

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В.О. Чмельов

РАДІОЛОКАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Розрахунково-графічна робота

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»,
спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензенти

Лащевська Н.О., канд. техн. наук, доц. кафедри прикладної радіоелектроніки, РТФ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Відповідальний
редактор

Жук С.Я., доктор. техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 01/2023 від 30.01.2023 р.)*

Навчальний посібник містить методичні рекомендації щодо виконання та оформлення результатів розрахунково-графічної роботи з розробки основних параметрів радіолокаційних систем. Розрахунково-графічна робота передбачена в рамках вивчення навчальної дисципліни «Радіолокаційні системи». В посібнику представлені основні теоретичні матеріали та аналітичні формули для проведення розрахунків параметрів РЛС. Крім того, представлені в посібнику рекомендації щодо орієнтовного змісту та оформлення результатів розрахунково-графічної роботи.

Для студентів всіх форм навчання, які навчаються за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» радіотехнічного факультету. Може бути використаний для навчання студентів за іншими спеціальностями.

Реєстр № 22/23-453 Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

© В.О. Чмельов

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Мета та завдання розрахунково-графічної роботи.....	4
2. Склад, обсяг і структура РГР.....	5
3. Методичні вказівки до виконання розрахунково графічної роботи	6
3.1 Обґрунтування тактико-технічних вимог до проектуємо РЛС.....	6
3.2 Основні технічні вимоги, які пред'являються до РЛС	7
3.3 Розробка узагальненої структурної схеми РЛС.....	10
3.4 Вибір і розрахунок основних технічних параметрів РЛС.....	11
3.5 Вибір довжини хвилі для радіолокаційних сигналів	12
3.6 Вибір виду зондуючого сигналу РЛС.....	16
3.7 Методи огляду простору, який контролює РЛС.....	19
3.8 Методи підвищення завадозахищеності РЛС.....	22
3.9 Вибір частоти повторення, і тривалості зондуючих імпульсів.....	23
3.10 Вибір ширини діаграми спрямованості антени РЛС.....	25
3.11 Розрахунок спектральної щільності шумів, та коефіцієнта розрізнення сигналу на фоні шумів	27
3.12 Розрахунок максимальної дальності виявлення РЛС.....	30
4 Розрахунок РЛС з автосупроводженням по кутовим координатам.....	33
5 Реалізація системного метода проектування при виконанні РГР...	37
6 Рекомендації до оформлення РГР.....	42
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	44
Додаток 1.....	46

ВСТУП

Вивчення навчальної дисципліни «Радіолокаційні системи» охоплює процес набуття теоретичних знань з принципів роботи радіолокаційних систем (РЛС), та набуття практичних навичок з побудови різних типів РЛС. При побудові РЛС, розробнику необхідно вирішувати на широкий спектр задач, які пов'язані з розробкою окремих підсистем та вузлів РЛС. Тому, комплексні процеси розробки РЛС поєднані в єдину організаційну форму навчальної діяльності – розрахунково-графічну роботу (РГР).

В процесі виконання РГР, студент навчиться системному підходу до синтезу РЛС, а саме, проведення розрахунків основних параметрів одної підсистеми РЛС, розробник повинен враховувати взаємовплив параметрів іншої підсистеми, і таким чином розглядати кожну підсистему, кожен елемент, як частину єдиної цілісної технічної системи – РЛС.

Надані методичні рекомендації щодо виконання РГР, дають можливість систематизувати роботу, і поступово виконати увесь комплекс розрахунків та графічних робіт для визначення основних параметрів РЛС.

Рекомендації з оформлення РГР дозволять в чіткій логічній послідовності викласти результати роботи, та представити їх у зрозумілій і зручній формі для аналізу досягнутих результатів.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Мета. Визначити основні параметри радіолокаційної системи, яка буде відповідати вимогам, що визначенні у завданні на розрахунково-графічну роботу (РГР).

Основні завдання РГР.

1. Деталізація та уточнення тактико-технічних вимог до радіолокаційної системи.
2. Побудова структурної схеми РЛС.

3. Визначення тактико-технічних характеристик (ТТХ) РЛС, яка буде відповідати тактико-технічним вимогам, що висуваються до неї.
4. Розрахунок параметрів основних вузлів і підсистем радіолокаційної системи.
5. Перевірка якості проведених розрахунків параметрів РЛС за інтегральним показником ефективності.

2. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РГР

Склад роботи повинен мати чітку структуру, і відповідати логічній послідовності виконання її окремих етапів. За результатами усвідомлення завдання на РГР необхідно детально розкрити тактико-технічні вимоги (ТТВ) до РЛС, що буде розроблятися, та вказати основні тактико-технічні характеристики (ТТХ) РЛС, які відповідатимуть висунутим вимогам. За аналізом досвіду побудови відомих РЛС, аналогічних за функціональним призначенням та ТТВ, будується структурна схема РЛС. В поясненні до структурної схеми, вказуються завдання, функції та стислий опис кожного структурного елементу та підсистем РЛС. Далі в роботі проводяться розрахунки основних параметрів кожного структурного елемента РЛС, визначається загальний параметр оцінки ефективності роботи РЛС як складної системи. Та робиться перевірка ефективності РЛС, і відповідності її ТТХ до висунутих ТТВ.

Структура РГР (розділи й підрозділи) визначається змістом роботи, тому рекомендовано виконувати роботу послідовно, у відповідності до наданих методичних рекомендацій. Складові елементи РГР (розділи й підрозділи) доцільно будувати за складовими методичних рекомендацій. Завершається робота загальним висновком про результати виконаної роботи. Загальний обсяг роботи повинен бути в межах 20-25 аркушів (додатки та графічний матеріал не враховується).

3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Виконання розрахункової роботи можна розділити на наступні етапи:

- вивчення літератури з метою пошуків аналогів, поглиблення і розширення знань, необхідних для обґрунтування тактико-технічних вимог й виконання завдання на роботу;
- розробка узагальненої структурної схеми системи;
- вибір і розрахунок основних параметрів;
- розробка структурної схеми однієї з підсистем у відповідності із завданням;
- аналіз можливих варіантів побудови принципової схеми окремої підсистеми РЛС (якщо вказано в завданні);
- розрахунок і аналіз деяких характеристик системи у відповідності з завданням;
- проведення розрахунків на комп'ютері в спеціальному програмному середовищі ;
- оформлення розрахунково-пояснювальної записки й креслень;
- підготовка до захисту і захист.

3.1 Обґрунтування тактико-технічних вимог до проектуємо РЛС

Початок роботи повинен починатися з аналізу завдання на РГР. Після усвідомлення завдання, необхідно розгорнуто та детально сформулювати тактико-технічні вимоги до РЛС відповідно її функціонального призначення. Крім того, в роботі особливу увагу буде присвячено детальній розробці однієї з підсистем РЛС, що визначено у завданні. Але, без глибокого розуміння місця цієї підсистеми, її взаємозв'язку з іншими системами і вплив на тактико-технічні характеристики системи в цілому проектування підсистеми неможливо. Тому роботу над потрібно починати з уявлення системи в

цілому, осмислення тактико-технічних вимог (ТТВ), які пред'явлених до РЛС.

ТТВ – це кількісний вираз характеристик системи, які вона повинна мати для успішного рішення своїх задач.

ТТВ розроблюється з урахуванням як тактичних вимог, витікаючих з ролі й місця РЛС, способів її застосування в відповідній системі (наприклад в системі управління повітряним рухом (УПР) чи в системі протиповітряної оборони), технічних характеристик існуючих і перспективних повітряно-космічних об'єктів, так і технічних можливостей по створенню РЛС на даному рівні розвитку науки й виробництва, допустимих затрат часу й матеріальних засобів на створення проектуємої системи.

3.2 Основні технічні вимоги, які пред'являються до РЛС

Вимоги пред'явлені до РЛС наступні:

- призначення РЛС, і склад інформації яку вона видає користувачу (так, наприклад, висотоміри в літаку видають лише одну координату – висоту літального апарату над землею чи водною поверхнею, наземні радіолокаційні висотоміри – дальність й кут місця чи дальність і висоту, наземні далекоміри – дальність і азимут, наземні трикоординатні РЛС – дальність, азимут і висоту чи дальність, азимут і кут місця й т.п.);
- максимальна дальність виявлення об'єкта R_m з заданою ефективною поверхнею розсіювання σ . Якщо R_m та σ в завданні не вказані, то необхідно задати потрібні для виконання проекту значення ЕПР σ і ймовірність правильного виявлення D об'єкту на межі зони бачення РЛС (зазвичай $D = 0,5$) і хибної тривоги F ;
- межа виявлення стандартних об'єктів H_m ;
- межі зони бачення по куту місця $\varepsilon_{\min} \varepsilon_{\max}$ і по азимуту;

- роздільна здатність РЛС по координатам $\delta R, \delta \beta, \delta \varepsilon$ і по швидкості δV_r ;
- точність вимірювання координат, задана у вигляді допустимих середньоквадратичних помилок вимірювання дальності σ_R , азимута σ_β , кута місця σ_ε , висоти σ_H ;
- характеристики завадозахищеності РЛС від різного роду завад, виражених значеннями відповідних параметрів завад, при яких зниження дальності дії чи характеристик точності не більше допустимих;
- інформаційні можливості РЛС, що характеризуються дискретністю виданої інформації чи пропускнуою спроможністю – під нею розуміють число одночасно спостерігаємих об'єктів, інформація про які видається з заданою дискретністю.

До тактико-технічних вимог також відносять характеристики надійності (що визначається часом роботи безвідмовної роботи), часові нормативи (час вмикання, вимикання, розгортки), характеристики мобільності і т.п.

Сучасні РЛС не спроможні кожна окремо вирішити всі основні задачі по виявленню, супроводу, розпізнанню різних об'єктів. У зв'язку з цим розвиток радіолокаційної техніки йде шляхом створення спеціалізованих РЛС (далекоміри, висотоміри, станції виявлення цілей на великій дальності, станції виявлення радіолокаційних об'єктів на малій висоті, станції супроводу, станції розпізнавання, і т.п.). Багатофункціональні РЛС за призначенням досить складні у розробці та виготовленні.

Тому обґрунтування ТТВ починається із з'ясування призначення майбутньої РЛС.

