

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.37:621.391

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.

« 14 » грудня 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Дослідження ефективності антенної системи кореляційного
пеленгатора станції радіомоніторингу»

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

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр. ТРм-19-1

14 грудня
(дата, підпис)

Подунай А.Я.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

14 грудня
(дата, підпис)

Ципоренко В.В.

Житомир
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему « Дослідження ефективності антенної системи кореляційного
пеленгатора станції радіомоніторингу »

Виконала: студентки 2 курсу, групи ТРм-19-1
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

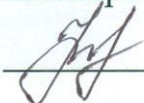
Керівник к.т.н.доц., Ципоренко В.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.тн.доц., Коломієць Р.О
(прізвище та ініціали)

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

 Т.М. Нікітчук

« 15 » червень 2020 р.

Завдання на атестаційну магістерську роботу

Подунай Анна Ярославівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження ефективності антенної системи кореляційного пеленгатора станції радіомоніторингу»

затверджено наказом по університету від «16» жовтня 2020 р. № 366/с

2. Мета дослідження: визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.) Метод пеленгування - кореляційно-інтерферометричний. Кількість каналів АР – 64.

4. Основні задачі дослідження: дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів; визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів; виконати порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів; виконати моделювання роботи кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з лінійною АР.

5. Термін подання роботи до захисту липень 2020

6. Дата видачі завдання « 15 » червень 2020 р.

Науковий керівник


(підпис)

Шинорешко В.В.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Подунай А.Я
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг складає 59 сторінок, з яких основний зміст викладено на 49 сторінках друкованого тексту, магістерська робота має в собі 17 рисунків. Перелік джерел посилання нараховує 19 найменування.

Перелік ключових слів.

Ефективність антенних решіток; кореляційно-інтерферометричний метод; радіопеленгування; лінійна антенна решітка.

Об'єктом досліджень є процес пеленгування радіовипромінювань.

Мета і задачі дослідження.

Для досягнення цієї мети розв'язувались наступні задачі:

- дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів;
- визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів;
- виконати порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів;
- виконати моделювання роботи кореляційно-інтерферометричного пеленгатора з лінійною АР.

Методи дослідження. В першому розділі використано методи теорії кореляційного аналізу, цифрового спектрального аналізу, методи радіопеленгування. В другому розділі використано методи теорії статистичних рішень, цифрового оброблення сигналів, антенних решіток, диференційне та інтегральне числення, теорію функцій комплексної змінної. В третьому розділі використано теорію оптимального оброблення радіосигналів, цифрового оброблення сигналів. В четвертому розділі використовуються математичні та програмні методи моделювання.

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АР	антенна решітка
ДРВ	джерело радіовипромінювання
ЕМО	електромагнітна обстановка
ДС	діаграма спрямованості
АФС	антенно-фідерна система

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналітичний огляд літературних джерел	8
1.1 Призначення та мета радіочастотного контролю	8
1.2 Існуючі типи пеленгаторів і принципи їх роботи	14
1.2.1 Амплітудні пеленгатори	14
1.2.2 Фазові пеленгатори	17
1.2.3 Кореляційні (амплітудно-фазові) інтерферометри	20
1.3 Джерела похибки пеленгування	20
1.4 Порівняльні характеристики пеленгаторів різних типів	22
2 Дослідження ефективності використання багатoelementних антенних решіток різної конфігурації	25
2.1 Дослідження ефективності антенних решіток різної конфігурації для кореляційно-інтерферометричного пеленгування	25
3 Моделювання кореляційного пеленгатора станції радіомоніторингу	42
3.1 Програмна модель, обґрунтування складу та функціональних можливостей.	42
3.2 Задаємо початкові умови	43
3.3 Результати моделювання	48
3.3.1 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від напрямку	49
3.3.2 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від типу вікна	50
3.3.3 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від сигнал/шум.	51
3.3.4 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від частоти	52
Висновки	53
Список використаної літератури	54

ВСТУП

На сьогоднішній день, актуальною задачею є ефективний контроль використання радіочастотного ресурсу і забезпечення електромагнітної сумісності, оскільки дуже швидко збільшується кількість радіоелектронних засобів в різних галузях діяльності суспільства. Тому, головною задачею служб радіомоніторингу є контроль роботи ліцензованих джерел радіовипромінювань (ДРВ), а також оперативний пошук несанкціонованих ДРВ і усунення причин їх виникнення [1, 2]. Нажаль, в умовах великих населених пунктах просторова щільність ДРВ сягає величини 10^4 джерел на квадратний кілометр, що ускладнює виконання цієї задачі.

Радіопеленгатор один із основних засобів, так як, забезпечує ефективну просторову локалізацію джерел завад. Досить перспективним напрямком реалізації пеленгування для апаратури радіомоніторингу є цифрові кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори, в основі яких лежать антенні решітки (АР).

Головною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих відношеннях сигнал/шум [1, 2]. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізняльну здатність.

Від параметрів антено-фідерних систем і конфігурації АР [3] суттєво залежить завадостійкість радіопеленгаторів. Щоби ефективно функціонувати в складній електромагнітній обстановці (ЕМО) при дії різноманітних завад

потрібно забезпечувати радіопеленгатори завадостійкістю, що є важливою проблемою при їх розробці.

Перераховані переваги вказують на те, що на сьогодні розробка цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з АР є одним із перспективних напрямків розвитку засобів радіомоніторингу.

Отож, невирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, є дослідження впливу параметрів просторової селективності та ефективності конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

1 Аналітичний огляд літературних джерел

1.1 Призначення та мета радіочастотного контролю

Роль і місце радіочастотного моніторингу у сфері використання РЧР визначається перш за все двома аспектами:

- перший пов'язаний з підвищенням ефективності використання РЧР і обумовлений тим, що планування використання й присвоєння радіочастот базується на розрахункових методах, в які для забезпечення відповідних гарантій по ЕМС закладають значні резерви спектра, що практично не використовуються, тому система радіомоніторингу повинна забезпечити оперативне виявлення резервів радіочастот і підвищення ефективності використання РЧР,

- другий аспект пов'язаний з тим, що найдосконаліші методи оцінки ЕМС, на засадах яких приймаються рішення щодо присвоєння радіочастот, не дозволяють в повній мірі врахувати всю багатогранність та специфіку реальної електромагнітної обстановки, що призводить до виникнення важкопрогнозованих завадових ситуацій .

Загальна задача радіочастотного моніторингу - підтримка процесу регулювання й планування у сфері використання РЧР - вирішується шляхом :

- вирішення випадків виникнення небажаних електромагнітних завад на місцевому, регіональному чи глобальному рівні з метою забезпечення сумісного функціонування радіостанцій та радіо служб, зниження затрат на їх розгортання й експлуатацію, отримання економічного ефекту за рахунок покращення доступу до вільного від завад РЧР; - забезпечення допустимого рівня завад телебаченню та радіомовленню в мережах загального користування (населенням);

- надання інформації щодо реального використання (завантаження) окремих каналів і смуг частот у цілому;

- контролю технічних і експлуатаційних характеристик РЕЗ та РВП;

- виявлення та ідентифікації незаконно діючих передавачів, встановлення відповідності виявлених випромінювань зареєстрованим РЕЗ; - підтримки програм радіочастотного моніторингу, організованих МСЕ.

Складовою частиною функцій радіочастотного моніторингу при вирішенні задач по забезпеченню державного нагляду за використанням спектрального ресурсу є технічний та ефірний радіочастотний контроль, який призначений для підвищення ефективності регулювання у сфері використання РЧР. Основною метою радіочастотного контролю є виявлення джерел радіовипромінювання (ДРВ), аналіз параметрів та характеристик їх електромагнітних випромінювань, отримання даних щодо електромагнітної обстановки, необхідних для вирішення задач регулювання у сфері використання РЧР і забезпечення контролю за додержанням діючих норм радіовипромінювань.

Конкретні цілі радіочастотного контролю, що визначені Рекомендаціями МСЕ-P SM.1050-1, наступні:

а) забезпечення, необхідних для вирішення задач по регулюванню у сфері використання РЧР, наступних даних та інформації щодо:

- реальної зайнятості смуг частот електромагнітними випромінюваннями в зіставленні з дозволом або запланованим завантаженням;

- відповідності параметрів сигналів, що передаються, вимогам ліцензій;
- ведення та перевірки реєстрації частот;

- виявлення, розпізнавання й визначення місцезнаходження джерел несанкціонованих радіовипромінювань та радіо завад;

б) сприяння у вирішенні проблем ЕМС при введенні в експлуатацію нових радіосистем, присвоєнні робочих радіочастот і укладенні частотних планів шляхом контролю меж зон обслуговування, параметрів РЕЗ і виявлення джерел радіо завад конкретним радіосистемам;

в) сприяння в забезпеченні допустимого рівня радіо завад при прийманні населенням програм телебачення й радіомовлення;

г) забезпечення інформацією, яка пов'язана з вирішенням конкретних задач за звертаннями користувачів РЧР, а також для програм міжнародного радіочастотного моніторингу.

При радіочастотному контролі, згідно Рекомендацій МСЕ-Р SM.1050-1, вирішуються задачі:

а) вимірювання параметрів і характеристик радіовипромінювань, які включають:

- частоту випромінювання;
- ширину смуги частот, реально зайнятої сигналом;
- рівні побічних і поза смугових випромінювань;
- девіацію частоти випромінювання;
- рівні підносійних частот;
- рівні оточуючих шумів, для вирішення питань щодо додаткового використання РЧС, наприклад, шляхом застосування широкосмугових сигналів;
- спеціальні характеристики сигналів для конкретного виду радіослужби, наприклад, телебачення, широкосмугових супутникових передач тощо;
- напруженість поля та густину потоку потужності для:

- вивчення й підтвердження прийнятих моделей поширення радіохвиль і алгоритмів присвоєння радіочастот;

- підтвердження результатів розрахунків відношення рівнів сигнал/завада;

- перевірки критеріїв спільного використання частот різними радіо службами;
- перевірки результатів аналізу можливого виникнення радіо завад;
- оцінки зон обслуговування РЕЗ;

б) визначення:

- зайнятості смуг частот для перевірки прийнятих правил розподілу й присвоєння радіочастот та можливості повторного використання цих смуг;
- класу випромінювання для оцінки параметрів модуляції;

- відповідності присвоєним значенням радіочастоти випромінювання ширини смуги радіочастот, реально зайнятої сигналом, девіації частоти випромінювання, рівнів підносійних частот;

в) проведення аналізу параметрів та характеристик радіовипромінювань з метою:

- ідентифікації джерел недопустимих радіо завад;
- перевірки відповідності ідентифікаційних сигналів (позивних) національним і міжнародним регламентам ідентифікації сигналів;
- ідентифікації незареєстрованих РЕЗ;
- пеленгації чи визначення місця розташування джерела недопустимої завади або радіопередавача, що працює з порушеннями національних і міжнародних стандартів і регламенту;

г) участь у міжнародному радіочастотному моніторингу для виключення взаємних радіо завад між РЕЗ і радіо завад у смугах частот, відведених для подачі сигналів біди та забезпечення безпеки руху;

д) надання звітів за результатами радіочастотного контролю для вирішення питань, пов'язаних із розробкою стандартів та нормативних документів па параметри та характеристики радіовипромінювань;

е) проведення періодичних інспекційних перевірок засобів зв'язку на їх відповідність технічним, робочим і регламентним умовам, встановленим для регулювання у сфері використання РЧР;

є) виявлення проблемних питань для їх додаткових чи більш інтенсивних досліджень;

ж) розробка пропозицій, рекомендацій і процедур по виключенню радіо завад. Ефективність радіочастотного контролю визначається:

- досконалістю технічних засобів і обладнання радіочастотного контролю та рівнем їх використання;
- застосовуваними методиками вимірювань;
- функціональним програмним та методичним забезпеченням;
- рівнем кваліфікації персоналу;

- організацією взаємодії регіональних станцій радіочастотного контролю з центром та між собою;
- організацією постановки задач радіочастотного контролю.

Аналіз світової практики організації та планування радіочастотного контролю свідчить, що, незважаючи на досить корисні рекомендації МСЕ, єдиної концепції радіочастотного контролю не існує, оскільки ці рекомендації не визначають конкретні критерії його побудови, тому в кожній країні питання організації, планування та практичної реалізації радіочастотного контролю вирішуються по-своєму.

В Україні розподіл смуг радіочастот визначається Національною таблицею розподілу смуг радіочастот України, яка є нормативноправовим актом, що регламентує використання частот радіо службами.

Згідно статті 27 Закону України "Про радіочастотний ресурс України" міжнародно-правовий захист РЕЗ і РВП України, інтересів держави та користувачів РЧР здійснюється:

- за участю у роботі МСЕ, регіональних та інших міжнародних організацій з питань регулювання у сфері використання РЧР;
- укладанням двосторонніх чи багатосторонніх міжнародних угод із регулювання у сфері використання РЧР;
- міжнародною координацією присвоєнь радіочастот РЕЗ України та інших країн;
- реєстрацією у МСЕ присвоєнь радіочастот РЕЗ України.

Організаційні засади, порядок проведення міжнародної координації радіочастотних присвоєнь та міжнародно-правовий захист радіочастотних присвоєнь в Україні визначаються "Положенням про порядок здійснення міжнародної координації радіочастотних присвоєнь в Україні". Реалізація міжнародно-правових заходів щодо регулювання у сфері використання РЧР покладається на Адміністрацію зв'язку та радіочастот України, яка залучає для цього інші центральні органи виконавчої влади та Національну раду України з питань телебачення і радіомовлення.

В Україні смуги радіочастот переважного використання для потреб національної оборони, державної безпеки, охорони правопорядку становлять до 30 відсотків освоєного РЧР, а решта належить до смуг спільного використання РЕЗ цивільного та військового призначення. Смуги частот для переважного використання РЕЗ цивільного призначення в Національній таблиці розподілу радіочастот не передбачені, тоді як у країнах Європи на такі смуги припадає до 15 - 20 відсотків технологічно освоєного діапазону частот від 300 кГц до 50 ГГц.

