

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІМ. О.С. ПОПОВА

Кафедра телебачення та радіомовлення

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ
з курсу**

"РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ"

Частина 1

**для студентів ННІ РТЕ.
Напрямок підготовки - "Радіотехніка"
Спеціальність - "Апаратура радіозв'язку, радіомовлення
та телебачення"**

Одеса 2015

Укладачі: **В.Б. Баляр, Д.О. Маковеснко, О.В. Салабай**
Рецензент - **О.В. Ошаровська**

Методичні вказівки містять практичні завдання з курсу "Радіоелектронні пристрої" й порядок їх виконання, теоретичні відомості, що необхідні для вирішення поставлених завдань, а також рекомендації до виконання самостійної роботи студентами.

Рекомендовано студентам усіх форм навчання за спеціальністю «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення та телебачення» ОНАЗ ім. О.С. Попова.

ЗАТВЕРДЖЕНО
методичною радою
академії зв'язку
Протокол № 3 від 24.03.2015 р.

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
телебачення та радіомовлення
і рекомендовано до друку.
Протокол № 2
від 30.09.2014 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
<i>Практичне заняття № 1. ФАЗОВІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ</i>	<i>7</i>
<i>Практичне заняття № 2. ДАЛЬНІСТЬ ДІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ</i>	<i>14</i>
<i>Практичне заняття № 3. ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ</i>	<i>23</i>
<i>Практичне заняття № 4. ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ РІЗНИХ ТИПІВ</i>	<i>30</i>
<i>Практичне заняття № 5. ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ</i>	<i>38</i>
<i>Практичне заняття № 6. РАДІОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ПЕЛЕНГАЦІЇ</i>	<i>42</i>
<i>Практичне заняття № 7. РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ У РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ</i>	<i>47</i>

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна “Радіоелектронні системи” складається з двох модулів. Мета курсу – надати студентам необхідні знання з радіоелектронних систем (РЕС) і основах застосувань для відповідних предметних областей. В результаті вивчення цього курсу студенти повинні освоїти класифікацію радіоелектронних систем, принципи побудови та особливості радіоелектронних систем різного призначення; принципи виявлення й розрізнення сигналів у радіоелектронних системах передавання інформації; методи оброблення сигналів у радіоелектронних системах.

ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Модуль № 1. Основні принципи побудови та технічні характеристики радіоелектронних систем

Структура залікового модуля 1

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття (год.)		Самостійна робота (год.)
		практичні	лабораторні	
1 Загальні положення теорії РЕС	4	2		14
2 Класифікація РЕС	4	2		18
3 Моделі та служби РЕС	12	6	2	40
4 Радіоелектронні системи витягання інформації	8	18	26	24
Разом модуль 1, год.	28	28	28	96

Теми практичних занять модуля 1

№ з/п	Тема	Годин
1	Фазові методи вимірювання дальності	4
2	Дальність дії радіолокаційних станцій	4
3	Частотний метод вимірювання дальності	4
4	Точність вимірювання в радіолокаційних системах різних типів	4
5	Імпульсний метод вимірювання дальності	4
6	Радіочастотні методи пеленгації	4
7	Роздільна здатність у радіоелектронних системах	4
Всього		28

Перелік лабораторних робіт модуля 1

№ з/п	Тема	Годин
1	Радіоелектронні системи витягання інформації. Фазовий метод радіодальнометрії	12
2	Радіоелектронні системи витягання інформації. Частотний метод радіодальнометрії	4
3	Радіоелектронні системи витягання інформації. Імпульсний метод радіодальнометрії	4
4	Радіоелектронні системи витягання інформації. Фазовий метод радіопеленгації	4
5	Радіоелектронні системи витягання інформації. Амплітудний метод радіопеленгації	4
Всього		28

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1 Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник.. – [2-е изд., перераб. и доп.]; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.: ил.

2 Радиотехнические системы: учеб. пособ. [для вузов]; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.

3 Чердынцев В.А.. Радиотехнические системы: учеб. пособ. [для вузов]/ Чердынцев В.А. – Мн.: Выш. шк., 1988. - 369 с.

4 Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: учеб. пособ. [для вузов]/ Лезин Ю.С. – Мн.: Радио и связь, 1986. - 280 с.

5 Пестряков В.Б., Радиотехнические системы: учеб. пособ. [для вузов]/ В.Б.Пестряков, В.Д. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1985. – 446 с.

6 Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства/ Белоцерковский Г.Б.- М.: Сов. Радио, 1975. – 336 с.: ил.

7 Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник [для вузов]/ Бакулев П.А.. – М.: Радиотехника, 2004. - 320 с.: ил.

8 Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: учебник [для вузов]/ Финкельштейн М.И. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.: ил.

9 Васин В.В. Справочник задачник по радиолокации/ Васин В.В., Степанов Б.М. – М: Сов. радио, 1977. - 320 с.

10 Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “Радіоелектронні системи”. Модуль 1: Основні принципи побудови та технічні характеристики радіоелектронних систем. Модуль 2: Принципи, функції та основні характеристики радіоелектронних систем/ укладачі: В.Б. Баляр, С.С. Устинов, О.В. Салабай, В.І. Споросева. – О.: Вид-во ОНАЗ ім. О.С. Попова. - 2012. - 116 с.

11 Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування "Оцінка технічних та експлуатаційних характеристик радіоелектронних систем різних типів"/ укладачі: О.В. Гофайзен, О.В. Салабай, В.Б. Баляр. – О.: Вид-во ОНАЗ ім. О.С. Попова. - 2014. - 51 с.

НАСТАНОВИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Самостійна робота - планована навчальна, навчально-дослідницька, науково-дослідна робота студентів, що виконується у позааудиторний (аудиторний) час за завданням і за методичним керівництвом викладача, але без його безпосередньої участі (за часткової безпосередньої участі викладача, що залишає за собою провідну роль за роботою студентів).

