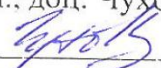


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 654.9

«Допущено до захисту»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерних технологій у медицині
та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.


« 19 » 12 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження якісних показників виявлення джерел радіовипромінювання
з космічного апарату

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРм-21-1


(дата, підпис)

Чернецький Б.М.

Керівник роботи
к.т.н., доц.


(дата, підпис)

Дубина О.Ф.

Житомир
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Дослідження якісних показників виявлення джерел радіовипромінювання
з космічного апарату

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-21-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Чернецький Б.М.

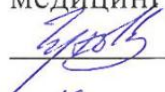
Керівник Дубина О.Ф.

Рецензент Ципоренко В.Г.

Житомир
2022

«Затверджено»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях

 В.В. Чухов

« 10 » 12 2022 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Чернецький Богдан Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження якісних показників виявлення джерел радіовипромінювання з космічного апарату від «12» 10 2022 р. № 460/с

2. Мета дослідження: дослідження показників якості виявлення джерел радіовипромінювання з космічного апарату.

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.)

Параметри РЛС протиповітряної оборони

4. Основні задачі дослідження:

4.1 Провести огляд і аналіз відомих методів виявлення радіоелектронних засобів.

4.2 Повести розробку алгоритмів розрахунку показників якості джерел радіовипромінювання.

4.3 Провести дослідження показників якості виявлення ДРВ на основі розроблених алгоритмів.

5. Термін подання роботи до захисту 12 грудень 2022 р. _____

6. Дата видачі завдання «10» 05 2022 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання

(підпис)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній магістерській роботі досліджувалось показники якості виявлення джерела радіовипромінювання (ДРВ) з космічної платформи.

Проведений аналіз відомих методів пошуку радіоелектронних засобів, а саме: пошук у просторі, пошук у частотному діапазоні та спільний пошук у просторі і у частотному діапазоні. Для кожного методу показано алгоритм розрахунку.

Обґрунтовані принципи та розроблений алгоритм розрахунку ймовірності виявлення джерела радіовипромінювання, що дозволяє покращити точність розрахунку ймовірності виявлення радіоелектронних засобів вже відомих методів.

На основі програмного пакету математичного моделювання MathCad розроблена програмна модель, за допомогою якої були досліджені показники якості виявлення ДРВ з космічної платформи та визначені показники якості виявлення реальних джерел радіовипромінювання.

ANNOTATION

In this master's degree work probed indexes of quality of exposure of source of radiation (SR) from a space platform.

Conducted analysis of well-known methods of search of radio electronic facilities, such as: search in a space, search in a frequency range and general search in space and in a frequency range. For every method the algorithm of calculation is refined.

Grounded principles and developed algorithm of calculation of probability of exposure of source of radiation, that allows to improve exactness of probability of exposure of radio electronic facilities already the known methods.

On the basis of programmatic package of mathematical design of Mathcad a programmatic model is developed which certain indexes of quality of exposure of the real sources of radiation.

РЕФЕРАТ

Атестаційна магістерська робота складається з чотирьох розділів, висновку, переліку посилань.

Атестаційна магістерська робота викладена на 60 сторінках основного тексту, що включає 20 ілюстрацій, 41 формулу. Список використаних джерел нараховує 23 найменування на 2 сторінках. Повний обсяг роботи 69 сторінок.

У вступі розглянуто область науки і техніки, до якої належить тема даної роботи та обґрунтовано актуальність роботи.

У першому розділі розглянуто огляд існуючих методів пошуку джерел радіовипромінювання з космічної платформи, проведено аналіз таких методів, їх переваги та недоліки. Для кожного методу показано загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення джерел радіовипромінювання.

У другому розділі розроблені та досліджені алгоритми роботи пристрою виявлення джерела радіовипромінювання з космічної платформи, а саме: алгоритм розрахунку показників якості виявлення джерела у просторі, у частотному діапазоні, при спільному пошуку, алгоритм розрахунку ймовірності правильного виявлення сигналу та ймовірності виявлення джерела радіовипромінювання.

У третьому розділі проводилося дослідження показників якості через комп'ютерне моделювання за допомогою програмного пакету математичного моделювання MathCad.

За результатами дослідження зроблено висновки.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ (РЕЗ)	12
1.1 Класифікація радіоелектронних засобів та їх аналіз	12
1.1.1 За галуззю застосування	12
1.1.2 За типом каналу передачі інформації	14
1.1.3 За застосуванням	18
1.1.4 За частотним діапазоном.....	18
1.1.5 За можливістю відновлення	18
1.2 Пошук радіоелектронних засобів за напрямом	18
1.3 Пошук радіоелектронних засобів у частотному діапазоні	26
1.4 Спільний пошук радіоелектронних засобів за частотою та напрямком.	33
2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ (ДРВ).....	40
2.1 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі	40
2.2 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ у частотному діапазоні	42
2.3 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ при спільному пошуку у просторі та частотному діапазоні.....	44
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ДРВ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ.....	47
3.1 Визначення ймовірності зустрічі діаграм спрямованості антен	47
3.2 Визначення ймовірності настройки приймального пристрою на частоту випромінюючого сигналу.....	52
3.3 Визначення ймовірності виявлення сигналу при спільному пошуку	57
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

США – Сполучені Штати Америки;
РТР – радіотехнічна розвідка;
РЛС – радіолокаційна станція;
РЕЗ – радіоелектронні засоби;
ДС – діаграма спрямованості;
РПП – радіоприймальний пристрій;
ДРВ – джерело радіовипромінювання.

ВСТУП

Радіoeлектронна розвідка (англійський термін “Electronic intelligence”) ведеться радіо- і електронними способами для здобуття розвідувальної інформації. Радіoeлектронна розвідка становить найважливішу частину державної й військової розвідки капіталістичних країн. Іноземні фахівці вважають, що різноманітні технічні засоби радіoeлектронної розвідки дозволяють одержувати інформацію про внутрішню й зовнішню політику, стан економіки й збройних сил інших держав. Гігантська мережа радіoeлектронної розвідки різних держав охоплює всі континенти планети й діє на суші, на морі, у повітрі й у космосі.

Для прикладу, розвідувальні служби США широко використовують оснащені радіoeлектронними апаратурою літаки, морські кораблі й штучні супутники Землі для добування розвідувальної інформації. Сучасний рівень розвитку радіотехніки й електроніки дозволив їм створити глобальну систему розвідки [1].

Радіoeлектронна розвідка принципово відрізняється від інших видів розвідки. Вона володіє наступними особливостями:

- діє без безпосереднього контакту з об'єктами розвідки;
- охоплює більші відстані й простори, межі яких визначаються особливостями поширення радіохвиль різних частот;
- функціонує безупинно в різну пору року й доби і при будь-якій погоді;
- забезпечує одержання достовірної інформації;
- добуває велику кількість інформації різного характеру й змісту;
- одержує інформацію в найкоротший термін і найчастіше в реальному масштабі часу;
- маловразлива й у багатьох випадках недосяжна;
- діє таємно.

Основний зміст радіорозвідки – виявлення й перехоплення відкритих, засекречених, кодованих передач зв'язних радіостанцій, пеленгування їхніх

сигналів, аналіз і обробка отриманої інформації з метою розкриття її змісту й визначення місцезнаходження джерел випромінювання.

Об'єкти радіотехнічної розвідки виявляють (проявляють) себе через роботу радіоелектронних засобів (РЕЗ), що забезпечують їхнє функціонування. Ці радіоелектронні засоби називають джерелами розвідувальних відомостей або джерелами радіовипромінювання (ДРВ).

Джерелами випромінювання для радіотехнічної розвідки є випромінюючі радіоелектронні засоби різного призначення.

Перехоплення радіовипромінювань являє собою наступний комплекс заходів:

- виявлення випромінюючих радіоелектронних засобів у частотному діапазоні й у просторі;
- прийом виявлених радіовипромінювань;
- аналіз сигналів;
- передачу добутих розвідувальних відомостей для наступної обробки.

Радіорозвідка й радіотехнічна розвідка являються пасивними видами розвідки, тобто не випромінюючі.

Актуальністю роботи є розробка алгоритму, що дозволяє, при заданих параметрах РЛС, оптимізувати структуру системи розвідки по критерію максимізації ймовірності правильного виявлення джерела.

В даній роботі показники якості являють собою ймовірність правильного виявлення сигналу, ймовірність зустрічі ДС антен, ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу, ймовірність виявлення сигналу за спільним пошуком у просторі і у частотному діапазоні та ймовірність виявлення ДРВ.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження показників якості виявлення джерел радіовипромінювання з космічного апарату.

Для досягнення цієї мети розв'язувались наступні задачі:

1. Огляд і аналіз відомих методів виявлення радіоелектронних засобів.
2. Розробка алгоритмів розрахунку показників якості джерел радіовипромінювання.

3. Дослідження показників якості виявлення ДРВ на основі розроблених алгоритмів.

Об'єктом дослідження виступає система радіолокаційної розвідки.

Предметом дослідження є процес проведення радіорозвідки.

Методи досліджень використані у роботі:

- розрахунок показників якості виявлення ДРВ.
- порівняння результатів досліджень із відомими дослідженнями вчених у даній області.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ (РЕЗ)

1.1 Класифікація радіоелектронних засобів та їх аналіз

Радіоелектронну апаратуру поділяють за такими ознаками:

1.1.1 За галуззю застосування

(наприклад, медична, зв'язку, космічна, військова, побутова та інша).

Медична електронна апаратура - це розділ електроніки, в якому розглядаються особливості застосування електронних схем для розв'язання медикобіологічних задач, а також будова і робота відповідної медичної апаратури.

Медична апаратура ділиться на:

- інформаційні апарати, за допомогою яких збирають інформацію про пацієнта (діагностична апаратура);
- апарати, що чинять різний вплив на пацієнта з лікувальною метою, наприклад терапевтичні.

Існує класифікація біомедичної техніки (<http://www.rpd.univ.kiev.ua/med/biomed.php>), де виділяють:

1. Лабораторну техніку.

2. Системи отримання медичних зображень.

- Рентгенівські системи.
- Системи радіонуклідної діагностики
- Магніторезонансні системи.
- Ультразвукові системи.
- Системи візуалізації теплових полів
- Системи для дослідження електричного імпедансу біологічних тканин.
- Оптична інтроскопія.

3. Біоелектричні та біомагнітні системи.

- Електрокардіографія.
- Кардіостимулятори.

- Магнітокардіографія.
- Фонокардіографія. Сфігмографія. Апекскардіографія. Реокардіографія.
- Системи біоелектричних та біомагнітних досліджень головного мозку (електроенцефалографія).
- Системи для діагностики нервових волокон та м'язових тканин (електроміографія).
- Системи для діагностики органів зору (електроретинографія).
- Системи для діагностики слухорівноважних органів (аудіометрія).
- Системи діагностики шлунково-кишкового тракту. (електрогастрографія).
- Діагностичні системи для акушерства і гінекології (фетальна електрокардіографія, магнітокардіографія, фонографія).
- Діагностичні системи для урології та нефрології (уродинамічна електроміографія).

4. Лазерні системи медичного призначення.

- Лазерні методи досліджень в медицині.
- Системи для лазерної терапії.

Космічна радіоелектронна апаратура призначена для виконання найширшого спектру наукових, господарських, військових та іншого роду завдань, яка зокрема включає:

Дослідження Землі: — супутники дистанційного зондування Землі;

Метеорологія: — метеорологічні супутники;

Навігація: — навігаційні супутники;

Планетні й міжпланетні дослідження — автоматичні міжпланетні станції, планетоходи;

Телекомунікації й зв'язок: — телекомунікаційні супутники;

Забезпечення життєдіяльності людини у космічному просторі — пілотовані космічні кораблі та орбітальні станції;

Космічний туризм — пілотовані космічні кораблі та орбітальні станції;

Розвідка та військові експерименти — розвідувальні супутники, військові супутники, пілотовані космічні кораблі та орбітальні станції;

Військова Радіоелектронна апаратура включає в себе:

радіолокаційні комплекси виявлення, наведення та цілевказання

радіотехнічні засоби виявлення цілей та наведення ракет

засоби радіоелектронної боротьби

радіоелектронні засоби розвідки

радіоелектронні комплекси і електронні обчислювальні машини

Радіозв'язкове обладнання літаків і вертольотів

Радіонавігаційне обладнання літаків і вертольотів

Радіоелектронну пошуково-прицільну протичовнову апаратуру

Радіогідроакустичні скидні буї

Радіоапаратура бомбометання та десантування

Радіоапаратура розпізнавання, оповіщення та активної відповіді

Радіотехнічне обладнання крилатих ракет і безпілотних літальних апаратів

1.1.2 За типом каналу передачі інформації

(гідроакустична, оптоелектронна, радіотехнічна, інфрачервона тощо.)

Гідроакустичний канал передачі

Гідроакустика отримала широке практичне застосування, бо жодні види електромагнітних хвиль не поширюються у воді (внаслідок її електропровідності) на скільки-небудь значні відстані, тож через це звук є єдиним можливим засобом зв'язку під водою.

Для такої мети, користуються звуковими частотами від 300 до 10000 гц і ультразвуками від 10000 гц та вище. Як випромінювачі і приймачі у звуковій області застосовуються електродинамічні і п'єзоелектричні випромінювачі і гідрофони, а в ультразвуковій — п'єзоелектричні і магнітострикційні. Крім звукопідводного зв'язку, гідроакустика використовується для:

Виявлення шумових сигналів і визначення напрямку на них;

Випромінювання акустичних сигналів, виявлення відбитих сигналів і визначення координат;

Класифікації виявлених сигналів

Найбільш суттєві застосування гідроакустики:

Вирішення військових завдань (виявлення надводних суден, підводних човнів, безпілотних підводних апаратів, торпед, водолазів, мін тощо);

Морська навігація;

Звукопідводний зв'язок;

Рибопошукова розвідка;

Океанологічні дослідження;

Сфери діяльності з освоєння багатств дна Світового океану;

Використання акустики в басейні (вдома або в тренувальному центрі із синхронного плавання);

Навчання морських тварин.

Оптоелектронний канал передачі

В багатьох випадках виявляється необхідним або зручним вводити в лінії зв'язку ділянки, на яких передача інформації здійснювалася б не у вигляді електричних, а у вигляді оптичних (світлових) сигналів. Наприклад, при роботі з радіоелектронними вимірювальними приладами або з електронно-обчислювальними машинами, інформація, яку зчитує оператор, для зручності звичайно виводиться у вигляді світлових сигналів – світіння сигнальних ламп, світлових табло, цифрових індикаторів, тощо.

І навпаки, при роботі із світловими сигналами часто на певному етапі виникає необхідність перетворення їх в електричні. Така необхідність виникає в системах автоматики і контролю, коли первинну світлову інформацію потрібно ввести для обробки в радіоелектронні пристрої. Основними елементами таких змішаних оптико-електронних систем є пристрої для перетворення сигналів одного виду в інший.

Прилади оптоелектроніки:

Для перетворення світла в електричний струм — фотоопори (фоторезистори), фотодіоди (р-п, лавинний), фототранзистори, фототиристри, піроелектричні приймачі, прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ), фотоелектронні помножувачі (ФЕП).

Для перетворення струму в світлове випромінювання — різного роду лампи розжарювання, індикатори електролюмінесцентні, напівпровідникові світлодіоди і лазери (газові, твердотільні, напівпровідникові).

Для ізоляції електричних кіл (послідовного перетворення «струм-світло-струм») служать окремі пристрої оптоелектроніки — оптопары — резисторні, діодні, транзисторні, тиристорні, оптопары на одноперехідних фототранзисторах і оптопары з відкритим оптичним каналом.

Для застосування в різних електронних пристроях служать оптоелектронні інтегральні схеми — інтегральні мікросхеми, в яких здійснюється оптичний зв'язок між окремими вузлами або компонентами з метою ізоляції їх один від одного (гальванічної розв'язки).

Радіотехнічний канал передачі

Радіоканал (канал передачі даних) — це канал зв'язку, в якому передача інформації здійснюється за допомогою радіохвиль. Включає середовище поширення радіохвиль і пристрої перетворення електричних сигналів в електромагнітне випромінювання (радіопередавальний пристрій) та електромагнітне випромінювання в електричні сигнали (радіоприймальний пристрій).

Особливість радіоканалу полягає в тому, що сигнал вільно випромінюється в ефір, він не замкнутий у кабель, тому виникають проблеми сумісності з іншими джерелами радіохвиль (радіо- і телевізійними станціями, радарми, радіоаматорськими й професійними передавачами й т.д.). У радіоканалі використовується передача у вузькому діапазоні частот і модуляція інформаційним сигналом сигналу несучої частоти. Головним недоліком радіоканалу є його поганий захист від прослуховування, тому що радіохвилі поширюються неконтрольовано. Інший великий недолік радіоканалу - слабка перешкодозахищеність.

