668 & -0.312 & 0.044 & 0.400 \\ 0.667 & 0.222 & -0.134 & -0.490 & -0.668 & -0.223 & 0.133 & 0.489 \\ 0.578 & 0.222 & -0.134 & -0.490 & -0.579 & -0.223 & 0.133 & 0.489 \\ 0.489 & 0.133 & -0.223 & -0.579 & -0.490 & -0.134 & 0.222 & 0.578 \\ 0.489 & 0.133 & -0.223 & -0.579 & -0.490 & -0.134 & 0.222 & 0.578 \\ 0.400 & 0.048 & -0.312 & -0.668 & -0.401 & -0.045 & 0.311 & 0.667 \\ 0.400 & 0.048 & -0.312 & -0.757 & -0.401 & -0.045 & 0.311 & 0.756 \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0.215 & 0.358 & 0.358 & 0.358 & -0.214 & -0.071 & -0.071 & -0.071 \\ 0.358 & 0.072 & 0.072 & 0.072 & -0.071 & -0.355 & -0.355 & -0.355 \\ 0.072 & 0.501 & 0.501 & 0.4896 & -0.355 & -0.214 & -0.214 & -0.214 \\ 0.215 & 0.215 & 0.215 & 0.215 & -0.214 & -0.500 & -0.500 & -0.4892 \\ 0.358 & 0.358 & 0.358 & 0.358 & -0.071 & -0.071 & -0.071 & -0.075 \\ 0.072 & 0.072 & 0.072 & 0.072 & -0.355 & -0.355 & -0.355 & -0.355 \\ 0.4992 & 0.501 & 0.501 & 0.215 & -0.214 & -0.214 & -0.214 & -0.214 \\ 0.215 & 0.215 & 0.215 & 0.072 & -0.498 & -0.500 & -0.500 & -0.071 \end{bmatrix}$$

f = 1680e6 //Установка частоты

lambda = 3e8/f //Длина волны

K=2\*%pi/lambda //Волновое число

mm — 2 // матрицы положения элементов АФАР

y=matrix(y,8,8)

// Кути сканування

deg = %pi/180

betam = 30

beta2 = betam/2

beta = [0:l/mm:betam-l/mm]

b\_beta = (-beta2+beta)\*deg

```

epsilon_m = 30
epsilon_2 = epsilon_m/2
epsilon = [0:1/mm:epsilon_m-1/mm]
e_epsilon = (-epsilon_2+epsilon)*deg
b0 = 0
e0 = 0
Bbeta = %i*K*(sin(b0*deg)-sin(b_beta)) // розрахунок діаграми направленості
Eepsilon = %i*K*(sin(e0*deg)-sin(e_epsilon))
Bbetal = matrix(Bbeta,beta_m*mm,1)
Eepsilon_l = matrix(Eepsilon,1,epsilon_m*mm)
ones_b = ones(1,epsilon_m*mm)
ones_e = ones(beta_m*mm,1)
n=[1:1:8]
Bbetam = Bbetal * ones_b
Eepsilon_m = ones_e*Eepsilon_l
j1=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j2=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j3=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j4=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j5=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j6=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j7=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
j8=zeros(beta_m*mm,epsilon_m*mm)
for k=1:8,
j_l = j_l + exp(y(k,l)*Bbetam+x(k,l)*Eepsilon_m