Для того, щоб практичні заняття приносили максимальну користь, необхідно пам'ятати, що вирішення завдань відбувається на базі теоретичного матеріалу, що його викладено на практиках, лекціях або інших заняттях з викладачем та який пов'язаний, як правило, з детальним розбором окремих питань лекційного курсу. Слід зазначити, що матеріал закріплюватиметься на практичних заняттях як в результаті обговорення й аналізу теоретичного матеріалу, так і за допомогою вирішення проблемних ситуацій, завдань. За цих умов студент повинен не лише добре засвоїти матеріал, але і навчитися застосовувати його на практиці, а також отримувати додатковий стимул для активного опрацювання наданого викладачем матеріалу. Крім того, певна частина завдань, наданих за відповідною темою, може бути використана далі на лабораторних заняттях як початкові дані для проведення дослідження принципів або характеристик тієї або іншої реалізації радіоелектронної системи.

При самостійному рішенні завдань треба обґрунтовувати кожен етап рішення, виходячи з теоретичних положень курсу. Якщо студент бачить декілька шляхів вирішення проблеми (завдання), то треба порівняти їх і вибрати найраціональніший. Корисно до початку обчислень скласти короткий план вирішення проблеми (завдання). Рішення проблемних завдань або прикладів слід викладати детально, обчислення розташовувати в строгому порядку, відділяючи допоміжні обчислення від основних. Рішення за необхідності треба супроводжувати коментарями, схемами, кресленнями і рисунками.

Слід пам'ятати, що рішення кожного навчального завдання має доводитися до остаточної логічної відповіді, якої вимагає умова, і по можливості з висновками. Отриману відповідь слід перевірити способами, витікаючими з суті цього завдання. Корисно також (якщо можливо) вирішувати декількома способами і порівняти отримані результати. Рішення завдань цього типу треба продовжувати до придбання твердих навичок у їх рішенні.

У кінці матеріалу кожного практичного заняття надано вказівки з виконання завдань у рамках самостійної роботи, а також розділи і глави навчальної літератури, які можуть бути використані для вивчення додаткового матеріалу, що дозволяє розширити теоретичні або практично знання з відповідного питання.

Для контролю отриманих навичок у кінці кожного практичного заняття має бути проведено відповідний контрольний захід, тип якого визначається викладачем (контрольна робота, вибіркове опитування або інші форми).

Практичне заняття № 1

ФАЗОВІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо загальних принципів та технічних характеристик сучасних фазових систем радіодальнометрії, вимірювання та оцінки параметрів зонduючих сигналів у приймачах РЛС та методів підвищення ефективності систем фазової радіодальнометрії.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

1. РЕАЛІЗАЦІЯ ФАЗОВИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

Базова реалізація фазового методу вимірювання дальності. Вимірювання дальності фазовими методами полягає у вимірюванні приросту фази зонduючого коливання з масштабною частотою при затримці відбитого від об'єкта радіолокаційного спостереження зонduючого сигналу.

При фазовому методі вимірювання дальності до об'єкта радіолокаційного спостереження генератор високої частоти (ГВЧ) випромінює немодульоване гармонічне коливання (рис. 1.1). Фаза цього зонduючого сигналу (в точці 1 на рис. 1.1) має миттєве значення

$$\varphi_1(t) = 2\pi f_0 t + \varphi_0, \quad (1.1)$$

де f_0 - частота випромінюваного коливання, φ_0 - початкова фаза.

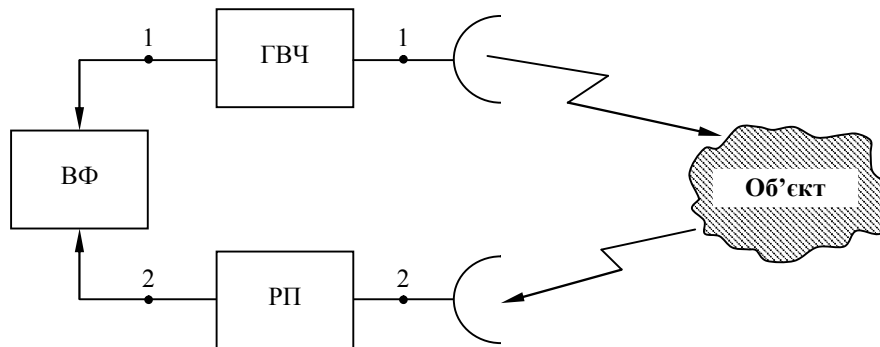


Рисунок 1.1 – Схема реалізації базового методу фазової дальнометрії

Тоді миттєву фазу φ_2 відбитого сигналу (в точці 2 на рис. 1.1) буде затримано на деякий час

$$t_3 = \frac{2r}{c}, \quad (1.2)$$

де r - дальність до об'єкта радіолокаційного спостереження;

t_3 - час затримки зонduючого сигналу.

Таким чином,

$$\varphi_2(t) = \varphi_1(t - t_3) = 2\pi f_0(t - t_3) + \varphi_0 + \Delta\varphi = 2\pi f_0 t - 2\pi f_0 t_3 + \varphi_0 + \Delta\varphi, \quad (1.3)$$

де $\Delta\varphi$ - зсув фази при відбитті від об'єкта (враховувати не будемо).

Відбитий сигнал надходить в приймальну антену, потім в резонансний підсилювач (РП) і на вимірювач фази (ВФ), до якого також надходить початковий зонduючий сигнал. Вимірювач фази визначає різницю фаз $\Delta\varphi$ випромінюваного і відбитого сигналів

$$\Delta\varphi = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) = 2\pi f_0 t_z = 2\pi f_0 2\frac{r}{c} = 4\pi \frac{r}{\lambda_0}, \quad (1.4)$$

яка пропорційна дальності до об'єкта радіолокаційного спостереження.