Інфрачервоний канал передачі

На відміну від радіоканалу, інфрачервоний канал нечутливий до електромагнітних перешкод, що дозволяє використовувати його у виробничих умовах. До недоліків інфрачервоного каналу відносяться висока вартість приймачів і передавачів, де потрібне перетворення електричного сигналу в інфрачервоний і назад, а також низькі швидкості передачі (зазвичай не перевищує 5-10 Мбіт/с, але при використанні інфрачервоних лазерів можливі значно вищі швидкості). В умовах прямої видимості інфрачервоний канал може забезпечити зв'язок на відстанях кілька кілометрів,

Мережі з інфрачервоним каналом передачі можуть бути 4 типів:

- прямої видимості;
- на розсіяному випромінюванні;
- на відбитому випромінюванні;
- широкосмугові.

системи засновані на передачі сигналів за допомогою інфрачервоного випромінювання набувають все більшої популярності, чому сприяє ряд переваг перед використанням радіочастот і кабельних ліній: мале енергоспоживання, відсутність електромагнітних перешкод (що впливають як на роботу інфрачервоних систем, так і створюваних ними), немає необхідності виділення та резервування частотного діапазону, скритність і висока захищеність інформації, що передається від перехоплення (особливо при використанні вузького лазерного променя між передавачем і приймачем), не потрібно прокладання кабельних ліній, особливо у важкодоступних місцевостях, швидке розгортання, практично необмежена швидкість поширення сигналу (швидкість світла). При цьому є й недоліки, зокрема це залежність від середовища передачі (атмосферні опади, хмари, тумани та інші аерозолі, непрозорі для інфрачервоних променів природні та штучні перешкоди на шляху поширення променя між приймачем і передавачем (наприклад птахи, що пролітають)).

В умовах земної атмосфери інфрачервоні канали зв'язку в залежності від призначення та потужності дозволяють передавати інформацію на відстані від кількох метрів і менше (наприклад, пульти дистанційного керування побутових

електроприладів, іграшок, ІЧ-порти телефонів) до десятків кілометрів (наприклад, у телекомунікаційних мережах)

Сфера використання

Тим не менш, цей тип зв'язку набув широкого поширення в сучасних фотоспалахах та синхронізаторах. Він використовується для дистанційного запуску додаткових спалахів та обміну даними між TTL-експонетром фотоапарата та мікропроцесорами, що керують потужністю імпульсного освітлення. Керування зовнішніми спалахами інфрачервоним каналом є стандартною функцією сучасних систем EOS flash system компанії Canon, Speedlight компанії Nikon та інших.

Застосовується інфрачервоний канал для потайного зв'язку та передачі даних між кораблями на флоті, починаючи від спрямованої передачі сигналів азбукою Морзе за допомогою сигнальних прожекторів і закінчуючи автоматизованими комплексами інфрачервоної обчислювальної мережі між групою кораблів та/або береговими об'єктами

1.1.3 За застосуванням

радіоелектронна апаратура ділиться на: Наземна, стаціонарна, пересувна, переносна;

морська: для суден, для військових кораблів, буйкова;

бортова: літакова, вертольотна, ракетна, космічна;

1.1.4 За частотним діапазоном

низькочастотна

високочастотна

надвисокочастотна

1.1.5 За можливістю відновлення

Відновлювальна

невідновлювальна.

1.2 Пошук радіоелектронних засобів за напрямом

Для оцінки можливостей і ефективності добування розвідувальних відомостей засобами радіотехнічної розвідки необхідне враховувати наступне:

- радіоелектронні засоби супротивника розгорнуті в смузі розвідки відповідно до бойового порядку військ нерівномірно: на окремих напрямках щільність їхнього розподілу більше, на інших – менше, а на деяких напрямках вони можуть взагалі бути відсутні;
- радіоелектронні засоби мають різний енергетичний потенціал;
- сучасні радіоелектронні засоби працюють у дуже широкому діапазоні частот (від одиниць кілогерців до десятків тисяч мегагерц);
- по характеру використання багато радіоелектронних засобів включаються на випромінювання короткочасно, що обмежує час прийому й обробки їхніх сигналів;
- сучасні радіоелектронні засоби мають різноманітну, складну та змінну структуру випромінювань.

З перерахованого вище можна сказати, що за допомогою засобів радіотехнічної розвідки можна виявити працюючі радіоелектронні засоби тільки для певної дальності, у конкретному напрямку, на даній частоті й тільки в певний момент часу, маючи спеціальну апаратури для прийому простих і складних сигналів з невідомою структурою.

Таким чином, виявлення роботи наземних радіоелектронних засобів є складною подією, що складається з ряду умов, до яких можна віднести наступні:

- у зоні розвідки повинна бути забезпечена електромагнітна доступність, тобто рівень сигналу радіоелектронного засобу на вході прийомного пристрою станції радіотехнічної розвідки повинен перевищувати його реальну чутливість:

$$P_{\text{вх}} > P_{\text{р}}. \quad (1.1)$$

- діаграми спрямованості антен радіоелектронного засобу, що розвідує, і наземної радіотехнічної станції повинні зустрітися;

- у момент зустрічі діаграм прийомний пристрій станції радіотехнічної розвідки повинен бути настроєний на частоту сигналу, що випромінюється;
- за час зустрічі діаграм спрямованості антен наземного радіоелектронного засобу й станції радіотехнічної розвідки повинен бути прийнятий сигнал із тривалістю, що є достатній для його обробки й реєстрації.

Для виявлення працюючих радіоелектронних засобів за допомогою станції радіотехнічної розвідки необхідно виконати усі вище перераховані умови.

Для задоволення першої умови прийомні пристрої повинні мати високу еквівалентну чутливість у всьому діапазоні частот, що розвідують:

$$S = \frac{P_p}{G_p}, \quad (1.2)$$

де P_p – реальна чутливість приймача;

G_p – коефіцієнт спрямованої дії антени.

Це можливо тільки при високій чутливості прийомного пристрою й наявності антени з великим коефіцієнтом спрямованої дії.

Для задоволення другої умови необхідно вести пошук по напрямку, тобто обертати діаграму спрямованості антени станції радіотехнічної розвідки в заданому секторі або по колу. При цьому вважають, що діаграма спрямованості у вертикальній площині досить широка й немає необхідності вести пошук по куту місця. Для більшості станцій радіотехнічної розвідки ця умова, як правило, виконується [2].

Для задоволення третьої умови необхідно вести пошук у частотному діапазоні, тобто перебудовувати вибіркоку частину приймача по частоті або використовувати широкосмуговий прийомний пристрій, що здатний приймати сигнали у всьому діапазоні частот без перебудови (здійснювати безпошуковий прийом сигналів).

Для задоволення четвертої умови необхідно мати антенну систему станції із широкою діаграмою спрямованості при заданій високій швидкості обертання або з вузькою діаграмою при повільній швидкості обертання.

У сучасних засобах радіотехнічної розвідки використовуються варіанти пошукових і безпошукових методів виявлення:

- комплекси “Тамара”, “Рамона-Планшет” – безпошукові за напрямом, пошукові по частоті;
- станції “Пост-ЗМ”, “РПС-6”, “Кольчуга” – безпошукові по частоті й пошукові по напрямку;
- комплекси “Сахалін”, “СДР-2А” – комбіновані по частоті й пошукові по напрямку.

Для виявлення роботи радіоелектронного засобу по напрямку використовуються як пошукові, так і безпошукові методи (рис. 1.1) [2].

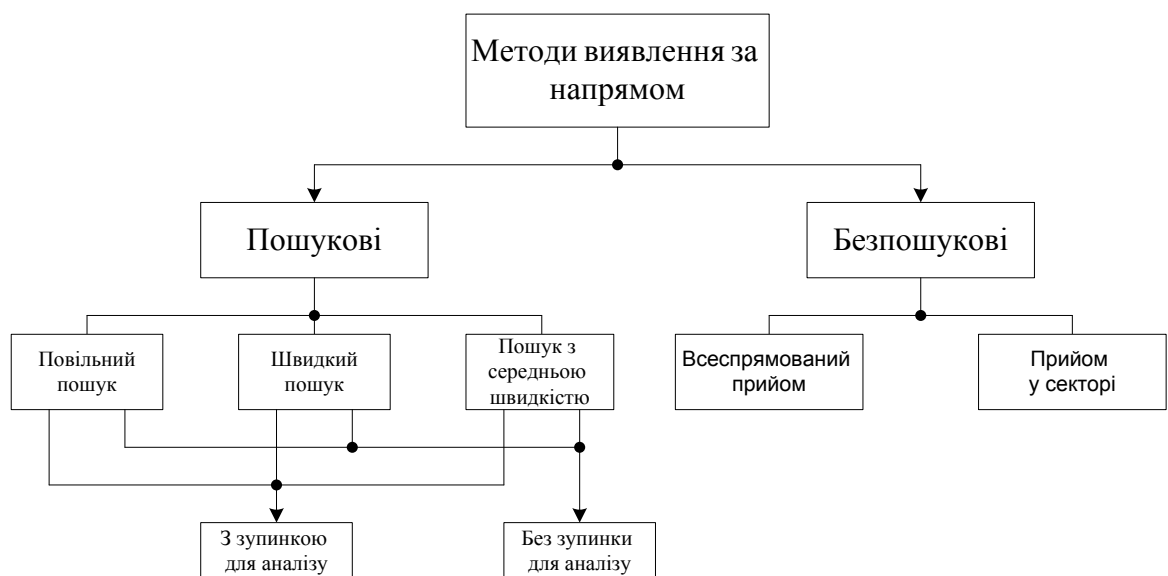


Рисунок 1.1 – Структурна схема методів виявлення РЕЗ за напрямом

З метою реалізації пошукових методів виявлення радіоелектронних засобів за напрямом використовують обертові або скануючі антенні системи.

Під пошуком за напрямом розуміють процес виявлення працюючих радіоелектронних засобів шляхом послідовного огляду або огляду простору діаграмою спрямованості антени, що ведеться за певним законом. Пошук

можна вести в секторі або по колу. У разі пошуку в просторі варто враховувати два можливих випадки [2]:

- пошук радіоелектронних засобів, що мають спрямоване випромінювання з обертанням діаграми спрямованості в горизонтальній площині;
- пошук радіоелектронних засобів, що мають ненаправлене випромінювання.

Найбільш загальним є перший випадок. При веденні пошуку за напрямом можуть бути пропуски сигналів за рахунок короткочасності роботи радіоелектронного засобу, а також за рахунок того, що в момент опромінення станції радіотехнічної розвідки її антена не спрямована на радіоелектронний засіб, що розвідує. По наявності або відсутності пропусків прийому пошукові методи виявлення розділяють на гарантовані та ймовірнісні. Якщо за один період обертання антени радіоелектронного засобу забезпечується достовірний прийом сигналів, то пошук називається гарантованим. У протилежному випадку пошук має ймовірнісний характер.

Гарантований пошук може бути повільним і швидким. У ряді випадків використовують безпошуковий метод виявлення по напрямку або частоті. Для порівняльної оцінки методів виявлення застосовуються наступні критерії:

- ймовірність виявлення працюючого радіоелектронного засобу;
- час виявлення із заданою ймовірністю;
- середня частота повторень прийому сигналів.

Ймовірність виявлення працюючого радіоелектронного засобу по напрямку, при попередньому налаштуванні приймача станції розвідки на частоту сигналу й достатнім перевищенням сигналу над шумом, визначається ймовірністю зустрічі діаграм спрямованості. При цьому варто мати на увазі, що час прийому сигналів (тривалість реалізації) τ_c повинне бути не менше часу, необхідного для їхньої обробки й відображення. Тому ймовірність виявлення по напрямку можна представити виразом [2]:

$$P_H = P_B \cdot P(\tau_c \geq \tau_0), \quad (1.3)$$

де P_B – ймовірність зустрічі діаграм спрямованості антен радіоелектронного засобу й станції радіотехнічної розвідки;

$P(\tau_c \geq \tau_0)$ – умовна ймовірність прийому сигналів тривалістю не менше заданої (τ_0) за умови, що зустріч діаграм спрямованості відбулася.

Часом зустрічі називають тривалість зустрічі діаграм спрямованості антен радіоелектронного засобу й станції радіотехнічної розвідки, протягом якої приймаються сигнали розвідувальною станцією. Важливою характеристикою є час виявлення за напрямом t_n . Часом виявлення за напрямом називається час, протягом якого працюючі радіоелектронні засоби виявляються із заданою ймовірністю.

Визначимо ймовірність зустрічі діаграм спрямованості антен радіоелектронного засобу й станції радіотехнічної розвідки.

У практиці ведення радіотехнічної розвідки найбільше часто виникає завдання пошуку нових джерел радіовипромінювання, місцезнаходження яких, а отже, і напрямки на них з позиції станції розвідки невідомі. Виходить, що потрібно здійснювати пошук у просторі, переміщаючи (обертаючи) діаграму спрямованості по колу або в апіорно заданому секторі з періодом T_p .

Оскільки антена радіоелектронного засобу обертається з періодом T_a , то зустріч діаграм спрямованості буде відбуватися не за кожний оборот, а за n оборотів. Число оборотів антени залежить від співвідношення періодів T_p і T_a .

Будемо вважати, що зустріч діаграм спрямованості відбулася, якщо відрізок прямій OO_1 , що з'єднує точки розташування антен, перебуває в межах кутів розкриву діаграм спрямованості β_p і β_a . Позначимо час, протягом якого діаграма спрямованості перетинає пряму OO_1 (рис.1.2):

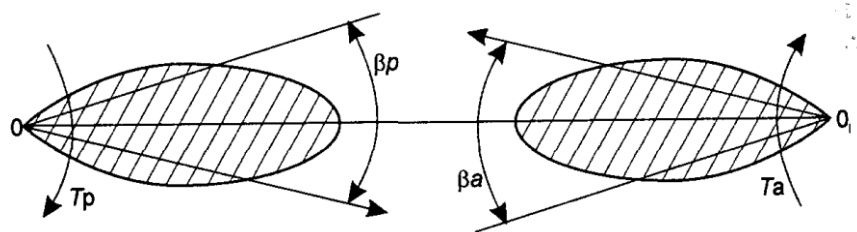


Рисунок 1.2 – Взаємна орієнтація ДС станції РТР і РЛС

При цьому припускаємо, що початкове положення антен рівносильно відносно один одного. У цьому випадку ймовірність зустрічі діаграм спрямованості визначається одним із двох виразів, залежно від того, який з періодів обертання антен більше [2]:

$$P_{ap} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T_p} \cdot (\beta_a \cdot T_a + \beta_p \cdot T_p), \text{ якщо } T_a > T_p; \quad (1.4)$$

$$P_{pa} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T_a} \cdot (\beta_a \cdot T_a + \beta_p \cdot T_p), \text{ якщо } T_p > T_a. \quad (1.5)$$

З виразів (1.4) і (1.5) видно, що ймовірність зустрічі $P_{зст}$ діаграм спрямованості визначається їхньою шириною й значенням періодів обертання антени.

З аналізу виразів можна сказати, що є області значень, при яких здійснюється повільний, швидкий гарантований пошук і ймовірнісний пошук із середньою швидкістю.

Повільним гарантованим пошуком за напрямом називається такий пошук, при якому за час одного обороту антени радіоелектронного засобу антена станції радіотехнічної розвідки повертається не більше ніж на ширину своєї діаграми спрямованості. При цьому факт виявлення відбудеться за час не більше, ніж період обертання антени станції розвідки ($t_n \leq T_p$).

Час зустрічі при повільному пошуку буде практично дорівнювати часу опромінення. Співвідношення швидкостей обертання антени станції радіотехнічної розвідки й антени радіоелектронного засобу дорівнює відношенню кута огляду радіоелектронного засобу (при круговому обертанні $\Delta\beta_a = 2 \cdot \pi$) до кута розкриття діаграми спрямованості станції розвідки.

На підставі вищесказаного можна зробити наступні висновки про особливості повільного пошуку [2]:

1. Швидкість обертання антени станції радіотехнічної розвідки мала, отже, потрібний великий час для виявлення сигналу. Для виявлення

короткочасно працюючих радіоелектронних станцій повільний пошук неприйнятний.

2. При повільному пошуку забезпечується час прийому сигналів, цілком достатній для спрацьовування аналізуючої апаратури.

Існує кілька способів зменшення часу пошуку, основними з яких є:

- використання багатоканальних за напрямом антен, що створюють парціальні діаграми спрямованості;
- підвищення чутливості прийомних пристроїв станцій радіотехнічної розвідки для прийому по бічних пелюстках діаграми спрямованості радіоелектронного засобу;
- використання секторного пошуку.