```

```

j2 = j2 + exp(y(k,2)*Bbetam+x(k,2)*Epsilon)
j3 = j3 + exp(y(k,3)*Bbetam+x(k,3)*Epsilon)
j4 = j4 + exp(y(k,4)*Bbetam+x(k,4)*Epsilon)
j5 = j5 - exp(y(k,5)*Bbetam+x(k,5)*Epsilon)
j6 = j6 + exp(y(k,6)*Bbetam+x(k,6)*Epsilon)
j7 = j7 + exp(y(k,7)*Bbetam+x(k,7)*Epsilon)
j8 = j8 + exp(y(k,8)*Bbetam-x(k,8)*Epsilon)
end

Aj=j1+j2
Gj=j3+j4
Cj=j5H-j6
Dj=j7+j8
Sj=Aj+Gj-fCj+Dj
Mj=abs(Sj)
Uj1=%i*Aj+%i*Gj+Cj+Dj
Uj2=Aj+%i*Gj+%i*Cj+Dj
Uj3=-Aj+Gj+%i*Cj+%i*Dj
Uj4=%i*Aj+Gj+Cj+%i*Dj
Vj1=abs(Uj1)
Vj2=abs(Uj2)
Vj3=abs(Uj3)
Vj4=abs(Uj4)
Vj0=(Vj1+Vj2+Vj3+Vj4)/4
// розрахунок дискримінаційної характеристики
ul=zeros(betam*mm,epsilon*mm)

```

```

u2=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u3=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u4=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u5=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u6=zeros (betam*mm,epsilon*mm)
u7=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u8=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
//for k=1:8,
ul = ul + exp(y(2,2)*Bbetam+x(2,2)*Eepsilon)
u2 = u1 + exp(y(6,2)*Bbetam+x(6,2)*Eepsilon)
u3 = u3 + exp(y(2,3)*Bbetam+x(2,3)*Eepsilon)
u4 = u3 + exp(y(6,3)*Bbetam+x(6,3)*Eepsilon)
u7 = u7 + exp(y(5,7)*Bbetam+x(5,7)*Eepsilon)
u8 = u7 + exp(y(1,7)*Bbetam+x(1,7)*Eepsilon)
u5 = u5 + exp(y(5,6)*Bbetam+x(5,6)*Eepsilon)
u = u5 4- exp(y(1,6)*Bbetam+x(1,6)*Eepsilon).
//end

u2=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u4=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u6=zeros(betam*mm,epsilon*mm)
u8=zeros(betam*mm,epsilon*mm)

A=u1+u2
G=u3+u4
C=u5+u6
D=u7+u8

```

$$S=A+G+C+D$$

$$M=\text{abs}(S)$$

$$U1=0i*A+0i*G+C+D$$

$$U2=A+0i*G+0i*C+D$$

$$U3=A+G+0i*C+0i*D$$

$$U4=0i*A+G+C+0i*D$$

$$V1=\text{abs}(U1)$$

$$V2=\text{abs}(U2)$$

$$V3=\text{abs}(U3)$$

$$V4=\text{abs}(U4)$$

$$V0=(V1+V2+V3+V4)/4$$

$$v1=V1-V0$$

$$v2=V2-V0$$

$$v3=V3-V0$$

$$v4=V4-V0$$

$$\text{betas}=(v1-v3) ./(V0.^{0.8})$$

$$\text{epsilons}=(v2-v4) ./(V0.^{0.8})$$

$$\text{ze} = \text{zeros}(1, \text{mm} * \text{epsilon}_m)$$

$$\text{ze}(1, \text{mm} * \text{epsilon}_m / 2) = 1$$

$$EE = \text{ze} * V0$$

$$EE_j = \text{ze} * V_j$$

$$\text{plot2d}(\text{epsilon}, 10 * \log_{10}(EE_j / 45))$$

$$\text{scf}(4)$$

$$\text{plot2d}(\text{epsilon}, 10 * \log_{10}(EE / 45))$$

$$\text{scf}(5)$$

```

zb = zeros(mm*betam,1)
zb(mm*betam/2,1)=1
BB=V0*zb
BBj=VjO*zb
plot2d(beta,10*log10( BBj/45))
plot2d(beta,10*log10( BB/45))
xlabel('beta','error')

```

## ВИСНОВКИ

За вісімдесят років свого розвитку радіозондування атмосфери пройшло цілий ряд якісних етапів, які характеризувалися збільшенням висоти, автоматизації вимірювань і обробки даних. За ці роки метод радіозондування атмосфери зазнав величезних змін - від прийому інформації на слух, громіздкою ручною обробкою та передачі даних до повністю автоматичного прийому, обробки та відправки аерологічних повідомлень у спеціалізовані канали зв'язку. Радіозонд пройшов шлях від приладу вагою близько 2-х кг до мініатюрного пристрою легше 200 гр.