В завданні на РГР, як правило, сформовані вимоги лише до деяких тактичних характеристик РЛС, знання яких недостатньо для обґрунтування шляхів і принципів побудови, вибору і розрахунку основних параметрів проектуємої РЛС. Тому усвідомивши призначення майбутньої РЛС, на основі

вивчення характеристик повітряно-космічних об'єктів і перспектив їх розвитку, вимог споживачів до якості радіолокаційної інформації, можливостей раніше створених аналогічних зразків, сучасного рівня розвитку науки детально формулюють ТТВ.

При обґрунтуванні ТТВ необхідно враховувати можливості сучасних технологій виробництва радіоелектронної техніки. Треба пам'ятати, що підвищення тактико-технічних вимог призводить до ускладнення апаратури, підвищення її коштовності, зниженню надійності, ускладненню експлуатації. На практиці не завжди трапляється можливим на сучасному рівні розвитку науки і виробництва задовольнити задані тактичні вимоги. Тому при обґрунтуванні ТТВ потрібно виходити з мінімальних вимог.

Таким чином, при формулюванні ТТВ ідуть на компроміс між тактичними вимогами і технічними можливостями на сучасному етапі розвитку науки і техніки з урахуванням економічних виробничих можливостей.

Обґрунтування ТТВ є складною й об'ємною задачею, що потребує для свого рішення багатьох знань про повітряно-космічні об'єкти, способи їх застосування, про потенційні активні і пасивні завади для роботи РЛС.

У зв'язку з цим в РГР потрібно показати лише розуміння підходу до обґрунтування ТТВ і сформулювати основні ТТВ у відповідності з призначенням РЛС, і з урахуванням тактико-технічних характеристик аналогічних зразків.

Рекомендується приводити більш повні обґрунтування лише тих вимог, задоволення яких забезпечується підсистемою, на яку буде акцентована додаткова увага в РГР. Так, якщо розроблюється функціональна схема системи селекції рухомих цілей, то необхідно основну увагу приділити обґрунтуванню вимог до завадозахищеності РЛС від пасивних завад. Якщо розроблюється вимірювач висоти радіолокаційного висотоміра літака, то обґрунтовуються вимоги до точності і т.п.

3.3 Розробка узагальненої структурної схеми РЛС

Розробка узагальненої (спрощеної) структурної схеми починається з вибору основних технічних рішень, що являють собою сукупність технічних ідей та принципів, які визначають:

- методи огляду простору й вимірювання координат;
- діапазон хвиль, вид зонduючого радіолокаційного сигналу;
- методи захисту РЛС від активних та пасивних завад;
- способи отримання первинної радіолокаційної інформації, і

інтеграція РЛС з системами вторинної і третинної обробки радіолокаційної інформації.

Структурна схема РЛС відображає апаратне втілення технічних рішень, показує склад апаратури і функціональну взаємодію між пристроями РЛС.

Розвиток статистичної теорії виявлення і вимірювання параметрів сигналів, відбитих від радіолокаційних об'єктів, призвело до рішення задачі синтезу окремих пристроїв обробки (пристроїв виявлення, вимірювачів), оптимальних за визначеними критеріями. Але математично-аналітичний метод синтезу таких складних систем, як РЛС на теперішній час не розроблений. В схемотехніці, що займається проектуванням великих систем (до яких відносяться й РЛС), основним методом є так званий варіантний метод проектування. При цьому методі розглядаються окремі варіанти, що розробляються на основі існуючого досвіду, знань теорії і інженерної інтуїції.

В процесі проектування різні варіанти порівнюються по повноті задоволення ТТВ, вартості і іншим показникам, виявляються напрямки удосконалення варіантів. Широке використання комп'ютерів (ПК) дозволяє досить швидко проводити розрахунки і здійснювати швидкий пошук кращих варіантів.

При обґрунтуванні структурної схеми враховують призначення і пред'явленні ТТВ до нової РЛС, вибрані методи зондування і огляду

простору, метода вимірювання координат, завадозахищеності, способи відображення і зняття інформації. Забезпечення нормального функціонування РЛС при їх сумісній роботі потребує застосування на всіх РЛС мір по ослабленню їх побічного випромінювання, а також по зниженню рівня взаємних і індустриальних завад, проникаючих по каналам побічного прийому. Оскільки технічні заходи по забезпеченню електромагнітної сумісності (ЕМС) вирішуються на етапі розробки РЛТС, то ці важливі питання мабуть бути пророблені при виконанні РГР, перш за все в розділах «Обґрунтування тактико-технічних вимог» та «Розробка спрощеної структурної схеми радіотехнічної системи».

Вибравши принципи побудови РЛС (наприклад когерентно-імпульсна РЛС виявлення і наведення кругового огляду сантиметрового діапазону з зондуючим ЛЧМ сигналом), потрібно привести обґрунтування спрощеної структурної схеми.

Не рекомендується досить докладно розкривати структуру окремих елементів. Необхідно звернути увагу лише на їх призначення, вимоги до них і особливості застосування. Структурна схема повинна мати всі основні пристрої, враховуючи вхідні пристрої РЛС. Об'єм даного розділу – 5 сторінок.

3.4 Вибір і розрахунок основних технічних параметрів РЛС

Основні технічні параметри – це кількісні характеристики пристроїв і систем РЛС, які визначають її основні тактико-технічні характеристики (ТТХ). Перелік основних технічних параметрів можна отримати, проаналізувавши формули для розрахунку основних ТТХ. Класифікацію основних технічних параметрів можна проводити різними способами. Часто виділяють групи параметрів, які визначають дальність дії (енергетичні параметри), роздільна здатність, точність і т.п. При такому підході одні і тіж параметри можуть одночасно з'явитися у різних групах. На наш погляд,

класифікація стає більш чіткою, якщо виділити параметри генерації зондуючого сигналу (довжина хвилі λ , форма сигналу, тривалість огинаючої імпульсу τ_u , і його імпульсна потужність P_u , частота повторення F_n), параметри внутрішньо-імпульсної модуляції, що характеризують для частотно-модульованих сигналів девіацію частоти Δf , а для фазоманіпульованих сигналів – тривалість елементарного імпульсу τ_e , параметри прийому (коефіцієнт шуму $K_{ш}$, чутливість, ширина смуги пропускання Δf , проміжна частота), параметри огляду (швидкість обертання антени n_a , ширина діаграми спрямованості антени в азимутальній $\beta_{0,5}$, кутомісцевій $\varepsilon_{0,5}$ площинах, межі роботи по куту місця $\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$), параметри завадозахищеності (що характеризуються діапазоном і швидкістю перестроювання, коефіцієнтами придушення активних і пасивних завад при використанні відповідних пристроїв захисту) та ін.

Єдиної, підходящої для всіх випадків, методики вибору і розрахунку основних технічних параметрів немає, оскільки вона залежить від специфіки і призначення майбутньої РЛС, вибраних технічних рішень, можливостей промисловості.

Розглянемо спочатку деякі загальні питання вибору діапазону хвиль, форми зондуючого сигналу і методів захисту від завад, які в значній мірі визначають принципи побудови і основні технічні рішення.

3.5 Вибір довжини хвилі для радіолокаційних сигналів

Чим коротша довжина електромагнітної хвилі λ , тим при менших габаритах антени можна отримати необхідну ширину діаграми спрямованості і відповідно необхідні роздільна здатність по кутовим координатам, точність вимірювання координат і дальність дії [1].

$$\beta_{0,5}^0 \approx \frac{60\lambda}{l_T}; \quad \varepsilon_{0,5}^0 \approx \frac{60\lambda}{l_B} \quad (1)$$

де l_T, l_B - розміри антени по горизонталі і вертикалі.

Коефіцієнт підсилення антени можна визначити за емпіричною формулою

$$G = \frac{25000}{\beta_{0,5}^0 \cdot \varepsilon_{0,5}^0} \quad (2)$$

З аналізу формул (1) та (2) видно, що більшість РЛС з високою точністю вимірювання координат (РЛС зенітно-ракетних комплексів, системи управління повітряним рухом, РЛС наведення перехоплювачів та ін.) працюють в сантиметровому і міліметровому діапазонах.

В бортових РЛС, що розміщують на літальних апаратах, габаритні обмеження є вирішальними при виборі робочого діапазону хвиль.

При виборі λ враховуються й інші міркування і фактори. Так, одне з них пов'язане з залежністю ефективної площі розсіювання (ЕПР) реальних об'єктів локації від довжини хвилі. Як правило, використовують значення ЕПР типових цілей [2]: транспортний літак, бомбардувальник $\sigma \approx 10 \text{ м}^2$; винищувач, легкомоторний літак $\sigma \approx 1 \text{ м}^2$; крилата ракета $\sigma \approx 0,1 \text{ м}^2$; середній БПЛА $\sigma \approx 0,01 \text{ м}^2$; малий БПЛА, дрон $\sigma \approx 0,001 \text{ м}^2$.

Якщо λ більше геометричних розмірів об'єктів, то відбувається огинання об'єктів електромагнітними хвилями, і ефективна поверхня розсіювання об'єктів дуже мала. Кількісно це виражається формулою Релея для ЕПР (σ) сферичних об'єктів [3]

$$\sigma = \pi^5 \cdot \frac{d^6}{\lambda^4} \cdot \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)^2 \quad (3)$$

де ε - діелектрична проникність матеріалу радіолокаційного об'єкту, d - діаметр сфери ($d \ll \lambda$).

Аналіз формули (3) обґрунтовує використання в радіолокаційних системах хвилі НВЧ. Тільки в РЛС загоризонтної локації, в яких

електромагнітна енергія від РЛС до об'єктів локації розповсюджується шляхом відбиття від іоносферних шарів, змушені використовувати хвилі короткохвильового діапазону (10-30МГц), які зазнають відбиття від іоносфери.

В метеорологічних РЛС, де об'єктами локації є гідрометеори (краплі дощу, туману, кристали снігу, град), краще використовувати сантиметровий і міліметровий діапазон, оскільки в дециметровому і метровому діапазоні ЕПР хмар гідрометеорів настільки мала, що відбиття від них практично не спостерігається.