Отже, дальність відповідає такій формулі

$$r = \lambda_0 \frac{\Delta\varphi}{4\pi}. \quad (1.5)$$

Максимальна межа однозначно вимірюваної відстані такого дальноміра буде визначатись з умови відсутності неоднозначності визначення дальності:

$$r_{\max} = \frac{\lambda_0 2\pi}{4\pi} = 0.5\lambda_0, \quad (1.6)$$

тобто буде відповідати половині використовуваної довжини хвилі.

Таким чином, для однозначного вимірювання дальності фазовим методом в інтервалі $(0, r_{\max})$ масштабна частота має задовольняти умові

$$\omega_M \leq \frac{c\pi}{r_{\max}}; f_M \leq \frac{c}{2r_{\max}}, \quad (1.7)$$

де f_M - масштабна частота зонduючого сигналу.

Масштабна частота впливає на точність визначення дальності. В цьому випадку з формули (1.5) дальність відповідає

$$r = \lambda_M \frac{\Delta\varphi}{4\pi} = \frac{c}{f_M} \frac{\Delta\varphi}{4\pi}. \quad (1.8)$$

Якщо пристрій вимірювання фази визначає r з середньоквадратичною помилкою $\sigma_{\Delta\varphi}$, то дальність визначається з середньоквадратичною помилкою

$$\sigma_r = \frac{c \cdot \sigma_{\Delta\varphi}}{4\pi f_M} = \lambda_M \frac{\sigma_{\Delta\varphi}}{4\pi}. \quad (1.9)$$

Шуми перешкоджають точному визначенню фазового зсуву та зі збільшенням відношення сигнал/шум (позначимо через q_0) помилка $\sigma_{\Delta\varphi}$ зменшується:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{1}{\sqrt{q_0}}. \quad (1.10)$$

З урахуванням цього з формули (1.9) знаходимо потенційно можливу середньоквадратичну помилку вимірювання дальності фазовими методами:

$$\sigma_r = \frac{c \cdot \sigma_{\Delta\varphi}}{4\pi f_M} = \frac{c}{4\pi f_M \sqrt{q_0}} = \frac{\lambda_M}{4\pi \sqrt{q_0}}. \quad (1.11)$$

Особливістю одночастотної фазової системи є можливість вимірювання не самої дальності, а приросту дальності за час спостереження. Особливості вимі-

рування приросту відстані може бути знайдено на с. 19 методичного посібника [9]. За теорією приріст відстані буде відповідати:

$$r_{\Pi} = \left(N + \frac{\Delta\varphi_K - \Delta\varphi_H}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (1.12)$$

де $\Delta\varphi_H$ - початкове значення фази;

$\Delta\varphi_K$ - кінцеве значення фази;

N - число переходів через нуль.

Повна дальність до об'єкта відповідатиме

$$r = r_0 + r_{\Pi}, \quad (1.13)$$

де r_0 - початкова дальність, яку необхідно знати з апріорної інформації від іншого джерела.

Фазовий радіодальномір з модуляцією несучого коливання. При цьому методі передавальна антена випромінює радіохвилі несучої частоти f_0 , що модулюються за амплітудою гармонічними коливаннями низької частоти F , а порівняння фаз випромінюваного і відбитого сигналів здійснюється на частоті обвідної F_M цих сигналів. Пропорційно зменшенню масштабної частоти від f_0 до $F_M = F$ (збільшенню масштабної довжини хвилі λ_M) зростає однозначно вимірювана дальність $r_{\text{одн}}$.

В разі використання цифрового лічильника відстані на базі підрахунку еталонних імпульсів, дальність буде визначатись як

$$r = \frac{ct_3}{2} = \frac{cN_{em}T_{em}}{2} = \frac{cN_{em}}{2F_{em}}. \quad (1.14)$$

Еталонні імпульси рахують у лічильнику пачками по $N_{em} = t_3 / T_{em}$ імпульсів (t_3 - час затримки зонduючого сигналу). При цьому виникає помилка дискретності вимірювача, що відповідає періоду еталонних імпульсів:

$$\sigma_r = \pm \frac{cT_{em}}{2} = \pm \frac{c}{2F_{em}} \quad (1.15)$$

Багаточастотні фазові дальноміри. Протиріччя у виборі масштабної частоти вирішують використанням багатошкального відліку, за якого використовують декілька масштабних частот $\omega_{M_1}, \omega_{M_2}, \dots, \omega_{M_n}$. Найменша з масштабних частот визначає найбільш грубу шкалу визначення дальності і вибирається з умови однозначності вимірювань. Наступна, вища масштабна частота визначає другу, точнішу шкалу дальності. Ця частота вибирається так, щоб інтервал однозначного вимірювання дальності за другою шкалою перевищував подвоєне значення максимальної помилки вимірювань за першою шкалою.

Вибір кількості частот при багаточастотній реалізації фазового дальноміра залежить від розрахункової максимальної дальності дії і від мінімальної необхідної точності визначення дальності до об'єкта при заданих параметрах РЛС.

Співвідношення між N робочими частотами фазового дальноміра теж є не випадковим, а детермінованим, що вибирають за наступним законом:

$$\begin{cases} f_N = n_N \cdot f_{N-1} & \text{при } N > 1 \\ f_N = f_1 & \text{при } N = 1 \end{cases} \quad (1.16)$$

де n_N - ціле число, що є коефіцієнтом пропорційності між відповідними робочими частотами.