З виконаного огляду сучасного стану техніки радіозондування видно, що на основі тісної співпраці та взаємодії промислових підприємств з науковим колективом Вузу вдалося в короткі терміни створити якісно нову апаратуру радіозондування атмосфери та програмне забезпечення до неї, що відповідають сучасним вимогам. В результаті виконаного комплексу робіт вперше створено навігаційний АРЗ з сучасним цифровим радіоканалом і технічними характеристиками, що перевершують вітчизняні радіолокаційні АРЗ.

Перспектива пов'язана з модернізацією існуючих і розробкою нових систем радіозондування шляхом застосування автодинних НВЧ генераторів в якості мініатюрних і дешевих прийомо-передавачів - відповідачів сигналів запросного радіолокатора. Представляє інтерес також розробка цих генераторів в гібридно-монолітному виконанні на базі польових НВЧ транзисторів, які в порівнянні з біполярними транзисторами мають більш високий ККД. Крім того, враховуючи високі показники цих транзисторів в освоєнні високих частот, вважаємо можливим перехід систем радіозондування на використання радіохвиль короткохвильової частини сантиметрового і навіть міліметрового діапазонів довжин хвиль випромінювання. В цих діапазонах РЛС по ряду параметрів і характеристик, в тому числі за масою і габаритами, мають значні переваги.

Активна фазированная антенна решітка (АФАР) - фазована антенна решітка, в якій напрям випромінювання і (або) форма діаграми спрямованості регулюються зміною амплітудно-фазового розподілу струмів або полів збудження на активних випромінюючих елементах .

Активна фазированная антенна решітка конструктивно складається з модулів, які об'єднують випромінюючий елемент (або групу випромінюючих елементів) і активні пристрої (підсилювальні, генераторні або перетворювальні). Ці пристрої можуть у найпростішому випадку посилювати передається або випромінюючим елементом сигнал, а також здійснювати перетворення частоти сигналу, генерувати (формувати) сигнал, перетворювати сигнал з аналогової в цифрову форму і (або) з цифрової в аналогову. Для спільної узгодженої роботи всі модулі АФАР повинні бути об'єднані ланцюгом розподілу сигналу збудника (у режимі прийому - ланцюгом збору сигналу в приймальний пристрій), або робота модулів повинна бути синхронізована від єдиного джерела.

Радіозондування атмосфери. Для розрахунків прогнозів погоди як синоптичними, так і гідродинамічними методами використовуються дані про поточний стан атмосфери і різні прогностичні моделі. Поточний стан



атмосфери визначається на основі різних видів спостережень, у тому числі наземних, повітряних, морських і супутникових. При цьому ключову роль відіграють дані радіозондирования атмосфери.

Радіозондування представляє найбільш точні результати безпосередніх контактних вимірювань термодинамічних параметрів атмосфери на висотах від рівня землі до 35 ... 40 км.

Ці дані містять інформацію про вертикальних профілях температури, вологості, швидкості і напрямку вітру, а також про тиск повітря на заданих рівнях.

Для отримання інформації в атмосферу випускаються у вільний політ невеликі легкі вимірювальні прилади, забезпечені датчиками різних метеорологічних параметрів і радіопередавачем.

Такі прилади, звані радіозондах, піднімаються до великих висот за допомогою спеціальних латексних куль (оболонок), що наповнюються легким газом - воднем або гелієм.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень і аналізу поточних алгоритмів, були розроблені і реалізовані алгоритми підвищення точності і достовірності вимірювання координат в системі радіозондирования атмосфери МАРЛ.