Але, чим менше довжина хвилі, тим більші втрати електромагнітної енергії при її розповсюдженні в молекулах кисню, парах води, краплях дощу, що видно з рис. 1, та рис. 2. Ці втрати доводиться враховувати у першу чергу в РЛС середньої і великої дальності дії. В зв'язку з цим не можна вибирати довжину хвилі як завгодно малою, оскільки із-за поглинання енергії при розповсюдженні в атмосфері необхідно буде значно збільшувати потужності зонduючого сигналу.

Наступним фактором, що впливає на вибір довжини хвилі є відбиття електромагнітної хвилі від поверхні землі. Із-за відбиття сигналів від земної поверхні дальність дії РЛС метрового діапазону, при інших рівних умовах, у деяких напрямках може збільшуватися у два рази. Це пояснюється тим, що при роботі в метровому діапазоні нерівності земної поверхні Δh відносно малі

$$\Delta h < \frac{\lambda}{10 \sin \varepsilon} \quad (4)$$

де ε – кут, під яким промінь РЛС падає на поверхню землі [1].

В зв'язку з цим, відбиття від земної поверхні носять не дифузний, а дзеркальний характер, із-за чого в певних точках простору енергія сигналу від антени РЛС та енергія сигналу, яка відбилися від поверхні землі, складаються синфазно, тому тут загальна енергія сигналу РЛС подвоюється.

Розподіл і вибір довжини хвиль проводять також з урахуванням забезпечення електромагнітної сумісності роботи своїх радіоелектронних

засобів, завадозахищеності від природних і штучних активних завад. Існуючі РЛС працюють в метровому, дециметровому, сантиметровому діапазонах. В останні роки освоюється міліметровий, інфрачервоний, оптичний і, навіть, рентгенівський діапазони.

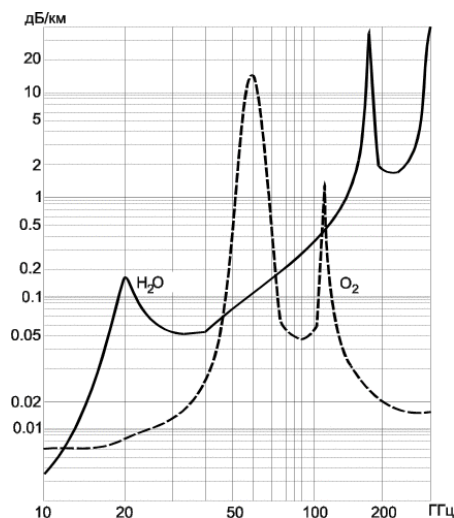


Рис. 1. Залежності коефіцієнта затухання від частоти сигналу для кисню та парів води [2].

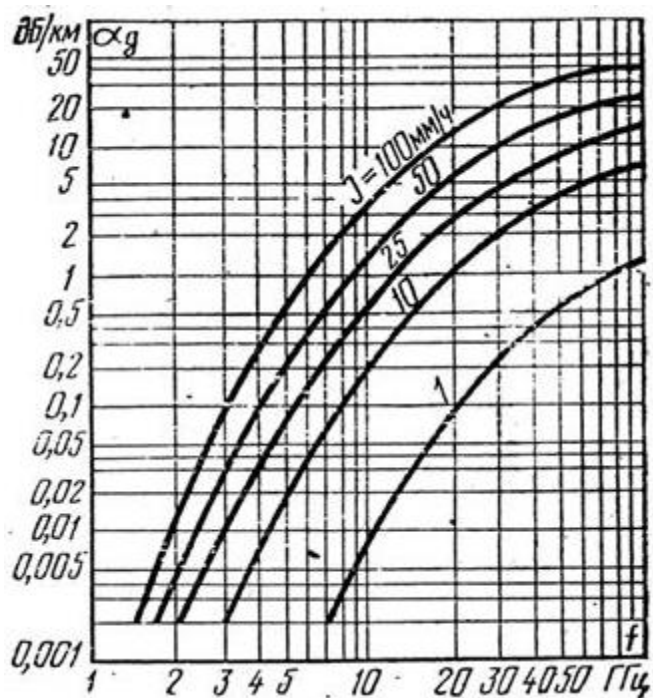


Рис. 2. Залежності коефіцієнта затухання від частоти сигналу та інтенсивності дощу [1].

Різні РЛС можуть працювати при фіксованих частотах несучої радіолокаційного сигналу, або переключатися на інші частоти (втому числі від імпульсу до імпульсу) в межах визначеного діапазону. Чим більший діапазон частот роботи РЛС, тим більша потенційна можливість захисту від активних завад та забезпечення електромагнітної сумісності. З урахуванням зазначених факторів, вибір діапазон частот РЛС є одне з головних рішень, які визначають функціональне призначення та подальшу ефективність роботи РЛС.

В завданні на РГР, як правило, вказується діапазон хвиль проектуємої РЛС. При виконанні роботи, необхідно зрозуміти всі переваги і недоліки заданого діапазону, і точно вибрати довжину хвилі, знання якої необхідно для проектування. Об'єм запису по цій частині від 2 до 5 сторінок.

3.6 Вибір виду зондуючого сигналу РЛС

Від виду і параметрів зондуючого сигналу залежать всі основні тактико-технічні характеристики РЛС. Так дальність дії залежить від енергії зондуючих сигналів, роздільна здатність РЛС по дальності і точність вимірювання дальності – від ширини спектра сигналу, розрізнення по частоті і точність її вимірювання – від тривалості зондуючого сигналу і т.п.

Зондуючи сигнали характеризуються довжиною хвилі λ , формою, законом і параметрами внутрішньо-імпульсної модуляції, тривалістю імпульсу τ_i , імпульсною потужністю P_u , періодом повторення F_n , стабільністю частоти генеруємих коливань.

Розрізняють імпульсні і неперервні зондуючі сигнали, прості (без внутрішньо-імпульсної модуляції) і складномодульовані. В залежності від призначення РЛС τ_i вибирається від декількох десятих мікросекунд до декількох мілісекунд, а частоти повторення F_n - від декількох сотень герц до декількох десятків кілогерц. РЛС з імпульсним зондуючим сигналом характеризується простотою вимірювання дальності, мають одну антену, що

використовується на передачу зонduючого сигналу РЛС, та прийом відбитого сигналу від радіолокаційного об'єкту.

Перевагами РЛС неперервного випромінювання є велика дальність дії при обмеженій піковій потужності зонduючого сигналу, високі потенціальні можливості по вимірюванню доплерівського зміщення частоти відбитих сигналів від рухомих об'єктів, і розрізнення по частоті. Але вони не забезпечують однозначного вимірювання дальності (якщо сигнал не модульований), потребують використання двох антен і забезпечення хорошої розв'язки між ними.

При обмеженій імпульсній потужності передавача для підвищення дальності дії потрібно збільшити тривалість імпульсу, що призводить до погіршення роздільної здатності по дальності. Одночасно досягти високої роздільної здатності по дальності і великої дальності дії РЛС можна при використанні складномодульованих зонduючих сигналів. Це витікає з того, що роздільна здатність по дальності δR визначається не тривалістю огинаючої імпульсу τ_i , а шириною спектра зонduючого імпульсу Δf [4]

$$\delta R = \frac{C}{2 \cdot \Delta f} \quad (5)$$

де Δf - девіація частоти при використанні частотно-модульованого (ЧМ) сигналу, чи $\Delta f = \frac{1}{\tau_o}$ при використанні фазомодульованого сигналу, де τ_o - тривалість дискрету.

Звичайно, генерування і оброблення таких сигналів складніше, але вказані складності доводиться долати, якщо необхідно мати РЛС з високою роздільною здатністю по дальності.

Підвищення енергії зонduючих сигналів за рахунок великої тривалості огинаючої τ_i , і високої роздільної здатності по дальності за рахунок великої ширини спектра зонduючого імпульсу призводить також до підвищення завадозахищеності від активних завад.

При використанні частотно-модульованих зондуючих сигналів з'являється можливість здійснювати електронне (частотне) сканування діаграм спрямованості антен, що володіють куточастотною чутливістю, що досить важливо в РЛС, де механічне сканування великогабаритних антен неможливе.

Другою перевагою використання неперервних ЧМ сигналів є можливість вимірювання мінімальної відстані між РЛС та радіолокаційним об'єктом. У таких РЛС відсутня «сліпа зона», що застосовується в радіолокаційних висотомірах літальних апаратів, які повинні вимірювати висоту над земною поверхнею, починаючи з десятих частин метра.

Щоб одночасно забезпечити високу роздільну здатність по дальності та по швидкості, в сучасних РЛС використовують періодичні імпульсні зондуючі сигнали.

Чим більший період повторення імпульсів T_n , тим більший інтервал однозначного вимірювання дальності [1]

$$R_{\max} = \frac{C \cdot T_n}{2} \quad (6)$$

де C – швидкість світла $3 \cdot 10^8$ м/с.

Але, збільшення T_n призводить до зменшення інтервалу однозначного вимірювання доплерівського зсуву частоти відбитого сигналу від рухомого об'єкту.

В РЛС з квазінеперервним зондуючим сигналом покращення частотної селекції забезпечується вибором великої частоти повторення $F_n = \frac{1}{T_n}$. В таких

РЛС скважність імпульсів $Q = \frac{T_n}{\tau_i} < 20$.

Періодичність зондуючих сигналів використовується в РЛС для підвищення надійності виявлення за рахунок некогерентної чи когерентної обробки пачки відбитих сигналів, для захисту від хаотичних імпульсних, а також інших активних і пасивних завад.

Враховуючи вище приведенне, можна зробити наступні рекомендації по вибору зондуючих сигналів:

1. На основі вивчення ТТВ необхідно визначити, чи можливо задовольнити задані вимоги за допомогою простого імпульсу, який потрібно вибирати у випадку позитивного рішення. Разом з простотою формування і оброблення перевагою простого імпульсу є відсутність бокових пелюсток поблизу головного піка, які є на виході оптимального приймача у випадку застосування складномодульованих сигналів.
2. ЛЧМ і ФМС можна рекомендувати використовувати в РЛС далекого виявлення малорозмірних об'єктів з високою завадозахищеністю від активних і пасивних завад.
3. В РЛС для підвищення надійності виявлення флуктуючих сигналів, послаблення ефекту «сліпих» швидкостей, що проявляються при роботі в режимі придушення пасивних завад, і підвищення завадозахищеності від активних завад краще використовувати двох – чи багаточастотний зондуючий сигнал, та зміну період повторення імпульсів T_n .