Якщо помилка вимірювання дальності за другою шкалою перевищує допустиме значення $\sigma_{r_{\max}}$, то вимірювання виконуються за третьою, ще точнішою шкалою. Користуючись сукупністю відліків дальності за всіма шкалами багатоточкового дальноміра, можна виміряти дальність з помилкою, визначуваною найбільш точною шкалою, і з інтервалом однозначності, який визначається найбільш грубою першою шкалою.

2. ЕЛЕМЕНТИ СТРУКТУРНИХ СХЕМ РАДІОДАЛЬНОМІРІВ

Лічильники для цифрових фазових радіодальномірів. Існує безліч реалізацій цифрових лічильників, але в рамках курсу РЕС розглянемо тільки два – нестежачий лічильник на базі підрахунку імпульсів та лічильник на базі віднімання/ інтегрування.

Принцип дії *лічильника на базі рахування імпульсів* необхідно розглянути для фазового радіодальноміра з модуляцією носійного коливання на базі того, що надано на с. 20 методичного посібника [9]), а *лічильника на базі віднімання/ інтегрування* – на с. 25 методичного посібника [9].

Змішувачі у багаточастотних фазових радіодальномірах. Основу багаточастотних фазових радіодальномірів складає сукупність змішувачів та смугових фільтрів, що використовують для перенесення частоти вгору в передавачі радіодальноміра та вниз – у приймачі.

Структурна схема перетворювача частоти вниз (змішувача), що базується на балансовому модуляторі та смуговому фільтрі, показана на рис. 1.2.

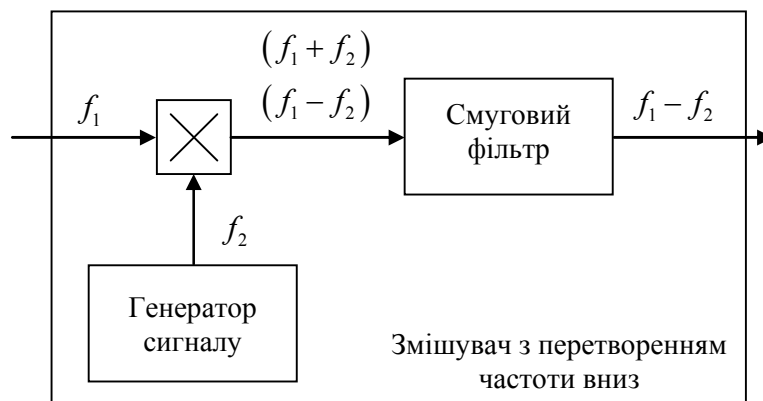


Рисунок 1.2 – Змішувач з перетворенням частоти вниз

Після подання на вхід змішувача сигналу з частотою f_1 та перемноження з сигналом, що має частоту f_2 , утворюється двочастотний сигнал $S_{\text{бм}}$, який

має дві складові з частотами $(f_1 - f_2)$ та $(f_1 + f_2)$ (рис. 1.3). В тому разі, якщо необхідно підвищити частоту – смуговим фільтром виділяють складову $(f_1 + f_2)$, знизити частоту – виділяють складову $(f_1 - f_2)$. На рис. 1.3 пунктирною лінією показано ідеалізовану АЧХ смугового фільтра.

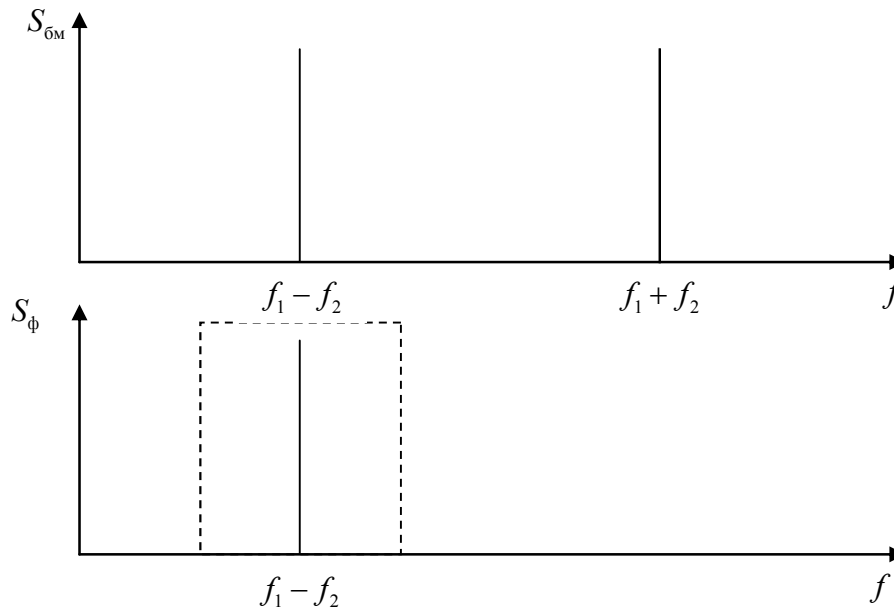


Рисунок 1.3 – Спектр сигналів на виході балансного модулятора та смугового фільтра в разі зниження частоти

У відповідній лабораторній роботі в якості першої частоти слід брати носійну частоту, а другої – масштабну частоту, яку отримано в результаті підрахунків.

В тому разі, якщо сигнал є не однією гармонікою, а містить певний набір частот, тоді необхідно провести відповідне віднімання та додавання граничних частот спектра сигналу на виході балансного модулятора, а для смугового фільтра – визначити відповідні граничні частоти АЧХ фільтра.

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожній задачі використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. Яким відстаням до об'єктів радіолокаційного спостереження відповідає час затримки відбитих сигналів N мкс, $(N+3)$ мс, M с, $0,5 \cdot (N+1)$ хв.?