Розроблено алгоритм вимірювання кутів, що дозволяє отримати точність вимірювань вище, ніж в існуючих вітчизняних системах радіозондирования атмосфери. Були проведені випробування, які показали, що точність вимірювання системи покращилася. В даний час відбувається впровадження нового алгоритму вимірювання кутів на вже встановлені і поставляються комплекси радіозондування атмосфери МАРЛ.

У даному проекті була розглянута можливість корекції фазового розподілу АФАР з метою зменшення помилок супроводу через неправильно сформованої діаграми спрямованості. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує алгоритм формування початкового фазового розподілу для створення неспотвореної діаграми спрямованості АФАР. Розроблено

методику корекції фазового розподілу АФАР для радіолокаційного комплексу МАРЛ.

Результати, отримані в цьому розділі, дозволили налагодити настройку АФАР МАРЛ при виробництві, а також відновити роботу встановлених на аерологічної мережі радіолокаторів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В.Э. Иванова. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 606 с.
2. Белов Н.П. Метеорологические радиолокационные станции: Учебное пособие – Ленинград: Гидрометиздат, 1976. 368 с.
3. Перелигін Б.В., Велика О.І. Методи дистанційного зондування навколишнього середовища: Конспект лекцій-Одеса: ОДЕКУ, ТЕС 2012. 180 с.
4. Зайцев Н.А. Аерология. – Л.: Гидрометиздат, 1990. 325 с.
5. Ефимов А.А. Принципы работы аерологического информационного вычислительного комплекса АВК-1: Учебное пособие.- Москва: Гидрометиздат, 1989. 148 с.
6. Молчанов П.А. О точности зондирования атмосферы методом радиозондов // Метеорология и гидрология. – 1936. – № 2. – С. 30–41.
7. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. 215 с.
8. Марфенко О.В. Оценка точности результатов радиозондирования на аерологической сети Советского Союза // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 3. – С. 14–21.
9. Фридзон М.Б. Оценка погрешности измерений температуры и влажности при радиозондировании на аерологической сети СССР // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 5.
10. Азаров М. А., Азаров А. С, Кочин А. В. О модернизации наземных комплексов аерологического зондирования // Научный вестник МГТУ ГА. 1999. Т. 18.

11. Бененсон Л. С. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования: Обзор зарубежных работ. Москва: Радио и связь, 1966. 78 с.
12. Коростылев А. А., Ключев Н. Ф., Мельник Ю. А. Теоретические основы радиолокации. Советское радио, 1978. f 355 с.
13. Гостюхин В. Л., Гринева К. И., Трусов В. Н. Вопросы проектирования активных ФАР с использованием ЭВМ. Москва: Радио и связь, 1983.
14. Хансен Р. К. Сканирующие антенные системы свч. Москва: Советское радио, 1966.
15. INRIA. Scilab. The Scilab Consortium On INRIA's site Domaine de Voluceau, Rocquencourt - B.P. 105: <http://www.scilab.org>.
16. Радио и связь, 1994. ISBN: 5-526-00404-2.
17. Ахмеев А.В., Дідик Ю.І., Иванов В.Е. Аерологічної радіолокатор як засіб вимірювань // Вимірювальна техніка. 2003.№6.
18. Повчання гідрометеорологічним станціям і постам, Випуск 4, Аерологічні спостереження на станціях, частина III, температурно-вітрове зондування // РД 52.11.650.2003.
19. Вельміскін Д.І., Бучинська І. В., Муркина К.С. Вестник.2015. №19., 5 с.
20. Єфімов О.О., Принцип роботи аерологічної інформаційно-обчислювального комплексу АВК-1, Московський гідрометеорологічний технікум, 1989.
21. INRIA. Scilab. The Scilab Consortium On INRIA's site Domaine de Voluceau, Rocquencourt - B.P.105: <http://www.scilab.org>.
22. Curry G.R. RadarSystem Performance Modeling. ARTECH HOUSE, 2005. ISBN: 1-58053-816-9.
23. Skolnik M.I. Radar HANDBOOK. McGraw-Hill, 2008. IS-BN: 978-0-07-148547-0.