Об'єм матеріалу цієї частини від 2 до 5 сторінок.

3.7 Методи огляду простору, який контролює РЛС

Використання в РЛС антен спрямованої дає підвищення дальності дії, роздільній здатності і точності вимірювання кутових координат. З іншого боку, використання антенних систем з вузькою діаграмою спрямованості, обумовлює більш складний процес моніторингу простору. Радіолокаційним оглядом називають періодичне опромінення всіх точок заданої області простору і прийом сигналів від об'єктів, що знаходяться в цій зоні. Параметрами зони огляду РЛС є максимальна дальність дії R_m , величини

секторів по азимуту β_c і куту місця ε_c , межі роботи по куту місця $\varepsilon_{\min}$ і $\varepsilon_{\max}$, межа зони огляду по висоті H_m . Вимоги до параметрів зони огляду залежать від призначення РЛС та характеристик об'єктів локації.

Наприклад [8], для РЛС виявлення аеродинамічних об'єктів $R_m=20 - 400$ км, $H_m = 20 - 40$ км, $\beta_c = 360^\circ$, $\varepsilon_c = 20 - 60^\circ$, $\varepsilon_{\min} = 0.5^\circ$, $\varepsilon_{\max} = 20 - 60^\circ$.

Спосіб огляду простору залежить від форми діаграми спрямованості антени. Розрізняють віялоподібні (плоскі) і голкоподібні (коли ширина діаграми спрямованості в вертикальній і горизонтальній площинах однакова) діаграми спрямованості.

Якщо РЛС вирішує задачу тільки виявлення цілей, для неї можна застосувати антенну систему з меншою точністю вимірювання кутових координат, але з широкою діаграмою спрямованості для максимального охоплення простору контролю в одиницю часу. Прикладом є РЛС кругового огляду простору, ширина діаграми спрямованості антенної системи такої РЛС в горизонтальній (азимутальній) площині $\beta_{0.5} = 0.5 - 4^\circ$, а в вертикальній (кутовій) площині $\varepsilon_{0.5} = 20 - 40^\circ$. антена обертається відносно вертикальної осі на 360 градусів.

Параметрами огляду простору є: період огляду, орієнтовний час опромінення радіолокаційного об'єкту, число циклів огляду на одиницю часу, число імпульсів в пачці сигналів відбитих від цілі.

Періодом огляду T_0 - називають час, що необхідний для одноразового опромінення всіх точок простору, який оглядає РЛС.

Часом опромінення $T_{\text{опр}}$ об'єкту називають термін часу, що протікає з моменту початку опромінення об'єкту до кінця прийому відбитих сигналів. Час опромінення дорівнює часу, за який діаграма спрямованості антени зміщується на свою ширину відносно компактного радіолокаційно об'єкту. Для РЛС кругового огляду

$$T_{\text{опр}} = T_0 \cdot \frac{\beta_{0.5}}{360} \quad (7)$$

де $\beta_{0,5}$ – ширина діаграми спрямованості антени на рівні $\frac{1}{2}$ від максимального значення.

За час $T_{опр}$ накопичується енергія N імпульсів, яка необхідна для виявлення і оцінки параметрів сигналу, відбитого від цілі. Число відбитих імпульсів (число імпульсів в пачці) $N = T_{опр} \cdot F_n = \frac{T_{опр}}{T_n}$, при якому забезпечується надійне виявлення і оцінка параметрів сигналів, повинно бути не менше 10. Ця вимога дуже важлива для когерентно-імпульсних РЛС, оскільки при меншому числі імпульсів буде низькою завадозахищеність від пасивних завад, яка базується на міжперіодній кореляції сигналів, відбитих від нерухомих об'єктів.

Для РЛС кругового огляду основним параметром огляду є швидкість обертання антени n_a , вона дорівнює числу обертів антени за хвилину. Вибирається n_a відповідно до вимоги частоти надання первинної радіолокаційної інформації. Зазвичай $n_a = (3 - 10)$ об/хв., а для РЛС виявлення складних радіолокаційних об'єктів (мала швидкість руху, мале значення ЕПР, низька висота) обирають $n_a = (6 - 20)$ об/хв.

$$\text{Очевидно, } T_0 = \frac{60}{n_a} \text{ с., тоді } N = T_{опр} \cdot F_n = F_n \cdot \frac{\beta_{0,5}}{360} \cdot \frac{60}{n_a} = F_n \cdot \frac{\beta_{0,5}}{6 \cdot n_a}.$$

Наприклад, при $F_n = 360$ Гц, $\beta_{0,5} = 1^\circ$, $n_a = 6$ об/хв, $N = 10$. В наземних радіолокаційних висотомірах, в яких досить вузький промінь у вертикальній площині, N залежить від періоду качання T_k . Зазвичай $T_k = 1 - 2$ с. Тоді при $\varepsilon_c = 30^\circ$, $\varepsilon_{0,5} = 1^\circ$, $F_n = 360$ Гц, $T_k = 2$ с.

$$N = \frac{T_k}{2} \cdot \frac{\varepsilon_{0,5}}{\varepsilon_c} \cdot F_n = 12.$$

Переміщення (сканування) променю у просторі може бути механічним, коли відбувається поворот дзеркала чи опромінювача антени, або електронним, при якому змінюється розподіл амплітуд і фаз поля в розкритті антени.

В сучасних РЛС використовують фазовані антенні решітки (ФАР), що забезпечують одночасно великі коефіцієнти підсилення, високу точність визначення кутових координат, і потрібну швидкість сканування. Об'єм матеріалу цієї частини від 2 до 5 сторінок.

3.8 Методи підвищення завадозахищеності РЛС

Ефективність РЛС може бути значно знижена за рахунок дії завад. Складна проблема підвищення завадозахищеності повинна вирішуватись ще на етапі проектування за допомогою раціонального вибору принципів побудови і параметрів РЛС. Практично всі сучасні РЛС будуються з урахуванням вимог забезпечення високої завадозахищеності.

Основні методи захисту РЛС від завад [1]:

- рознесення робочих частот різних РЛС в широкому діапазоні, що полегшує рішення проблеми електромагнітної сумісності;
- побудова РЛС з широкою можливістю перестройкою робочої частоти;
- підвищення потенціалу РЛС шляхом підвищення енергії зондуючого сигналу і коефіцієнта підсилення антени;
- придушення активних шумових завад, діючих по боковим пелюсткам діаграми спрямованості антен, за допомогою адаптивних систем з кореляційним зворотнім зв'язком;
- розширення динамічного діапазону приймальних трактів за рахунок використання схем МАРУ, ШАРУ та ін.;
- придушення несинхронних імпульсних завад за допомогою пристроїв, робота яких ґрунтується на використанні відмінностей у параметрах одиночних корисних сигналів і завад (схема ШОУ, схема селекції по амплітуді і ін.);

- придушення імпульсних завад за допомогою схем, що використовують відмінності в параметрах послідовностей корисних сигналів і завад (схеми селекції по частоті повторення і ін.);
- використання оптимальних систем обробки, в тому числі фільтрових кореляційно-фільтрових систем когерентної обробки;
- використання різного роду селекції рухомих цілей для захисту РЛС від пасивних завад, що створюються відбиттями сигналу від місцевих предметів (пагорбів, споруд), хмар, гідрометеорів, дипольних відбивачів, та інше. В роботі необхідно вказати, які обрані системи захисту від активних та пасивних завад. Якщо поставлено завдання щодо їх розробки, то провести більш детальний опис, побудувати структурну схему, та провести необхідні розрахунки. Об'єм матеріалу цієї частини від 2 до 5 сторінок.

3.9 Вибір частоти повторення, і тривалості зондуючих імпульсів

Для забезпечення однозначного вимірювання дальності до об'єкту, період повторення зондуючих імпульсів $T_0 = \frac{1}{F_n}$ повинен вибиратися з умови :

$$T_n > \frac{2R_m}{c}, \quad (8)$$

де c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.

З точки зору досягнення високої завадозахищеності від пасивних завад бажано вибирати F_n більшим, оскільки при меншому T_n коефіцієнт міжперіодної кореляції пасивних завад і відповідно коефіцієнт придушення завад будуть великими. Інший фактор це, чим більше F_n , тим більше кількість імпульсів у пачці відбитих від радіолокаційній цілі, і тому можна накопичити більше їх енергія, а відповідно збільшити дальність дії РЛС.

Звичайно вибирають $T_n = (1,1...1,3) \frac{2R_m}{c}$. Частота повторення імпульсів в залежності від призначення РЛС змінюється від декількох десятків герц до

декількох кілогерц. Між тим, на бортових РЛС літаків (з дальністю дії декілька сотень кілометрів), коли вимагається забезпечити високу завадозахищеність від пасивних завад, які виникають через відбиття сигналу від земної поверхні, іноді використовують квазібезперервний зонduючий сигнал ($Q = \frac{T_n}{T_{imn}} < 20$) з частотою повторення декілька десятків кілогерц.

При виборі довжини зонduючого імпульсу - τ_{imn} враховують, що чим більше τ_{imn} , тим більше енергія зонduючого імпульсу і відповідно дальність дії РЛС, а також збільшується завадозахищеність РЛС від активних завад. Однак, збільшення τ_{imn} погіршує роздільну здатність по дальності δR - формула (5), а також погіршується завадозахищеність від пасивних завад, оскільки зі збільшенням δR збільшується потужність пасивних завад.

Потенційна роздільна здатність РЛС по дальності визначається формулою (5), у випадку використання простого радіоімпульсу (без внутрішньо-імпульсної модуляції) $\Delta f \approx \frac{1}{\tau_{imn}}$ і відповідно $\delta R_n = \frac{c\tau_{imn}}{2}$.

Тривалість огинаючої складномодульованих імпульсів вибирається із умови забезпечення необхідних дальності дії, завадозахищеності від активних шумових завад, що діють по боковим пелюсткам діаграми спрямованості антенної системи.

Наприклад, при проектуванні імпульсних бортових радіовисотомірів на літаках, тривалість імпульсу вибирається з умови забезпечення вимог до мінімальної дальності дії РЛС ($\tau_{imn} < \frac{2R_{min}}{c}$).