Режим, при якому за період обертання антени радіоелектронного засобу факт прийому сигналу тривалістю не менш заданої є достовірним, називається швидким пошуком. При швидкому пошуку за час повороту антени радіоелектронного засобу на ширину діаграми спрямованості антена станції розвідки робить повний оборот. Швидкість обертання антени станції розвідки в $2 \cdot \pi / \Delta\beta_a$ раз більше швидкості обертання антени наземного радіоелектронного засобу, тобто досить більша, що є істотним недоліком швидкого пошуку. При цьому важко забезпечити час прийому не менш заданого.

Якщо умови існування гарантованого повільного або швидкого пошуку не виконуються, може бути застосований ймовірнісний пошук (пошук із середньою швидкістю). Швидкість обертання антени займає проміжне положення між швидкістю при повільному й швидкому пошуках.

Ймовірність зустрічі ДС антен за k обертів антен [2]:

$$P_k = 1 - (1 - P_{pa})^k. \quad (1.6)$$

Знаючи число оборотів антени станції розвідки, що необхідне для виявлення радіоелектронного засобу із заданою ймовірністю, можливо визначити потрібний час пошуку [2]:

$$t_n = k \cdot T_p. \quad (1.7)$$

Отже, загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі може бути поданий наступним чином, рис. 1.3:

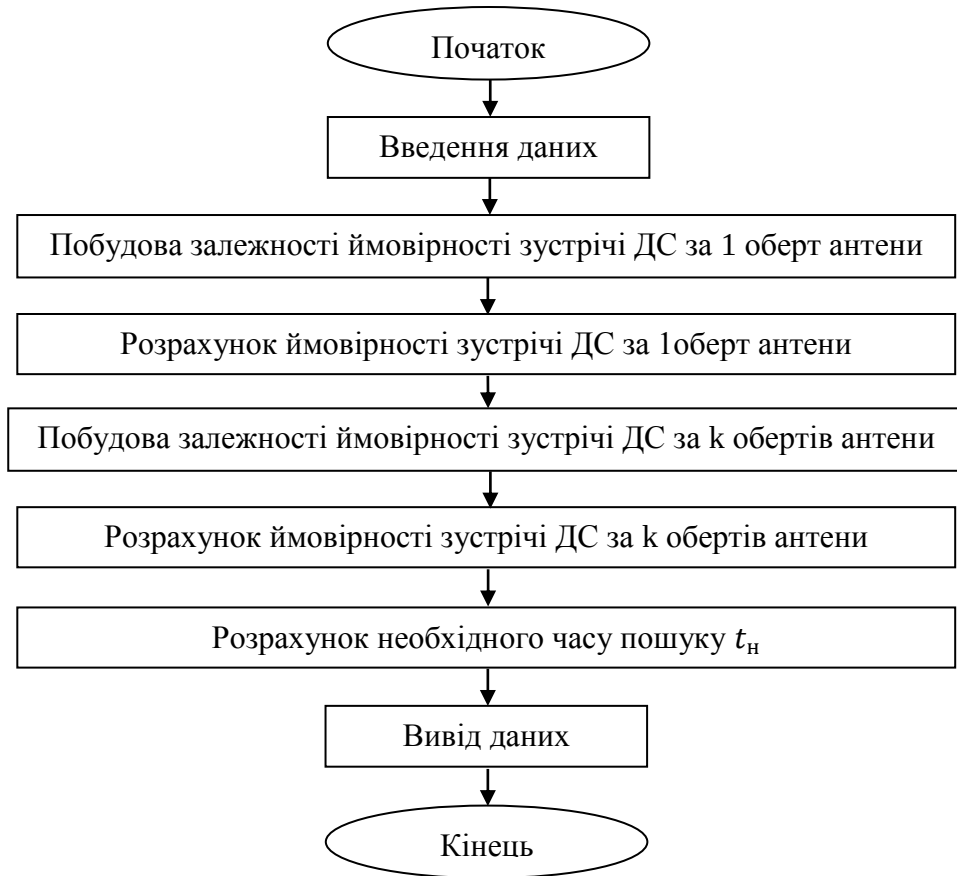


Рисунок 1.3 – Загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі

1.3 Пошук радіоелектронних засобів у частотному діапазоні

Для виявлення працюючих радіоелектронних засобів у частотному діапазоні використовуються пошукові, безпошукові й комбіновані методи (рис. 1.4) [2]:

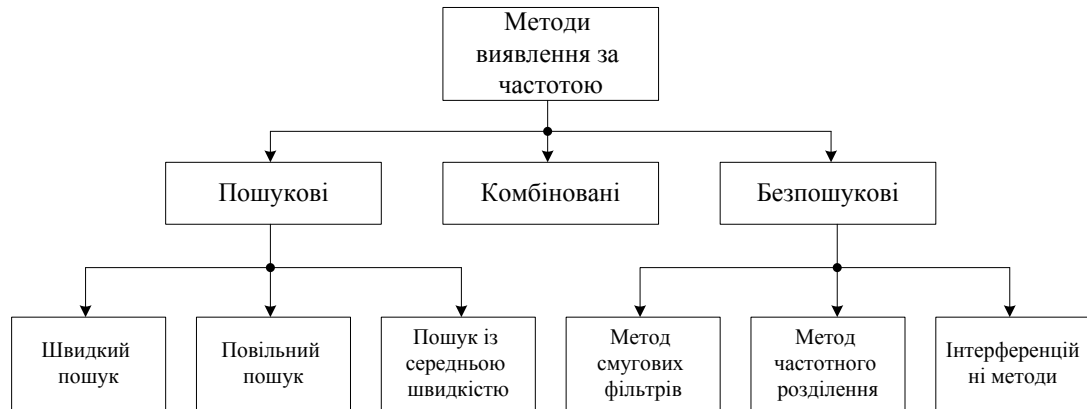


Рисунок 1.4 – Структурна схема методів виявлення за частотою

Під виявленням сигналу в частотному діапазоні розуміють процес пошуку працюючих радіоелектронних засобів шляхом послідовної перебудови прийомного пристрою розвідувальної станції, що має смугу пропускання Δf у діапазоні розвідки Δf_p . Тому для реалізації пошукових методів виявлення радіоелектронних засобів за частотою використовуються прийомні пристрої, що перебудовуються [2].

При розгляді пошуку за частотою варто враховувати чотири можливих випадки:

- 1) безперервне випромінювання – пошук радіоелектронних засобів, що мають спрямоване імпульсне випромінювання з обертанням діаграми спрямованості в горизонтальній площині;
- 2) пошук радіоелектронних засобів, що мають спрямоване безперервне випромінювання з обертанням діаграми спрямованості в горизонтальній площині;
- 3) пошук радіоелектронних засобів, що мають ненаправлене імпульсне випромінювання;
- 4) пошук радіоелектронних засобів, що мають ненаправлене безперервне випромінювання.

Найбільш загальним є перший випадок, що знайшов широке застосування в системах радіотехнічної розвідки.

При пошуку за частотою можливі наступні види перебудови приймача станції радіотехнічної розвідки:

- однобічна зі швидким неробочим зворотнім ходом;
- однобічна зі швидким зворотнім ходом і зупинкою для аналізу;
- двостороння з однаковою швидкістю перебудови в обидва боки;
- двостороння з однаковою швидкістю перебудови в обидва боки й зупинкою для аналізу.

При пошуку за частотою, як і при пошуку за напрямом, можуть відбуватися пропуски прийому сигналу за рахунок короткочасної роботи радіоелектронного засобу й за рахунок того, що в момент зустрічі діаграм спрямованості прийомний пристрій розвідувальної станції не настроєний на частоту сигналу.

По відсутності або наявності пропусків прийому, пошукові методи виявлення діляться на гарантовані і ймовірнісні. При гарантованому виявленні забезпечується обов'язковий прийом сигналів за час, що дорівнює найбільшому з періодів T_n або T_c . При ймовірнісному виявленні прийом сигналів за той же проміжок часу здійснюється з деякою ймовірністю. До гарантованих методів пошуку відносяться повільний і швидкий, а до ймовірнісного – пошук із середньою швидкістю.

Різновидами повільного пошуку по частоті є пошук за простим законом, пошук за складним законом і пошуковий метод послідовного уточнення частоти.

Для розвідки радіоелектронного засобу зі швидкою перебудовою від імпульсу до імпульсу або короткочасно працюючих радіоелектронних засобів застосовуються безпошукові за частотою методи виявлення: метод смугових фільтрів, метод частотного розділення, інтерференційний і автокореляційний методи.

У деяких станціях радіотехнічної розвідки застосовуються комбіновані методи виявлення, які являють собою сполучення пошукових і безпошукових методів виявлення. Порівняльну оцінку методів виявлення по частоті, як і для випадку пошуку за напрямком, роблять за наступними критеріями:

- ймовірність виявлення працюючого радіоелектронного засобу;
- час виявлення із заданою ймовірністю;

- точність визначення несучої частоти;
- діапазон розвідувальних частот; реалізація.

Ймовірність P_q виявлення працюючого радіоелектронного засобу за частотою визначається за формулою [2]:

$$P_q = P_{сч} \cdot P(\tau_c \geq \tau_0), \quad (1.8)$$

де P_q – ймовірність збігу інтервалу часу настройки прийомного пристрою на частоту працюючого радіоелектронного засобу з інтервалом тривалості імпульсу;

$P(\tau_c \geq \tau_0)$ – умовна ймовірність прийому сигналу тривалістю не менш заданої за умови, що збіг відбувся (передбачається, що за напрямом сигнал виявлений, а його рівень перевищує реальну чутливість прийомного пристрою).

При $\tau_c \geq \tau_0$ ймовірність виявлення практично дорівнює ймовірності збігу.

Ймовірність збігу буде тим більше, чим ширше смуга пропускання прийомного пристрою розвідувальної станції, а також чим більше тривалість сигналу, більше розходження між періодом перебудови прийомного пристрою T_{Π} і періодом повторення сигналу T_c .

Часом виявлення по частоті t_q називається час, протягом якого працюючий радіоелектронний засіб виявляється із заданою ймовірністю $P_q = P_0$. Для пошукових систем цей час називається часом пошуку по частоті $t_{пч}$. [2]

Необхідний діапазон частот, що розвідують, визначається розподілом радіоелектронних засобів, що підлягають розвідці по частоті. Ймовірність збігу інтервалу часу настроювання прийомного пристрою на частоту працюючого радіоелектронного засобу $P_{пс}$ із інтервалом тривалості імпульсу τ_c за час перебудови приймача у всьому діапазоні частот ($t_{\Delta f_p}$) визначається виразом:

$$P_{\text{пс}} = \frac{t_{\Delta f_p} + \tau_c}{T_c}. \quad (1.9)$$

Цей випадок характеризується тим, що $T_{\text{п}} > T_c$. Якщо ж $T_{\text{п}} < T_c$, ймовірність збігу за час, що дорівнює періоду приходу сигналів, визначається виразом:

$$P_{\text{сп}} = \frac{t_{\Delta f_p} + \tau_c}{T_{\text{п}}}. \quad (1.10)$$

Позначивши швидкість перебудови $\gamma = \Delta f / T_{\text{п}}$, час перебудови прийомного пристрою на ширину його смуги пропускання:

$$t_{\Delta f_p} = \frac{\Delta f_p}{\gamma} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} \cdot T_{\text{п}}. \quad (1.11)$$

Враховуючи вираз (1.11), формули (1.9) та (1.10), визначення ймовірності збігу можна переписати у наступному вигляді:

$$P_{\text{пс}} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} \cdot \frac{1}{\tau} + Q_c, \quad (1.12)$$

$$P_{\text{сп}} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} + \tau \cdot Q_c, \quad (1.13)$$

$$\text{де } \tau = T_c / T_{\text{п}}; \quad (1.14)$$

$$Q_c = \tau_c / T_c - \text{скважність сигналу}. \quad (1.15)$$

Із виразів видно, що є два режими гарантованого пошуку: повільний і швидкий [2].

Повільним гарантованим пошуком за частотою називається такий пошук, при якому за час перебудови:

$$\frac{\Delta f_p}{T_c} < \frac{\Delta f}{T_\Pi} < \frac{T_\Pi}{\tau_c} \quad (1.16)$$

Ймовірність виявлення сигналу за один період перебудови прийомного пристрою при прийомі по бічних пелюстках по колу визначається з виразу:

$$P_{\text{пс}} = \frac{t \cdot \Delta f_p + \tau_c}{T_i} \quad (1.17)$$

При розвідці по головному пелюстку діаграми спрямованості:

$$P_{\text{пс}} = \frac{t \cdot \Delta f_p + \tau_c}{T_a} \quad (1.18)$$

Ймовірність виявлення сигналу за k періодів:

$$P_k = 1 - (1 - P_{\text{пс}})^k \quad (1.19)$$

Перетворимо вираз (1.19) до наступного вигляду:

$$P_k = 1 - \left[(1 - P_{\text{пс}}) \cdot \frac{1}{P_{\text{пс}}} \right]^{-k \cdot P_{\text{пс}}} \quad (1.20)$$

Враховуючи те, що за один період перебудови ймовірність виявлення сигналу $P_{\text{пс}}$, як правило, невелика – $\lim (1 - P_{\text{пс}}) \cdot \frac{1}{P_{\text{пс}}} = e$, ймовірність виявлення за k періодів $P_k = 1 - e^{-k \cdot P_{\text{пс}}}$, так як $k = \frac{t_q}{T_c}$, то $P_k = 1 - e^{-\frac{t_q}{T_c} \cdot P_{\text{пс}}}$ [2].

Ймовірність виявлення сигналу за час $t_q > T_c$ може бути визначена з виразу:

$$P_k = 1 - e^{-\frac{\Delta f_p \cdot T_\Pi}{\Delta f \cdot T_c}} \quad (1.21)$$

Час виявлення сигналу із заданою ймовірністю P_k визначається за формулою [2]:

$$t_{\text{ч}} = -T_{\text{с}} \cdot \frac{\ln(1-P_k)}{P_{\text{пс,сп}}} \quad (1.22)$$

Покажемо загальний алгоритм роботи виявлення у частотному діапазоні, що зображений на рис. 1.5:



Рисунок 1.5 – Загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у частотному діапазоні

1.4 Спільний пошук радіоелектронних засобів за частотою та напрямком

На практиці радіотехнічна розвідка ведеться панорамним прийомним пристроєм з одночасним пошуком по напрямку й частоті. Тому актуальним завданням є оцінка ефективності пошуку станцією радіотехнічної розвідки такого типу в просторі й частотному діапазоні [2].

Антени радіолокаційної станції й станції радіотехнічної розвідки в азимутальній площині обертаються з кутовими швидкостями Ω_1 і Ω_2 . Їх діаграми спрямованості в прямокутній системі координат можна апроксимувати прямокутниками з кутами розкриву відповідно β_a й β_p . Сигнал випромінюється радіолокаційною станцією із частотою слідування $F_c = \frac{1}{T_c}$ й тривалістю τ_c . Пошуковий радіоприймач, що має прямокутну частотну характеристику, зі смугою пропускання Δf_p у діапазоні $(f_{max} - f_{min})$ перебудовується з постійною швидкістю $\gamma = \frac{f_{max} - f_{min}}{T_{\Pi}}$ й з періодом T_{Π} . У цьому випадку необхідно визначити частоту прийому сигналу радіолокаційної станції, що розвідує. Станція радіотехнічної розвідки буде опромінюватися потоком серій імпульсів тривалістю $\tau_1 = \beta_a / \Omega_1$, що слідує із частотою $\mu_1 = \Omega_1 / 2 \cdot \pi$. При цьому сигнали радіолокаційної станції приймаються дискретно й тільки тоді, коли її антена перетинає лінію візування на радіолокаційну станцію, що розвідує. Дискретність визначається обертанням діаграми спрямованості і її вибірковою здатністю в просторі.

Можливу діяльність і частоту прийому сигналів позначимо відповідно $\tau_2 = \beta_a / \Omega_2$ і $\mu_2 = \Omega_2 / 2 \cdot \pi$.

Тривалість і частоту спостереження сигналів пошуковою станцією на фіксованій частоті можна розглядати як потік сигналів із тривалістю $\tau_3 = (\Delta f_p / \Delta f) \cdot T_{\Pi}$ й частотою слідування $F_3 = 1 / T_{\Pi}$. Тривалість і частоту слідування імпульсів радіолокаційної станції позначимо $\tau_4 = \tau_c$ й $F_4 = \mu = 1 / T_c$. Отже, частота повторення прийому сигналів визначається характеристиками чотирьох потоків імпульсів збігу [2].