24. Филлипов В.С., Пономарьов Л.І., Гриньов А.Ю. Антени та пристрої НВЧ. Проектування фазованих антенних решіток. Москва: Радио и связь, 1994. ISBN: 5-526-00404-2.
25. Вендік О.Г., Парнес М.Д., АНТЕНИ З ЕЛЕКТРИЧНИМ сканування. Радянське радіо, 2001.
26. Mailloux R.J. Phased Array Antenna HandBook. ARTECH HOUSE, INC, 2005. ISBN: 1-58053-689-1.
27. Аміт Н., Галиндо В., Ву Ч. Теорія і аналіз фазованих антенних решіток. Москва: Мир, 1974. 656 с.
28. Hansen R.C. Phased Array Antennas. John Wiley & Sons, Ltd, 1998.. ISBN: 0-471-22421-9.

## Додаток А

## Графічна частина магістерської роботи

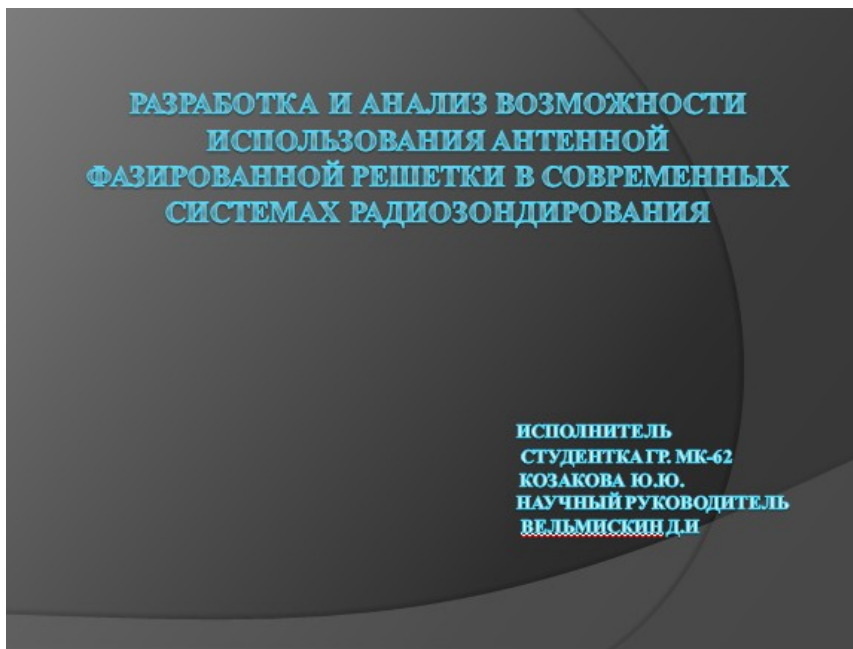


Рисунок А.1 – Головна сторінка презентації

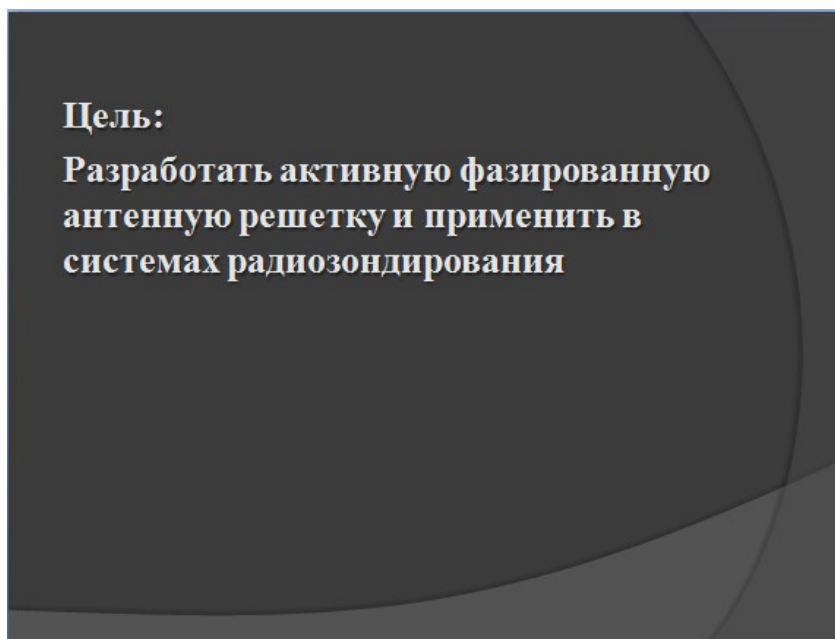


Рисунок А.2 – Мета

ФАР – антенна разделена на ячейки, образующие регулярную решётку. В каждой такой ячейке находится специальный прибор – фазовращатель, который может на заданный угол изменять фазу электромагнитной волны. “Обработанные” сигналы из ячеек поступают по волноводам на приёмник, и сигнал на входе приёмника образуется “суммированием” сигналов из ячеек решётки.

Рисунок А.3 – Фазована антенна решётка

Можно выделить три типа схем ФАР :

- пассивная;
- активная;
- полуактивная.

Рисунок А.4 – Типы схем ФАР

Ключевые преимущества полноценной АФАР такие:

- гораздо выше надёжность (много независимых передатчиков и приёмников);
- появляется возможность работать на нескольких частотах сразу (приёмопередатчики независимы);
- выше чувствительность (потому что сигнал “детектируется” сразу приёмником в базовом элементе).

Рисунок А.5 – Переваги АФАР

**Активная ФАР (АФАР)** – это следующий шаг в развитии пассивной. Она позволяет увеличить дальность обнаружения целей, распознавать и классифицировать групповые и одиночные объекты, одновременно атаковать несколько целей.