РЛС цілевказівки зенітно-ракетним комплексам, наведення перехоплювачів на цілі, системи керування повітряним рухом та інші, повинні здійснювати вимірювання координат з високою точністю, коли середньоквадратичні помилки (СКП) повинні складати декілька метрів.

Похибка одноразового вимірювання дальності характеризується СКП [5]:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R_{II}}^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_{R_i}^2}, \quad (9)$$

де $\sigma_{R_{II}} = \frac{c}{2\sqrt{\pi q \Delta f}}$ - потенційна СКП вимірювання дальності, обумовлена шириною спектра зонduючого імпульсу і параметром виявлення $q^2 = \frac{2E}{N_0}$ (для простого сигналу $\sigma_{R_{II}} = \frac{c\tau_{imm}}{2\sqrt{\pi q}}$); σ_{R_i} - додаткові помилки вимірювання, обумовлені недосконалістю пристроїв РЛС, спотвореннями сигналів при розповсюдженні в просторі, та ін.

СКП, обумовлена нестабільністю частоти генератора еталонних імпульсів, при застосуванні кварцового стабілізатора складає $\sigma_{R_E} \approx (10^{-4} \dots 10^{-5}) R$.

При інструментальному вимірювання дальності за дискретними вимірюваннями СКП визначається:

$$\sigma_{R_{дис}} = \frac{c}{2} \frac{T_e}{2\sqrt{3}} \approx 0,15cT_E, \quad (10)$$

де c – швидкість розповсюдження електромагнітної енергії, T_E – період проходження еталонних лічильних імпульсів.

За час опромінення цілі намагаються провести як можна більшу кількість вимірювань – k , що дозволяє зменшити СКП в $\sqrt{k}$ разів. Об'єм матеріалу цієї частини від 5 до 7 сторінок.

3.10 Вибір ширини діаграми спрямованості антени РЛС

Ширина діаграми спрямованості в азимутальній та кутомісцевій площині впливають на роздільну здатність, точність вимірювання кутових координат, дальність дії РЛС та її завадозахищеність від активних та пасивних завад. Але, для забезпечення меншого значення ширини діаграмами спрямованості антени, необхідно збільшити її геометричні розміри формули (1). Тому, вибір параметрів антенної системи, з

урахуванням призначення РЛС, та необхідних тактико-технічних характеристик, носить суперечливий характер.

Роздільна здатність РЛС по азимуту (куту місця) [4]:

$$\delta\beta = \beta_{0,5} + \delta\beta_{nc}, \quad (11)$$

де $\beta_{0,5}$ - ширина діаграми спрямованості антени у горизонтальній площині; $\delta\beta_{nc}$ - погіршення роздільної здатності за рахунок недоліків підсистем та вузлів РЛС.

Іноді у тактико-технічних вимогах до РЛС вказують лінійну роздільну здатність по азимуту, яка визначається:

$$\delta R_{\beta} = R\delta\beta,$$

де R – дальність до радіолокаційного об'єкту.

Роздільна здатність по висоті визначається аналогічною формулою $\delta H = \delta R_{\varepsilon} = R\delta\varepsilon$.

При проектуванні антенної системи РЛС постає наступне протиріччя, з одного боку необхідно збільшувати розміри апертури антени в вертикальній та горизонтальній площині, щоб забезпечити високу роздільну здатність РЛС по кутовим координатам та максимально великий коефіцієнт підсилення антени $G = \frac{25000}{\beta_{0,5}^{\circ} \varepsilon_{0,5}^{\circ}}$, а з іншого боку, збільшення масо-габаритних параметрів антени, призводить до великих труднощів щодо мобільності РЛС, та керування антеною при організації сканування простору.

Компромісне рішення знаходиться за рахунок варіативного вибору довжини хвилі λ , форми діаграми спрямованості, розподілу поля в розкритті антени, та ускладнення конструкції антенної системи.

Помилка у визначенні азимуту теж характеризується значення СКП. У багатьох випадках СКП може бути розрахована за формулою [4]

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{\sigma_{\beta_{\Pi}}^2 + \sigma_{\beta_{nc}}^2 + \sigma_{\delta\beta}^2}, \quad (12)$$

де σ_{β_n} - потенційна СКП, яку можна знайти із співвідношення

$$\sigma_{\beta_n} = K_\phi \frac{\beta_{0,5}}{q}$$

де K_ϕ – коефіцієнт, який залежить від форми діаграми спрямованості (наприклад, для дзвоноподібної діаграми $K_\phi = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$).

$\sigma_{\beta_{nc}}$ – СКП, обумовлена недосконалістю пристроїв РЛС, помилки дискретності відліку:

$$\sigma_{\beta_{ouc}} = \frac{\Omega_a T_n}{2\sqrt{3}}, \quad (13)$$

де $\Omega_a = \frac{\pi}{30} n_a$ – кутова швидкість огляду.

У вертикальній площині, СКП визначенні кута місця цілі розраховується по аналогічним формулам. В роботі необхідно побудувати Діаграму спрямованості антенної системи РЛС в горизонтальній і вертикальній площині, вказати на графіку основні її параметри. Об'єм матеріалу цієї частини до 5 сторінок.

3.11 Розрахунок спектральної щільності шумів, та коефіцієнта розрізнення сигналу на фоні шумів

Спектральна щільність шумів, приведені до входу приймача [1],

$$N_0 = K_{III} k T_0 \quad (14)$$

де K_{III} – коефіцієнт шуму приймального пристрою; k – стала Больцмана; $T_0 = 290\text{ K}$ – абсолютна температура приймача.

Коефіцієнт шуму приймачів, що виконані на сучасній елементній базі, складає величину $K_{III} = (2 \dots 4)$ [4].

При роботі в умовах впливу активних шумових завад замість N_0 у розрахунках необхідно підставляти $N_0 + N_{n_{ex}}$, де $N_{n_{ex}}$ – спектральна щільність зовнішніх завад на вході приймача РЛС.

Її можна визначити, знаючи відстань до передавача активних завад R_n і спектральну щільність завад на виході антени передавача завад:

$$N_n = \frac{P_n G_n}{\Delta f_n} \quad (15)$$

де P_n - потужність передавача завад; G_n - коефіцієнт підсилення антени передавача завад; Δf_n - ширина спектра випромінюваних коливань завад.

$$N_{n_{ex}} = \frac{N_n}{4\pi R_n^2} A_{плс}(\beta_n, \varepsilon_n) = \frac{N_n}{4\pi R_n^2} \frac{G_{плс}(\beta_n, \varepsilon_n) \lambda^2}{4\pi} = N_n G_{плс}(\beta_n, \varepsilon_n) \left(\frac{\lambda}{4\pi R_n} \right)^2, \quad (16)$$

де β_n, ε_n - азимут і кут місця джерела завад.

Якщо при обробці у пристрої захисту від завад вона послаблюється у K_n разів, то при розрахунках замість $N_0 + N_{n_{ex}}$ необхідно підставляти $N_0 + \frac{N_{n_{ex}}}{K_n}$. Коефіцієнт придушення завади K_n залежить від типу пристроїв придушення, характеристик каналів обробки. Так, у випадку придушення шумової завади, що приймається по боковим пелюсткам діаграми спрямованості основної антени, одноканальним кореляційним автокомпенсатором [1]

$$K_n = \frac{1}{1 - r_{ов}^2},$$

де $r_{ов}$ - коефіцієнт взаємної кореляції завад основного і допоміжного каналів на вході суматора автокомпенсатора активних завад.

Він залежить від ідентичності частотних характеристик антен та підсилювальних трактів основного і допоміжних компенсаційних каналів.

При розрахунках РЛС, ми не можемо знати які будуть діяти завади, тому зразу визначаємо параметри системи захисту РЛС від активних завад, а в подальших розрахунках вважаємо що завади скомпенсовані. Значення коефіцієнту придушення активних завад можна брати $K_n = 20...25 \text{ дБ}$ для РЛС з одноканальним автокомпенсатором, і $K_n = 18...20 \text{ дБ}$ для РЛС з двоканальним автокомпенсатором завад, який здатний одночасно придушувати завади від двох рознесених у просторі джерел.

Для розрахунку коефіцієнта розрізнення K_p за формулою (21) потрібно знати коефіцієнт втрат α .

При розрахунку α вважаємо, що це узагальнені втрати в різних підсистемах та вузлах РЛС:

а) втрати із-за некогерентного накопичування N імпульсів пачки (у порівнянні з когерентним) при $N=10$, $\alpha_{нкз} = 2$ (рис. 4);

б) втрати енергії в антенному комутаторі та фідері $\alpha_{афс} = 1,5$;

в) втрати із-за використання у приймачі квазіоптимального фільтра замість оптимального, узгодженого лише за смугою, $\alpha_{\phi} = 1,1$;

г) втрати, пов'язані з недосконалістю пристрою автоматичного зчитування координат, або залежні від оператора, $\alpha_0 = 1,5$;

д) втрати із-за непрямокутності огинаючої пачки імпульсів $\alpha_{нач} = 1,5$.

Загальний коефіцієнт втрат $\alpha = \prod_i \alpha_i \approx 10$

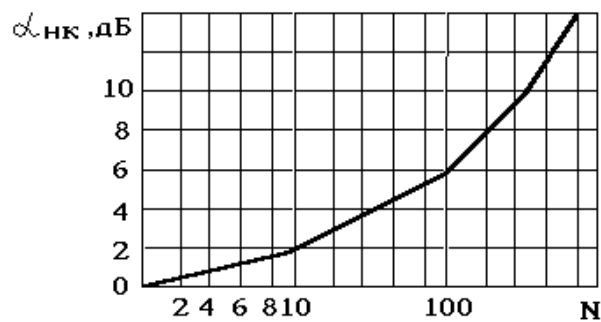


Рис. 4. Втрати енергії у децибелах при некогерентному накопиченні імпульсів у порівнянні з когерентним ($D = 0,5$; $F = 10^{-10}$) [2].

Вибравши і розрахувавши основні технічні параметри РЛС, можна визначити імпульсну потужність $P_{имп}$, використовуючи формули (18), (20), (21) в залежності від діапазону частот РЛС та кліматичних умов. Якщо виявиться, що $P_{имп} > 1$ МВт для РЛС метрового діапазону, $P_{имп} > 10$ кВт для РЛС сантиметрового діапазону, або $P_{имп} > 10$ Вт для РЛС міліметрового діапазону то необхідно змінити деякі параметри РЛС. Наприклад, збільшити $\tau_{имп}$, або збільшити G , або зменшити n_a , та інші зміни, а потім знову виконати розрахунок $P_{имп}$. Об'єм матеріалу цієї частини до 3 сторінок.