Такий розподіл РЧР обмежує виділення смуг частот для РЕЗ цивільного використання і стримує розвиток важливих сучасних систем та засобів радіозв'язку народногосподарського призначення, поширених в інших країнах (систем рухомого радіозв'язку загального користування, наземного та супутникового телебачення і радіомовлення тощо). Особливості міжнародної політики колишнього СРСР зумовили значні розбіжності національного розподілу радіочастот з вимогами міжнародного Регламенту радіозв'язку. В результаті чого ця обставина ускладнила освоєння та придбання передових західних технологій радіозв'язку і закупівлю сучасного обладнання, гальмує утворення нових радіо служб, послаблює позицію України в питаннях використання РЧР па міжнародному рівні та стримує розвиток вітчизняної промисловості в галузі виробництва конкурентоспроможних видів радіообладнання, яке відповідає світовому рівню.

Оскільки міжнародні стандарти відображають найкращий досвід промисловості, дослідників та споживачів у всьому світі, відповідають загальним потребам у багатьох країнах і є одним із дієвих засобів усунення технічних перешкод у торгівлі, то в останні роки в Україні проводиться інтенсивна робота по прийняттю міжнародних стандартів як національних у відповідності з правилами та настановами, розробленими Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) та Міжнародною електротехнічною комісією (IEC).

1.2 Існуючі типи пеленгаторів і принципи їх роботи

Перші пеленгаційної пристрої з'явилися на початку двадцятого століття, в них використовувався принцип визначення напрямку на джерело радіовипромінювання по максимуму сигналу, що приходить, що реалізовувалося за допомогою обертових антен. Низька точність визначення напрямку при широких діаграмах спрямованості і складність апаратної завдання створення вузьких обертових діаграм висунули на перший план фазові методи, які використовують прості ненаправлені антени і допускають цифрові методи визначення напрямку. Сучасні методи обробки інформації про просторовий розподіл амплітуд і фаз сигналу дозволили перейти до впровадження амплітудно-фазових інтерферометрів, які забезпечують більшу перешкодозахищеність пеленгаторів.

Таблиця 1.1

№	Тип пеленгаторів	Варіанти побудови пеленгатора
1	Амплітудний пеленгатор	Обертання спрямованої антени
		Перемикання спрямованих антен
		$E_{\text{джокк}}$ (Н- $E_{\text{джокк}}$)
		Електрична – комутуюча АР з формуванням вузької обертається ДН
2	Фазовий пеленгатор	Класичний фазовий пеленгатор
		Допплеревскій (квазідоплеревскій, диференційно-фазовий) пеленгатор
		Фазовий інтерферометр
3	Кореляційний пеленгатор	Кореляційні (амплітудно-фазові) інтерферометри

1.2.1 Амплітудні пеленгатори. У пеленгаторах з обертається антеною максимум її діаграми спрямованості збігається з напрямком на джерело

радіовипромінювання. У таких пеленгаторах використовуються рамкові, логоперіодичеськие, рупорні і дзеркальні антени.

При визначенні напрямку на ДРВ по максимуму діаграми спрямованості точність пеленгування безпосередньо залежить від її ширини. Однак якщо заздалегідь запам'ятовувати форму діаграми для кожної частоти (сформувати так звані «еталони»), то, накладаючи на реальну діаграму відповідний «еталон» і домагаючись їх максимального збігу, можна отримати високу точність пеленгування, незалежно від ширини діаграми. Однак, якщо потрібна висока перешкодозахищеність, слід використовувати вузькі діаграми спрямованості, що не завжди можливо.

Недолік таких пеленгаторів - мала швидкість обертання антени і, отже, обмеженість використання пеленгатора при роботі з короткими за часом сигналами.

Так при використанні стандартних поворотних пристроїв фірми «YAESU» швидкість обороту антени 30, 45 с. Відомі пеленгатори зі швидкостями обертання антени до декількох оборотів в секунду, а й такій швидкості часто буває недостатньо.

Пеленгатор з перемиканням спрямованих антен є розташовані по колу «n» спрямованих антен - антенних елементів (АЕ), кожен з яких має діаграму спрямованості, близьку до кардіоїд. Антенний комутатор (АК) послідовно підключає виходи антенних елементів до входу радіоприймача (РПУ) з частотою комутації $F_{\text{ком}}$. Амплітуда сигналу фіксується в пристрої обробки і визначення пеленга.

Як антенних елементів зазвичай використовуються пари компланарних рамок, фазовані вібратори, щілинні антени і т.д.

До переваг пеленгатора слід віднести простоту реалізації, високу швидкодію за рахунок електронного перемикання антенних елементів.

Основними недоліками є невисока точність пеленгування, що залежить від ідентичності характеристик антенних елементів і слабка

перешкодозахищеність, зумовлена великою шириною діаграми спрямованості антенних елементів.

Пристрої такого типу розроблені фірмами «Роде-Шварц», «Телефункен» і ін. І використовуються для роботи у верхній частині УКХ діапазону в мобільних пеленгаційних системах.

Принцип роботи пеленгатора типу Е_{джокк} (Н-Е_{джокк}) [2, 4] заснований на використанні двох рознесених на відстань $< 0,5 \lambda$ (λ - довжина хвилі) вертикальних і протифазно включених вібраторів - так званої «пеленгаційної пари». Вертикально-поляризований сигнал, який надходить з напрямку φ , наводить в такій парі ЕРС (Е), пропорційну $\sin \varphi$. При використанні двох зсунутих на 90° пеленгаційних пар, напрямок на ІРІ (φ) визначається співвідношенням:

$$\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \sim \frac{E_1}{E_2} \quad (1.1)$$

де E_1 , E_2 амплітуда ЕРС пеленгаційних пар.

Принцип побудови двоканального амплітудного пеленгатора Н-Еджокк, в якому використовується двоканальний приймач із загальним гетеродином. У каналах повинні бути забезпечені однакові коефіцієнти передачі та фазові зрушення. Для визначення сторони приходу сигналу, використовується той факт, що при зміні кута приходу на 180° , фаза E_1 , E_2 змінюється на 90° . Технічно це реалізується шляхом застосування ненаправленої антени з підключенням її по черзі до одного з каналів і подальшою обробкою і індикацією пеленга. Існує велика кількість модифікацій пеленгатора Н-Еджокк, з описом яких можна познайомитися в спеціальній літературі [4 та ін.].

Переваги пеленгатора Н-Еджокк полягають в простоті реалізації антеною системи, високу швидкодію і можливості збільшення точності шляхом збільшення числа пеленгаційних пар.

До недоліків слід віднести складність реалізації ідентичних по амплітудно-фазових характеристиках трактів і неможливість забезпечити хорошу перешкодозахищеність.

Пеленгатори на базі електронно-комутованою антеною решітки з формуванням вузької обертається ДН, називають пеленгаторами «Валленвебера». Він являє собою набір розташованих по колу N досить простих ненапрямлених антенних елементів і комплект ліній затримки для вирівнювання фази приходить ЕМ хвилі. Обертання ДН забезпечується механічним комутатором, послідовно підключає комплект ліній затримки до антенних елементів. Побудований таким чином пеленгатор нормально функціонує тільки до частот 300 , 400 МГц через технічні обмежень механічного комутатора.

Можлива реалізація цієї ідеї при використанні фазированной антеною решітки, що складається з спрямованих антенних елементів з електронним обертанням діаграми, що розширює робочий діапазон частот.

Пеленгатори "Валленвебера" мають високу захищеність від перешкод, високою швидкістю і чутливістю.

До недоліків такого типу пеленгаторів слід віднести його високу вартість через складність реалізації.

1.2.2 Фазові пеленгатори. Принцип роботи фазового пеленгатора полягає в порівнянні фази сигналу з виходу обертового вібратора з фазою сигналу, що приходить на нерухомий вібратор, що знаходиться в центрі кола обертання. Максимум різниці фаз буде відповідати напрямку приходу сигналу, а його мінімум - напрямленню, зрушеному на 90° . При заміні механічного обертання дискретним переключенням розташованих по колу вібраторів (або інших ненапрямлених антенних елементів) реалізується класичний фазовий пеленгатор, що містить крім описаної вище антеною системи двоканальний приймач із загальним гетеродином, обмежувачем для виключення впливу амплітудної модуляції і фазовим детектором, а також пристрій додаткової обробки і індикації пеленга.

Такого типу пеленгатори широко використовуються на практиці і виготовляються закордонними фірмами.

Перевагами фазових пеленгаторів є простота реалізації антеною системи та алгоритму отримання відліку пеленга, а також стійкість до паразитного амплітудної модуляції.

До недоліків слід віднести складність реалізації приймача з повністю ідентичними по фазовим характеристикам трактами і слабкий захист від впливу зосереджених перешкод, внаслідок застосування всеспрямованих антен.

Фазові пеленгатори, в яких антена обертається з частотою $F_{вр}$, щоб покращити якість сигналу приймачем, обмежується, детектується частотним детектором, а потім фаза отриманого коливання порівнюється з фазою частоти обертання, називаються доплерівськими пеленгаторами.

В даний час широко застосовуються квазідоплеровські пеленгатори. У них використовуються нерухомі розташовані по колу антенні елементи (зазвичай вібратори), які комутуються, тобто по чергові підключаються до входу приймача.

У диференційно-фазових пеленгаторах розташовані по колу антенні елементи послідовно попарно комутуються, і визначається різниця фаз між ними.

Принцип роботи фазових інтерферометров заснований на отриманні в цифровому вигляді значень фаз сигналів на окремих антенних елементах - окремих точках простору і обчисленні пеленга шляхом вирішення фазових рівнянь, або порівнянні отриманих значень фаз з матрицею фаз для різних напрямків приходу сигналу і обчисленні напрямки по максимуму функції кореляції груп цих фазових значень. Однак, для отримання набору фаз на окремих антенних елементах необхідний багатоканальний приймач - по числу антенних елементів. Завдання спрощується, якщо брати набір попарних різниць фаз і порівнювати їх з наборами різниць фаз для різних кутів приходу сигналу. В цьому випадку можна обійтися двоканальним приймачем і комутатором попарного підключення антенних елементів до входів двоканального РПУ.

Заміна багатоканального РПУ на двоканальний зменшує швидкодію пеленгатора, але значно спрощує реалізацію. При заміні набору різних різниць

фаз на набір різниць фаз між сигналами на антенних елементах, розташованих по колу, і на одній опорної антени, що розміщується в центрі кола, одержуємо структуру, аналогічну звичайному фазового пеленгатора.

Для сучасних стаціонарних фазових інтерферометров ДВЧ-УВЧ діапазону типова розбивка антеною решітки на піддіапазони, збільшення її бази і числа антенних елементів до $8 \div 16$ в кожному піддіапазоні. Застосовується і збільшення набору різниць фаз без опорної антени, яка використовується тільки для калібрування. Все це призводить до деякого підвищення перешкодозахищеності і чутливості пеленгаторів.

Фазові інтерферометри - сучасне розвивається напрямом. Переклад сигналу на виході приймача в цифрову форму дозволив застосовувати і удосконалювати алгоритми цифрової обробки сигналів. Один з напрямків полягає в застосуванні перетворення Фур'є на кожному кроці перемикання антенних елементів і отриманні пеленга для кожної спектральної складової сигналу. При роботі в одному частотному каналі (з одним «корисним» сигналом) такий підхід, при наявності перешкоди в суміщеному каналі з неповним перекриттям спектрів сигналу і перешкоди, дозволяє здійснити, при використанні відповідних алгоритмів, роздільне пеленгація сигналу і перешкоди. При роботі в широкій смузі частот може бути реалізований режим т.зв. «Пеленгової панорами», тобто отримання пеленгів на всі сигнали в переглядається смузі частот, що дає додаткові можливості прискорення аналізу радіоспектра.

До переваг фазових інтерферометров слід віднести малу інструментальну похибку, наявність стійкого показника якості пеленга, високу швидкодію, наявність режимів пеленгової панорами, можливість періодичного калібрування пеленгатора подачею каліброваного сигналу на спеціально розташовану в антеною решітці додаткову антену.

І все-таки, незважаючи на сучасні алгоритми обробки, перешкодозахищеність таких пеленгаторів при роботі в складній помехової обстановці часто недостатня. Практично, немає захисту від когерентної

перешкоди. Недоліком є складність і висока вартість таких пристроїв (особливо в порівнянні з квазідоплеровськими пеленгаторами).

1.2.3 Кореляційні (амплітудно-фазові) інтерферометри. Принцип роботи цих пристроїв - отримання інформації про амплітудах і фазах сигналу на елементах антеною решітки, порівняння їх з матрицями амплітуд і фаз для різних кутів приходу сигналу і спільна кореляційний обробка. При наявності достатньої бази антеною решітки в таких пристроях можливо роздільне пеленгація сигналу і перешкоди в суміщеному каналі і виділення сигналу на тлі когерентних перешкод. У них застосовуються, так звані, алгоритми множинної класифікації сигналу (MUSIC), багаторівневі методи оцінки максимальної правдоподібності (MLE), а також алгоритми суперрозрешення (SR-DF).

Відмінність від фазового інтерферометра полягає в тому, що тут використовується інформація про амплітудах і фазах сигналу і істотно ускладнений метод обробки з метою виділення сигналу на рівні перешкод або роздільного пеленгування. У нас в країні для цілей цивільного відео подібні пеленгатори практично не використовуються.

1.3 Джерела похибки пеленгування

При реальному використанні пеленгаторів на точність пеленгування впливає велика кількість різних факторів.

Ці чинники (джерела похибки) діляться на апаратурні (інструментальні) і методичні, пов'язані з умовами пеленгації.