Рисунок А.6 – Активна ФАР



# Главное окно программы

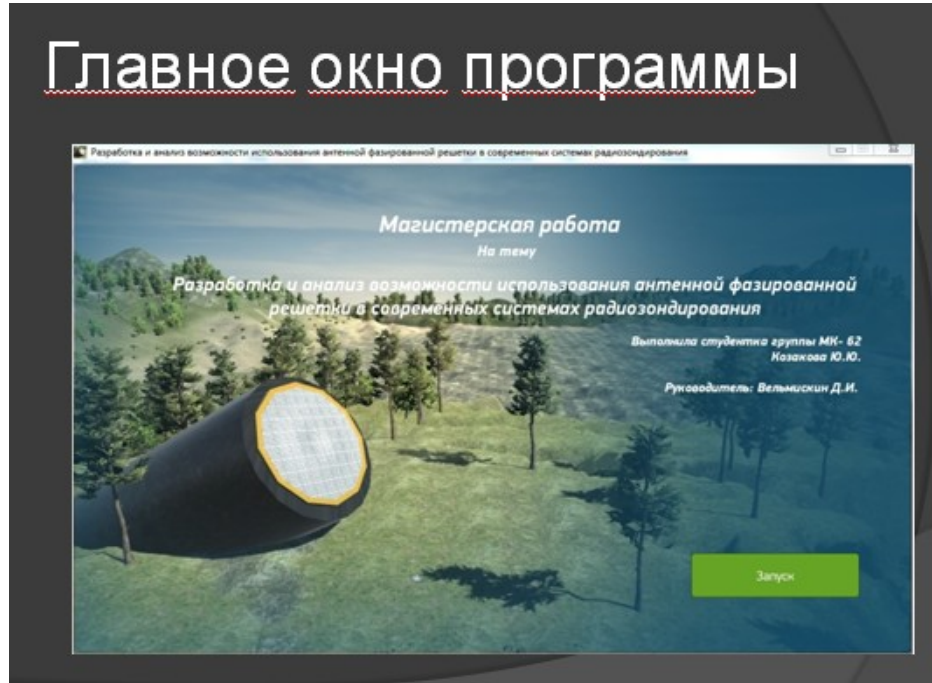


Рисунок А.7 – Головне вікно програми

# Рабочее окно программы

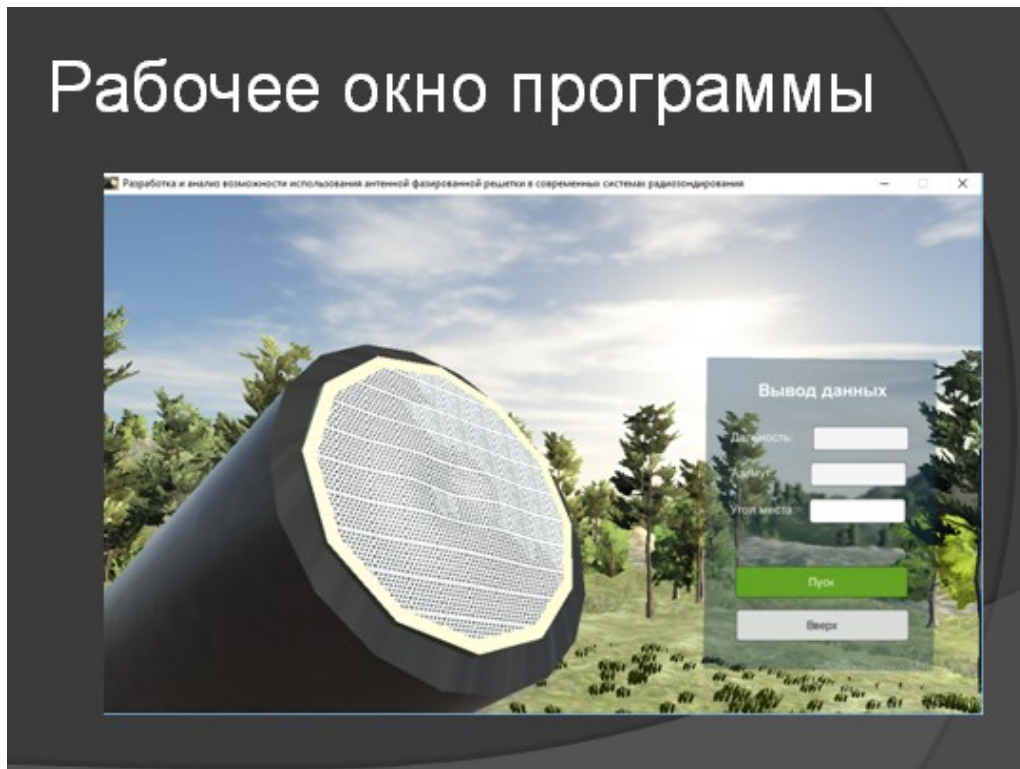