3.12 Розрахунок максимальної дальності виявлення РЛС

В завданні на РГР проектування зазвичай вказується максимальна дальність виявлення R_m об'єкту з заданою ефективною поверхнею розсіювання σ . Формули для розрахунку ЕПР тіл правильної форми, а також значення ЕПР тіл правильної форми, а також значення ЕПР типових радіолокаційних об'єктів можна знайти в [2,3]. ЕПР розподілених поверхневих об'єктів розраховують за формулою $\sigma = \sigma_y S_n$, де S_n - геометрична площа сектору одночасно освітлюваної поверхні (тобто частина об'єкту, яка попала в розрізняваний об'єм), а σ_y - питома ЕПР (ЕПР одиниці площі), яка залежить від довжини хвилі, поляризації зондуючого сигналу, фізичних властивостей відбиваючої поверхні, рельєфу та рослинного покриву відбиваючої ділянки, кута ковзання променю. Значення питомої ЕПР коливається в широких межах – від 1 до 10^{-8} .

При розрахунку R_m звичайно вважають, що на межі зони виявлення стандартна ціль з ЕПР σ виявляється з імовірністю вірного виявлення D (звичайно $D=0,5$) при імовірності хибної тривоги F в розрізняваному об'ємі. Величина F встановлюється шляхом вибору величини порога, який обумовлений допустимим числом хибних тривог m за один огляд $T_{огл}$ за наступним співвідношенням:

$$F = \frac{m}{T_{огл} \Delta f} \quad (17)$$

де Δf - ширина спектру зондуючого сигналу.

При простому сигналі $\frac{1}{\Delta f} = \tau_{имп}$, тоді $F = \frac{m\tau_{имп}}{T_{огл}}$. Наприклад, при $m=10$,

$T_{огл}=10$ с, $\tau_{имп}=1$ мкс маємо $F=10^{-6}$.

Завданням на розробку РЛС, в залежності від її функціонального призначення, чітко вказується імовірності параметри виявлення цілі: D та F . Для зв'язку імовірностей параметрів виявлення цілей з технічними параметрами підсистем РЛС застосовують співвідношення сигнал/шум – q .

$$q^2(D, F) = \frac{2E}{N_0} \quad (18)$$

де $E = P_c \tau_{imn} N$ - енергія пачки з N імпульсів; τ_{imn} - тривалість огинаючої вхідного сигналу; P_c - імпульсна потужність зонduючого сигналу РЛС, $E_{imn} = P_c \tau_{imn}$ - енергія одного імпульсу; N_0 - спектральна щільність шумів.

Характеристики виявлення рис. 3. дозволяють визначити необхідне перевищення енергії корисного сигналу E над на вході оптимального приймача, при якому при заданій ймовірності хибної тривоги F ймовірність правильного виявлення корисного сигналу складає величину D :

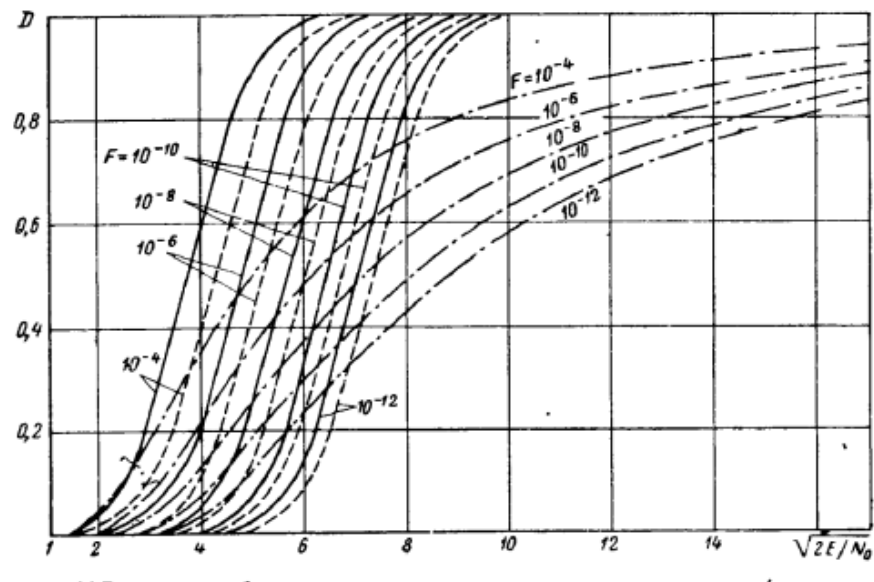


Рис. 3. Криві виявлення для сигналів: з повністю відомими параметрами (штрих пунктир), з випадковою фазою (пунктир), з випадковими амплітудами і початковими фазами (суцільна) [1].

Параметр виявлення q^2 залежить як від D, F , так і від типу відбитого сигналу від цілі (повністю відомий, сильно флуктуючий, слабо флуктуючий).

Якщо при обробці одиночних імпульсів і пачки у цілому допускаються втрати, загальна величина яких α , то при колишніх значеннях D, F порогове відношення треба збільшити в α разів, таким чином [2]:

$$\frac{2E}{N_0} = \frac{P_c \tau_{imn} N}{N_0} = \alpha q^2(D, F) \quad (19)$$

Потужність відбитого сигналу на вході приймача [1]

$$P_c = \frac{P_{imn} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

маємо
$$\frac{2P_{imn} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_m^4} \frac{\tau_{imn} N}{N_0} = \alpha q^2(D, F),$$

звідки

$$R_m = \sqrt{\frac{P_{imn} \tau_{imn} G^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 K_p}} \quad (20)$$

де K_p - коефіцієнт розрізнення сигналів на фоні шумів, G - коефіцієнт підсилення антени РЛС по потужності, P_{imn} - імпульсна потужність передавача РЛС.

$$K_p = \frac{\alpha q^2(D, F)}{2N} \quad (21)$$

Максимальна дальність виявлення РЛС з урахуванням згасання радіохвиль в атмосфері:

$$R = R_m 10^{-0.5 \left(\delta_R R + \sum_i \delta_{n_i} R_i \right)} \quad (22)$$

де R_m - дальність виявлення РЛС у вільному просторі, яка визначається за формулою (20); δ_R - коефіцієнт згасання радіохвиль у кисні і парах води; R_i - протяжність i ділянок траси РЛС – ціль з атмосферними опадами і відповідні їм коефіцієнти згасання радіохвиль δ_{n_i} .

Залежність коефіцієнта згасання δ_R від довжини хвилі λ зображена на рис. 1, а криві коефіцієнтів згасання δ_n для дощу різної інтенсивності на рис. 2.

При роботі в метровому діапазоні хвиль згасання радіохвиль в атмосфері практично відсутнє. Однак, із-за наявності дзеркального відбиття

сигналу від поверхні землі, коли виконується умова за формулою (4), або водної поверхні, формула для дальності дії наземних РЛС з врахуванням інтерференційного множника має вигляд

$$R_m(\varepsilon) = R_m 2 \left| \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} h_a \sin \varepsilon \right) \right| F(\varepsilon) \quad (23)$$

де R_m - максимальна дальність дії у вільному просторі, яка визначається співвідношенням (20); ε - кут місця цілі; h_a - висота електричного центра антени; $F(\varepsilon)$ - нормована діаграма спрямованості антени по полю у вертикальній площині для вільного простору.

При довжині хвилі $\lambda = 10$ см та менше із-за невиконання умови (4) розсіювання від земної та водної поверхні, як правило, мають дифузний характер, тому інтерференційний множник враховується лише для РЛС дециметрового і метрового діапазону.

4. РОЗРАХУНОК РЛС З АВТОСУПРОВОДЖЕННЯМ ПО КУТОВИМ КООРДИНАТАМ

Розглянемо особливості розрахунку енергетичних параметрів РЛС з автосупроводженням по кутовим координатам, в яких використали метод рівносигнальної напрямку для пеленгації цілі, що отримується шляхом кінчного сканування промінню діаграми спрямованості антени. Цей розділ виконується, якщо в завданні на РГР буде поставлена задача розробити РЛС автосупроводження цілей.

Як відомо, у випадку кінчного сканування огинаюча прийнятих сигналів, що виділяється на навантаженні детектора сигналу помилки, описується виразом [4]

$$A(t) = A_p [1 - m \cos(\Omega t - \varphi)] \quad (24)$$

де A_p - амплітуда сигналу від цілі, що знаходиться на рівносигнальному напрямку; Ω - кутова швидкість сканування променем; φ - кут у картинній

площині між напрямком на ціль та вихідним напрямком, для якого фаза опорної напруги дорівнює нулю; m - глибина модуляції.

$$m = \frac{\Delta A_p}{A_p} \approx \frac{\phi A_m F'(\beta_p)}{A_m F(\beta_p)} = \frac{\phi F'(\beta_p)}{F(\beta_p)} \quad (25)$$

де $F(\beta_p)$ - діаграма спрямованості; (β_p) - кут між напрямком максимуму діаграми та рівносигнальним напрямком; ϕ - кут між напрямком на ціль та рівносигнальним напрямком.

Сигнал помилки $U_{co} = A_p m \cos(\Omega t - \varphi)$.

Сигнали помилок на виходах фазових детекторів (кутових дискримінаторів) відповідно: $U_\beta = A_p m \cos(\varphi)$ $U_\varepsilon = A_p m \sin(\varphi)$.

Розглянемо сигнал помилки на вході фазового детектора азимутального каналу. Нехай $\varphi = 0$, тоді

$$U_p = A_p m = \left[A_p \frac{F'(\beta_p)}{F(\beta_p)} \right] \phi = S \phi \quad (26)$$

де $S = \frac{U_p}{\phi}$ - крутизна пеленгаційної характеристики.