Апаратурна похибка відліку пеленга визначається в ідеальних умовах (при відсутності перевідбиттів, впливу підстильної поверхні, перешкод, спотворень поляризації і т.д.), при прийомі сигналу заданої поляризації і отриманні відліку пеленга за заданий, так зване, робочий час пеленгування, при заданому рівні сигналу в місці розташування антен пеленгатора, виражене в

мкВ / м. Апаратурна похибка визначається в усьому заданому діапазоні частот і діапазоні кутів приходу сигналу. Як правило, це похибка систематична, хоча в ній може бути випадкова складова (пов'язана з методом обробки, дискретністю відліків і т.д.). В принципі, апаратурна похибка може бути зменшена калібруванням апаратури по частоті і розі приходу сигналу.

В документації на пеленгатор повинна наводитися середньоквадратическая, середня і максимальна апаратурна похибка.

Джерела методичних похибок зазвичай обумовлені наступним:

- Похибка, викликана наявністю перевідбиттів сигналів (наявністю «когерентної перешкоди»).

Рівень перевідбиттів сигналів впливає на ступінь спотворення фронту хвилі, що приходить і визначається каналом поширення радіохвиль. Найбільший вплив надає найближче оточення пеленгатора - будівлі, щогли, великі предмети і т.п. Перевідбиттів сигнал може впливати на пеленгатор, відбиваючись від підстильної поверхні.

- Похибка, викликана наявністю зосередженої завади.

Зрозуміло, що основною характеристикою пеленгатора є точність пеленгування, тобто точність визначення напрямку на джерело радіовипромінювання, виражена в абсолютних або відносних значеннях.

Це так звана перешкода «в суміщеному каналі» [2], яка потрапляє в тракт основний вибіркості приймача пеленгатора і присутній разом з корисним сигналом, ускладнюючи процес пеленгування.

- Похибка, викликана модуляцією сигналу.

Відзначимо, що апаратурна похибка визначається по немодульованих сигналу. При пеленгацією модульованого сигналу похибка визначення пеленга зростає і залежить від конкретної реалізації пеленгатора

- Похибка, що залежить від поляризації сигналу.

В даний час більшість використовуваних на практиці пеленгаторів працюють по вертикально поляризованому сигналу, хоча випромінюється сигнал може мати будь-яку поляризацію.

- Похибка, викликана зміною в часі характеристик каналу поширення.

Це джерело похибок характерний, перш за все, для рухомих випромінювачів або пеленгаторів (наприклад, мобільних джерел випромінювання або мобільних пеленгаторів). Для стаціонарних джерел випромінювання і стаціонарного пеленгатора характеристики каналу поширення в більшості випадків можна вважати постійними.

Апаратурна похибка характеризує потенційну точність пеленгатора. Решта похибки пов'язані з реальною роботою пеленгатора в умовах експлуатації.

Реальна експлуатаційна похибка пеленгування об'єктивно може бути визначена лише статистично при проведенні представницьких експлуатаційних випробувань і є основною характеристикою пеленгатора. Нерідко експлуатаційну похибка пеленгування визначають не по всіх ситуацій, а тільки на ті, які дають похибку пеленга в межах деякого допустимого значення, і окремо визначається відсоток (або ймовірність) ситуації, коли пеленг перевищує це допустиме значення. Такі пеленги називаються недостовірними, і ймовірність їх отримання є важливою характеристикою пеленгатора. Зазвичай ці пеленги не враховуються при пеленгування, однак, якщо ймовірність отримання їх досить велика (наприклад, більше 10%), то необхідно мати надмірну кількість пеленгаторів, так, щоб при виключенні хоча б одного з них залишилося ще кілька пеленгаторів для отримання достовірного результату. При реальній роботі визначити якість пеленга непросто. У деяких пеленгаторах реалізований режим, коли при зниженні якості пеленга нижче порогового рівня пеленг не фіксується.

1.4 Порівняльні характеристики пеленгаторів різних типів

В таблиці 1.2 наведено порівняльні характеристики пеленгаторів різних типів

Таблиця 1.2

№	Характеристики	Пеленгатор				
		АП з переключачими АЕ	Н-Е _{дккок}	Квазі-доплер	Фазові інтерферометри	АР з обертаючою ДС
1	Чутливість (В відносних одиницях)	1	1	1	1	0,5
2	Точність пеленгування (апаратурна), град.	2°-5°	2°	2°	1°,2°	1°,2°
3	Граничний рівень сигнал / когерентная перешкода, дБ	>3,5дБ	5,10дБ	>3,5дБ	>3дБ	Роздільне пеленгування
4	Граничний рівень сигнал / перешкода в суміщеному каналі	>3,5дБ	5,10дБ	>3,5дБ	>3,5дБ	Роздільне пеленгування
5	Показник якості пеленга	По с/ш, по спотворень фронту хвилі	По с / ш, по девіації пеленгов в	За с / ш, по девіації пеленгов, по спотворень фронту хвилі	За с / ш, по девіації пеленгов, по спотворень фронту хвилі	За наявності перешкоди в межах ДС
6	Відносна складність реалізації	1	1,5	1	1,5÷2	3

При виборі пеленгатора дуже важлива повнота інформації про його основні характеристики. Наводимо перелік відомостей про пеленгаторі, які слід мати на увазі при закупівлі даного типу апаратури:

- метод пеленгування (детальна характеристика особливостей реалізації методу);
- діапазон робочих частот, розбивка на піддіапазони;
- поляризація сигналу;
- чутливість пеленгатора по піддіапазону частот (мкВ / м);
- апаратурна (інструментальна) похибка пеленгування;
- робочий час пеленгування;
- мінімальний час пеленгування (зі зниженням апаратурною точності пеленгування);
- похибка пеленгування при наявності когерентної перешкоди;
- похибка пеленгування при наявності перешкоди в суміщеному каналі;
- похибка пеленгування при модульованому сигналі;
- динамічний діапазон;
- показник якості пеленга;
- вимоги до розташування антен;
- відомості про експлуатаційні випробування (в тому числі експлуатаційна похибка пеленгування);
- додаткові відомості про пеленгаторі (режими автоматичного пеленгування, можливості пеленгування широкосмугових сигналів, наявність режиму побудови пеленгової панорами в діапазоні частот і параметри цього режиму і т.д.)

Висновки: в даному розділі було проведено літературний аналіз. Дякуючи цьому, ми ознайомились з призначенням та метою радіочастотного контролю. Також ознайомились з існуючими типами пеленгаторів, та їх принципом роботи. І врешті решт, порівняли їх між собою за основними характеристиками.

2 Дослідження ефективності використання багатoelementних антенних решіток різної конфігурації. Експериментальні дослідження розроблених методів пеленгування

2.1 Дослідження ефективності антенних решіток різної конфігурації для кореляційно-інтерферометричного пеленгування

При стрімкому збільшенні кількості радіоелектронних засобів в різних галузях діяльності суспільства актуальною задачею є ефективний контроль використання радіочастотного ресурсу і забезпечення електромагнітної сумісності. В цих умовах основною задачею служб радіомоніторингу є контроль роботи ліцензованих ДРВ, а також оперативний пошук несанкціонованих ДРВ і усунення причин їх виникнення [1]. Виконання цієї задачі суттєво ускладнюється в умовах великих населених пунктів, де просторова щільність ДРВ може сягати величини 10^4 джерел на квадратний кілометр.

Основними засобами, що забезпечують ефективну просторову локалізацію джерел завад є радіопеленгатори. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для апаратури радіомоніторингу є цифрові кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори, що використовують АР.

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум [1]. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати

область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізняльну здатність.

Завадостійкість радіопеленгаторів суттєво залежить від параметрів їх антено-фідерних систем і конфігурації АР [2]. Важливою проблемою розробки радіопеленгаторів є забезпечення їх завадостійкості, що, в свою чергу, дозволяє їм ефективно функціонувати в складній ЕМО при дії різноманітних завад.

Вказані переваги зумовлюють те, що на сьогодні розробка цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з АР є одним із перспективних напрямків розвитку засобів радіомоніторингу.

Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, є дослідження впливу параметрів просторової селективності та ефективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

Відповідно до невирішеної раніше проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою досліджень є: дослідження впливу параметрів просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів;
- визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів;
- дослідження ефективності конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що визначає їх завадостійкість;
- порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

Результати досліджень по аналізу та синтезу конфігурацій АР, а також впливу їх параметрів на завадостійкість та точність кореляційно-

інтерферометричних радіопеленгаторів представлені в великій кількості сучасних наукових праць.

В роботах [2, 3] наведені результати досліджень принципів побудови та завадостійкості швидкодіючих моноімпульсних цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що використовують лінійні АР. Показана можливість забезпечення пеленгування в реальному масштабі часу одночасно декількох ДРВ, спектри радіовипромінювань яких перекриваються за частотою. Така можливість реалізується на основі лінійних АР з цифровим діаграмоутворенням, що забезпечує низький рівень бічних пелюсток ДС, наприклад, не більше -60дБ . Однак в даних роботах не наведений порівняльний аналіз можливих конфігурацій АР і відповідного досягнення високої завадостійкості та швидкодії радіопеленгатора.

У роботах [4, 5] досліджені пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються в цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] запропоновано безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, що має високу точність і завадостійкість за рахунок використання попередньої просторової селекції та дисперсійно-кореляційної оцінки напрямків на ДРВ. Даний метод пеленгування використовує оцінку просторової частоти сигналу по двом реконструйованим відлікам просторового аналітичного сигналу. Це залишає можливість подальшого його вдосконалення з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування. Також дослідження завадостійкості даного методу не проведено.

У роботах [7-9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Однак вони мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу

недоліків, таких як висока обчислювальна складність (час обробки сигналів), що в кілька разів перевищує складність пошукового кореляційного методу пеленгування; необхідність точної апіорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщеність оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) вхідних відношеннях сигнал/шум. В результаті ефективність застосування спектральних методів пеленгування, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодія/точність пеленгування, в системах радіомоніторингу недостатня. Це підтверджується відсутністю їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу [1].

В роботах [10-12] наведені результати синтезу основних варіантів побудови спрямованих і неспрямованих антенних систем сучасних радіопеленгаторів. Проведені дослідження їх основних параметрів і характеристик. Визначено, що для задач пеленгування доцільно використовувати фазовані АР із кільцевою та лінійною конфігураціями. Такі АР зазвичай реалізуються в одній або декількох площинах і забезпечують якісну просторову селективність. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі і можливість ефективного подавлення та пеленгування завад.

Таким чином, для використання в автоматизованих системах радіомоніторинга розробка та дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею.

Нехай здійснюється прийом АР в межах смуги пропускання радіоканалів радіопеленгатора адитивної суміші $U(t)$ взаємно некорельованих сигналу $S(t)$ та радіовипромінювань $S_z(t)$ завад при наявності шуму $n(t)$:

$$U(t) = S(t) + S_z(t) + n(t). \quad (2.1)$$

Будемо вважати відомими значення середніх потужностей P_s сигналу $S(t)$, P_z завад $S_z(t)$, та P_n шумів $n(t)$.

Для вказаних умов виконаємо дослідження впливу параметрів просторової селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

АФС радіопеленгаторів в умовах складної ЕМО виконує дві основні функції: функціонального кутового дискримінатора і просторового селектуючого елементу [1]. Просторові селектуючі властивості АФС, що реалізуються на основі АР, визначаються формою та параметрами її ДС, такими як ширина $\Delta\theta_{ML}$ головної пелюстки ДС, рівень бічних пелюсток K_{SL} , коефіцієнт спрямованої дії K_D .

Складність ЕМО та умови функціонування радіопеленгатора кількісно доцільно характеризувати кількістю L радіовипромінювань та відношенням μ сигнал/(шум+завади) в межах ширини смуги Δf_k пропускання радіоканалів АР:

$$\mu = \frac{P_s}{P_z + P_n}, \quad (2.2)$$

де P_s , P_z , P_n – потужність сигналу, завад та шумів відповідно.

На виході АР радіопеленгатора відношення μ_A сигнал/(шум+завади) на виході АР радіопеленгатора покращується за умови, що напрямок θ на ДРВ завади знаходиться за межами головної пелюстки ДС АР і визначається наступним чином:

$$\mu_A = \frac{P_s \cdot K_D^2}{P_z \cdot K_{SL}^2 + P_n \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi) \cdot K_n}, \quad (2.3)$$

де μ_A – відношення сигнал/(шум+завади) на виході АР радіопеленгатора;

K_{SL} – рівень бічних пелюсток ДС;

$\Delta\theta_{ML}$ – ширина головної пелюстки ДС;

K_n – коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки ДС;

L – кількість радіовипромінювань в межах смуги Δf_k пропускання радіоканалів АР.

Аналіз рівнянь (2.1) – (2.3) показує, що відношення μ_A сигнал/(шум+завади) на виході АР і відповідна завадостійкість

радіопеленгатора в цілому суттєво залежить від ширини $\Delta\theta_{ML}$ і рівня K_{SL} , які в свою чергу визначаються кількістю N_Σ радіоканалів АР і способом утворення ДС [13, 14].

В результаті оцінку ефективності γ_A просторової селективності АР радіопеленгатора доцільно визначити як відношення покращення μ_A / μ на її виході до кількості N_Σ , що визначає об'єм її апаратних витрат, наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{\mu_A}{\mu \cdot N_\Sigma} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N / P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi) \cdot K_n)}, \quad (2.4)$$

де K_D – коефіцієнт спрямованої дії АР.

Аналіз рівняння (2.4) показує, що оцінка ефективності γ_A кількісно враховує усі особливості реалізації тільки просторового тракту радіопеленгатора, тобто є інтегрованою оцінкою його просторових селектуючих властивостей. Однак недоліком такого варіанту оцінки ефективності γ_A є відсутність врахування особливостей реалізації часово-частотного тракту радіопеленгатора, що визначається алгоритмом оброблення прийнятої суміші $U(t)$ після АР. В цілому просторовий та часово-частотний тракт кореляційних радіопеленгаторів забезпечує максимально правдоподібну оцінку $\hat{\theta}$ і еквівалентний низькочастотному фільтру з коефіцієнтом K_F фільтрації, що пропорційний часу T_a аналізу суміші $U(t)$.