Рисунок А.8 – Робоче вікно програми

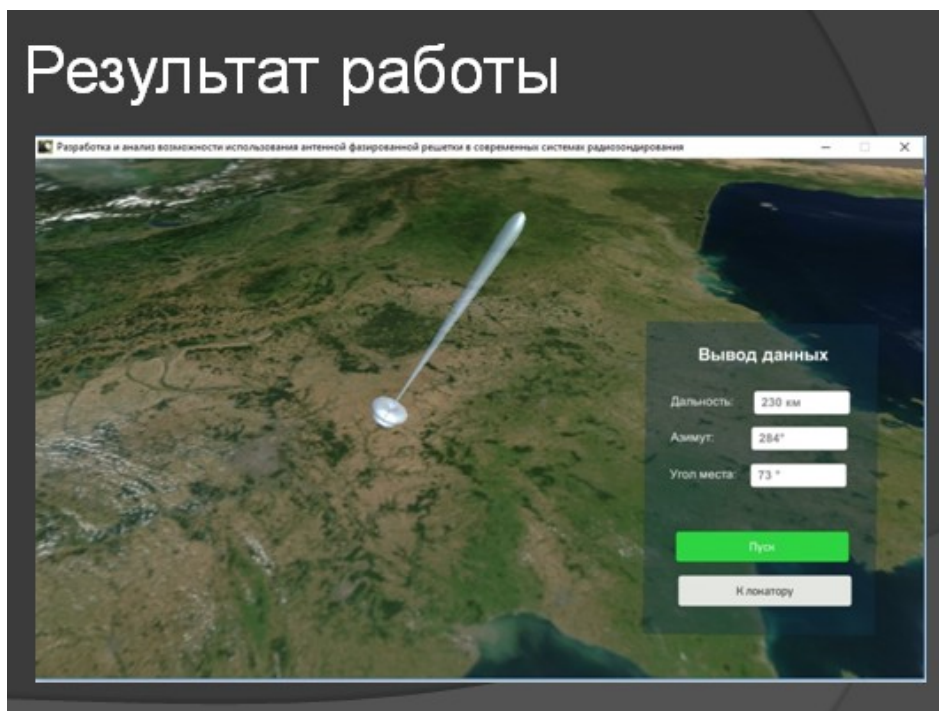


Рисунок А.9 – Результат работы программы

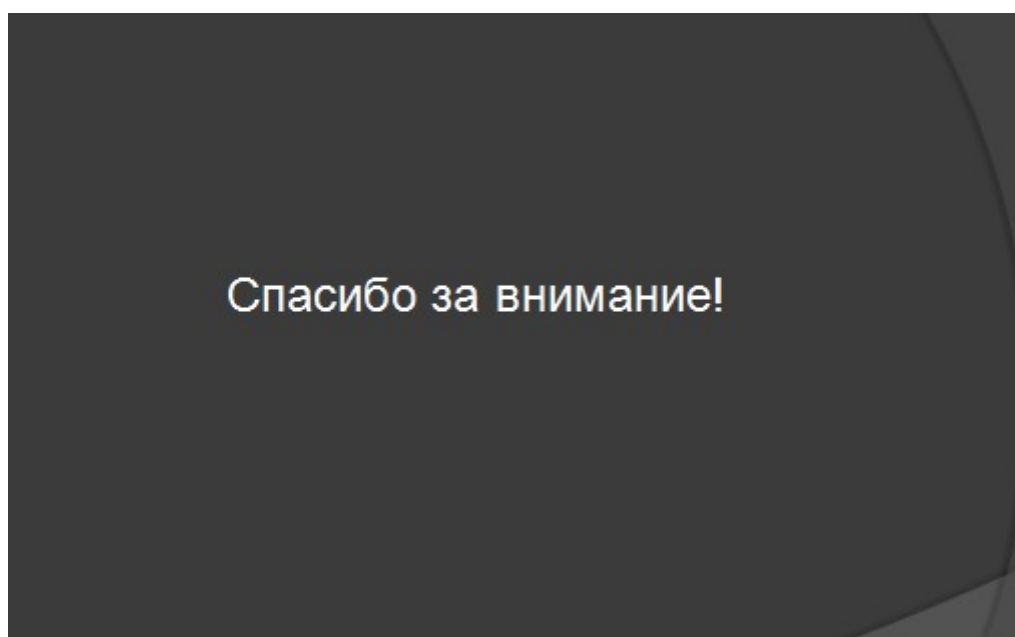


Рисунок А.10 – Дякую за увагу