Сигнали будуть прийняті тільки при збігу всіх чотирьох імпульсів сумарного потоку. Середня частота прийому сигналів визначається виразом:

$$\bar{\mu}_{4.4} = \sum_{s=1}^4 \frac{1}{\tau_s} \cdot \prod_{i=1}^4 \mu_i \cdot \tau_i. \quad (1.23)$$

Відповідно до прийнятих позначень розкриємо формулу:

$$\mu_{4.4} = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 \cdot (\tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 + \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_4 + \tau_1 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4) \quad (1.24)$$

Ця формула є загальною, і з неї можна одержати формули для ряду окремих випадків пошуку. Наприклад, якщо сигнал безперервний, то $\mu_4 \cdot \tau_4 = 1$, і права частина виразу (1.24) приводиться до вигляду:

$$\prod \bar{\mu}_{3.3} = \sum_{s=1}^3 \frac{1}{\tau_s} \cdot \prod \mu_i \cdot \tau_i = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot (\tau_2 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2). \quad (1.25)$$

Якщо на додаток до цього відсутній пошук по напрямку (антена станції радіотехнічної розвідки всеспрямована) або положення радіолокаційної станції відомо, то $\mu_2 \cdot \tau_2 = 1$. У цьому випадку:

$$\mu_{2.2} = \mu_1 \cdot \mu_3 \cdot (\tau_1 + \tau_3). \quad (1.26)$$

Якщо для прийому сигналів потрібно прийняти реалізацію тривалістю не менш τ_0 , то основна формула (1.23) буде мати вигляд:

$$\bar{\mu}_{4.4} = \sum_{s=1}^4 \frac{1}{\tau_s - \tau_0} \cdot \prod_{i=1}^4 \mu_i \cdot (\tau_i - \tau_0). \quad (1.27)$$

За формулами (1.23) і (1.27) можна знайти середню частоту прийому сигналів при пошуку за напрямом, при пошуку за частотою й напрямком. Знаючи середню частоту прийому сигналів, неважко визначити середній час, витрачений на прийом сигналів [2]:

$$t_{\text{пр}} = 1/\mu_{i.i}. \quad (1.28)$$

Для оцінки ймовірності виявлення сигналів по напрямку й частоті на практиці можна скористатися формулярами розрахунку ймовірнісних характеристик.

У цьому випадку вихідними даними для розрахунку будуть [2]:

- тривалість і частота повторення імпульсів радіолокаційної станції, що розвідує $\tau_c, F_c = 1/T_c$;

- швидкість обертання антени радіолокаційної станції, що розвідує, n_a ;

- ширина діаграми спрямованості антени радіолокаційної станції β_a ;

- швидкість обертання антени пошукової станції n_p ;

- ширина діаграми спрямованості антени пошукової станції β_p ;

- частотний діапазон пошуку Δf ;

- період перебудови в смузі $\Delta f - T_{\text{п}}$;

- смуга пропускання прийомного пристрою Δf_p .

При пошуку за напрямом розраховуються наступні характеристики [2]:

1. Ймовірність зустрічі діаграм спрямованості:

- якщо $T_a > T_p$, то $P_{\text{ар}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T_p} \cdot (\beta_a \cdot T_a + \beta_p \cdot T_p)$;

- якщо $T_p > T_a$, то $P_{\text{ра}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T_a} \cdot (\beta_a \cdot T_a + \beta_p \cdot T_p)$.

2. Ймовірність зустрічі діаграм спрямованості за k оборотів:

$$P_k = 1 - (1 - P_{\text{ар,ра}})^k \quad 1.29$$

3. Необхідний час пошуку із заданою ймовірністю виявлення:

$$t_n = \frac{T_p \cdot \lg(1 - P_k)}{\lg(1 - P_{ap,pa})}. \quad (1.30)$$

З основних характеристик пошуку у частотному діапазоні можна виконати у такій послідовності [2]:

1. Визначається співвідношення між періодом повторення імпульсів T_c і періодом перебудови T_n .

Якщо $T_c > T_n$, розраховується ймовірність настроювання прийомного пристрою на частоту сигналу за один цикл перебудови:

$$P_{nc} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} \cdot \frac{1}{\tau} + Q_c. \quad (1.31)$$

Якщо $T_n > T_c$, розраховується ймовірність настроювання прийомного пристрою на частоту сигналу за період повторення імпульсів:

$$P_{cn} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} + \tau_c \cdot Q_c. \quad (1.32)$$

2. Розраховується ймовірність настроювання прийомного пристрою станції розвідки на частоту сигналу за k циклів перебудови або за k періодів повторення сигналу:

$$P_k = 1 - (1 - P_{nc,cn})^k. \quad (1.33)$$

3. Визначається необхідне число циклів перебудови k й час для виявлення сигналів у частотному діапазоні Δf із заданою ймовірністю P_k .

Якщо здійснюється спільний пошук за частотою й напрямком, то може застосовуватися наступний порядок розрахунку [2]:

1. Тривалість серії опромінення:

$$\tau_a = \frac{\beta_a}{2 \cdot \pi} \cdot T_a. \quad (1.34)$$

1. Частота повторення серій опромінення:

$$\mu_1 = n_a/60. \quad (1.35)$$

2. Тривалість серії прийому сигналів:

$$\tau_2 = \frac{\beta_p}{2 \cdot \pi} \cdot T_p. \quad (1.36)$$

3. Частота повторення серій прийому:

$$\mu_2 = n_p/60. \quad (1.37)$$

5. Тривалість і частота спостереження сигналів пошуковою станцією радіотехнічної розвідки на фіксованій частоті:

$$\tau_3 = \frac{\Delta f_p}{\Delta f} \cdot T_{\pi}; F_3 = \frac{1}{T_{\pi}} = \mu_3. \quad (1.38)$$

4. Тривалість і частота проходження імпульсів радіолокаційної станції:

$$\tau_4 = \tau_c; F_4 = \frac{1}{T_{\pi}} = \mu_4. \quad (1.39)$$

5. Середня частота прийому сигналів при спільному пошуку за частотою й напрямком:

$$\mu_{4.4} = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 \cdot (\tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 + \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_4 + \tau_1 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4) \quad (1.40)$$

8. Періодичність прийому сигналів (час, що витрачається на прийом сигналів):

$$T_{4.4} = 1/\mu_{4.4} \quad (1.41)$$

Покажемо загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ при спільному пошуку на рис. 1.6:



Рисунок 1.6 – Загальний алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ при змішаному пошуку

В даному розділі був проведений огляд відомих методів виявлення РЕЗ, а саме: пошук по напрямку, пошук у частотному діапазоні та спільний пошук. Були показані загальні алгоритми розрахунку показників якості виявлення для

відомих методів пошуку. З аналізу виразів видно, що ймовірність зустрічі $P_{\text{зст}}$ діаграм спрямованості визначається їхньою шириною й значенням періодів обертання антени, а ймовірність настройки приймача P_c на частоту випромінюючого сигналу визначається його смугою пропускання, періодом перестройки, а також скаважністю сигналу та полосою розвідки.

В даній роботі ми будемо використовувати пошукові методи виявлення РЕЗ.

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ (ДРВ)

2.1 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі

Для обчислень та досліджень обираємо інтегрований багатофункціональний програмний пакет MathCAD, аббревіатура розшифровується як **Mathematical Computer Aided Design**, що переводиться як математичне автоматизоване проектування. Алгоритм задач в пакеті MathCAD описується в загальноприйнятих математичних термінах і позначеннях. Пакет має розвинуті засоби роботи із текстовою, графічною та ілюстративною інформацією являючи в сукупності розвинений інтегрований засіб із елементами штучного інтелекту для автоматизації вирішення задач обчислювального характеру.

Для отримання показників якості в просторі будемо проводити розрахунок за наступною послідовністю:

1. Встановлюємо кути розкриву ДС станції радіотехнічної розвідки та радіолокаційної станції відповідно β_p та β_a . Встановлюємо період обертання антен станції радіотехнічної розвідки T_p та межі зміни періоду обертання антени станції РЛС T_a .

2. За формулами (1.4) та (1.5) отримуємо залежність ймовірності зустрічі ДС антен станції РТР та РЛС.

3. Змінюємо кут розкриву ДС РЛС β_a та аналізуємо зміну залежності ймовірності зустрічі ДС антен.

4. Змінюємо період обертання антени станції РТР та аналізуємо зміну залежності ймовірності зустрічі ДС антен.

5. Встановлюємо конкретні значення періоду оберту РЛС T_a та знаходимо відношення періодів обертання антен $Q = \frac{T_a}{T_p}$.

6. Якщо $T_a > T_p$, з графіку залежності знаходимо ймовірність зустрічі ДС антен P_{ap} , що відповідає виразу (1.4). Якщо $T_p > T_a$, знаходимо ймовірність зустрічі ДС антен P_{pa} , що відповідає виразу (1.5). Ми знайшли ймовірність зустрічі ДС антен за 1 оберт антен.

7. Для побудови ймовірності зустрічі ДС антен за k обертів антен використовуємо вираз (1.6).

8. Встановлюємо конкретні значення обертів антен та отримуємо ймовірність зустрічі ДС антен за k обертів.

9. Знаючи число обертів антени, необхідний час пошуку t_n розраховуємо за формулою (1.7).

Отже, покажемо алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі на рис. 2.1:

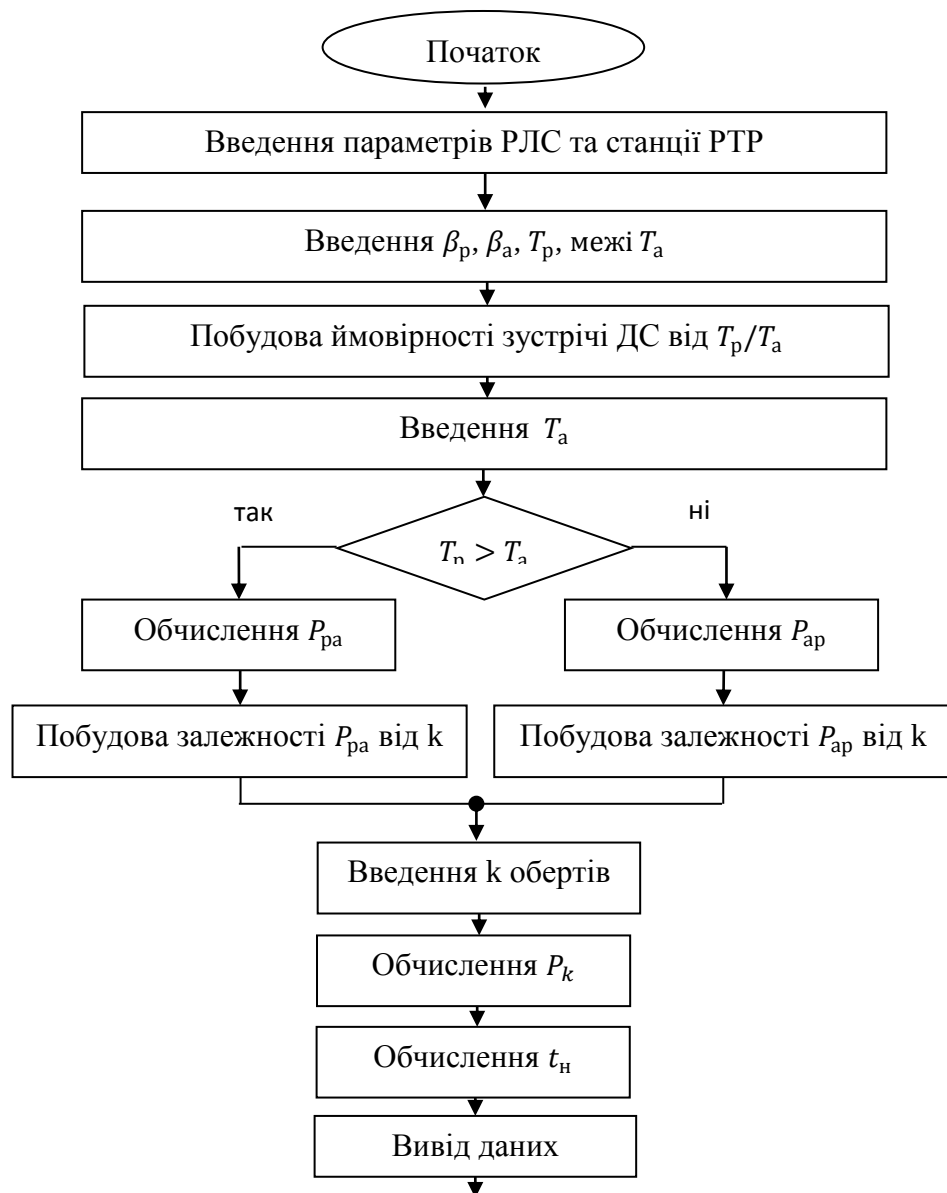


Рисунок 2.1 – Алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у просторі зустрічі ДС антен, але й провести всі необхідні дослідження і побачити як зміна параметрів обох станції впливає на ймовірність зустрічі ДС як за 1 оберт антени, так і за k обертів.

2.2 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ у частотному діапазоні

Будемо проводити розрахунок за наступною послідовністю:

1. Встановлюємо полосу розвідки Δf . Так як пошук будемо проводити у всьому діапазоні частот, тоді $\Delta f = \text{const} = 18$ ГГц. Встановлюємо смугу пропускання прийомного пристрою Δf_p . Встановлюємо тривалість імпульсу τ_c та період слідування імпульсів T_c .

2. Встановлюємо межі зміни відношення періодів слідування імпульсів до періоду перестройки прийомного пристрою $\tau = T_c/T_{\pi}$.

3. За виразами (1.12) отримуємо залежність ймовірності виявлення сигналу від відношення періодів слідування імпульсів і періоду перестройки приймача.

4. Змінюємо смугу пропускання прийомного пристрою Δf_p та аналізуємо отримані залежності.

5. Змінюємо період слідування імпульсів T_c та аналізуємо отримані залежності ймовірностей.

6. Встановлюємо конкретні значення перестройки приймача T_{π} та знаходимо τ , знаходимо час перебудови прийомного пристрою $t_{\Delta f_p}$ та швидкість пошуку γ за виразом (1.11).

7. Якщо $T_c > T_{\pi}$, знаходимо ймовірність виявлення сигналу $P_{\text{пс}}$. Якщо $T_{\pi} > T_c$, знаходимо ймовірність виявлення сигналу $P_{\text{сп}}$. Ми знайшли ймовірність

настройки приймального пристрою на частоту випромінюючого сигналу за 1 цикл перестройки або за 1 період повторення сигналу.

8. Будуємо ймовірності виявлення сигналу за k циклів перестройки або за k періодів повторення сигналу за виразом (1.21).

9. Встановлюємо конкретне значення k та знаходимо ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу за k циклів перестройки або за k періодів повторення сигналу.

10. Розраховуємо час виявлення сигналу t_q за виразом (1.22).

Алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у частотному діапазоні представлений на рис. 2.2:

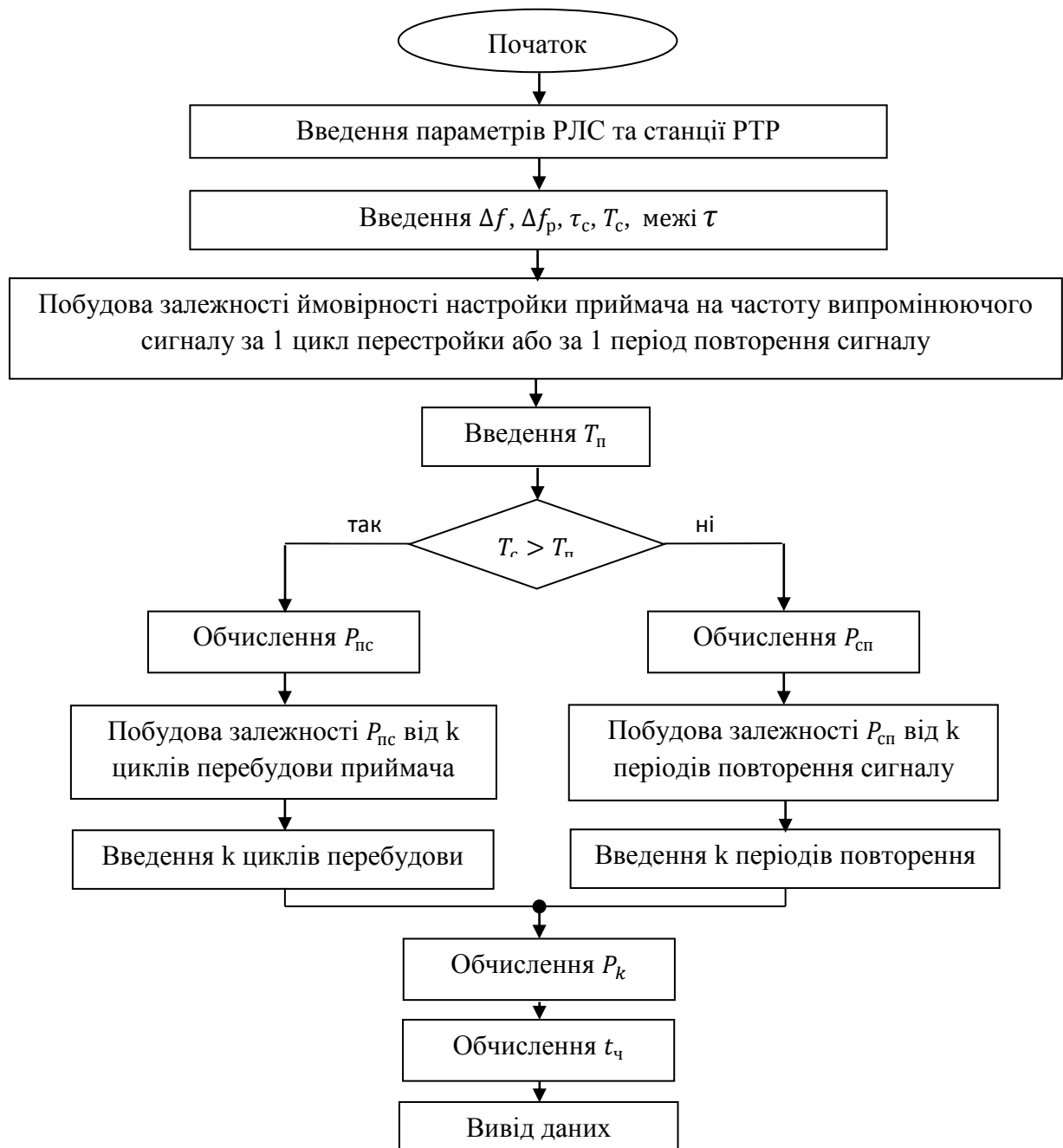




Рисунок 2.2 – Алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ у частотному діапазоні

Даний алгоритм дозволяє визначити необхідну ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу як за 1 період цикл перестройки і 1 період повторення сигналу, так і для k періодів циклів та k періодів повторення сигналу. Також можливо дослідити як зміна параметрів приймача впливає на ймовірність знаходження сигналу у частотному діапазоні.