З урахуванням статистичної незалежності сигналу $S(t)$, радіовипромінювань $S_z(t)$ завад та шуму $n(t)$ етапи просторового та часово-частотного оброблення можуть виконуватись в довільному порядку. З урахуванням цього ефективність просторово-частотної селективності γ_A в (6.4) доцільно представити наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N / P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML} / 2\pi \cdot K_F) \cdot K_n)}, \quad (2.5)$$

де $\Delta\theta_{ML}$ – ширина головної пелюстки ДС.

Особливістю оцінок ефективності γ_A згідно (2.4) та (2.5) є їх залежність від відношення q .

При переважанні в суміші $U(t)$ потужних станційних завад $S_z(t)$ відношення q буде зменшуватись і ефективність γ_A буде визначатися якістю придушення завад за межами сектора $\Delta\theta_{ML}$ головної пелюстки, тобто рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС.

При переважанні в суміші $U(t)$ шумів $n(t)$, що рівномірно розподілені у просторі, ефективність γ_A буде в основному визначатися відносною шириною $(\Delta\theta_{ML} / 2\pi)$ головної пелюстки ДС і відповідними апаратурними витратами N_Σ .

Перевагою запропонованого в (2.5) варіанту оцінки ефективності γ_A є його висока інформативність при простоті розрахунку. Аналіз рівняння (2.5) показує, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень K_{SL} , ширина $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт K_D і коефіцієнт K_n , та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Виконаємо дослідження залежності ефективності γ_A від її топології. Для цього визначимо конфігурацію АР, як спосіб розташування у просторі її N_Σ елементів [15]. Для подальшого аналізу доцільно виділити наступні основні варіанти конфігурації АР, що мають найбільш широке застосування в кореляційно-інтерферометричних методах радіопеленгування: кільцева АР, система з двох ортогональних лінійних АР (хрестоподібна), багатокутна з екрануванням, система з двох ортогональних лінійних АР з екрануванням [14]. Графічне зображення вказаних конфігурацій АР наведені на рис. 2.1.

На рис. 2.1 крапками позначені просторові позиції елементів АР, суцільними лініями позначені елементи екранування.

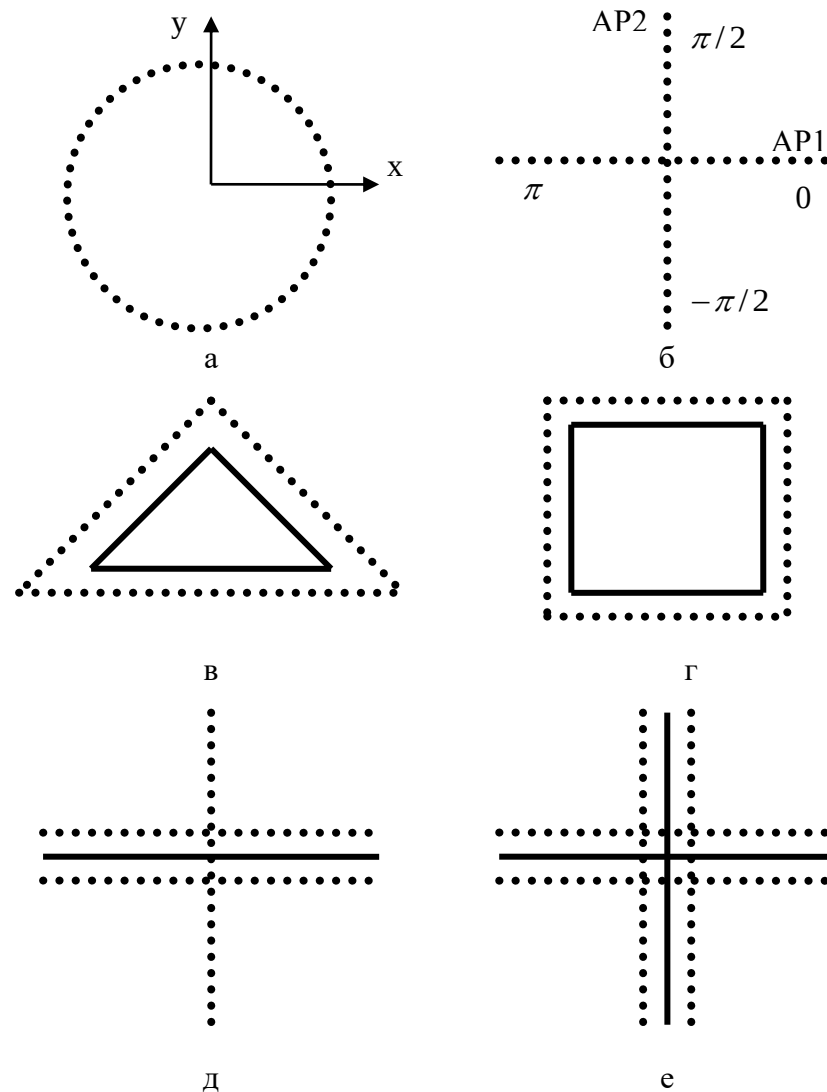


Рисунок 2.1 – Основні варіанти конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів: а – кільцева; б – система з двох ортогональних лінійних АР; в – трикутна з екрануванням; г – чотирикутна з екрануванням; д – система з двох ортогональних лінійних АР з частковим екрануванням; е – система з двох ортогональних лінійних АР з повним екрануванням

Визначимо значення ефективності γ_{A1} просторової селективності кільцевої АР, рис. 2.1а. Основною перевагою кільцевих АР є незалежність їх просторової селективності від напрямку θ_{ML} головної пелюстки ДС АР відносно вісі АР в межах $(0; 2\pi)$ радіан робочого сектору пеленгування при відносно невеликих габаритах [1].

Основним недоліком кільцевих АР є відносно великий рівень бічних пелюсток ДС, що зумовлює низьку завадозахищеність за відношенням сигнал/завада радіопеленгатора. Визначимо значення параметрів селективності кільцевої АР наступним чином [1]:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{ML1} &= 2 \cdot \arcsin\left(\frac{2,43 \cdot \lambda}{N_{\Sigma} \cdot d}\right); \\ d &\leq \lambda/2; \\ K_{SL1} &\in [0,1;0,4] = [-20\text{dB}; -8\text{dB}]; \\ K_{D1} &= 1; \\ K_{n1} &= [1;1,2].\end{aligned}\tag{2.6}$$

З урахуванням (2.4) і (2.5) визначимо ефективність γ_{A1} за умови $N_{\Sigma} \gg 1$:

$$\gamma_{A1} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_D^2}{N_{\Sigma} \left(K_{SL1}^2 + K_{n1} \cdot \left(2 \cdot \arcsin\left(\frac{2,43 \cdot \lambda}{N_{\Sigma} \cdot d}\right) / 2\pi \cdot K_F \right) \right)}.\tag{2.7}$$

Аналіз рівнянь (2.6) та (2.7) показав, що селективність за шумами та ефективність γ_{A1} в цілому збільшується пропорційно кількості N_{Σ} радіоканалів АР і її габаритів ($N_{\Sigma} \cdot d / 2\pi$). При цьому просторова селективність за завадами, що визначається рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС АР, низька (максимум -10dB), і за умови $d \leq \lambda/2$ не залежить від величини кроку d АР та кількості N_{Σ} радіоканалів.

Виконаємо аналіз ефективності γ_{A2} просторової селективності конфігурації системи АР, яка складається із двох ортогональних лінійних АР, рис. 2.16. Параметри селективності системи ортогональних лінійних АР визначимо наступним чином [14, 15]:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{ML2} = \Delta\theta_{MW} &= \frac{2\lambda}{d \cdot 0,5N_{\Sigma} \cdot \sin \theta_{ML}}; \\ K_{SL2} = K_{SW} &\in [10^{-2}; 10^{-5}] = [-40\text{dB}; -100\text{dB}]; \\ K_{D2} &= K_W / 2; \\ K_{n2} = K_{nW} &\in [1;1,8],\end{aligned}\tag{2.8}$$

де λ – довжина хвилі сигналу;

d – відстань між елементами (крок) АР;

K_w – коефіцієнт когерентного підсилення вікна спектрального аналізу;

$K_{SL2} = K_{SW}$, $K_{D2} = K_w$, $K_{n2} = K_{nw}$ – коефіцієнти рівня бічних пелюсток, спрямованої дії, шумової ширини головної пелюстки, відповідно, що визначаються видом вагової функції $W(z)$ діаграмоутворення (вікна спектрального аналізу);

$\Delta\theta_{MW}$ – ширина головної пелюстки Фур'є-перетворення функції вікна спектрального аналізу.

Аналіз рівнянь (2.8) показує, що коефіцієнти K_{SL2} , K_{D2} , K_{n2} визначаються видом вагової функції $W(z)$, тобто селективність системи ортогональних лінійних АР суттєво залежить від кількості N_Σ її радіоканалів, виду вагової функції $W(z)$ і ширини $\Delta\theta_A$. При пеленгуванні ДРВ в широкому робочому секторі ($\theta_{ML} \in [45; 135]^\circ$ для кожної АР) обернено пропорційно множнику $\sin \theta_{ML}$ змінюється (максимум на 30%) ширина $\Delta\theta_{ML2}$ головної пелюстки ДС АР.

Для системи ортогональних лінійних АР весь робочий сектор $\Delta\theta_A$ можна розділити на чотири підсектори шириною $\Delta\theta_A / 4 = 0,5\pi$ радіан, які попарно відповідають першій та другій ортогональним лінійним АР пеленгатора наступним чином: для першої АР $\Delta\theta_{A1} \in [-\pi/4; \pi/4] \vee [3\pi/4; -3\pi/4]$, для другої АР $\Delta\theta_{A2} \in (\pi/4; 3\pi/4) \vee (-3\pi/4; -\pi/4)$.

З урахуванням цього максимальне відхилення головної пелюстки для кожної зі складових першої та другої ортогональних лінійних АР буде становити:

$$\max\{|\theta_{ML}|\} = \theta_{ML, \max} = \pi/4. \quad (2.9)$$

З урахуванням (2.8) та (2.9) оцінімо значення ефективності γ_{A2} системи ортогональних лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A2} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_w^2 / 4}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_{nw} \cdot 4 \cdot \lambda}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\theta_{ML}) \cdot 2\pi \cdot K_F} \right)}. \quad (2.10)$$

Аналіз (2.9) та (2.10) показав, що просторова селективність системи ортогональних лінійних АР, рис. 2.1б, може легко регулюватися в широких межах шляхом вибору функції $W(z)$ і кількості N_Σ радіоканалів.

Суттєвим недоліком системи ортогональних лінійних АР є наявність в її ДС побічних головних пелюсток θ_{ML2} з напрямками просторових каналів $\theta_z = \{-\theta_{ML2}, (\pi - \theta_{ML2}), (\theta_{ML2} - \pi)\}$, рівень яких дорівнює коефіцієнту K_D головної пелюстки. Частково цей недолік може бути усунений завдяки просторовій селекції одночасно діючих першої та другої ортогональних лінійних АР при обмеженій кількості $m_z \leq 3$ одночасно діючих завад по побічним головним пелюсткам. Також треба враховувати, що при рівномірному розподілі густини імовірності $P_{z\theta} = 1/2\pi$ ДРВ завад в межах робочого сектора $\Delta\theta_A = 2\pi$ імовірність враження радіопеленгатора по чотирьом побічним просторовим каналам θ_z прийому буде незначною і має порядок 10^{-6} .

Вказаний недолік системи ортогональних лінійних АР усувається шляхом використання додаткового екранування АР або використання складних адаптивних алгоритмів компенсації завад [15, 16]. Першому варіанту ортогональних лінійних АР з екрануванням відповідають лінійні АР з опуклою конфігурацією у вигляді багатокутників, що містять внутрішні екрануючі системи, рис. 1в, рис. 1г, або подвоєнні ортогональні лінійні АР з екраном між кожною парою АР, рис. 1д, рис. 1е. Недоліком топологій системи лінійних АР з екрануванням є додаткові апаратурні витрати зі збільшенням кількості N_Σ радіоканалів, а також складність реалізації.

Визначимо основні параметри просторової селективності багатокутної системи лінійних АР з екрануванням. В загальному випадку для m -кутної конфігурації:

$$\begin{aligned}
\max\{\Delta\theta_{ML3}\} &= \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 2\lambda}{d \cdot (N_\Sigma / 2m) \cdot \sin \theta_{ML, \max}} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 4m \cdot \lambda}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin \theta_{ML3, \max}}; \\
K_{D3} &= K_W / m; \\
K_{n3} &= K_{nW} \in [1; 8]; \\
K_{SL3} &= K_{SW} \in [10^{-2}; 10^{-5}]; \\
\theta_{ML3, \max} &= (2\pi / m) / 2 = \pi / m.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

З урахуванням (2.4) і (2.11) для умови $N_\Sigma \gg 1$ визначимо ефективність γ_{A3} просторової селективності багатокутної (3-х та 4-х кутної) екранованої системи, рис. 6.1в, рис. 6.1г, з лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A3} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot (K_W / m)^2}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 4m \cdot \lambda \cdot K_{nW}}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\pi / m) \cdot 2\pi \cdot K_F} \right)}. \tag{2.12}$$

Аналогічним чином визначимо параметри селективності $\Delta\theta_{ML}$, K_D , K_n , K_{SL} , $\theta_{ML, \max}$:

$$\begin{aligned}
\max\{\Delta\theta_{ML4}\} &= \max\{\Delta\theta_{ML5}\} = \frac{2\lambda}{d \cdot (N_\Sigma / (2 + k)) \cdot \sin \theta_{ML}}; \\
K_{D4} &= K_{D5} = K_W / (2 + k); \\
K_{n4} &= K_{n5} = K_{nW} \in [1; 8]; \\
K_{SL4} &= K_{SL5} = K_{SW} \in [10^{-2}; 10^{-5}]; \\
\theta_{ML4, \max} &= \theta_{ML5, \max} = \pi / 4.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

З урахуванням (2.4) та (2.13) ефективність γ_{A4} просторової селективності для конфігурацій ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 2.1д, рис. 2.1е:

$$\gamma_{A4} = \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot K_W^2 / (2 + k)^2}{N_\Sigma \left(K_{SW}^2 + \frac{(1 + P_N / P_Z) \cdot 2(2 + k) \cdot \lambda \cdot K_{nW}}{d \cdot N_\Sigma \cdot \sin(\pi / 4) \cdot 2\pi \cdot K_F} \right)}. \tag{2.14}$$

Порівняльний аналіз рівнянь (2.10) та (2.14) показує, що додаткова селекція дзеркальних просторових каналів прийому в системі ортогональних лінійних АР досягається відносно невеликим (на [30–50]%) збільшенням кількості N_Σ радіоканалів при незмінному значенні $\theta_{ML, \max} = \pi / 4$ радіан

максимального відхилення напрямку головної пелюстки від нормалі. В екранованих ортогональних лінійних АР селективність за дзеркальними просторовими каналами прийому може бути збільшена до (-60dB) при відсутності розширення $\Delta\theta_{ML}$.