2. Визначити найвищу частоту синусоїдальної модуляції незгасаючих коливань фазового радіодальноміра, якщо максимальна дальність до об'єкта дорівнює $10 \cdot (N+10)$ км.

3. Визначити робочу частоту радіодальноміра, що працює за фазовим методом в його базовій реалізації, за умови, що сигнал, відбитий від об'єкта, після його випромінювання надійшов в антену РЛС через $t_3 = (30 + N) \cdot M$ мс.

4. Визначити значення різниці фаз для передаваного та прийнятого зондуєчого сигналів будуть зафіксовані на вимірювачі фаз у схемі на рис. 1.1, якщо об'єкт радіолокаційного спостереження буде знаходитись на відстані $(M + N)$ км від радіолокаційної станції. Зсув фази за відбиття від об'єкта радіолокаційного спостереження не враховувати.

5. У скільки разів зміняться показники вимірювача фази в радіодальномірі фазового типу, якщо частота модуляції незгасаючих коливань дорівнює $(600 + 5 \cdot N \cdot M)$ Гц, а дальність об'єкта збільшилася з $(15,7 + N \cdot M)$ до $(33,4 + N \cdot M)$ км?

6. Визначити значення вимірної відстані до об'єкта радіолокаційного спостереження, які зафіксує фазовий радіодальномір з немодульованим зондуєчим сигналом, якщо час затримки його надходження до приймальної антени відповідає N мкс, а відношення сигнал/шум на вході приймача РЛС буде зменшено в $(M + 1), (M + 5), (M + 7)$ разів.

7. Визначити частоту випромінюваного коливання фазового радіодальноміра і відстань до об'єкта спостереження, якщо час затримки сигналу складає N мкс, а різниця фаз випромінюваного і відбитого сигналів становить $(130 + N \cdot M)^\circ$ за однозначного визначення відстані.

8. Якою буде відстань до об'єкта, якщо початкова та кінцева фази досліджуваного і відбитого складають 0° і 90° при чотирьох зафіксованих переходах через 2π . Частота фазового радіодальноміра становить $(10 \cdot N \cdot M)$ кГц.

9. Різниця фаз випромінюваного і відбитого сигналів становить $(150 + N)^\circ$. Визначити частоту роботи фазового радіодальноміра якщо відстань до об'єкта складає $(500 \cdot M)$ м.

10. Визначити кількість переходів через 2π фазового радіодальноміра, що працює на частоті $(45 + N)$ кГц, якщо відстань до об'єкта складає $(8 + M)$ км, а різниця фаз випромінюваного і відбитого сигналів $(150 + N)^\circ$.

11. Визначити характеристики лічильника цифрового фазового радіодальноміра (мінімальну частоту еталонних імпульсів та їх період), якщо об'єкт радіолокаційного спостереження розташовано на відстані $(25 + N)$ км від РЛС, а необхідна точність вимірювання відстані відповідає $\pm(65 \cdot M)$ м.

12. Яка кількість імпульсів буде підрахована лічильником цифрового радіодальноміра, якщо об'єкт радіолокаційного спостереження розташовано на відстані $(10 + N)$ км від РЛС, а необхідна точність вимірювання дальності буде відповідати $(8 \cdot M)$ м?

13. При використанні двочастотного фазового радіодальноміра різниця фаз коливань, що підводяться до вимірювача фази, складає $18 \cdot M^\circ$, дальність до об'єкта радіолокаційного спостереження дорівнює $20 \cdot M$ км. Визначити різницю частот далекоміра.

14. Визначити стосовно умов попереднього завдання максимально можливі значення носійних частот далекоміра, якщо відносна стабільність генераторів носійних частот дорівнює 10^{-7} , а допустимі помилки вимірювання дальності не мають перевищувати 3 %.

15. Трьохчастотний вимірювач дальності працює на частотах: $(1,8 \cdot M)$ кГц; $(18 \cdot M)$ кГц і $(180 \cdot M)$ кГц. Далекмір фіксує наступну різницю фаз для кожної з трьох носійних: 55° , $10\pi + 36^\circ$ та $100\pi + 39^\circ$. Визначити відстань до об'єкта радіолокаційного спостереження.

16. Знайти середньоквадратичну помилку визначення дальності двочастотного вимірювача дальності, що працює на частотах $(5 \cdot M)$ кГц і $(50 \cdot M)$ кГц. Відношення сигнал/шум на вході приймача становить $(15 + N)$ дБ.

17. Визначити масштабні частоти тричастотного радіодальноміра з перенесенням на носійну частоту (вибрати довільно у відповідності з умовами задачі), що вимірює дальність до об'єкта радіолокаційного спостереження, розташованого на відстані $(15,4 + N)$ км від РЛС, якщо необхідна точність вимірювання дальності відповідає $\pm (78 + M)$ м.

18. Для умов попередньої задачі визначити характеристики АЧХ фільтрів змішувачів схеми тричастотного фазового радіодальноміра (використовувати схему, базовану на схемі рис. 1.7 методичного посібника [9]) та приймальних фільтрів, зокрема нижні та верхні граничні частоти АЧХ всіх фільтрів у схемі. Граничні частоти рекомендується обирати виходячи з запасу не менш ніж 50 % від номінального значення частоти, що фільтрується.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід рішення та відповіді занести в зошит для практичних занять.

Також потрібно провести відповідну роботу для підготовки до виконання лабораторної роботи.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати розділ 2.7 (с. 107) [8], главу 1 (с.15) [9], розділ 10.1 (с. 230) [7], розділ 19 (с. 79) [6], розділ 2.4.1 (с. 20) [4], підрозділи 3 (с. 15) та 4 (с. 20) [10].

Практичне заняття № 2

ДАЛЬНІСТЬ ДІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо оцінки дальності дії радіолокаційних станцій з урахуванням різних впливаючих факторів (умов розповсюдження зондуючих сигналів, технічних параметрів радіолокаційних станцій тощо).