2.3 Розробка алгоритму розрахунку показників якості виявлення ДРВ при спільному пошуку у просторі та частотному діапазоні.

1. Встановлюємо кути розкриття ДС станції радіотехнічної розвідки та радіолокаційної станції відповідно β_p та β_a . Встановлюємо період обертання антен станції радіотехнічної розвідки T_p та межі зміни періоду обертання антени РЛС T_a . За формулами (1.4) та (1.5) отримуємо залежність ймовірності зустрічі ДС антен $P_{ap,pa}$ станції РТР та РЛС.

2. Встановлюємо полосу розвідки Δf . Так як пошук будемо проводити у всьому діапазоні частот, тоді $\Delta f = const = 18$ ГГц. Встановлюємо смугу пропускання прийомного пристрою Δf_p . Встановлюємо тривалість імпульсу τ_c та період слідування імпульсів T_c . Встановлюємо межі зміни відношення періодів слідування імпульсів до періоду перестройки прийомного пристрою $\tau = T_c/T_p$. За формулами (11) отримуємо залежність ймовірності виявлення сигналу $P_{пс,сп}$ від відношення періодів слідування імпульсів і періоду перестройки приймача.

3. Для отримання спільної залежності, необхідно перемножити отримані залежності ймовірностей у просторі та у частотному діапазоні. В результаті отримаємо та аналізуємо трьохмірні графіки залежностей для кожного з випадків:

а). $T_a > T_p, T_n > T_c$; б). $T_a > T_p, T_c > T_n$;

в). $T_p > T_a, T_n > T_c$; г). $T_p > T_a, T_c > T_n$.

4. Змінюючи параметри станції РТР та РЛС, такі як кути розкриву ДС антен, період обертання антени РЛС, смугу пропускання прийомного пристрою та період слідування імпульсів, період перестройки приймача, досліджуємо зміну спільної ймовірності пошуку.

5. Встановлюємо конкретні значення періоду оберту РЛС T_a та конкретні значення перестройки приймача T_n , та отримуємо спільну ймовірність виявлення сигналу за 1 період антени та 1 цикл перестройки приймача.

6. Знаходимо час перебудови прийомного пристрою $t_{\Delta f_p}$ та швидкість пошуку γ .

7. За виразами (1.6) та (1.21) отримуємо залежності ймовірності зустрічі ДС за k обертів антен $P_{k(пр)}$ та ймовірність настройки РПП на частоту випромінюючого сигналу за k періодів перестройки $P_{k(ч)}$.

8. Розраховуємо необхідний час пошуку у просторі t_n та час виявлення сигналу за частотою $t_{ч}$.

9. Встановлюємо кількість оборотів антени й період перестройки приймача та визначаємо спільну ймовірність виявлення у просторі та у частотному діапазоні.

10. Знаходимо тривалість серії опромінення τ_a , частоту повторення серій опромінення μ_1 , тривалість серії прийому сигналів τ_2 , частота повторення серій прийому μ_2 , тривалість і частоту спостереження сигналів пошуковою станцією радіотехнічної розвідки на фіксованій частоті – τ_3 і F_3 , тривалість і частоту проходження імпульсів РЛС – τ_4 і F_4 , середню частоту прийому сигналів за частотою і напрямом $\mu_{4.4}$ та періодичність прийому сигналів $T_{4.4}$.

Отже, алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ при спільному пошуку у просторі і у частотному діапазоні, може бути представлений на рис. 2.3.

За допомогою даного алгоритму можливо визначити показники якості виявлення при спільному послідовному пошуку і побачити, як зміни параметрів станції РТР та РЛС впливають на спільну ймовірність виявлення сигналу у просторі і частотному діапазоні.

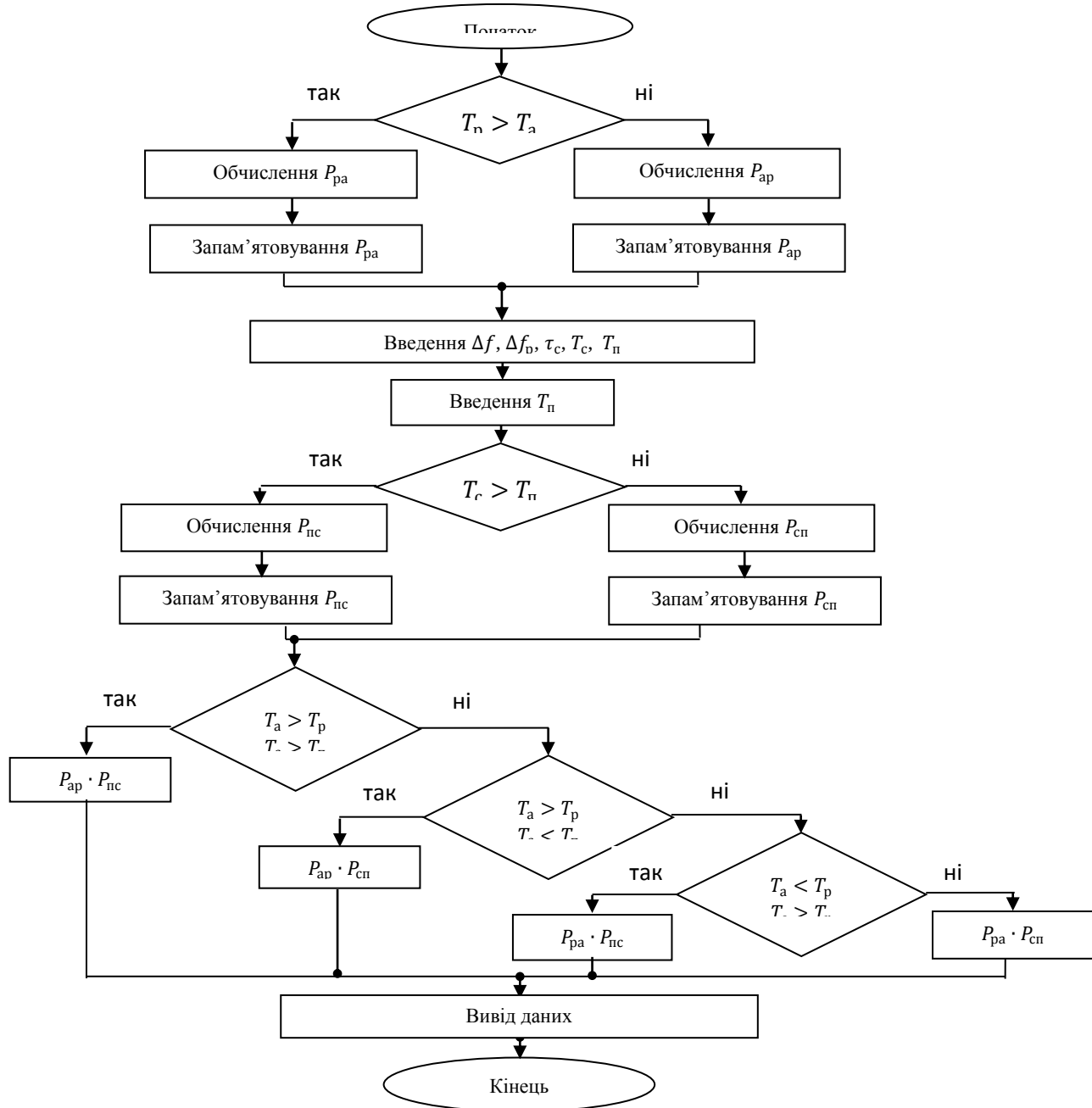


Рисунок 2.3 – Алгоритм розрахунку показників якості виявлення ДРВ при спільному пошуку

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ДРВ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ

3.1 Визначення ймовірності зустрічі діаграм спрямованості антен

1. Досліджуємо залежність ймовірності зустрічі діаграм спрямованості $P_{\text{зст}}$ від величини $Q = \frac{T_a}{T_p}$ при зміні кута розкриття ДС РЛС β_a за 1 оберт антени

[2]. Встановлюємо такі значення станції РЛС та РТР:

- кут розкриття ДС станції РТР: $\beta_p = 90^\circ$ (1,571 рад);
- період обертання антени станції РТР: $T_p = 5$ с;
- межі зміни значення періоду обертання антени РЛС: $T_a = 0..300$ с.

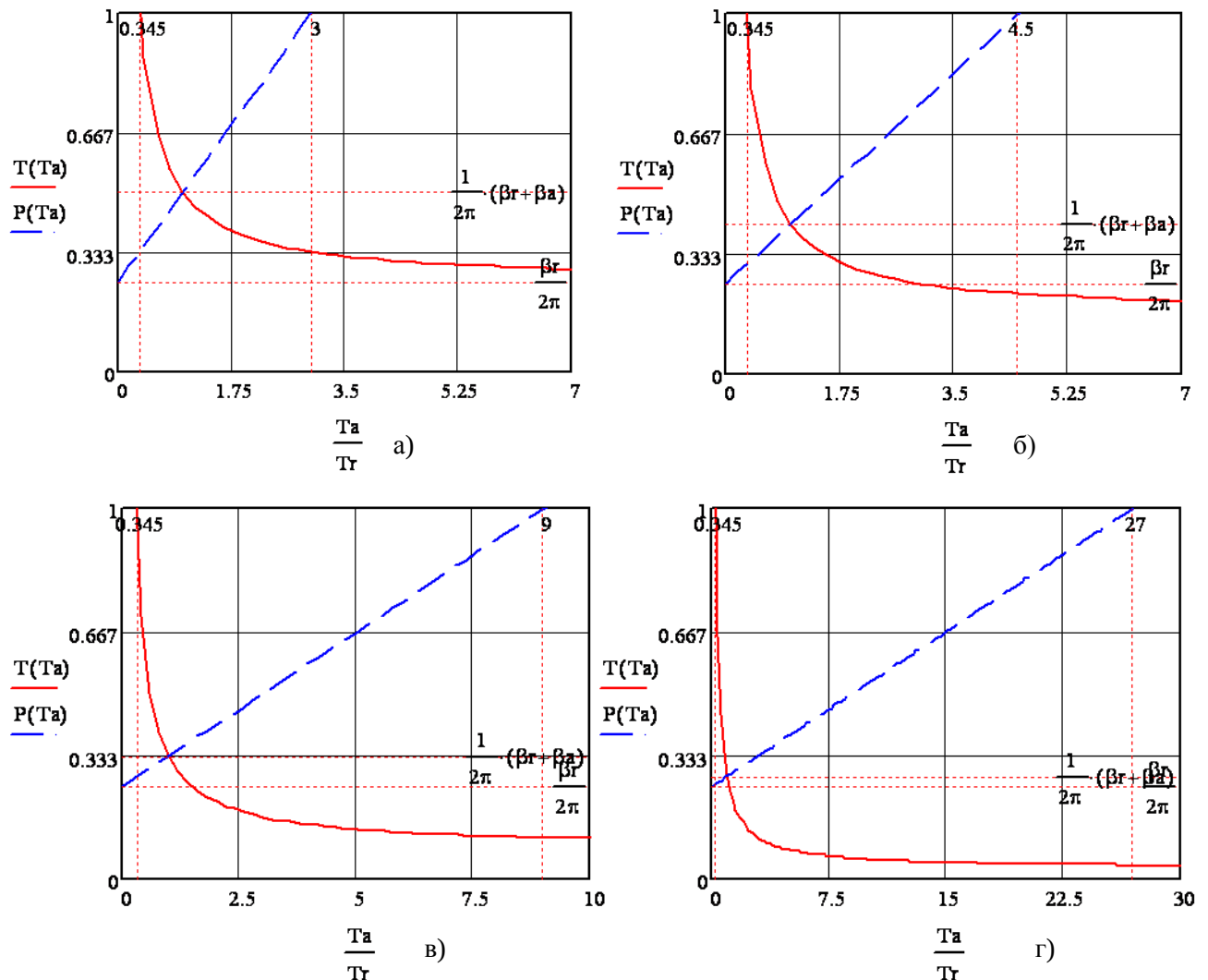


Рисунок 3.1 – Ймовірність зустрічі ДС антен станції РЛС та РТР при

а) $\beta_a = 90^\circ$; б) $\beta_a = 60^\circ$; в) $\beta_a = 30^\circ$; г) $\beta_a = 10^\circ$

Як видно з отриманих залежностей, чим менше кут розкриття ДС антени РЛС, тим більше ймовірнісний пошук із середньою швидкістю. Час зустрічі при повільному пошуку буде майже дорівнювати часу опромінення, тобто можна сказати, що повільний пошук є неприйнятним для виявлення короточасних працюючих радіоелектронних засобів, але при повільному пошуку забезпечується час прийому сигналів цілком достатній для спрацювання аналізуючої апаратури.