Виконаємо з використанням програми MathCad та рівнянь (2.7), (2.10), (2.12) та (2.14) експериментальні дослідження залежності ефективності γ_A розглянутих конфігурацій АР від кількості N_Σ радіоканалів АР при ЕМО різної складності – при співвідношеннях потужності завади та шуму $P_Z / P_N = 0\text{dB}$ та $P_Z / P_N = 20\text{dB}$.

Моделювання виконаємо за наступних умов: для кільцевої АР γ_{A1} : $K_{SL1} = 0,4$, $K_{D1} = 1$, $K_{n1} = 1,2$; для оцінки ефективності γ_{A2} , γ_{A3} , γ_{A4} врахуємо використання функції $W(z)$ діаграмоутворення – Хемінга з параметрами: коефіцієнт спрямованої дії $K_w = 0,54$, коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки $K_{nw} = 1,36$, коефіцієнт рівня бічних пелюсток $K_{sw} = -43\text{dB}$ [17]. Також оберемо коефіцієнт фільтрації корелятора рівним $K_F = 4 \cdot 10^4$, що відповідає умові оброблення $4 \cdot 10^4$ часових сигнальних відліків. Режим роботи АР – прийом під нахилом (з межевим напрямком прийому головної пелюстки) з кутом $\theta_{ML} = \pi / 4$ для ортогональних систем та $\pi / 3$ для трикутної конфігурації.

На рис. 2.2 та рис. 2.3 наведені залежності ефективностей: γ_{A1} для рис. 2.1а, γ_{A2} для рис. 2.1б, γ_{A3} для рис. 1в, γ_{A4} для рис. 2.1е за умови мінімальних апаратурних витрат, тобто при $m=3$ для m -кутної конфігурації, рис. 2.1в, та $k=2$ для конфігурації ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 2.1е.

Порівняльний аналіз залежностей ефективностей $\gamma_{A1} - \gamma_{A4}$ від кількості N_Σ радіоканалів на рис. 2.2 та рис. 2.3 показує, що ефективність АР незалежно від конфігурації є монотонною спадаючою функцією в залежності від кількості N_Σ радіоканалів. Залежності ефективностей $\gamma_{A1} - \gamma_{A4}$ є нелінійними.

Доцільно виділити два піддіапазони графіків. В піддіпазоні $N_\Sigma \in [4;30]$ крутизна залежностей суттєва і зумовлює зменшення ефективності в межах $[3;7]$ дБ. В піддіпазоні $N_\Sigma > 30$ крутизна залежностей набагато менша.

Найкращу ефективність для двох варіантів ЕМО, при $P_Z / P_N = 0$ дБ та $P_Z / P_N = 20$ дБ має система з двох ортогональних лінійних АР, рис. 2.16. Її ефективність γ_{A2} просторової селективності краща порівняно з ефективністю γ_{A1} кільцевої АР на $[20;25]$ дБ.

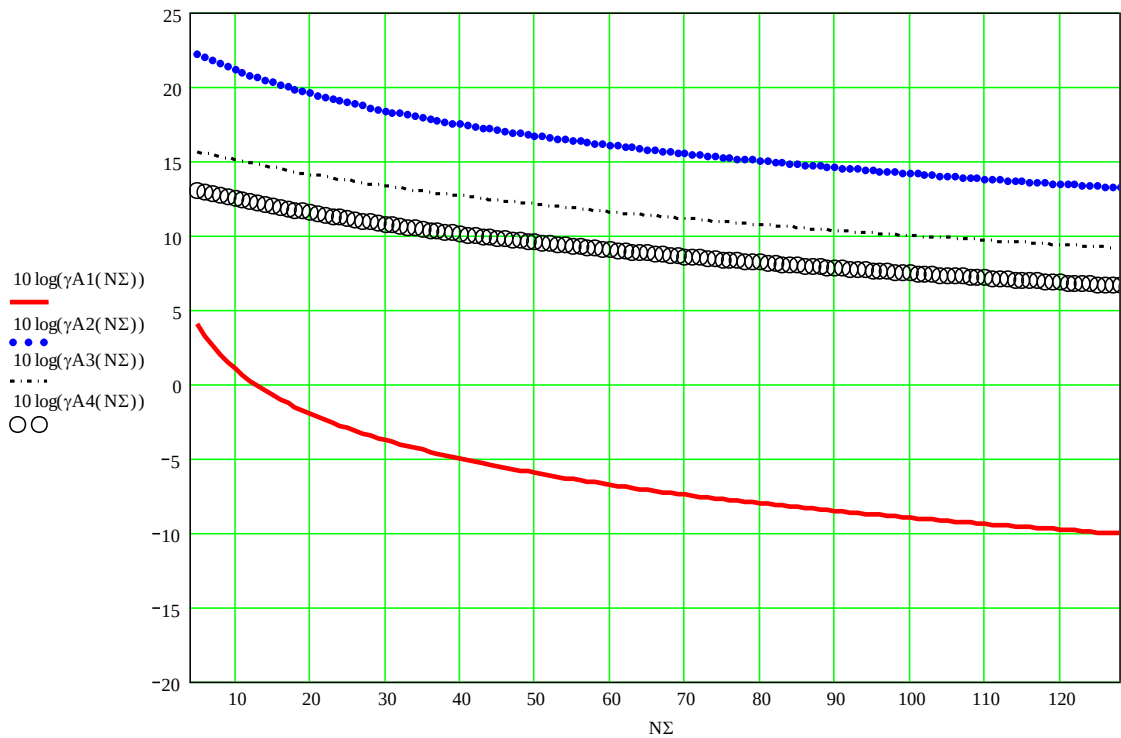


Рисунок 2.2 – Сімейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 0$ дБ від кількості N_Σ радіоканалів

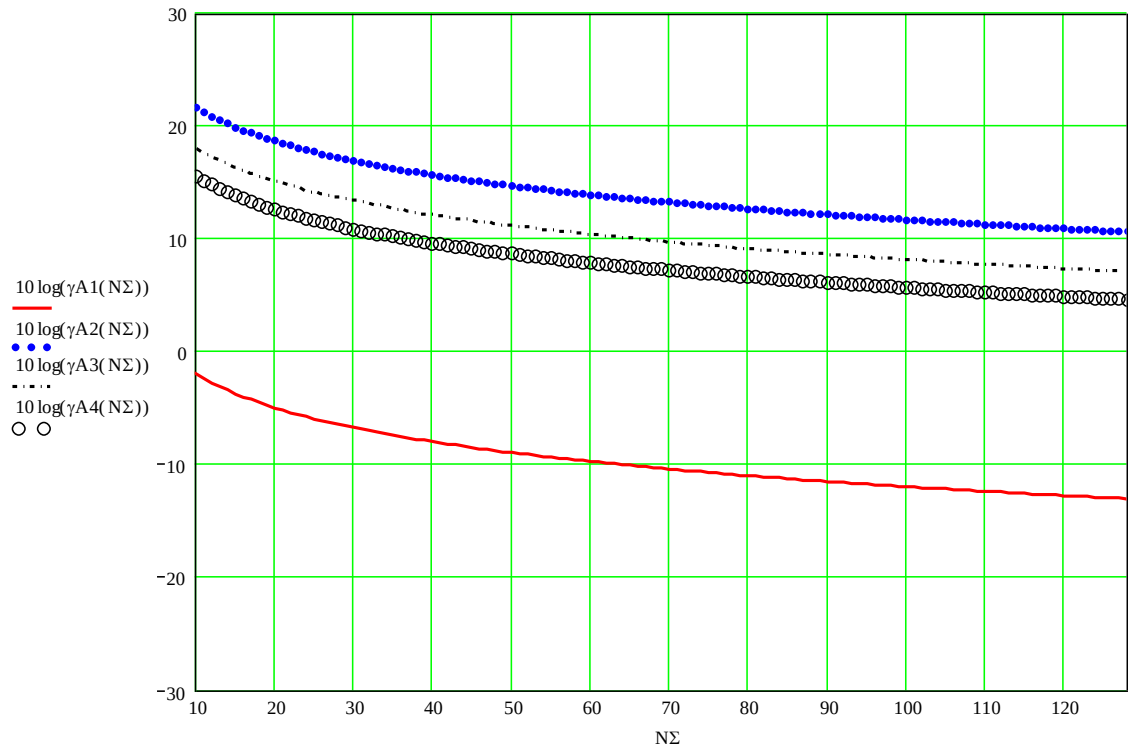


Рисунок 2.3 – Сімейство залежностей ефективності γ_A селективності конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20$ дБ від кількості N_Σ радіоканалів

На рис. 2.4 наведені залежності ефективностей γ_A конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20$ дБ від коефіцієнта K_F фільтрації. Для отримання залежності рис. 2.4 оберемо $N_\Sigma = 32$.

При погіршенні ЕМО і зростанні відношення P_Z / P_N на 20дБ абсолютні значення ефективностей γ_{A2} , γ_{A3} та γ_{A4} збільшуються в середньому на 2дБ, а ефективність γ_{A1} кільцевої АР зменшується на 3дБ.

В результаті для умов складної ЕМО при $P_Z / P_N = 20$ дБ і більше доцільним є застосування ортогональної лінійної АР, рис. 2.1б, а застосування кільцевої АР є малоефективним.

При застосуванні екранування, що захищає радіопеленгатор від дії множинних завад найбільшу ефективність забезпечує трикутна АР з екрануванням, рис. 2.1в.

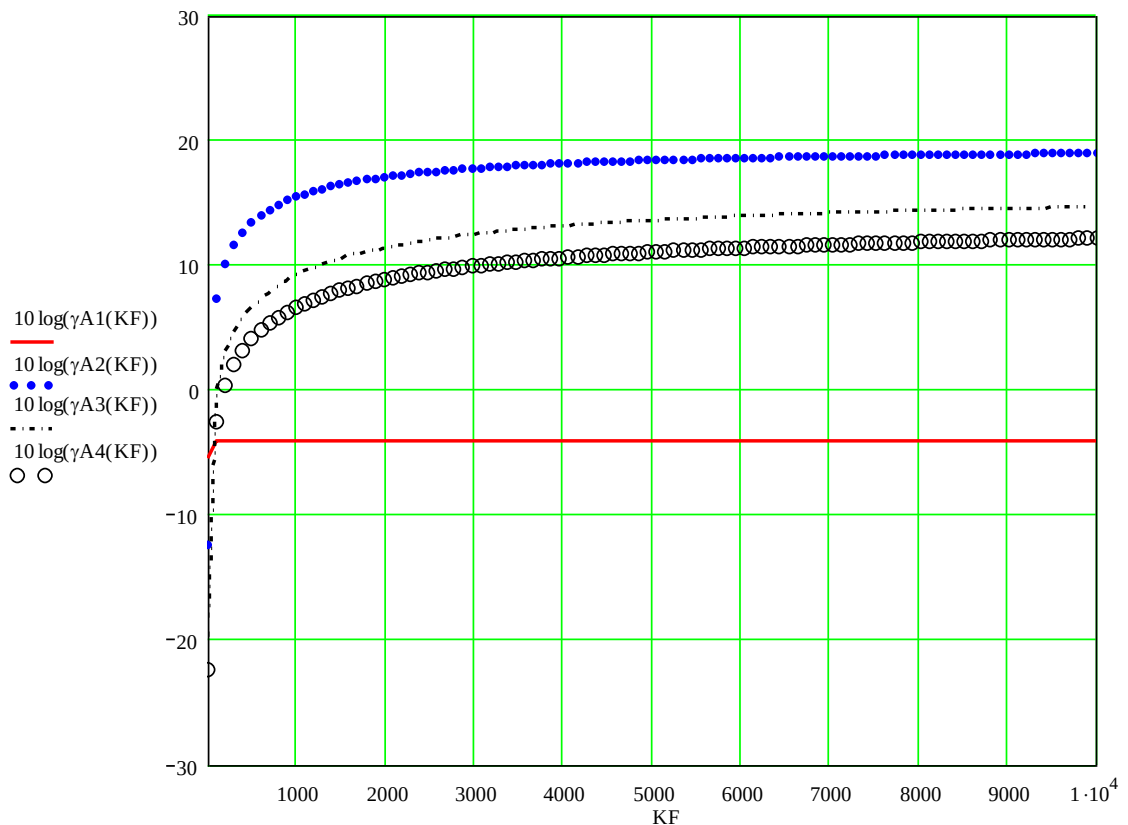


Рисунок 2.4 – Сімейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 20\text{дБ}$ від коефіцієнта K_F фільтрації

Аналіз рис. 2.4 показує, що ефективність просторової селективності конфігурацій AP за запропонованим критерієм суттєво залежить від коефіцієнта K_F . Залежності на рис. 2.4 ефективності γ_A від коефіцієнта K_F є немонотонно зростаючими, крутизна яких найбільша в діапазоні $K_F \in [10; 1000]$. При цьому ефективність просторової селективності кільцевої AP практично не залежить від коефіцієнта K_F .