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

Дальність дії є однією з найважливіших характеристик радіолокаційних систем. Під дальністю дії розуміють максимальну відстань $r = r_{\text{макс}}$, на якій сигнал, що приймається, досягає мінімально допустимого (порогового) рівня $P_c = P_{c \text{ мин}}$ ще достатнього для виконання системою основних функцій з якісними показниками не гірше заданих. Також можна стверджувати, що максимальною дальністю дії РЛС називається найбільша відстань між станцією і об'єктом радіолокаційного спостереження, на якому сигнали від об'єкта виявляються із заданою ймовірністю правильного виявлення $P_{\text{пв}}$ і помилкової тривоги $P_{\text{пт}}$ [9].

На максимальній дальності дії РЛС відношення енергії одного сигналу, що приймається, до спектральної густини шуму приймача дорівнює коефіцієнту розрізнюваності $k_p = E_{c1} / N_0$.

Якщо використовуються відбиті від об'єкта сигнали, то у вільному просторі максимальна дальність дії імпульсної РЛС визначається формулою

$$r_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС}} \cdot \tau_i \cdot G_{\text{пер}} \cdot S_{\text{пр}} \cdot \bar{\sigma}}{16 \cdot \pi^2 \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p}}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{РЛС}}$ - імпульсна потужність передавача РЛС; τ_i - тривалість випромінюваних імпульсів; $G_{\text{пер}}$ - максимальне значення коефіцієнта посилення антени передавача; $S_{\text{пр}}$ - ефективна площа антени приймача; $\bar{\sigma}$ - середнє значення ефективної відбиваючої площі об'єкта радіолокаційного спостереження; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт с/град - постійна Больцмана; T_0 - абсолютна температура приймача; $k_{\text{ш}}$ - коефіцієнт шуму приймача.

На рис. 2.1 надані графіки, що характеризують значення коефіцієнта шуму малошумних підсилювачів високої частоти.

При використанні в РЛС для випромінювання і приймання радіохвиль за однієї антени будуть однаковими значення коефіцієнта посилення при прийманні і передаванні $G_{\text{пр}} = G_{\text{пер}}$, а також значення ефективної площі антени $S_{\text{пр}} = S_{\text{пер}}$.

Ефективна площа антени S і коефіцієнт її посилення за потужністю G пов'язані співвідношенням [9]

$$S = \lambda^2 \cdot G / 4\pi,$$

де λ — довжина хвилі, що використовують у РЛС.

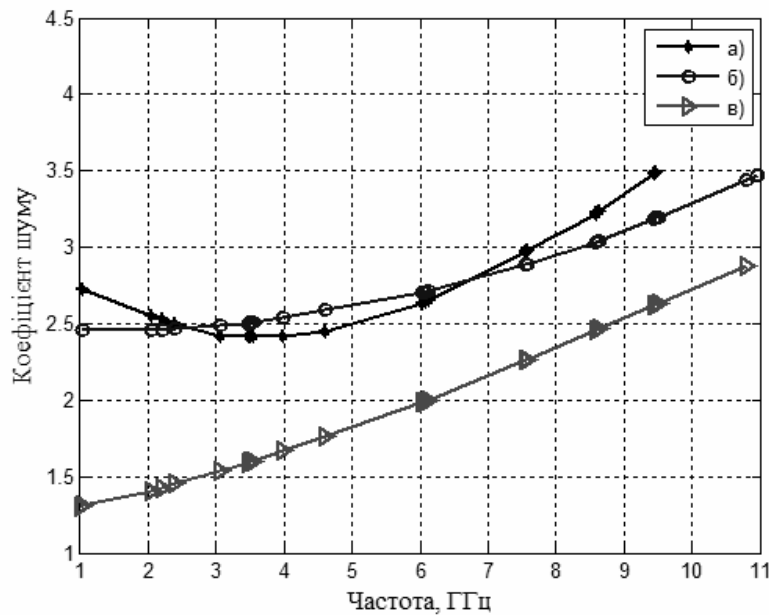


Рисунок 2.1 - Залежність коефіцієнта шуму від частоти зонduючого сигналу:
а) для ламп бігучої хвилі; б) для підсилювачів на тунельних діодах;
в) для параметричних підсилювачів

Якщо відоме значення ефективної площі S антени РЛС, тоді

$$r_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС}} \cdot \tau_i \cdot S^2 \cdot \bar{\sigma}}{4 \cdot \pi \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p \cdot \lambda^2}}, \quad (2.2)$$

У тих випадках, коли задається значення коефіцієнта посилення G антени РЛС, слід користуватися формулою

$$r_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС}} \cdot \tau_i \cdot G^2 \cdot \bar{\sigma} \cdot \lambda^2}{64 \cdot \pi^3 \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p}}. \quad (2.3)$$

Формули (2.1)...(2.3) визначають дальність дії РЛС лише у напрямі максимуму діаграми направленості антени РЛС. Якщо значення коефіцієнта розрізняюваності k_p вибирається з урахуванням зміни амплітуд сигналів в пачці імпульсів при скануванні антени, тобто враховується коефіцієнт втрат α_a , тоді вказані формули справедливі при розташуванні об'єктів радіолокаційного спостереження в межах деякої частини діаграми направленості антени.

Більш повно дальність дії РЛС з урахуванням направленості антени дозволяє оцінити зону видимості. Зона видимості станції є поверхнею, яка характеризується тим, що при розташуванні об'єкта радіолокаційного спостереження в будь-якій точці цієї поверхні відношення енергії E_{c1} одного сигналу, що приймається, до спектральної густини шуму приймача N_0 виявляється рівним коефіцієнту розрізняюваності k_p .