2. Досліджуємо залежність ймовірності зустрічі діаграм спрямованостей

$P_{\text{зст}}$ від величини $Q = \frac{T_a}{T_p}$ при зміні кута розкриття ДС станції РТР β_p :

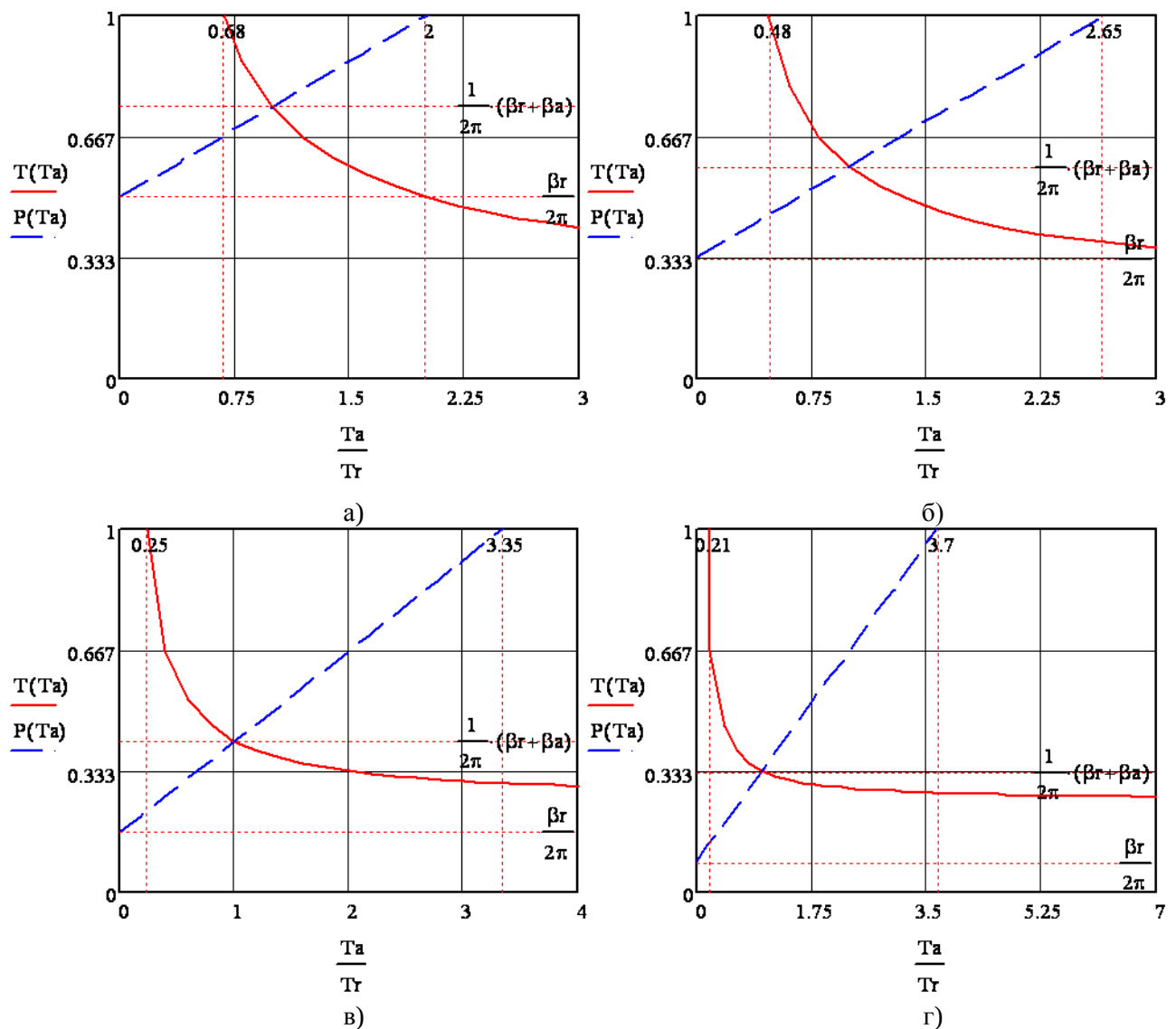


Рисунок 3.2 – Ймовірність зустрічі ДС антен при станції РЛС та РТР при

а) $\beta_p = 180^\circ$; б) $\beta_p = 120^\circ$; в) $\beta_p = 60^\circ$; г) $\beta_p = 30^\circ$

Як видно з рис. 3.2, зміна кута розкриття станції РТР має вплив набагато більший ніж зміна кута розкриття РЛС. При великих значеннях кута розкриття станції РТР маємо найкращу ймовірність зустрічі ДС при 1 оберті антени. Зменшення кута розкриття ДС РТР призводить до зменшення повільного гарантованого пошуку та збільшення ймовірнісного пошуку.

3. Досліджуємо залежність ймовірності зустрічі діаграм спрямованостей $P_{зст}$ від величини $Q = \frac{T_a}{T_p}$ при зміні періоду обертання антени станції РТР T_p [2]:

- кут розкриття ДС станції РТР: $\beta_p = 90^\circ$ (1,571 рад);
- кут розкриття ДС РЛС: $\beta_a = 90^\circ$ (1,571 рад);
- межі зміни значення періоду обертання антени РЛС: $T_a = 0..300$ с.

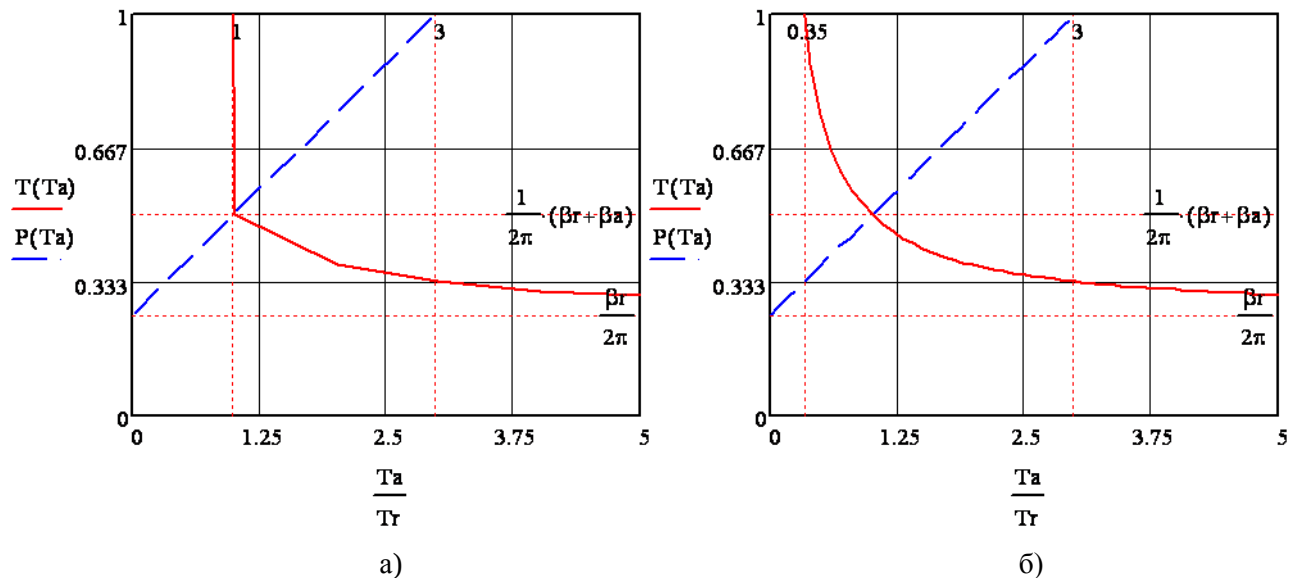


Рисунок 3.3 – Ймовірність зустрічі ДС антен при а) $T_p = 1$ с, б) $T_p = 10$ с

При збільшенні періоду обертання антени станції РТР повільний гарантований пошук зменшується, швидкий пошук залишається незмінним.

4. Досліджуємо залежність ймовірності зустрічі діаграм спрямованостей за k обертів антен [2].

Встановлюємо такі параметри станції РТР та РЛС:

- період обертання антени станції РТР: $T_p = 5$ с;
- період обертання антени РЛС: $T_a = 3$ с.

В даному випадку $T_p > T_a$, тоді за виразом (1.5) знайдемо ймовірність зустрічі ДС антен:

$$P_{pa} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot (1,571 \cdot 3 + 1,571 \cdot 5) = 0,667.$$

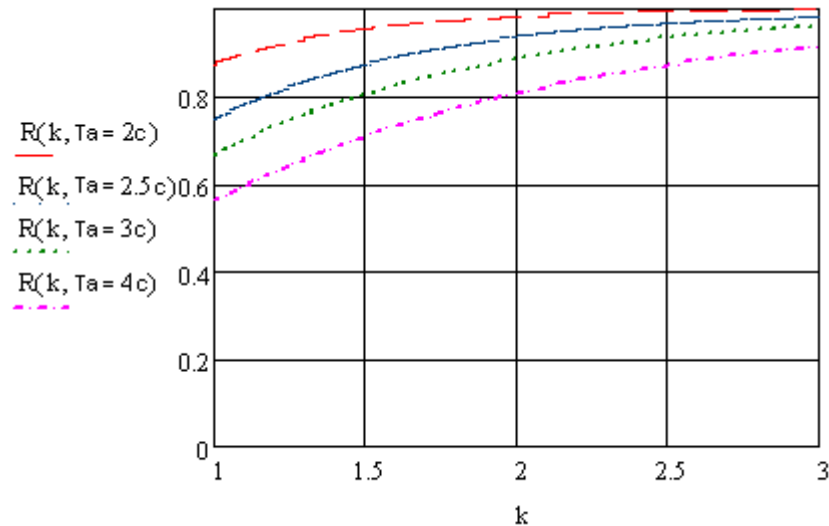


Рисунок 3.4 – Ймовірність зустрічі ДС антен за k обертів антен при $T_a = 2$ с; $T_a = 2,5$ с; $T_a = 3$ с; $T_a = 4$ с, за умови, що $P_{pa} = 0,667$

Як бачимо з рис. 3.4, з такими параметрами РЛС та станції РТР для гарантованої зустрічі ДС антен необхідно виконати 6 обертів антені станції РТР. Також видно, що чим менше період обертуту антени РЛС і чим більший період обертуту антени станції РТР, тим краща ймовірність зустрічі ДС за 1 оберт.

Введемо кількість обертів $k=4$ і розрахуємо ймовірність зустрічі ДС за виразом (1.6):

$$P_k = 1 - (1 - 0,667)^4 = 0,988.$$

За (1.7) визначимо необхідний час пошуку:

$$t_H = 4 \cdot 5 = 20 \text{ с.}$$

Як бачимо при таких параметрах станції РТР та РЛС, за 1 оберт антени станції РТР, що триває 5 с, ймовірність зустрічі ДС буде складати 0,667. При 4 обертах антени на КА, час пошуку вже буде складати 20 с і відповідно ймовірність зустрічі ДС буде більше і складатиме 0,988 – майже гарантована зустріч.

Введемо інші параметри станцій та проведемо дослідження:

- період обертання антени станції РТР: $T_p = 4$ с;
- період обертання антени РЛС: $T_a = 6$ с.

В такому випадку $T_a > T_p$, тоді ймовірність зустрічі ДС антен за формулою (1.4):

$$P_{ap} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot (1,571 \cdot 6 + 1,571 \cdot 3) = 0,625.$$

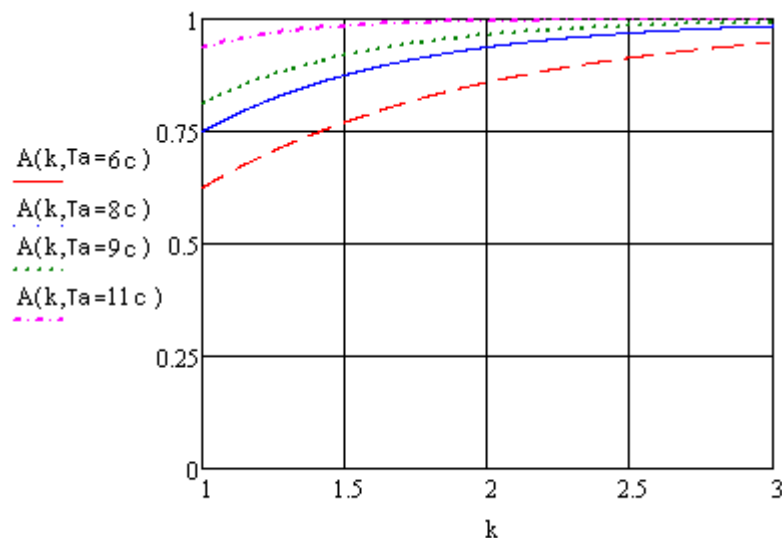


Рисунок – 3.5 Ймовірність зустрічі ДС антен за k обертів антен при $T_a = 6$ с; $T_a = 8$ с; $T_a = 9$ с; $T_a = 11$ с, за умови, що $P_{pa} = 0,625$

З рис. 3.5 видно, що чим більший період оберту антени РЛС, тим гірша ймовірність зустрічі ДС антен за 1 оберт.

Введемо кількість обертів антени РЛС $k=4$, тоді за (1.7):

$$P_k = 1 - (1 - 0,625)^4 = 0,98.$$

Визначимо необхідний час пошуку:

$$t_n = 4 \cdot 4 = 16 \text{ с.}$$

Як бачимо пошуку у просторі буде проводитися швидше за менший період обертання антени станції РТР, але ймовірність при цьому буде трохи меншою.

Отже можна зробити загальний висновок щодо пошуку РЕЗ за напрямом:

Для отримання високої ймовірності зустрічі ДС необхідно, щоб кути розкриву ДС антен були досить високими, і чим більше, тим краще. Високу ймовірність зустрічі при 1 обертанні антен можна отримати при кутах розкриву $\geq 90^\circ$. Чим більша ймовірність зустрічі ДС антен за 1 оберт антен, тим менше обертів потрібно зробити антенам для гарантованої зустрічі ДС. Також було встановлено, що якщо кути розкриву ДС обох антен 90° , і період будь-якої з антен буде перевищувати один одну в 3 рази, будемо мати гарантовану зустріч ДС антен. При дослідженні було встановлено, що якщо період обертання антен між станціями буде один і той самий (наприклад 2 с), то ймовірність зустрічі ДС буде більша у випадку, коли період обертання антени РЛС буде менший за період обертання антени станції РТР, тобто $T_p > T_a$.

3.2 Визначення ймовірності настройки приймального пристрою на частоту випромінюючого сигналу

1. Досліджуємо залежність ймовірності виявлення сигналу P_c від відношення періоду слідування імпульсів і періоду перестройки РПП $\tau = T_c/T_n$ при зміні смуги пропускання прийомного пристрою за 1 цикл перебудови або за 1 період перебудови приймача [2].

Встановлюємо такі значення станції РЛС та РТР:

- смуга розвідки: $\Delta f = 18 \text{ ГГц}$;
- тривалість імпульсу: $\tau_c = 50 \text{ мкс}$;

- період слідування імпульсів: $T_c = 100$ мкс;
- межі зміни значення відношення періодів слідування імпульсів і періодом перестройки приймача: $\tau = 0,001..10$.

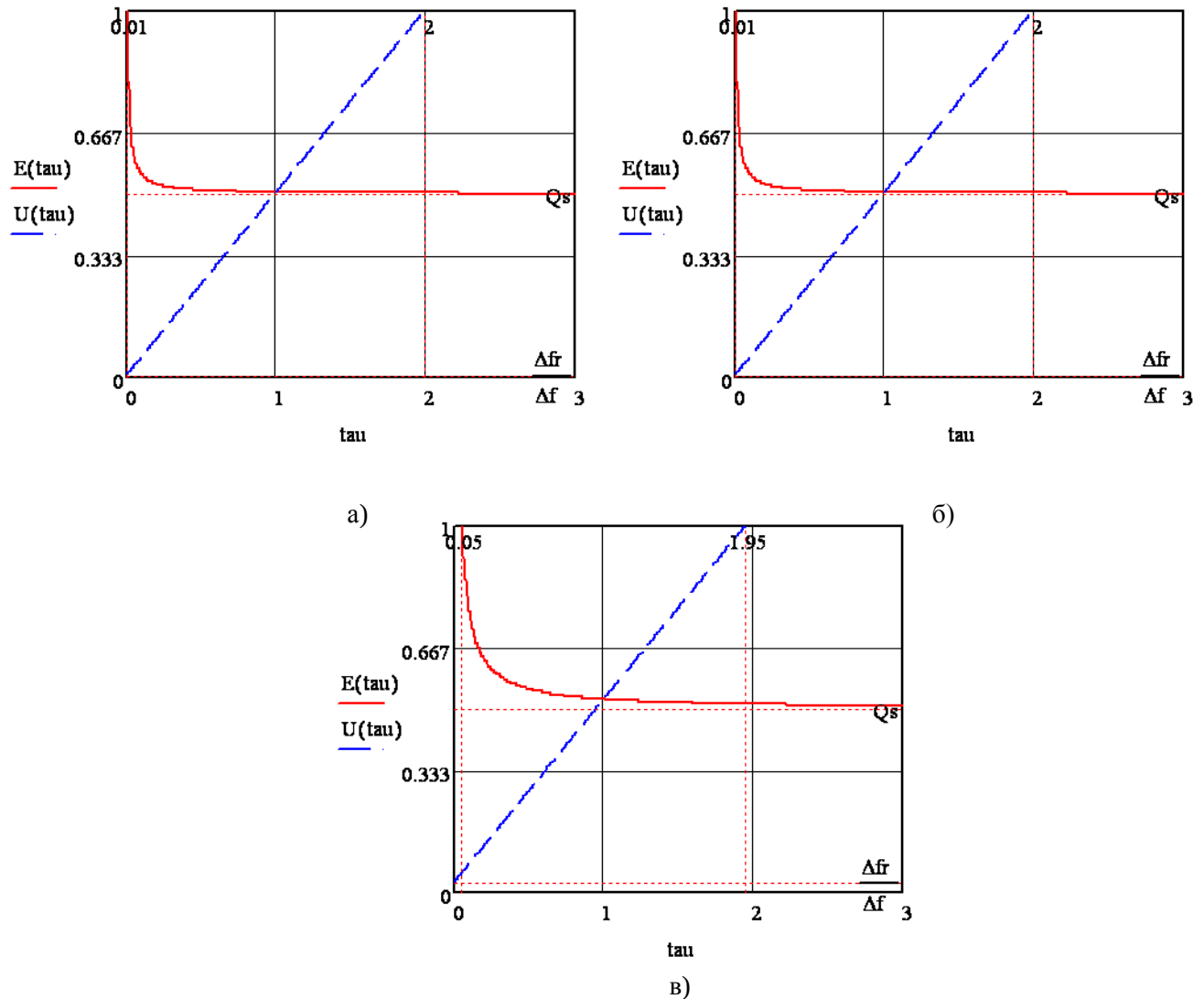


Рисунок 3.6 – Залежність ймовірності виявлення сигналу від відношення періоду слідування імпульсів і періоду перестройки РПП при
а) $\Delta f_p = 10$ МГц; б) $\Delta f_p = 100$ МГц; в) $\Delta f_p = 500$ МГц

З рис. 3.6 видно, що якщо смуга пропускання прийомного пристрою є досить малою, то повільний гарантований пошук майже не буде відбуватися. Чим більша смуга пропускання приймального пристрою, тим краща ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу.