Врахування коефіцієнта K_F , що зазвичай більший $K_F > 10^3$ якісно не змінює співвідношення залежностей порівняно з рис. 2.2 та рис. 2.3, але значно підвищує інформативність критерія (2.5).

Вцілому результати досліджень рис. 2.2 – рис. 2.4 підтверджують інформативність та об'єктивність запропонованого критерія ефективності селективності конфігурації AP і підтверджують в складній ЕМО суттєво кращу ефективність та перспективність застосування конфігурацій з лінійних AP.

Результати розробки та дослідження критерія ефективності селективності АР різної конфігурації для кореляційно-інтерферометричного пеленгування підтверджують інформативність запропонованого критерія ефективності. Проведені дослідження ефективності варіантів одновимірних АР показали, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторової селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з лінійних ортогональних АР.

Отримані результати доцільно використовувати при реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують в складній динамічній ЕМО.

Обмеженнями на використання лінійних АР є їх великі габарити на частотах нижче 500МГц, а також лінійна пропорційна залежність точності і роздільної здатності пеленгатора від частоти сигналу.[18]

Висновки. Проведені дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показують інформативність та інтегрований характер запропонованого показника ефективності γ_A просторово-частотної селективності конфігурацій антенних решіток.

Визначені основні параметри АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень бічних пелюсток K_{SL} , ширина головної пелюстки $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт спрямованої дії K_D і коефіцієнт K_n шумової ширини головної пелюстки діаграми спрямованості, та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Запропоновано варіант оцінки ефективності γ_A просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що кількісно враховує усі особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показав, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторово-частотної селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з двох ортогональних лінійних АР.

3 Моделивання кореляційного пеленгатора станції радіомоніторингу

3.1 Програмна модель, обґрунтування складу та функціональних можливостей

В ході моделювання було встановлено, що програмна модель пеленгатора має включати в себе блоки, що забезпечують [19]: формування сигналу, формування шуму, формування суміші адитивного шуму і сигналу, формування функції вікна N-відліків, множення на функцію вікна, швидке перетворення Фур'є часового спектрального аналізу, формування масиву просторових спектральних відліків однакової частоти, формування масиву Z-когерентних відліків k-ої спектральної складової, спектральний аналіз отриманих масивів, кореляційна оцінка просторової частоти сигналу з використанням перетворення, визначення пеленгу.

Для розробки потрібно обрати програмний пакет, що має змогу проводити математичні підрахунки і має можливість з високою точністю проводити симуляцію процесів. Отже, вибір зупинився на програмному пакеті «Mathcad», оскільки він може проводити потрібні для розробки операції, та має простий інтерфейс, що є досить вагомою перевагою, оскільки, навіть не маючи спеціальних знань синтаксису мови, але маючи уявлення про суть алгоритму, можливо зробити перевірку і внести поправки програмного коду. Також «Mathcad» містить усі наявні можливості будь-якої іншої програми: створення циклів, перевірка умов і так далі.

На рисунку 3.1 представлено структурну схему роботи програмної моделі.

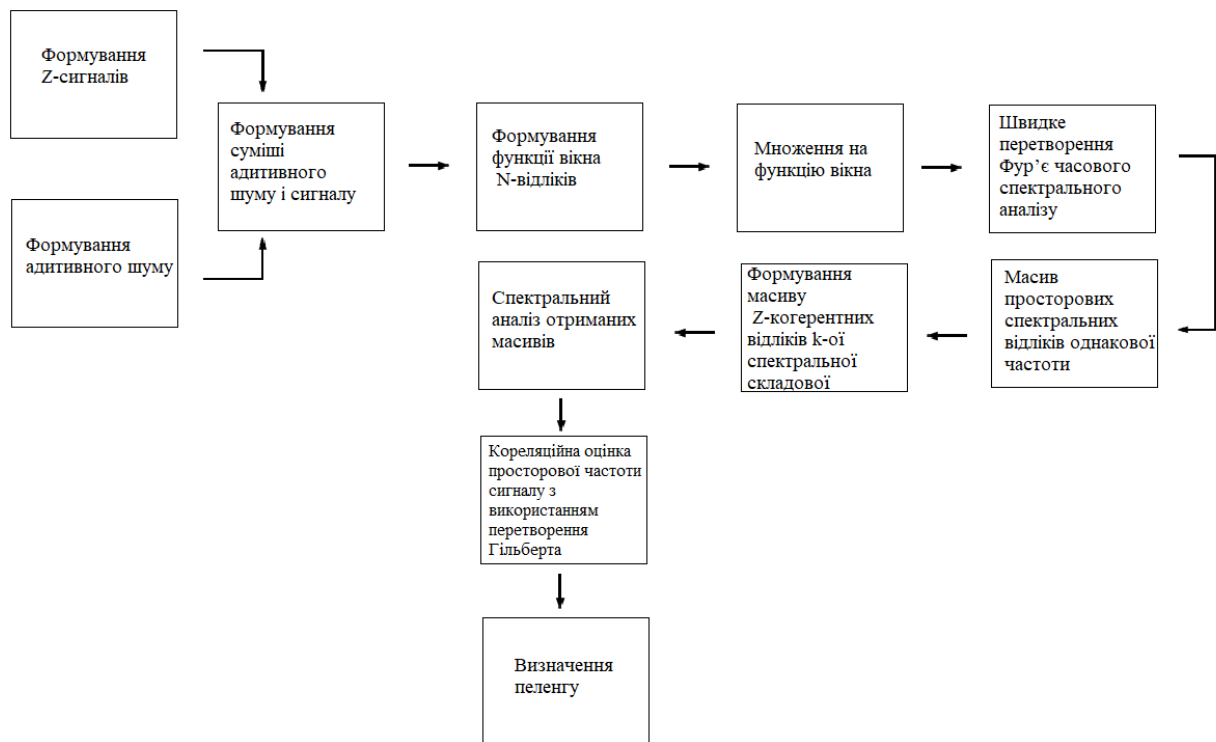


Рисунок 3.1 – Структурна схема алгоритму роботи програмної моделі

3.2 Задаємо початкові умові

1. Begining parameters

Задаємо кут приходу радіосигналу в межах від 0 до 180°

$$\theta_{grad} := 10$$

Переводимо градуси в радіани

$$\theta_{rad} := \frac{(\theta_{grad} \cdot \pi)}{180} \quad \theta_{rad} = 0.17453$$

Задаємо антенну базу, м:

$$b_a := 0.05$$

Задаємо константу швидкості світла, м/с:

$$c := 299792458$$

Отримуємо значення затримки, що відповідає цим початковим даним, с:

$$\tau := \frac{b_a \cos(\theta_{rad})}{c} \quad \tau = 1.64248 \times 10^{-10}$$

Рисунок 3.2 – Заповнення початкових даних в програмній моделі

Програмна модель складається з декількох розділів, відповідно до функціональних блоків. Кожен розділ можна редагувати та корегувати відповідно до потрібних умов проведення досліджень.

В першому розділі програми задаємо вхідні дані: кут приходу сигналу, і антенну базу. Наприкінці розділу програма обраховує по відповідним формулам затримку, яка існуватиме між першим та другим прийомними каналами – основний інформаційний параметр, по якому ми будемо шукати пеленг.

В наступному розділі програми ми формуємо лінійно частотно-модульовані сигнали (ЛЧМ), параметри яких ми можемо змінювати рисунку 3.3 враховуючи необхідні умови проведення досліджень: період сигналу, амплітуду, базу, середню частоту. Дані сигнали симулюють реальні сигнали, що приймаються антенами рознесеними у просторі.

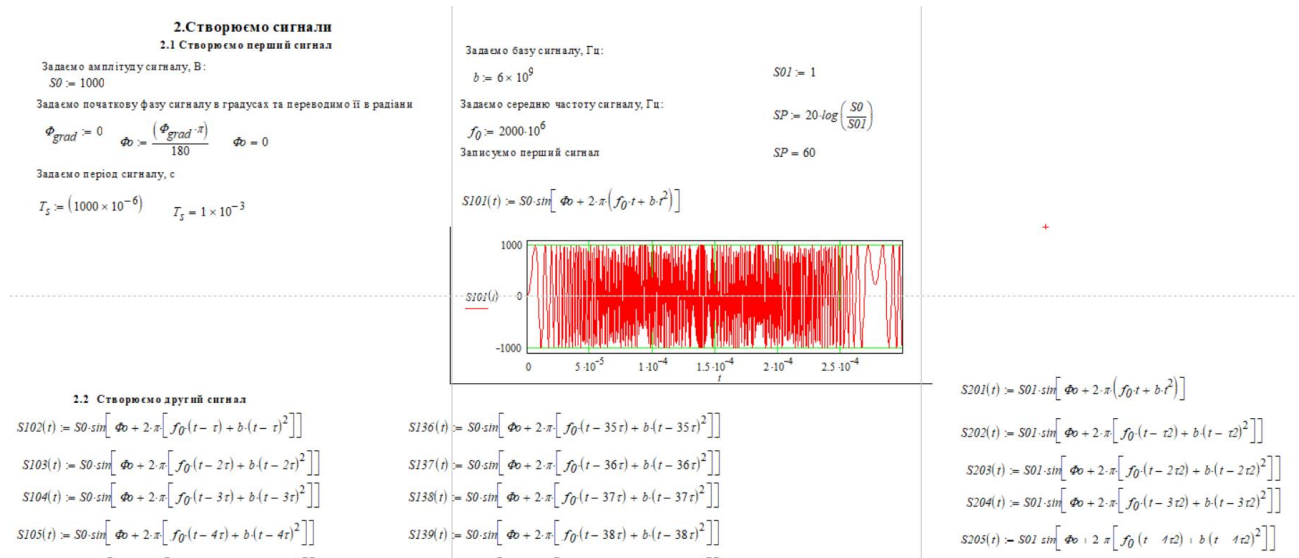


Рисунок 3.3 – Формування сигналів Z-канальної антенної решітки

Також можна регулювати середнє квадратичне очікування та математичне очікування.

3. Створюємо вікна

3.1. Задаємо параметри дискретизації вікон

Задаємо кількість відліків

$$N := 2048$$

Задамо частоту дискретизації F, Гц

$$Fd := 2.0575 \cdot 10^7$$

Період дискретизації Td

$$\frac{f_0}{Fd} = 97.20535$$

$$Td := \frac{1}{Fd} \quad Td = 4.86027 \times 10^{-8}$$

$$97 \cdot Fd = 1.99578 \times 10^9$$

Задаємо час аналізу, який рівний періоду імпульса широкопasmового сигналу, с:

$$tMax := N \cdot Td \quad tMax = 9.95383 \times 10^{-5}$$

Створюємо дискретні відліки часу з кроком Td

$$k := 0..N-1 \quad t_k := k \cdot Td$$

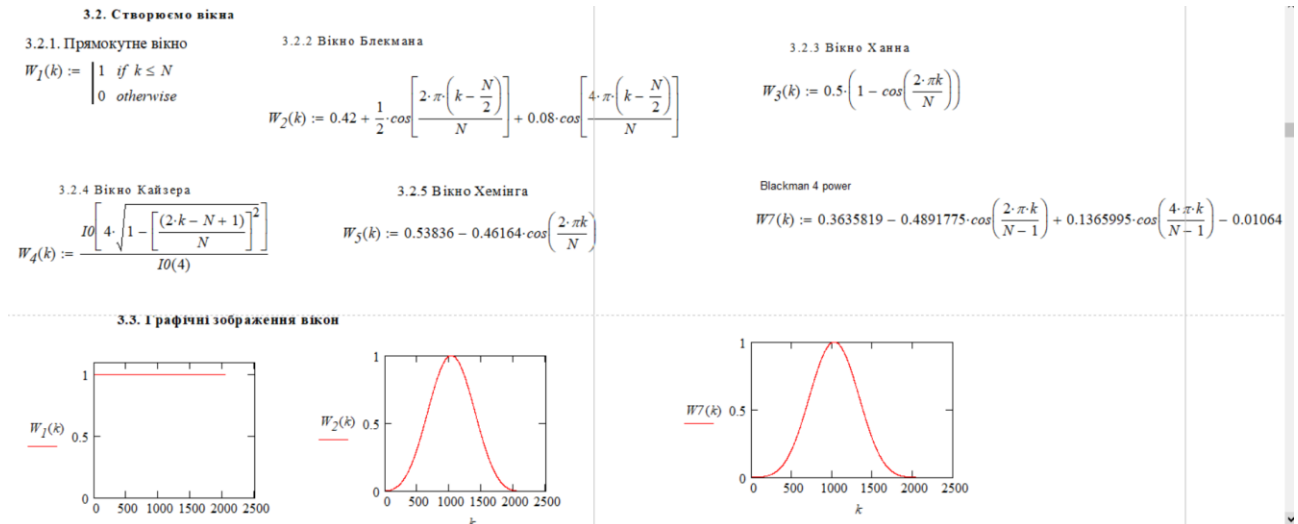


Рисунок 3.4 – Дискретизація та створення вікон

На наступному рисунку представлено частину програму, в якій відбувається зашумлювання даних.