Можна визначити зону видимості і як поверхню, в кожній точці якої об'єкт виявляється із заданими значеннями ймовірності правильного виявлення і помилкової тривоги. Вважають, що об'єкти, які знаходяться усередині зони видимості, виявляються станцією радіолокації, а за межами цієї зони об'єкти бути виявлені не можуть [9].

Якщо $F(\varphi_{аз}, \varphi_{км})$ - нормована діаграма направленості антени за напруженістю поля, $\varphi_{аз}$, $\varphi_{км}$ – кути (азимут та кут місця відповідно), що визначають напрям на об'єкт відносно деякого початку відліку, то зона видимості $r_B(\varphi_{аз}, \varphi_{км})$ може бути представлена таким чином (рис. 2.2):

$$r_B(\varphi_{аз}, \varphi_{км}) = r_{\text{макс}} \cdot F(\varphi_{аз}, \varphi_{км}). \quad (2.4)$$

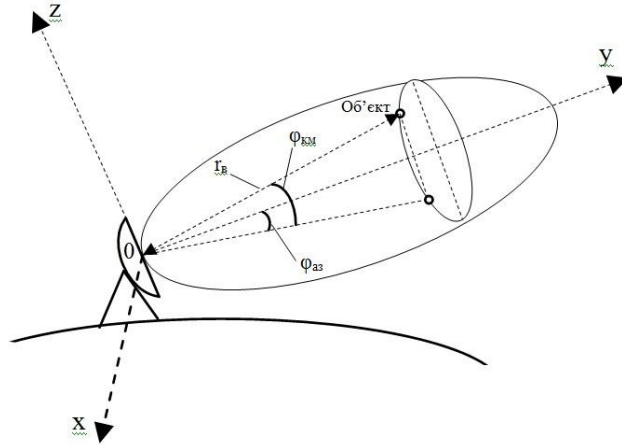


Рисунок 2.2 – Зона видимості РЛС

Дальність r_B визначає дальність виявлення об'єкта радіолокаційного спостереження, положення якої характеризують кутами $\varphi_{аз}$, $\varphi_{км}$ відносно напрямку 0у максимуму діаграми направленості антени.

Часто користуються діаграмами видимості, що є перерізом поверхні $r_B(\varphi_{аз}, \varphi_{км})$ будь-якою площиною, що проходить через напрям максимуму випромінювання. На рис. 2.3 показана діаграма видимості трипроменевої станції радіолокації у вертикальній площині.

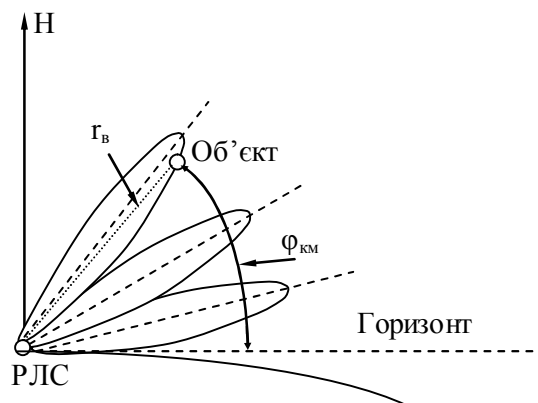


Рисунок 2.3 – Діаграма видимості трипроменевої РЛС у вертикальній площині

При переміщенні в просторі діаграми направленості антени аналогічним чином переміщається і зона видимості РЛС. Стосовно оглядової РЛС можна вважати, що зона видимості збігається із зоною огляду.

Дальність дії РЛС може бути виражена через середню потужність випромінювання передавача $P_{\text{серед}}$ і параметра зони огляду:

$$r_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{серед}} \cdot T_{\text{огл}} \cdot S \cdot \bar{\sigma}}{4 \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p \cdot N_c}}, \quad (2.5)$$

де $T_{\text{огл}}$ - період огляду заданої зони; Ω_0 - тілесний кут огляду; N_c - число накопичуваних сигналів при одноразовому опроміненні.

Точки випромінювання і прийому радіохвиль можуть бути рознесені в просторі (рис. 2.4). При цьому максимальне значення добутку дальності $r_{\text{пер}}$ від передавача до об'єкта спостереження радіолокації й $r_{\text{пр}}$ від об'єкта спостереження радіолокації до приймача визначається формулою [9]

$$(r_{\text{пер}} \cdot r_{\text{пр}})_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС}} \cdot \tau_i \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \bar{\sigma} \cdot \lambda^2}{64 \cdot \pi^3 \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p}}, \quad (2.6)$$

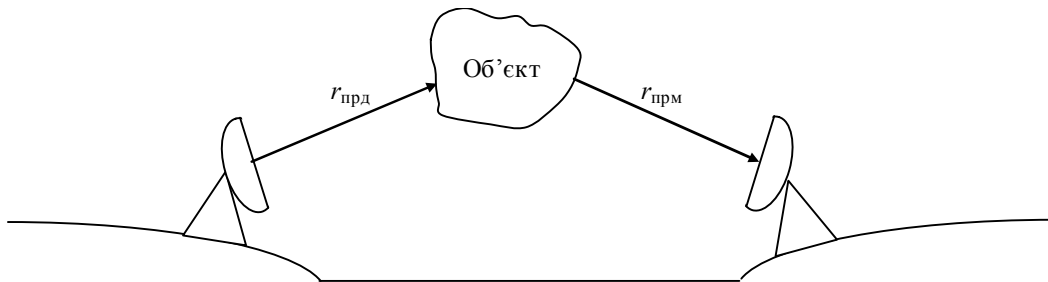


Рисунок 2.4 – Схема, що характеризує рознесення в просторі точок випромінювання та приймання радіохвиль

В активній радіолокації на об'єкт радіолокаційного спостереження встановлюють ретранслятор або відповідач, який приймає сигнали запиту, надіслані станцією радіолокації або спеціальним запитувачем, і надсилають радіосигнали у відповідь.