Кожний канал вимірювача являє собою балансний фазовий детектор з навантаженням у вигляді інтегруючої ланки. Очевидно, система стеження зможе виявити і відреагувати на зміну вихідної напруги дискримінатора, коли вона буде порівняна з середньоквадратичним значенням шуму на виході інтегруючого фільтра дискримінатора $\sigma_{шв}$, тобто коли [5]

$$U_\beta^2 = [A_p m]^2 = \left[A_p \frac{F'(\beta_p)}{F(\beta_p)} \right]^2 \phi^2 = \sigma_{шв}^2 \text{ звідки}$$

$$\sigma_\beta^2 = \phi^2 = \frac{\sigma_{шв}^2}{\left[A_p \frac{F'(\beta_p)}{F(\beta_p)} \right]^2} = \left[\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} \right]^2 \frac{1}{\left(\frac{A_p}{\sigma_{шв}} \right)^2} = \left[\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} \right]^2 \frac{1}{\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вих}} \quad (27)$$

Щоб обчислити СКП кута σ_β , необхідно визначити $\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вих}$. Оскільки

смуга пропускання слідкуючого вимірювача вузька (0,5-2 Гц), то можна

вважати, що спектральна щільність шуму на виході дискримінатора постійна і дорівнює $G(0)$. Тоді на виході інтегруючого фільтра [1]

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(0) |W(f)|^2 df = G(0) |W(0)|^2 \Delta F_{int} \quad (28)$$

де ΔF_{int} - еквівалентна смуга пропускання інтегруючого фільтра.

Для астатичних систем $W(0)=1$, тоді $P_{вих} = G(0) \Delta F_{int}$.

При малій обраній смузі інтегруючого фільтра за час накопичення (інтегрування) $T_n = \frac{1}{\Delta F_{int}} \approx NT_{int}$ на вхід приймача поступає N відбитих імпульсів. Із-за накопичення сигналів помилки N сусідніх періодів повторення відбувається покращення співвідношення сигнал/шум в N разів у порівнянні з аналогічним співвідношенням на вході дискримінатора (потужність корисного сигналу на виході інтегратора зростає в N^2 разів, а потужність шумів, які пройшли у приймачі стробуємий каскад, в N разів).

Таким чином,

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вмх} = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вх} N = q^2 N = \frac{2E}{N_0} N,$$

$$\text{де } N = \frac{T_n}{T_n} = \frac{F_n}{\Delta F_{int}}.$$

Тоді

$$\sigma_\beta^2 = \left[\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} \right]^2 \frac{1}{q^2 N} = \left[\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} \right]^2 \frac{\Delta F_{int}}{q^2 F_n} \quad (29)$$

Чим вужче смуга інтегруючої ланки слідкуючого вимірювача, тим більше N і тим менше дисперсія кутової помилки, обумовленої шумами. Однак, зі зменшенням смуги пропускання ΔF_{int} зростають динамічні помилки, які небезпечні для супроводження маневруючих цілей.

Розглянемо приклад розрахунку σ_β для РЛС, діаграма спрямованості якої апроксимується функцією Гауса [4]

$$F(\beta) = e^{-\frac{\pi \beta^2}{2 \beta_{0.7}^2}} \quad (30)$$

де $\beta_{0,7}$ - ширина діаграми спрямованості.

Нехай $\beta_{0,7} = 4^\circ$; $\beta_p = \frac{1}{2}\beta_{0,7} = 2^\circ$ (робочу точку обирають так, щоб крутизна пеленгаційної характеристики була великою. Однак зі збільшенням β_p зменшується рівень сигналу $A_p = A_m F(\beta)$), $q = 6$; $F_n = 500$ Гц; $\Delta F_{imn} = 1$ Гц.

Легко отримати
$$\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} = \frac{2\beta_{0,7}}{\pi}.$$

$$\text{Тоді } \sigma_\beta = \frac{2\beta_{0,7}}{\pi q} \sqrt{\frac{\Delta F_{imn}}{F_n}} \approx 1'.$$

При проектуванні РЛС звичайно задаються величиною середньоквадратичної шумової завади σ_β . Помітимо, що джерелами флуктуаційних завад є не тільки внутрішній шум, але і флуктуації відбитого сигналу, флуктуації кутів приходу. Крім флуктуаційних, проявляються також динамічні помилки. У зв'язку з цим, сумарна помилка вимірювання кутових координат в декілька разів більше шумової σ_β . При розрахунках для типових РЛС можна вимагати, щоб σ_β мала величину порядку хвилин.

Задавши σ_β і враховуючи, що

$$q^2 = \frac{2E}{N_0} = \frac{2P_c \tau_{imn}}{N_0} = \frac{2\tau_{imn}}{N_0} \frac{P_{imn} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}, \text{ маємо}$$

$$P_{imn} = \left[\frac{F(\beta_p)}{F'(\beta_p)} \right] \frac{\Delta F_{imn}}{\sigma_\beta^2 F_n} \frac{N_0 (4\pi)^3 R_m^4}{2\tau_{imn} G^2 \lambda^2 \sigma} \quad (31)$$

Тут G - коефіцієнт підсилення антени по потужності для рівносигнального напрямку. При $\beta_p = \frac{1}{2}\beta_{0,7}$ $G(\beta_p) = 0,5G_m$, де G_m - максимальний коефіцієнт підсилення антени.

Об'єм матеріалу цієї частини до 10 сторінок.

5. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМНОГО МЕТОДА ПРОЕКТУВАННЯ ПРИ ВИКОНАННІ РГР

Одною з важливих задач РГР роботи є отримання досвіду системного проектування. Сутність системного підходу (методу) полягає у проектуванні кожної частини цілого з точки зору цілого. Інакше кажучи, при проектуванні будь-якої підсистеми (частини цілого) треба враховувати її зв'язки і вплив на характеристики інших підсистем та систем в цілому. Тому реалізація системного методу проектування потребує від розроблювача глибокого розуміння функціонування всієї системи, взаємних зв'язків і взаємного впливу підсистем. Врахування взаємних зв'язків і впливів може відбитися на виборі структурної схеми всієї системи та окремих підсистем, на обраних параметрах, на вимогах до стабільності параметрів і характеристиках окремих підсистем.

Таким чином, при проектуванні, при розробці спрощеної структурної схеми всієї системи, обґрунтуванні та моделюванні технічних вимог до окремих підсистем необхідно уявляти та повністю враховувати функціональні зв'язки між підсистемами, вплив принципів побудови підсистем, їх параметрів та нестабільності роботи на характеристики взаємодіючих підсистем і тактико-технічних характеристик системи в цілому.

У якості ілюстрації реалізації системного підходу розглянемо проектування передавача РЛС з врахуванням особливостей підсистеми захисту від пасивних завад.

Для забезпечення високої завадозахищеності РЛС від пасивних завад використовують системи селекції рухомих цілей (СРЦ).

Спроможність системи СРЦ подавляти пасивні завади характеризують коефіцієнтом придушення $K_n = \frac{P_{n_{ex}}}{P_{n_{вх}}}$. Якщо у якості системи СРЦ використовувати одно- або дворазові системи міжперіодної компенсації, то [1]

$$K_{n_1} = \frac{1}{2[1-r(T_n)]}, \quad K_{n_2} = \frac{1}{2[3-4r(T_n)+r(2T_n)]},$$

де $r(T_n)$ та $r(2T_n)$ - коефіцієнти міжперіодної кореляції завади відповідно до інтервалів $\tau = T_n$ та $\tau = 2T_n$.

Проходження корисного сигналу через систему СРЦ характеризують коефіцієнтом

$$K_c = \frac{P_{c_{\text{вих}}}}{P_{c_{\text{вх}}}} = K_c(F_{\text{дс}}) \quad (32)$$

де $F_{\text{дс}} = \frac{2V_r}{\lambda}$ частота Доплера.

Відповідно [1], для одно- та дворазової системи міжперіодної компенсації:

$$K_{c_1} = 4\sin^2 \pi F_{\text{дс}} T_n, \quad K_{c_2} = 16\sin^4 \pi F_{\text{дс}} T_n.$$

Повною мірою можливості системи СРЦ по виділенню корисних сигналів на фоні пасивних завад є коефіцієнт підзавадового бачення $K_{\text{пб}} = \frac{P_{n_{\text{вх}}}}{P_{c_{\text{вх}}}}$, рівний відношенню потужності завади до потужності корисного сигналу на вході приймача РЛС, при якому корисний сигнал виявляється з заданими характеристиками D і F (наприклад, $D = 0,5$; $F = 10^{-3}$). Визначивши потрібне відношення $\frac{P_c}{P_n}$ на вході системи СРЦ, при якому імовірність правильного виявлення D при імовірності хибної тривоги F .

$q^2(D, F) = \left(\frac{P_c}{P_n} \right)_{\text{вих}}$ з урахуванням виразів для K_n та K_c маємо

$$q^2(D, F) = \frac{P_{c_{\text{вх}}}}{P_{n_{\text{вх}}}} = \frac{P_{c_{\text{вх}}} K_c}{\frac{P_{n_{\text{вх}}}}{K_n}} = \frac{K_c K_n}{\frac{P_{n_{\text{вх}}}}{P_{c_{\text{вх}}}}} = \frac{K_c K_n}{K_{\text{пб}}},$$

$$\text{звідки } K_{\text{пб}} = \frac{P_{n_{\text{вх}}}}{P_{c_{\text{вх}}}} = \frac{K_c K_n}{q^2(D, F)} \quad (33)$$

Отримане співвідношення дозволяє по відомим для даної системи СРЦ значенням K_n та K_c і потрібному для вибраних D і F пороговому

відношенню $q^2(D, F)$ (яке можна знайти за характеристиками виявлення), розрахувати $K_{нб}$. Очевидно, щоб забезпечити надійне виявлення корисного сигналу $K_{нб}$ вибраної системи, СРЦ повинно бути менше реального співвідношення $\frac{P_{n_{ex}}}{P_{c_{ex}}}$ на вході приймача РЛС. Принципи побудови і параметри РЛС треба вибирати так, щоб $\frac{P_n}{P_c}$ було можливо меншим, оскільки тоді потрібне значення буде меншим, і його легше досягти за допомогою системи СРЦ.