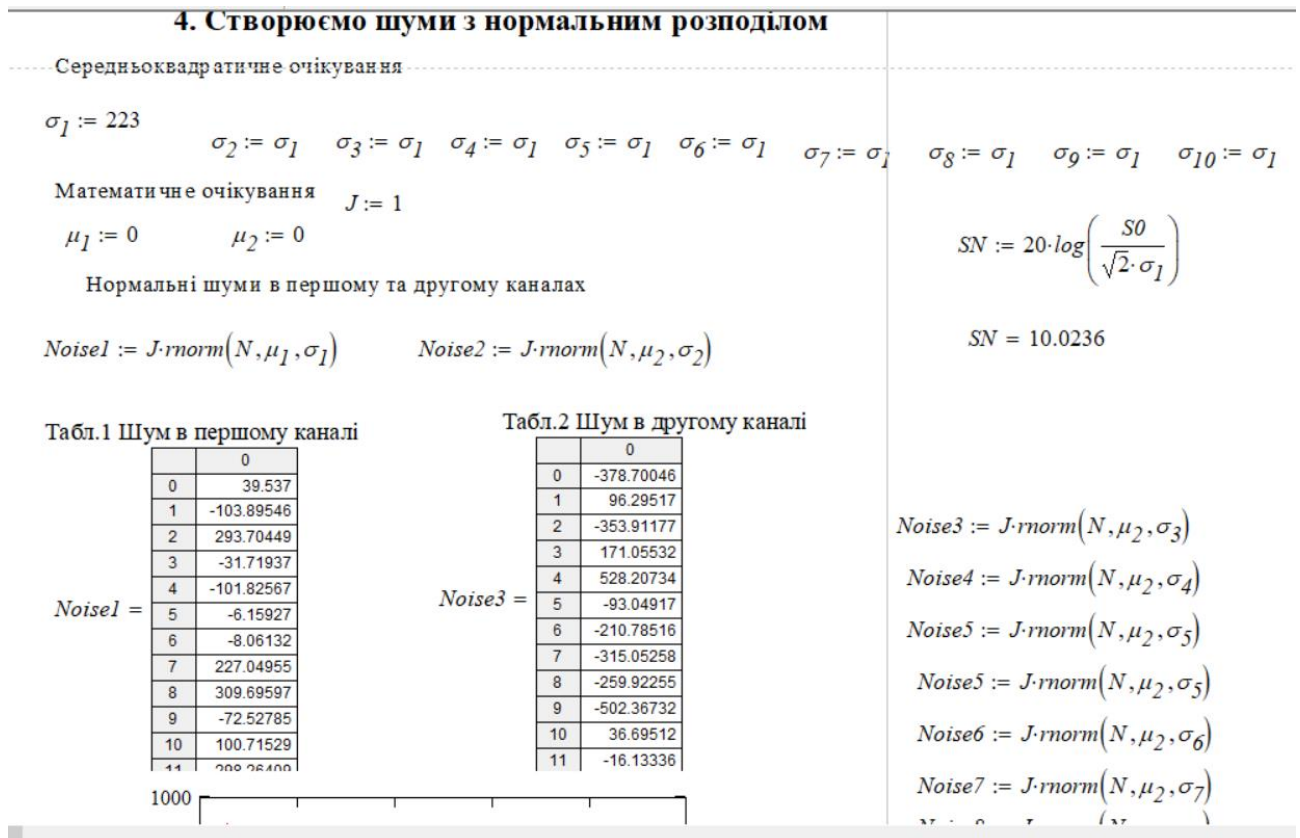


Рисунок 3.5 – Зашумлювання даних

На рисунку 3.6 представлено частину програми, в якій видно амплітудний спектр сигналу.

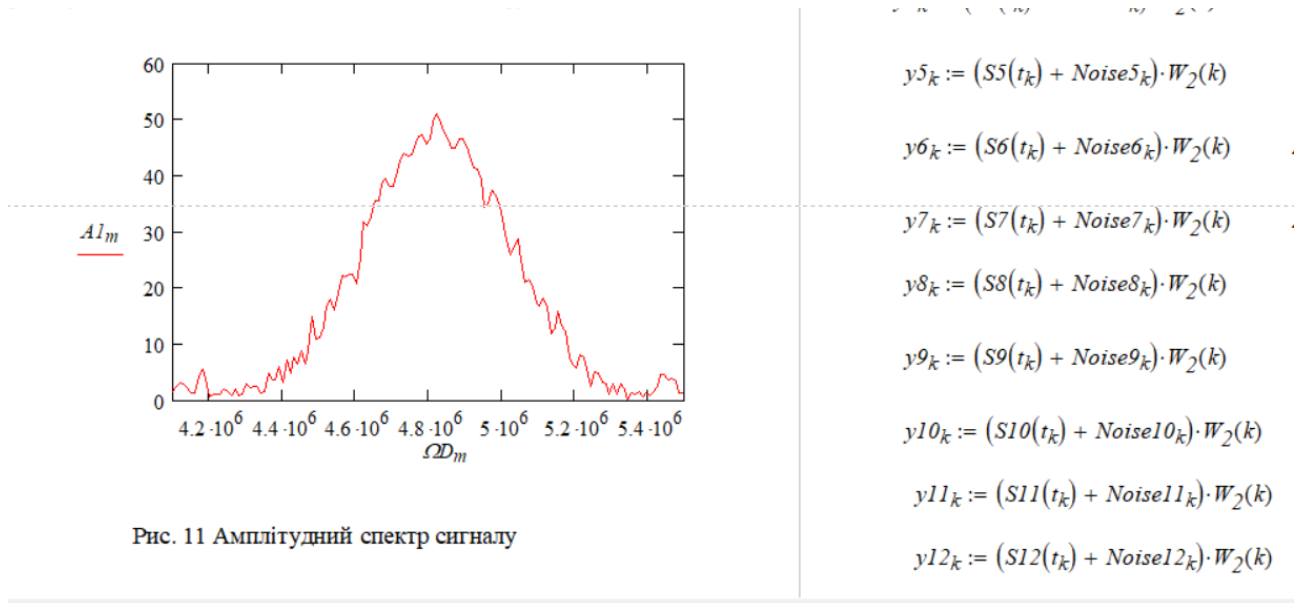


Рисунок 3.6 – Амплітудний спектр сигналу

На рисунку 3.7 зображено частину програмної моделі, в якій зображено просторовий спектральний аналіз

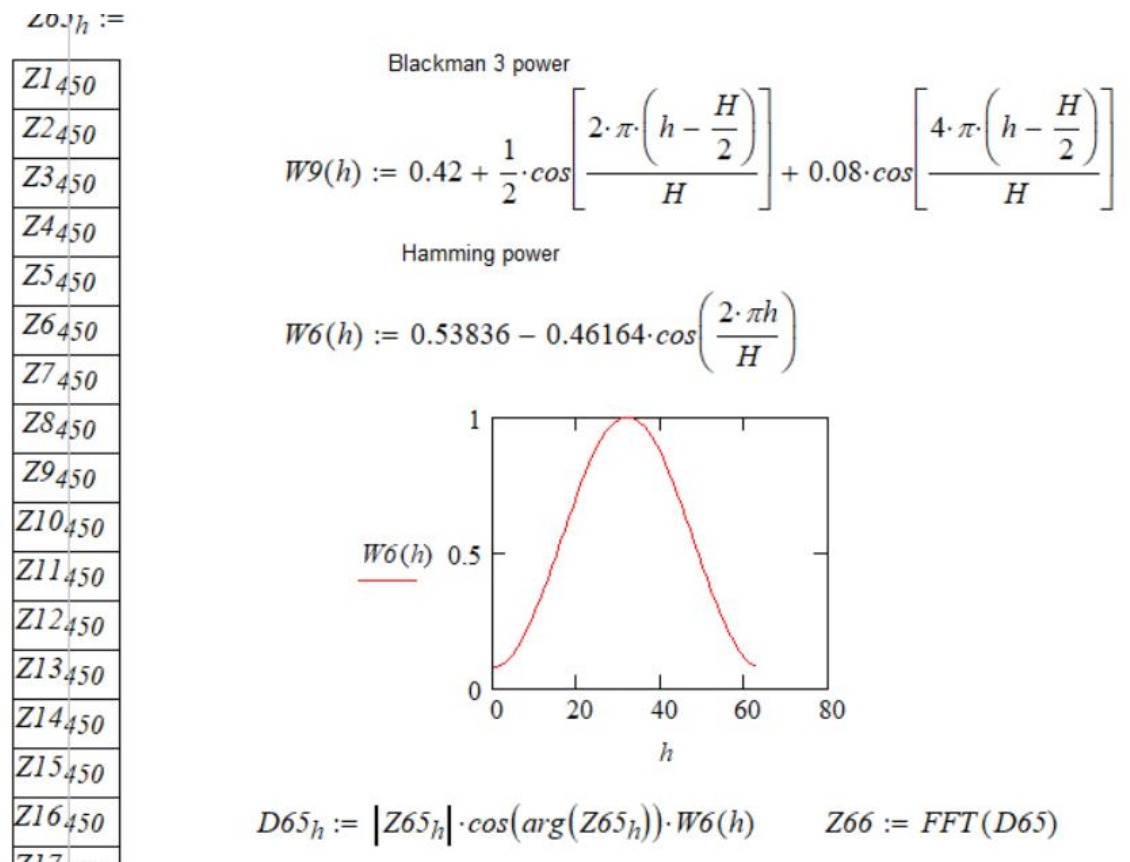


Рисунок 3.7– Просторовий спектральний аналіз

На рисунку 3.9 бачимо результат роботи блоку оцінки просторової частоти гармоніки.

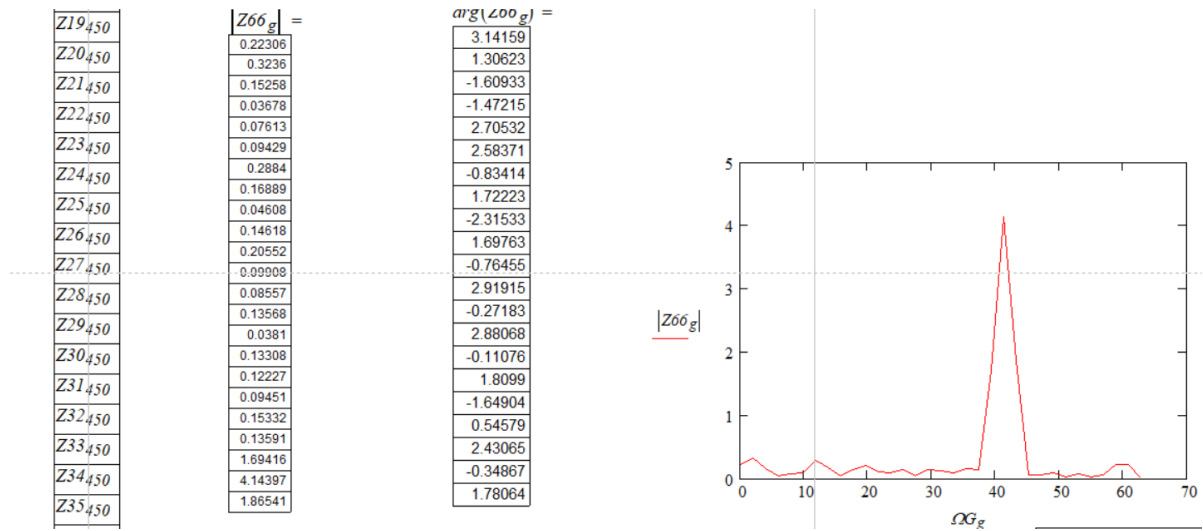


Рисунок 3.8 – Оцінка просторової частоти з використання перетворення Гільберта

В останньому, розділі програми знаходимо значення пеленгу по сумарній затримці, а також похибки пеленгування (абсолютну та відносну) рисунок 3.10.

Оцінка пеленга за екстремальною просторовою частотою (1 спектр складова) з уточненням частоти в межах пелюстки

$$\Omega V1 := \frac{1}{(z1)} \cdot \left(atan \left(\frac{S1 \cdot \sin(\Delta\psi1 + \Delta\psi2cile)}{S1 \cdot \cos(\Delta\psi1 + \Delta\psi2cile)} \right) + A \cdot \pi + \Delta\psi2cile \right)$$

$$Pel2 := acos \left[\Omega V1 \cdot \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot (\Omega D_{450} + 97 \cdot Fd)} \right]$$

$$Pel2grad := \frac{180 \cdot Pel2}{\pi} \quad Pel2grad = 10.0395$$

Похибка пеленгу, градусів

$$Pel2grad - \theta_{grad} = 0.0395$$

Рисунок 3.10 – Оцінка напрямку за просторовою частотою

3.3 Результати моделювання

Виконаємо моделювання роботи пеленгатора згідно розробленого безпошукового алгоритму кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням розробленої програми в середовищі MathCad.

Початкові умови моделювання:

- тип сигналу – неперервний з лінійною частотною модуляцією:

$$S(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t + bt^2);$$
- антенна база $b_a = 0,05м$
- тип АР: лінійна з кількістю пеленгаційних каналів прийому $Z = 64$;
- ширина спектра сигналу на рівні -3 дБ: $\Delta f_s = 0,5МГц$;
- частота сигналу $f_s = 2ГГц$;
- частота дискретизації $\Delta f_d = 2\Delta f_k = 20МГц$ $\Delta f_d = 2\Delta f_k = 20,5МГц$;
- аналізована кількість часових відліків сигналу $N_s = 2048$;

3.3.1 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від напрямку . В результаті моделювання отримана залежність похибки $\Delta\theta$ оцінки пеленгу від напрямку на ДРВ без урахування дії шумів (рис. 3.10, Ряд1) і залежність СКВ оцінки пеленгу від напрямку на ДРВ при заданому відношенні сигнал / шум 0дБ (рис. 3.10, Ряд2)..

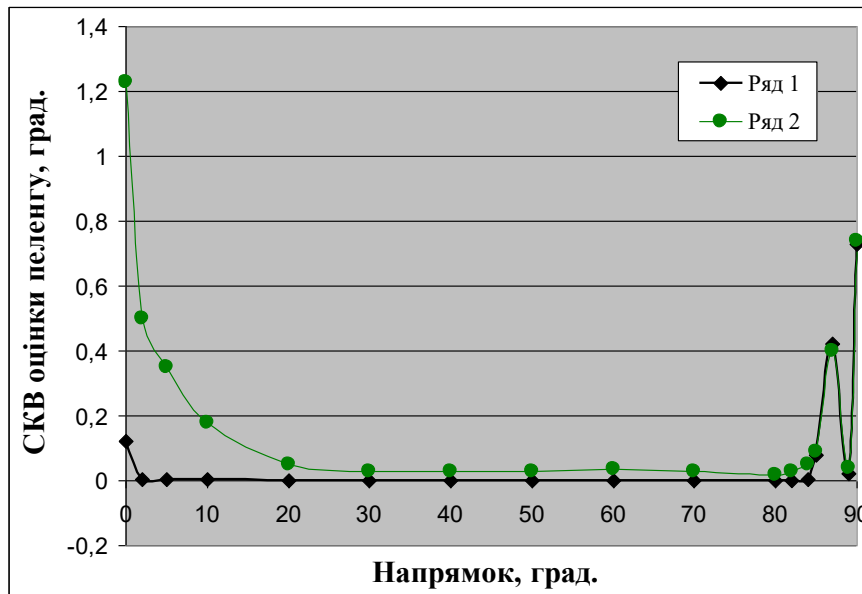


Рисунок 3.10 – Залежність похибки $\Delta\theta$ оцінки пеленгу від напрямку на ДРВ

Аналіз рис. 3.10 показує, що розглянута залежність забезпечує більш високу точність пеленгування в широкому секторі напрямків, але при цьому має значно менші обчислювальні витрати і забезпечує суттєве підвищення швидкодії пеленгування.