2. Змінюємо період слідування імпульсів при таких же параметрах станцій:

- смуга пропускання приймача: $\Delta f_p = 50$ МГц.

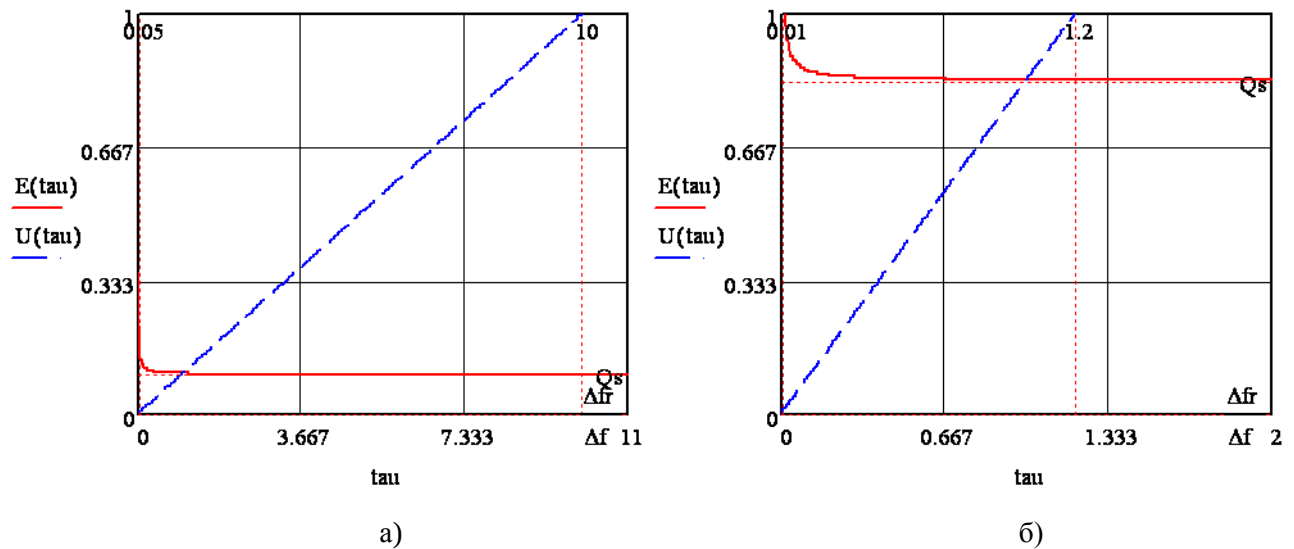


Рисунок 3.7 – Залежність ймовірності виявлення сигналу від відношення періоду слідування імпульсів і періоду перестройки РПП при

а) $T_c = 500$ мкс; б) $T_c = 60$ мкс

З графіків видно, що чим менше відношення тривалості імпульсу до періоду повторення імпульсів, тим більша скважність сигналу і тим краща ймовірність настройки сигналу на частоту випромінювання.

3. Досліджуємо ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу за k циклів перестройки або за k періодів повторення імпульсів:

Встановлюємо такі параметри станцій:

- смуга пропускання приймача: $\Delta f_p = 50$ МГц;
- період слідування імпульсів: $T_c = 100$ мкс;
- встановимо період перестройки приймача $T_n = 50$ мкс.

Тоді за формулою (1.14):

$$\tau = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6}} = 2.$$

Сквашність сигналу визначається за виразом (1.15):

$$Q_c = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} = 0,5.$$

В даному випадку $T_c > T_{\text{п}}$, тоді ймовірність спів падіння за виразом (1.30):

$$P_{\text{пс}} = \frac{50 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} \cdot \frac{1}{2} + 0,5 = 0,501.$$

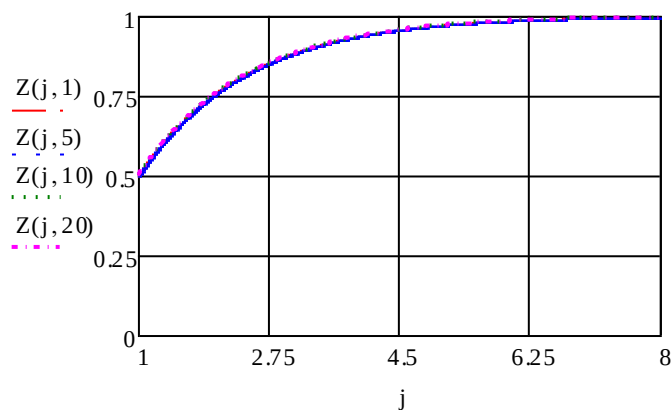


Рисунок 3.8 – Ймовірність настройки приймального пристрою на частоту сигналу за k циклів перестройки при $\tau = 1$; $\tau = 5$; $\tau = 10$; $\tau = 20$,

за умови, що $P_{\text{пс}} = 0,501$

Як бачимо, при таких параметрах приймального пристрою для гарантованої настройки приймача на частоту сигналу необхідно виконати 8 циклів перестройки. Було встановлено, що якщо $T_c > T_{\text{п}}$, ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу майже не змінюється.

Введемо кількість циклів перестройки $k=3$, тоді за (1.32):

$$P_k = 1 - (1 - 0,501)^5 = 0,876.$$

Визначимо час виявлення сигналу за виразом (1.22):

$$t_{\text{ч}} = -100 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\ln(1 - 0,876)}{0,501} = 417 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Змінимо параметри станції.

Візьмемо період перестройки приймача: $T_{\text{п}} = 150 \text{ мкс.}$

Тоді:

$$\tau = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{150 \cdot 10^{-6}} = 0,667.$$

В даному випадку $T_{\text{п}} > T_{\text{с}}$, тоді ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу знаходимо за (1.31) :

$$P_{\text{сп}} = \frac{50 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} + 0,5 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 0,336.$$

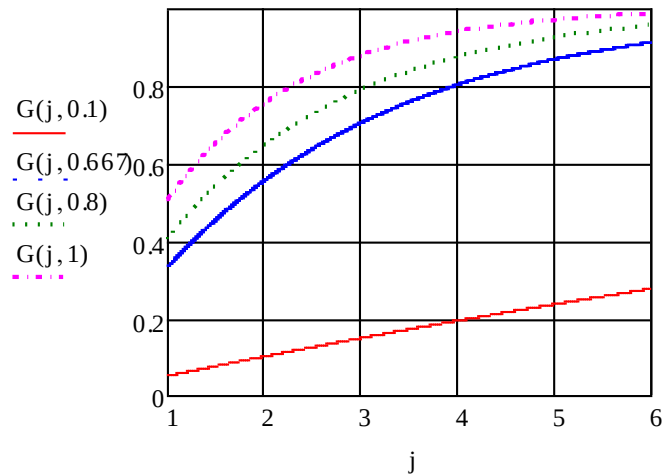


Рисунок 3.9 – Ймовірність настройки приймального пристрою на частоту сигналу за k циклів перестройки при $\tau = 0,1$; $\tau = 0,667$; $\tau = 0,8$; $\tau = 1$,
за умови, що $P_{\text{сп}} = 0,336$

При таких параметрах приймального пристрою для гарантованої настройки приймача на частоту сигналу необхідно, щоб відбулося 15 періодів повторення сигналу. Рис. 3.9 показує, що чим менше значення відношення періоду слідування імпульсів до періоду перестройки приймача, тим вище ймовірність настройки приймача за 1 період повторення сигналу.

Введемо кількість циклів перестройки $k=5$, тоді:

$$P_k = 1 - (1 - 0,336)^5 = 0,871.$$

Визначимо час виявлення сигналу за 5 періодів повторення сигналу:

$$t_{\text{ч}} = -100 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\ln(1 - 0,871)}{0,336} = 610 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

З отриманих результатів можна зробити висновок, що для того, щоб отримати високі показники якості виявлення за частотою, необхідно виконувати пошук у частотному діапазоні з періодом перестройки приймача, що є меншим за період слідування імпульсів, тобто приймач перелаштовується швидше ніж приходить імпульс. Було встановлено, що при введених параметрах станцій, для отримання гарантованої настройки приймача на частоту випромінювання сигналу необхідно виконати 10 циклів перестройки приймача при $T_c > T_{\text{п}}$, що складатиме 663 мкс або отримати 18 разів один і той же імпульс при $T_{\text{п}} > T_c$ за 1 мс. В такому випадку перший варіант є більш доцільнішим.

3.3 Визначення ймовірності виявлення сигналу при спільному пошуку

1. Досліджуємо спільну ймовірність виявлення сигналу при одночасному дослідженні ймовірності зустрічі ДС антен та ймовірності настройки приймального пристрою на частоту випромінюючого сигналу при невідомих параметрах РЛС.

Встановлюємо такі параметри станцій:

- кут розкриття ДС станції РТР: $\beta_p = 60^\circ$ (1,047 рад);
- кут розкриття ДС РЛС: $\beta_a = 60^\circ$ (1,047 рад);
- період обертання антени станції РТР: $T_p = 5$ с;
- межі зміни значення періоду обертання антени РЛС: $T_a = 0..300$ с;
- смуга розвідки: $\Delta f = 18$ ГГц;
- тривалість імпульсу: $\tau_c = 50$ мкс;
- смуга пропускання приймача: $\Delta f_p = 100$ МГц;
- період слідування імпульсів: $T_c = 100$ мкс;
- межі зміни значення відношення періодів слідування імпульсів і періодом перестройки приймача $\tau = 0,001..100$ с.

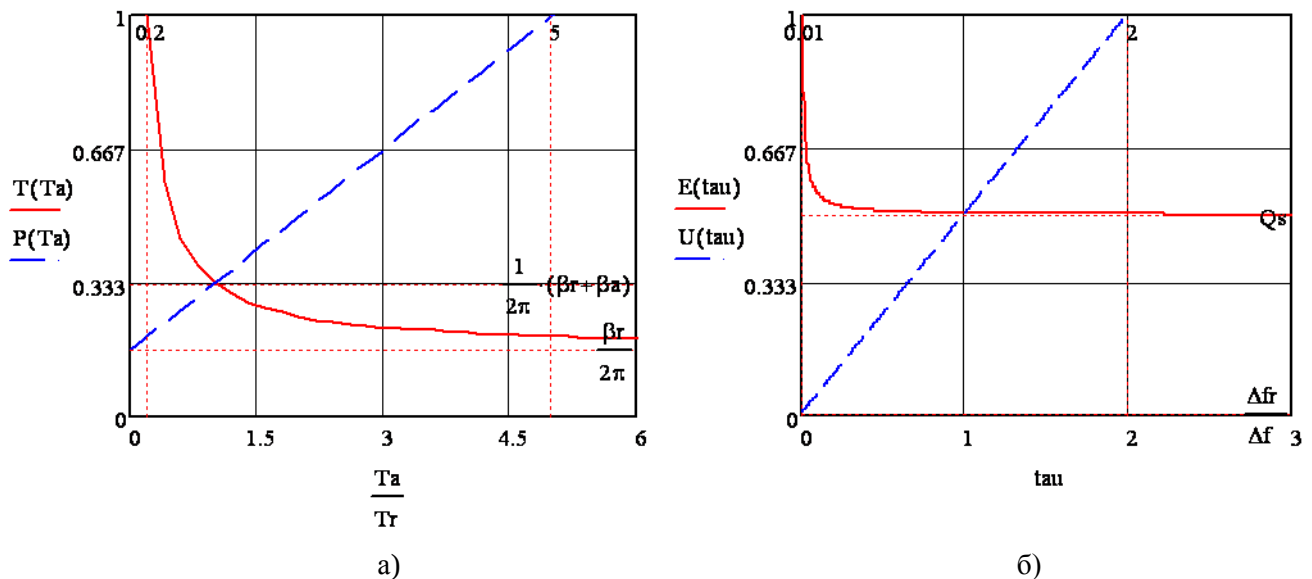


Рисунок 3.10 – а) Ймовірність зустрічі ДС антен при $T_a > T_p, T_p > T_a$;
 б) Ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу
 при

$$T_c > T_{\pi}, T_{\pi} > T_c$$

Для отримання спільної ймовірності пошуку у просторі і за частотою, поєднаймо між собою усі отримані залежності. В результаті отримаємо трьохмірні графіки залежностей, де по вісі z буде спільна ймовірність пошуку, по вісі x – період обертання антени РЛС (T_a), у – відношення періоду

слідуювання імпульсів до періоду перестройки приймача ($\tau = T_c/T_{\Pi}$). Покажемо спільну ймовірність пошуку для таких умов пошуку:

$$\text{а) } P_{\text{ар,пс}} = P_{\text{ар}} \cdot P_{\text{пс}} \quad \text{для умови} \quad T_a > T_p, T_c > T_{\Pi};$$

(3.1)

$$\text{б) } P_{\text{ар,сп}} = P_{\text{ар}} \cdot P_{\text{сп}} \quad \text{для умови} \quad T_a > T_p, T_{\Pi} > T_c;$$

(3.2)

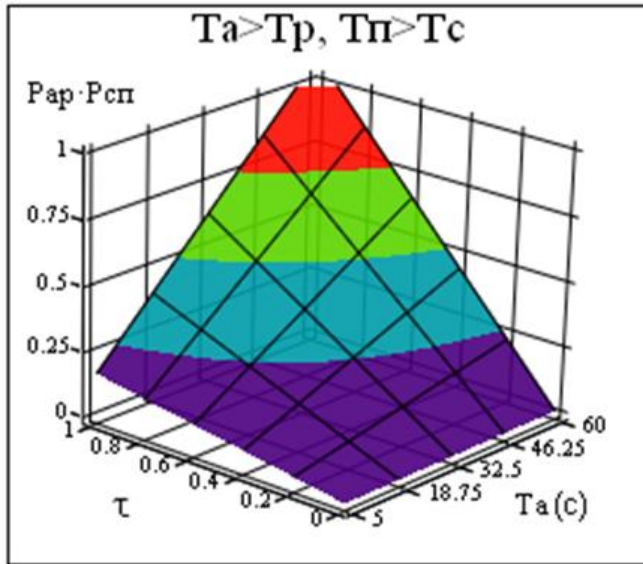
$$\text{в) } P_{\text{ра,пс}} = P_{\text{ра}} \cdot P_{\text{пс}} \quad \text{для умови} \quad T_p > T_a, T_c > T_{\Pi};$$

(3.3)

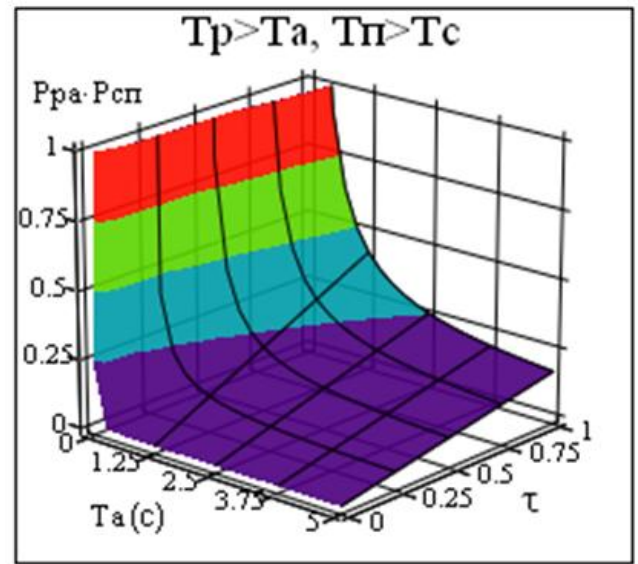
$$\text{г) } P_{\text{ра,сп}} = P_{\text{ра}} \cdot P_{\text{сп}} \quad \text{для умови} \quad T_p > T_a, T_{\Pi} > T_c.$$

(3.4)