Шляхом збільшення потужності зонduючого сигналу зменшити співвідношення $\frac{P_n}{P_c}$ неможливо, оскільки одночасно будуть зростати потужності корисного сигналу і пасивної завади. Потужність пасивної завади P_n залежить від величини імпульсного об'єму [1]

$$\delta V = \delta R \delta l_{\beta} \delta l_{\varepsilon} = \frac{c}{2\Delta f} R_{\beta_{0,5}} R_{\varepsilon_{0,5}} \quad (34)$$

де R - дальність до розглядаємого імпульсного об'єму; Δf - ширина спектра зонduючого сигналу; $\beta_{0,5}, \varepsilon_{0,5}$ - ширина діаграми спрямованості відповідно в азимутальній та кутовій площині, від щільності відбивачів, їх форми, геометричних розмірів та діелектричній проникності, довжини хвилі, поляризації зонduючого сигналу.

В РЛС колового огляду ширина діаграми спрямованості в азимутальній площині обирається достатньо вузькою. Зменшити ширину діаграми спрямованості у кутомісцевій площині при заданому секторі огляду по куту місця в РЛС колового огляду можливо за рахунок використання антен з парціальними діаграмами або за рахунок використання вузького променя у кутомісцевій площині, у якій виконується сканування за час тривалості імпульсу.

Відповідно, у першому випадку знадобиться будувати багатоканальний передавач (число окремих передавачів повинно дорівнювати числу

парціальних каналів), а в другому випадку - передавач складномодульованих зондуючих сигналів.

Проектуючи передавальний пристрій РЛС завадозахищенної від пасивних завад, з метою зменшення потужності пасивної завади потрібно збільшувати роздільну здатність по дальності або шляхом використання простих зондуючих сигналів невеликої тривалості, або, якщо для забезпечення потрібної дальності виявлення, по енергетичним причинам, неможливо використовувати короткі імпульси, зондуючі імпульси повинні бути з внутрішньо-імпульсною модуляцією.

Отже з'ясуємо, як впливають інші параметри зондуючого сигналу та їх нестабільності на величину коефіцієнта придушення K_n . Як видно із формул для K_n , останній визначається значенням коефіцієнта міжперіодної кореляції завади $r_n(T_n)$.

Для збільшення коефіцієнта кореляції $r_n(T_n)$ і, відповідно, $r_n(2T_n)$ потрібно обрати період повторення T_n можливо меншим, тобто поблизу значення, при якому забезпечується однозначність вимірювання дальності. Це впливає з того, що чим менше T_n , тим менша зміна положення цілей, що виникає при їх хаотичному переміщенні, а також тим менше оновлення характеристик відбивачів у межах імпульсного об'єму за T_n , внаслідок чого схожість (кореляція) завад суміжних періодів повторення буде більшою.

Коефіцієнт міжперіодної кореляції пасивних завад $r_n(T_n)$ тим менше, чим більші флуктуації несучої частоти зондуючого сигналу, частоти повторення, тривалості та амплітуди зондуючих сигналів. Можна сказати, що для досягнення значення коефіцієнта придушення величиною K_n , якщо декорелюючим фактором є тільки нестабільність несучої частоти зондуючого сигналу, допустиме середньоквадратичне відхилення значення частоти зондуючого сигналу [3]

$$\sigma_f \leq \frac{1}{\sqrt{K_n 6\pi r_{imn}}} . \quad (35)$$

Наприклад, при $K_n = 10^4$, $\tau_{im} = 1$ мкс, $\sigma_f \leq 500$ Гц.

Настільки високі вимоги до стабільності несучої частоти зонduючого сигналу можна забезпечити, побудувавши передавач за схемою з незалежним збудженням (малопотужний збуджувач, стабілізований кварцом, ланцюжок помножувачів частоти і підсилювачів потужності).

Так як вимога до стабільності частоти місцевого гетеродина приймача ще більш висока ($\sigma_f \leq \frac{1}{\sqrt{K_n 6\pi T_n}}$), то звичайно у якості опорної напруги для змішувача приймача використовують високостабільну за частотою напругу передавача, зміщену за частотою на проміжну частоту.

Щоб при будь-якій довільній радіальній швидкості руху цілі (і, відповідно, довільній частоті Допплера корисного сигналу $F_{dc} = \frac{2V_r}{\lambda}$) не допускати суттєвого зменшення коефіцієнта проходження корисного сигналу K_c (тобто уникнути прояву ефекту «сліпих» швидкостей), і тим самим забезпечити велике значення K_{no} , необхідно у передавачі передбачити роботу у режимі несиметричного запуску (коли сусідні інтервали між імпульсами T_{n_1} та T_{n_2} різні), або ж використовувати двочастотний зонduючий сигнал.

Аналогічно, реалізація системного метода проектування антени РЛС з урахуванням вимог до завадозахищеності від пасивних та активних завад, вимог до ЕМС відбилася на виборі принципів побудови та параметрів антени РЛС.

Для забезпечення потрібної завадозахищеності від активних завад необхідно розширити діапазон антени по частоті (якщо прийнято рішення виконувати перебудову частоти зонduючого сигналу), ввести додатково допоміжні антени, які використовуються в адаптивній системі просторової селекції на базі кореляційних автокомпенсаторів.

Наведений приклад взаємозв'язків параметрів підсистем РЛС, показує необхідність системного підходу до розробки РЛС, і попереджає розробника, що після розробки одної підсистеми, може виникнути потреба повторно

уточнити параметри у разі їх значного негативного впливу на роботу другої підсистеми.

6. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РГР

Звіт подається в друкованому або електронному вигляді за вказівкою викладача. Термін здачі звіту визначається викладачем. У разі затримки задачі звіту з РГР буде знижена оцінка в балах за захист результатів РГР. Захист роботи відбувається за вимогами:

1. До виконавця РГР.

- здатність студента пояснити зміст роботи;
- здатність студента розкрити особливості РЛС, параметри якої були визначені в РГР;
- здатність студента пояснити основні параметри РЛС, і як вони впливають на загальну ефективність РЛС.

2. До змісту звіту РГР:

- присутня структурна схема РЛС, та інші схеми для розкриття змісту роботи;
- представлені аналітичні і числові розрахунки для обґрунтування параметрів РЛС;
- зміст висновків за результатами роботи, що містить інформацію про дослідження, повинні відповідати результатам теоретичних положень.

Вимоги до оформлення РГР

Оформлена РГР подається у друкованому або у електронному варіанті. Відступ зліва, справа, згори та знизу має становити відповідно: 3 см, 2 см, 2 см, 2 см. Текст має бути набраний шрифтом Times New Roman, 14 кеглем, через півтора інтервали. Обов'язково робити абзацні відступи розміром 1,25 см. Текс на сторінці вирівнюється по ширині сторінки.

Нумерацію сторінок, розділів, підрозділів, таблиць, малюнків, формул подають арабськими цифрами. Першою сторінкою роботи є титульний лист, на якому номер сторінки не ставиться. На наступних сторінках номери проставляються у правому верхньому куті сторінки без крапки після цифри.

Номер розділу ставлять після слова “РОЗДІЛ”, після номера крапки не ставлять, потім з нового рядка друкують заголовок розділу. Підрозділи нумерують у межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, між якими ставлять крапку. В кінці номера підрозділу повинна стояти крапка, наприклад: “2.3.” (третій підрозділ другого розділу). Потім у тому ж рядку йде заголовок підрозділу. Кожен наступний абзац починається відступом 10 мм.

Жоден заголовок не може закінчуватися крапкою. Якщо він довший одного рядка, то не слід вживати перенесення (поділу) слів; наступний рядок повинен починатися з того самого відступу. Заголовки змісту, вступу, висновків, списку використаних джерел і літератури, додатків, списків позначень та скорочень повинні бути розміщені по центру рядка і написані великими літерами звичайним жирним шрифтом розміром 14 пунктів. Після заголовку пропускається один рядок. Кожен розділ починається з нового аркуша. Розділи позначаються арабськими цифрами. Заголовок розділу має бути розміщений в наступному рядку під номером, по центру рядка. Всі назви пишуть великими літерами звичайним жирним шрифтом.

У тексті роботи після висновків подають “Список джерел та літератури”. Цей список повинен містити повний бібліографічний опис будь яких документів, наукових праць та довідкової літератури, використаних автором у будь-якій формі. Назви розміщуються за алфавітом - спочатку кириличні видання, потім видання латиною.

Титульний аркуш для звіту подано у Додатку 1.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія радіолокаційних систем (видання друге): підручник/ Б.Ф. Бондаренко, В.В. Вишнівський, В.П. Долгушин та іню; за заг.ред. С.В. Ленкова. – К. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011.- 383с.
2. Методи безпечної обробки інформації у багатопозиційних системах радіолокації монографія / Ігор Пархомей, Валерій Козловський, Сергій Гнатюк, Мирослав Рябий ; Національний авіаційний університет., Київ: Центр учбової літератури, 2018. - 230 с.
3. Теорія радіолокаційних та радіонавігаційних систем : навч. посіб. для студ. внз за напрямком "Радіотехніка" / Я. І. Лепіх ; Одеська нац. морська акад. Одеса : Екологія, 2008. -224 с.
4. Прокопенко І.Г. Статистична обробка сигналів: навч. посіб. МОНУ/ І.Г. Прокопенко. — К.: НАУ, 2011. — 220 с.
5. Методи та засоби обробки сигналів. Навчальний посібник./ Г. Д. Братченко, Б. В. Перелигін , О. В. Банзак, Н. Ф. Казакова, Д. В. Григор'єв — Одеса: Типографія-видавництво «Плутон», 2014. — 452 с.
6. Чесановський І. І. Підвищення завадостійкості обробки сигналів в некогерентних радіолокаційних системах / Чесановський І. І., Іванов А. В., Гурман І. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування : збірник наукових праць. – 2013. – № 54. – С. 68–74. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7174>
7. Основи теорії радіотехнічних систем: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного Університету Львівська політехніка, 2005. -240 с.: іл. ISBN 966-553-439-4
8. Реутська, Ю. Ю. Моделювання радіолокаційного сигналу на основі аналізу роботи імпульсно-доплерівського радару в завадовій обстановці / Реутська Ю. Ю. // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» : матеріали конференції, 10-16 березня 2014 р., м. Київ / НТУУ «КПІ», РТФ. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 177-179.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА
З ДИСЦИПЛІНИ «РАДІОЛОКАЦІЙНІ СИСТЕМИ»

Виконав:

студент групи РТ – 00

«__»_____

Перевірив:

«__»_____

Київ – 202_