3.3.2 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від типу вікна. За отриманими результатами моделювання в MathCad побудований графік залежності СКВ від типу вікна, та представлений на рисунку 3.11

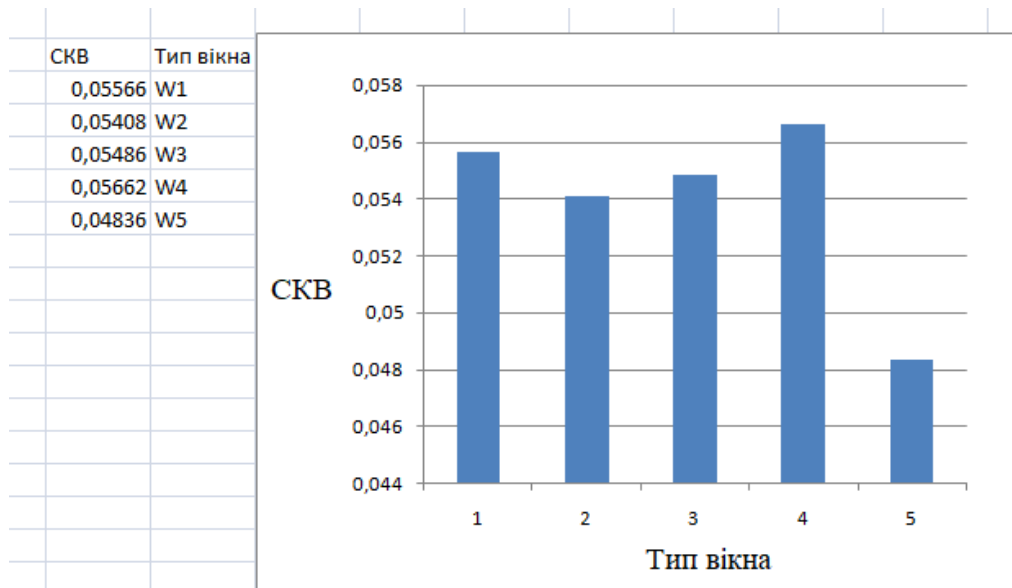


Рисунок 3.11 – Залежно СКВ від типу вікна спектрального аналізу

де - W1 – прямокутне вікно

- W2 – вікно Блекмана

- W3 – вікно Ханна

- W4 – вікно Кайзера

- W5 – вікно Хеммінга

В результаті проведених досліджень отримана залежність СКВ оцінки пеленга від типу вікна. З отриманого графіка видно, що мінімальну похибка забезпечило вікно W5 Хеммінга (Hamming) з шириною еквівалентної шумової смуги $\text{Noise BW} = 1,36$, максимальну похибку дало вікно W4 Кайзера (Kaiser $\alpha = 4$) з $\text{Noise BW} = 2$ що збігається з теорією.

3.3.3 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від сигнал/шум. На рисунку 3.12 представлені результати моделювання дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від сигнал/шум у вигляді графіку.

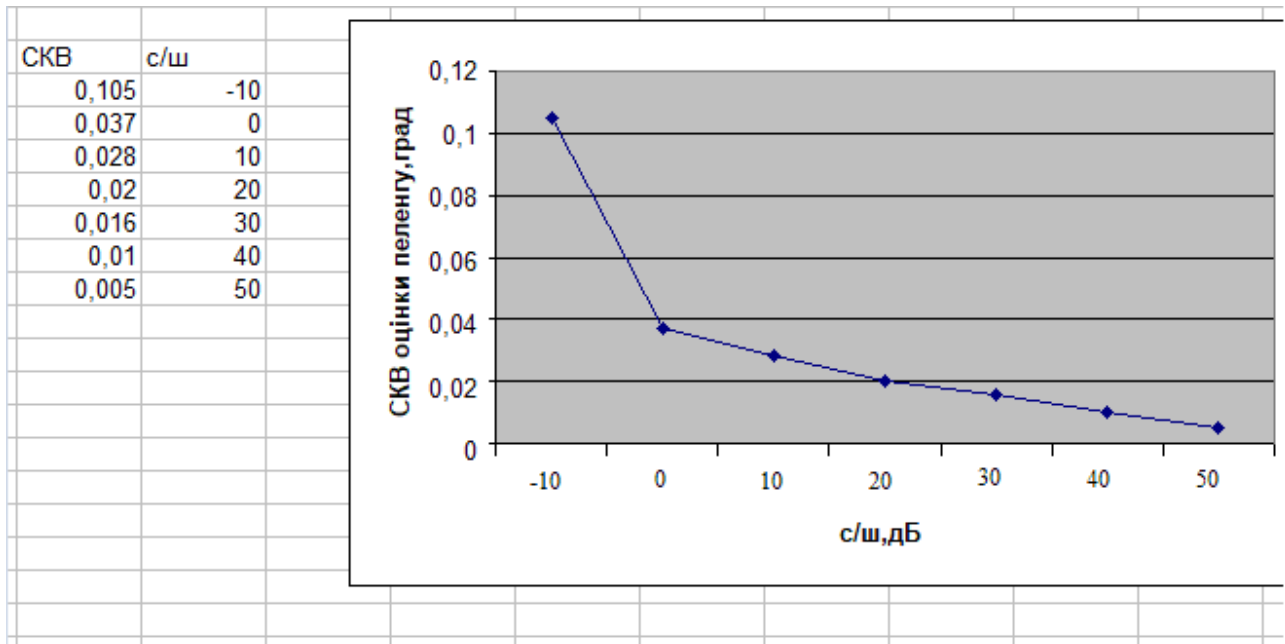


Рисунок 3.12 – Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від сигнал/шум.

В результаті проведених дослідженні отримана залежність СКВ оцінки пеленга від вхідного відношення сигнал / шум. З отриманого графіка видно, що СКО похибка пеленгування 0,1 градуса забезпечується при відношенні сигнал / шум + 5 дБ. При збільшенні значення сигнал / шум СКО оцінки пеленга зменшується по експоненті. Для порівняння, при пеленгацією амплітудним, фазовому або доплеровским методом, СКО оцінки пеленга 2 градуси досягається при відношенні сигнал / шум +30 дБ. Таким чином досліджуваний цифровий спектральний кореляційний метод пеленгування має набагато краще характеристики і на сьогодні є найбільш перспективним в світі для радіомоніторингу і радіорозвідки.

3.3.4 Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від частоти. В ході моделювання отримано графік залежності СКВ оцінки пеленга від частоти, що представлено на рисунку 3.13.

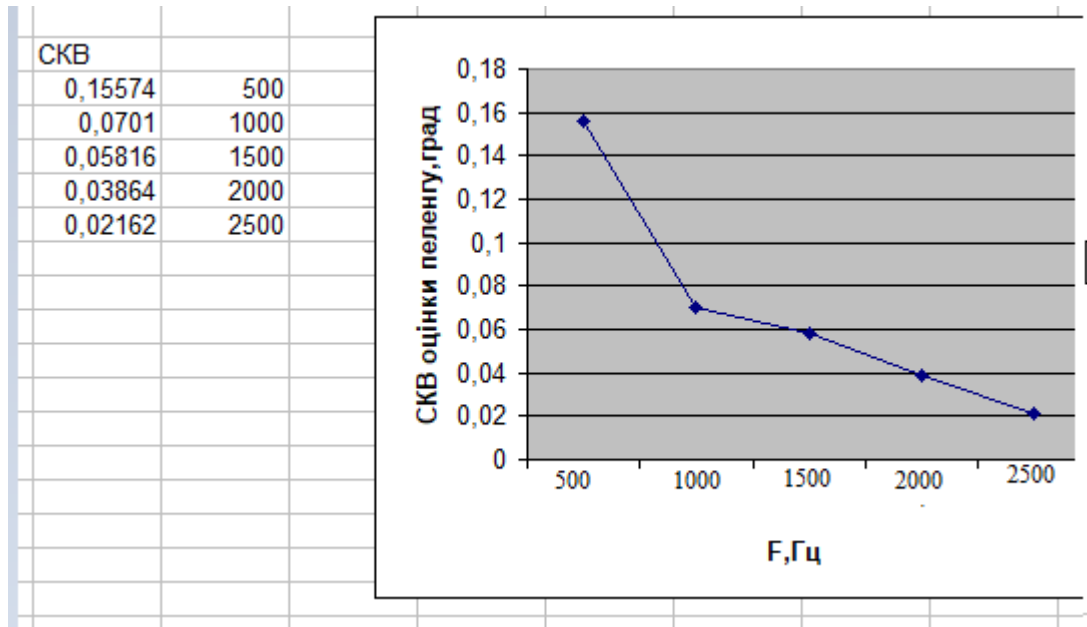


Рисунок 3.13 – Дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від частоти

З графіка залежності СКВ оцінки пеленга від частоти, видно, що чим більше частота, тим СКВ менше. Графік має зворотньопрпорційну залежність. За теорією корінь з частоти в знаменнику дорівнює значенню СКВ. Тобто теорія збіглася з практикою.

Висновки. Цей розділ присвячений безпосередньо дослідженням. Перед тим, як почати проводити дослідження, ми визначили якою має бути програмна модель, відповідно обґрунтували склад та функціональні можливості. В наступному підрозділі навели приклад робочої програми, і представили її у рисунках. І, задавши початкові дані, було проведено декілька дослідів, таких як: дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від сигнал/шум, дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від частоти, дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від напрямку, дослідження залежності СКВ оцінки пеленга від типу вікна. Відповідно до кожного з дослідженням проведено аналіз.

Висновки

В магістерській роботі було виконано дослідження ефективності антенної системи кореляційного пеленгатора станції радіомоніторингу.

Проведені дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показують інформативність та інтегрований характер запропонованого показника ефективності γ_A селективності АР радіопеленгатора.

Визначені основні параметри АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень K_{SL} бічних пелюсток ДС, ширина $\Delta\theta_{ML}$ головної пелюстки, коефіцієнт спрямованої дії K_D і коефіцієнт K_n шумової ширини головної пелюстки ДС, та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A просторової селективності конфігурації АР радіопеленгатора буде збільшуватись.

Запропоновано варіант оцінки ефективності γ_A просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що кількісно враховує усі особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показав, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторово-частотної селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з лінійних АР.

Підтверджено теоретичні розробки та положення програмним моделюванням.

Список використаної літератури

1. Козьмин В. А. Сучасні технології радіомоніторингу: теорія та практика / В. А. Козьмин. – Харків: Видавництво «Торсінг», 2018. – 350 с.
2. Jianfeng L. Joint direction finding and array calibration method for MIMO radar with unknown gain phase errors / L. Jianfeng, J. Ding, J. Defu // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2016. – Vol. 10, № 14. – P. 1563–1569. DOI: 10.1049/iet-map.2016.0104
3. Ципоренко В. В. Дослідження завадостійкості безпошукового цифрового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з антенною решіткою шляхом моделювання / В. В. Ципоренко, В. Г. Ципоренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки. – 2012. – № 3 (62). – С. 82–90.
4. Jung-Hoon L. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations / L. Jung-Hoon, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / [Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang] // Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings. – Mengqi Zhou, 2014. – P. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу / В. В. Ципоренко // Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2012. – № 48. – С. 75–84.
7. Kaluri V. R. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum / V. R. Kaluri, V. Shridhar // IEEE Transactions on Antennas

and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 4. – P. 2263–2268.
DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893

8. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements / [W. Chen, X. Xu, S. Wen, Z. Cao] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2011. – Vol. 5, № 8. – P. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289

9. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings. – Pisa : Marco Luise, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108

10. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation / [J. S. Matthew, D. C. Schmitz, D. M. Anderson, L. J. Douglas, T. B. Jennifer] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921

11. Houcem G. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources / G. Houcem, P. D. Jean, M. J. Larsys Sergio // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655

12. Jung-Hoon L. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System / L. Jung-Hoon, L. Jong-Hwan, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224

13. Chandran S. Advances: Direction-of-Arrival Estimation / S. Chandran. – Norwood: ARTECH HOUSE, 2006. – 474 p.

14. Milligan T. A. Modern antenna design: second edition / T. A. Milligan. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2005. – 614 p.

15. Lawrence M. J. Digital Spectral Analysis: With Applications / M. J. Lawrence. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1986. – 492 p.

16. Antenna engineering handbook / Ed. By J. L. Volakis. – New York: Digital Engineering Library. Mc Graw–Hill Companies, 2007. – 1755 p.

17. Proakis J. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077 p.

18. Ципоренко В.В. Дослідження антенної системи пеленгаторів комплексу радіомоніторинга / В.В. Ципоренко, Т.Г. Іщук, А.Я. Скочко // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2020» , 9-11 квітня 2020р. м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка». <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/05/173.pdf>

19. Ципоренко В.В. Алгоритм безпошукового кореляційно-інтерферометричного пеленгування з використанням багатоеlementної лінійної антенної решітки / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, А.Я. Скочко // Всеукраїнська науково-практична On-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки, 11-15 травня 2020р. м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка». С. 172. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/04/5.-metrologiya-informatsijno-vymiryuvalni-systemy-i-tehnologiyi.pdf>