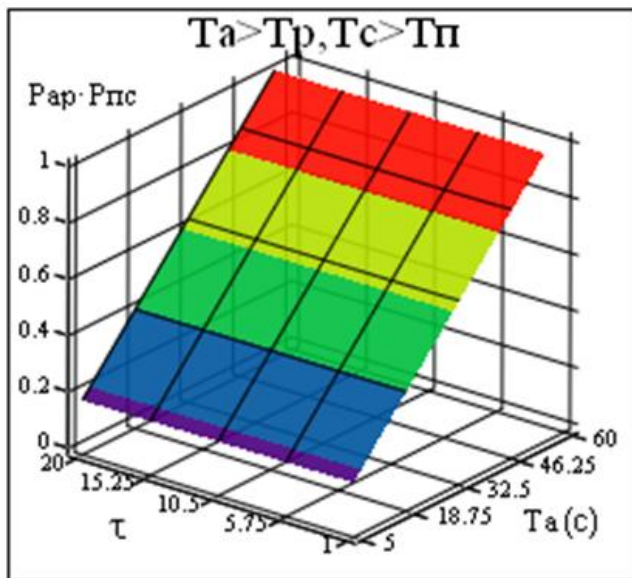
Результуючі графіки зображені на рис. 3.11:



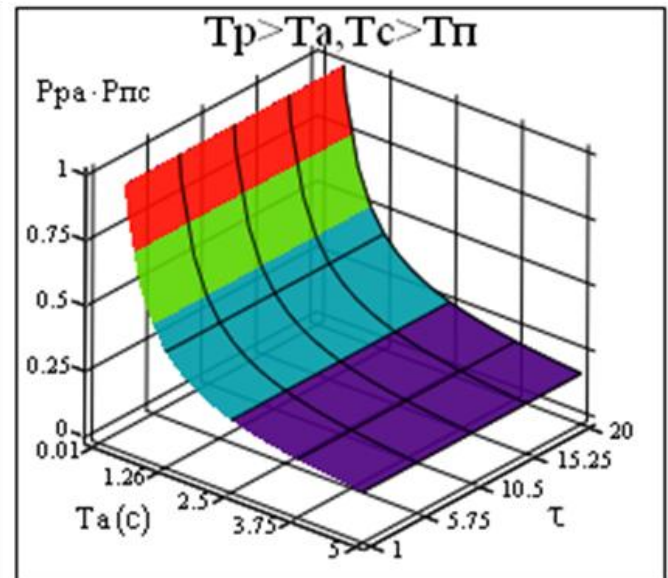
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 – Спільна ймовірність виявлення сигналу при

а). $T_a > T_p, T_{п} > T_c$; б). $T_p > T_a, T_{п} > T_c$;в). $T_a > T_p, T_c > T_{п}$; г). $T_p > T_a, T_c > T_{п}$

Для розуміння залежностей, виконаємо перевірку. Встановимо значення $T_a = 7$ с, $\tau = 0,5$. Визначимо період перестройки приймача:

$$T_{п} = \frac{T_c}{\tau} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{0,5} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

В такому випадку $T_a > T_p$ і $T_{п} > T_c$. Для першої умови за (1.4):

$$P_{\text{ap}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} \cdot (1,047 \cdot 7 + 1,047 \cdot 5) = 0,4.$$

Для другої умови, визначаємо ймовірність настройки за (1.31):

$$P_{\text{сп}} = \frac{50 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} + 0,5 \cdot 0,5 = 0,253.$$

Спільна ймовірність виявлення у просторі і за частотою при таких параметрах станцій за формулою (3.2):

$$P_{\text{ар,сп}} = 0,4 \cdot 0,253 = 0,1.$$

На рис. 3.11а видно, що при таких умовах спільна ймовірність пошуку також дорівнює 0,1. Графічні залежності відповідають формулам.

Тобто рис. 3.11 показує, як буде змінюватися спільна ймовірність виявлення при зміні хоча б одного з параметрів станцій. Це дозволяє нам пред'явити вимоги до станції РТР. Наприклад, для того, щоб провести спільний гарантований пошук у просторі і за частотою при $T_a > T_p$, $T_{\Pi} > T_c$ (див. рис. 3.9а), необхідно, щоб $\tau \approx 0,9$, а $T_a \approx 60$ с. Тоді при періоді обертання антени станції РТР $T_p = 5$ с, період перестройки приймача повинен бути $T_{\Pi} \approx 111$ мкс.

2. Досліджуємо спільну ймовірність виявлення сигналу при одночасному дослідженні ймовірності зустрічі ДС антен та ймовірності настройки приймального пристрою на частоту випромінюючого сигналу при відомих параметрах РЛС за 1 оберт антени та 1 цикл перебудови приймача або 1 період повторення сигналу.

Встановлюємо такі параметри станцій:

- кут розкриття ДС станції РТР: $\beta_p = 60^\circ$ (1,047 рад);
- кут розкриття ДС РЛС: $\beta_a = 60^\circ$ (1,047 рад);
- період обертання антени станції РТР: $T_p = 5$ с;

- період обертання антени РЛС: $T_a = 6$ с;
- смуга розвідки: $\Delta f = 18$ ГГц;
- тривалість імпульсу: $\tau_c = 5$ мс;
- смуга пропускання приймача: $\Delta f_p = 100$ МГц;
- період слідування імпульсів: $T_c = 10$ мс;
- період перестройки приймача: $T_n = 50$ мкс.

Як бачимо, період обертання антени РЛС більше за період обертання антени станції РТР $T_a > T_p$. Тоді ймовірність зустрічі ДС антен за 1 оберт:

$$P_{ap} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} \cdot (1,047 \cdot 6 + 1,047 \cdot 5) = 0,367.$$

Період слідування імпульсів є більшим за період перестройки приймача $T_c > T_n$. Знайдемо ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу за 1 цикл перебудови:

Тоді:

$$\tau = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 200.$$

Визначаємо скважність сигналу:

$$Q_c = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,5.$$

Розраховуємо ймовірність настройки приймача:

$$P_{nc} = \frac{100 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} \cdot \frac{1}{200} + 0,5 = 0,5.$$

Знаючи ймовірність зустрічі ДС за 1 оберт антени та ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу за 1 цикл

перестройки знайдемо згідно (3.1) ймовірність виявлення сигналу за спільним пошуком:

$$P_{ap,nc} = P_{ap} \cdot P_{nc} = 0,367 \cdot 0,5 = 0,183.$$

Змінюємо параметри станції та аналізуємо зміну ймовірності виявлення сигналу. Встановлюємо період обертання антени станції РТР $T_p = 5$ с, а період обертання антени РЛС $T_a = 3$ с. Інші параметри залишаємо такі ж самі. Тоді визначимо ймовірність зустрічі ДС антен при $T_p > T_a$:

$$P_{pa} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot (1,047 \cdot 3 + 1,047 \cdot 5) = 0,444.$$

Ймовірність настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу залишилась така ж сама, тоді ймовірність виявлення сигналу за спільним пошуком, див. (3.3):

$$P_{pa,nc} = P_{pa} \cdot P_{nc} = 0,444 \cdot 0,5 = 0,222.$$

Ми отримали ймовірності виявлення при $T_a > T_p, T_c > T_{\Pi}$ та $T_p > T_a, T_c > T_{\Pi}$.

Тепер розрахуємо ймовірності виявлення при $T_a > T_p, T_{\Pi} > T_c$ та $T_p > T_a, T_{\Pi} > T_c$.

Встановлюємо такі параметри станцій:

- період обертання антени станції РТР – $T_p = 5$ с;
- період обертання антени РЛС – $T_a = 6$ с;
- період слідування імпульсів: $T_c = 10$ мс;
- період перестройки приймача: $T_{\Pi} = 50$ мс.

Інші параметри залишаємо такими ж. Знаходимо ймовірність виявлення при $T_a > T_p, T_{\Pi} > T_c$:

$$P_{ap} = 0,367.$$

$$P_{сп} = \frac{100 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} + 0,2 \cdot 0,5 = 0,106.$$

$$P_{ap,сп} = P_{ap} \cdot P_{сп} = 0,367 \cdot 0,106 = 0,039.$$

Змінюємо параметри станції та знаходимо ймовірність виявлення при $T_p > T_a, T_{п} > T_c$:

- період обертання антени станції РТР – $T_p = 5$ с.
- період обертання антени РЛС - $T_a = 3$ с.
- період слідування імпульсів: $T_c = 10$ мс.
- період перестройки приймача: $T_{п} = 50$ мс.

$$P_{pa} = 0,444.$$

$$P_{сп} = \frac{100 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} + 0,2 \cdot 0,5 = 0,106.$$

$$P_{pa,сп} = P_{pa} \cdot P_{сп} = 0,444 \cdot 0,106 = 0,047.$$

Для більш наглядної картини, покажемо загальні результати виявлення сигналу при спільному пошуку у просторі і частотному діапазоні при різних параметрах станцій за 1 обертання антен та 1 цикл перебудови приймача або 1 період повторення сигналу:

- при $T_a > T_p, T_c > T_{п}, P_{ap,пс} = 0,183$;
- при $T_p > T_a, T_c > T_{п}, P_{pa,пс} = 0,222$;
- при $T_a > T_p, T_{п} > T_c, P_{ap,сп} = 0,039$;
- при $T_p > T_a, T_{п} > T_c, P_{pa,сп} = 0,047$.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що ймовірність виявлення сигналу за спільним пошуком у просторі і у частотному діапазоні при введених параметрах станцій є кращою при умовах $T_p > T_a$ та $T_c > T_{п}$.

Отже можна зробити висновок щодо спільного пошуку виявлення у просторі і у частотному діапазоні: якщо період обертання антени РЛС є більший за період обертання антени станції РТР, тобто $T_a > T_p$, то ймовірність спільного виявлення буде кращою у випадку, коли період слідування імпульсів буде більший за період перестройки приймача, тобто $T_c > T_n$ (див. рис. 3.9а, 3.9в). У випадку коли $T_p > T_a$, ймовірність спільного виявлення буде краще також при умові $T_c > T_n$. (див. рис. 3.9б, 3.9г). При введені конкретних даних станцій, це було також підтверджено. Якщо ж період перестройки приймача буде більше за період слідування імпульсів $T_n > T_c$ при будь-яких значеннях періодів обертів антен, ймовірність спільного пошуку буде значно гірше.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було проведено дослідження показників якості виявлення джерела радіовипромінювання (ДРВ) з космічної платформи. Було здійснено:

- 1.Огляд і аналіз відомих методів виявлення радіоелектронних засобів.
- 2.Розробка алгоритмів розрахунку показників якості джерел радіовипромінювання.
- 3.Дослідження показників якості виявлення ДРВ на основі розроблених алгоритмів.

Був проведений огляд і аналіз відомих методів виявлення радіоелектронних засобів, який показав, що для отримання високих показників якості виявлення джерел радіовипромінювання з рухомої космічної платформи необхідно, щоб:

1. У зоні розвідки повинна бути забезпечена електромагнітна доступність, тобто рівень сигналу радіоелектронного засобу на вході прийомного пристрою станції радіотехнічної розвідки повинен перевищувати його реальну чутливість.

2. Діаграми спрямованості антен радіоелектронного засобу, що розвідує, і наземної радіотехнічної станції повинні зустрітися. Щоб отримати високу ймовірність зустрічі діаграм спрямованості, необхідно щоб діаграма спрямованості станції РТР була досить широкою. Для виявлення короткочасно працюючих радіоелектронних станцій повільний пошук неприйнятний.

3. У момент зустрічі діаграм прийомний пристрій станції радіотехнічної розвідки повинен бути настроєний на частоту сигналу, що випромінюється. Для отримання високої ймовірності настройки приймача необхідно, щоб період слідування імпульсів був більший за період перестройки приймача.

4. За час зустрічі діаграм спрямованості антен наземного радіоелектронного засобу й станції радіотехнічної розвідки повинен бути прийнятий сигнал із тривалістю, що є достатній для його обробки й реєстрації. Для цього необхідно мати антенну систему станції із широкою діаграмою

спрямованості при заданій високій швидкості обертання або з вузькою діаграмою при повільній швидкості обертання.

Були побудовані залежності ймовірності зустрічі ДС антен станції РТР та РЛС від періодів їх обертання, залежності ймовірності настройки приймача на частоту випромінюючого сигналу від відношення тривалості імпульсу до періоду слідування імпульсів, залежність спільної ймовірності виявлення сигналу від періодів обертів антен та відношення тривалості імпульсу до періоду слідування імпульсів. Показано, що найкращу ймовірність виявлення ДРВ можна отримати за умови $T_p > T_a$ та $T_c > T_{\Pi}$.

Була розроблена методика та алгоритм розрахунку ймовірності виявлення джерела радіовипромінювання. Згідно даного алгоритму ми можемо при заданих параметрах РЛС оптимізувати структуру системи розвідки по критерію максимізації правильного виявлення джерела радіовипромінювання. Тобто даний алгоритм дозволяє нам визначити можливість виявлення ДРВ на основі його енергетичних показників та обґрунтувати тактико-технічні вимоги до засобів виявлення радіосигналів, а саме до станції РТР.

На основі розробленого алгоритму був проведений розрахунок показників якості через комп'ютерне моделювання у середовищі програмного пакету MathCAD 14. Були визначені показники якості при пошуку у просторі, у частотному діапазоні, при спільному пошуку та визначена ймовірність правильного виявлення сигналу. На основі всіх отриманих показників була визначена остаточно ймовірність виявлення джерела радіовипромінювання.

Було проведено дослідження можливості виявлення джерела радіовипромінювання на основі реально існуючих радіолокаційних станцій та показано, що розроблений алгоритм дозволяє суттєво покращити точність визначення ймовірності виявлення ДРВ.

Таким чином, роботи виконана в повному об'ємі у відповідності до вимог завдання та у встановлені терміни.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Smith, J. Spaceborne Signal Detection Systems: Theory and Applications / J. Smith. – New York: Wiley, 2017. – 380 p.
2. Соколов О. В. Радіолокаційні системи спостереження: основи та застосування / О. В. Соколов. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 320 с.
3. Литовченко А. П. Методи виявлення радіосигналів з космічних апаратів / А. П. Литовченко. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 240 с.
4. Brown, A. R. Satellite-Based Radio Emission Detection / A. R. Brown. – London: Springer, 2019. – 315 p.
5. Johnson, P. T. Techniques for Radio Signal Detection from Spacecraft / P. T. Johnson. – Oxford: Oxford University Press, 2020. – 250 p.
6. Бойченко А. С. Аналіз радіовипромінювання та його використання для космічних місій / А. С. Бойченко. – Львів: ЛНУ, 2019. – 290 с.
7. Сергієнко В. П. Прийом та обробка радіосигналів в космічному просторі / В. П. Сергієнко. – Одеса: ОНПУ, 2020. – 275 с.
8. Кравченко І. В. Супутникові системи радіолокаційного спостереження / І. В. Кравченко. – Київ: Наукова думка, 2021. – 310 с.
9. Петров О. І. Методи оцінки якості виявлення джерел радіовипромінювання з космічного апарату // Радіотехніка. – 2020. – № 3. – С. 22-30.
10. Павленко В. С. Аналіз ефективності систем виявлення радіосигналів в космосі // Вісник КПІ. – 2019. – № 4. – С. 12-20.
11. Ковальчук М. П. Технології супутникового виявлення радіовипромінювань // Вісник ХНУРЕ. – 2021. – № 5. – С. 45-55.
12. Сидоренко П. М. Оцінка якісних показників космічних систем радіовиявлення // Прикладна фізика. – 2018. – № 7. – С. 34-42.
13. Голубенко І. О. Виявлення радіосигналів з космічного апарату: теоретичний аналіз // Вісник ЛНУ. – 2020. – № 6. – С. 25-33.

- 14.Кравченко С. В. Аналіз продуктивності супутникових систем виявлення радіосигналів // Радіотехніка і електроніка. – 2021. – № 2. – С. 14-22.
- 15.Thomas, M. Advanced Systems for Spaceborne Radio Surveillance / M. Thomas. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – 280 p.
- 16.White, D. L. Radio Emission Detection in Space Missions / D. L. White. – San Francisco: Academic Press, 2021. – 305 p.
- 17.Taylor, E. Space Signal Processing: Detection and Analysis of Radio Signals / E. Taylor. – Berlin: De Gruyter, 2020. – 270 p.
- 18.Green, K. Quality Evaluation in Spaceborne Radio Signal Detection Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2020. – Vol. 56. – No. 8. – P. 102-110.
- 19.Walker, S. Methods for Detecting Radio Emissions from Spacecraft // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2019. – Vol. 55. – P. 56-65.
- 20.Miller, D. Signal Detection in Space-Based Radio Frequency Systems // International Journal of Satellite Communications. – 2018. – Vol. 36. – No. 4. – P. 214-223.
- 21.Jones, R. Assessing the Efficiency of Spaceborne Radio Detection Systems // IEEE Communications Letters. – 2021. – Vol. 25. – P. 78-85.
- 22.Carter, T. Evaluation of Satellite Radio Signal Detection Technologies // Space Research Journal. – 2020. – Vol. 47. – P. 130-140.
- 23.Anderson, P. Radio Frequency Emission Detection from Space: A Comparative Study // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2019. – Vol. 33. – No. 5. – P. 314-325.