Максимальна дальність дії з каналу запиту дорівнює

$$r_{\text{макс зап}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС зап}} \cdot \tau_{i \text{ зап}} \cdot G_{\text{пер зап}} \cdot S_{\text{пр відп}}}{4 \cdot \pi \cdot k_{\text{ш відп}} \cdot k \cdot T_{0 \text{ відп}} \cdot k_{p \text{ відп}}}}, \quad (2.7)$$

з каналу відповіді

$$r_{\text{макс відп}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС відп}} \cdot \tau_{i \text{ відп}} \cdot G_{\text{пер відп}} \cdot S_{\text{пр зап}}}{4 \cdot \pi \cdot k_{\text{ш зап}} \cdot k \cdot T_{0 \text{ зап}} \cdot k_{p \text{ зап}}}}. \quad (2.8)$$

У формулах (2.7) і (2.8) додаткові нижні індекси характеризують: зап - параметри запитувача; відп - параметри відповідача.

У наземних РЛС метрового діапазону внаслідок віддзеркалення радіохвиль від земної поверхні виникає різке спотворення діаграми видимості у вертикальній площині порівнянно з тим, що мало б місце у вільному просторі (рис. 2.5). За малих кутів місця $\varphi_{\text{км}}$, нехтуючи втратами енергії радіохвиль через поглинання в тропосфері, діаграму видимості РЛС у вертикальній площині можна надати таким чином

$$r_{\text{в}}(\varphi_{\text{км}}) = 2 \cdot \left| \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot H_{\text{а}} \cdot \varphi_{\text{км}}}{\lambda} \right) \right| \cdot r_{\text{макс}} \cdot F(\varphi_{\text{км}}), \quad (2.9)$$

де H_a - висота центру антени РЛС над землею поверхнею; $F(\varphi_{\text{км}})$ - нормована діаграма направленості антени по полю у вертикальній площині для вільного простору; $r_{\text{макс}}$ - максимальна дальність дії РЛС у вільному просторі.

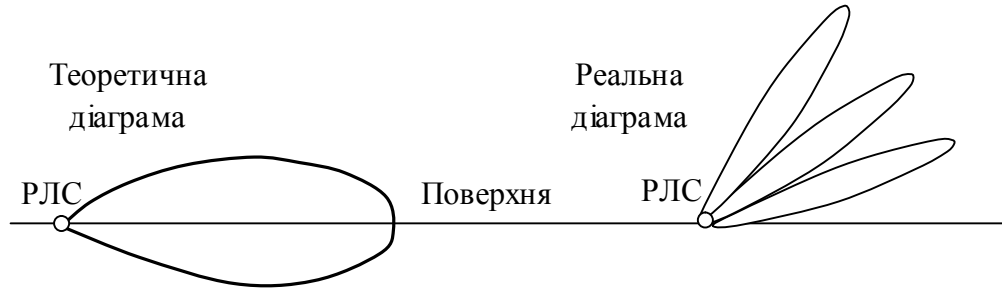


Рисунок 2.5 – Вплив земної поверхні на діаграму направленості антени РЛС у вертикальній площині

Поблизу поверхні Землі (у нижній частині першої пелюстки діаграми видимості) максимальна дальність дії РЛС приблизно дорівнює [9]

$$r_{\text{макс зем.поверх}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot H_a \cdot \varphi_{\text{км}}}{\lambda} \cdot r_{\text{макс}} \cdot F(\varphi_{\text{км}}). \quad (2.10)$$

При поглинанні енергії радіохвиль у тропосфері на обмежених ділянках (менших $r_{\text{макс}}$) максимальна дальність дії оцінюється за формулами:

$$r_{\text{макс } n} = r_{\text{макс}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \delta_{\Pi} \cdot l} = r_{\text{макс}} \cdot e^{-0,115 \cdot \delta_{\Pi} \cdot l}, \quad (2.11)$$

або

$$r_{\text{макс } n} = r_{\text{макс}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{\Pi_i} \cdot l_i} = r_{\text{макс}} \cdot e^{-0,115 \cdot \sum_{i=1}^n \delta_{\Pi_i} \cdot l_i}, \quad (2.12)$$

де $r_{\text{макс } n}$ - дальність дії з урахуванням поглинання; $r_{\text{макс}}$ - дальність дії за відсутності поглинання; δ_{Π} - коефіцієнт поглинання, що характеризує зменшення густини потоку енергії хвилі, що поширюється, в децибелах на кілометр; δ_{Π_i} - коефіцієнт поглинання на i -й ділянці траси; l_i - довжина i -ї ділянки траси, в кілометрах.

На рис. 2.6 і 2.7 надані графіки, що дозволяють оцінити значення коефіцієнта поглинання за різних атмосферних умов.

При поглинанні енергії на усій дальності дії РЛС має місце наступне співвідношення:

$$r_{\text{макс } \Pi} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{РЛС}} \cdot \tau_i \cdot S^2 \cdot \bar{\sigma}}{4 \cdot \pi \cdot k_{\text{ш}} \cdot k \cdot T_0 \cdot k_p \cdot \lambda^2}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \delta_{\Pi} \cdot D_{\text{макс } \Pi}}. \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) трансцендентне, що не має аналітичного розв'язання. Його можна розв'язати графоаналітичним шляхом. Ввівши заміну змінних

$r_{\text{макс } \Pi} / r_{\text{макс}} = x$, $a = 0,05 \cdot \delta_{\Pi} \cdot r_{\text{макс } \Pi}$, отримаємо нове рівняння: $\lg x = -ax$.

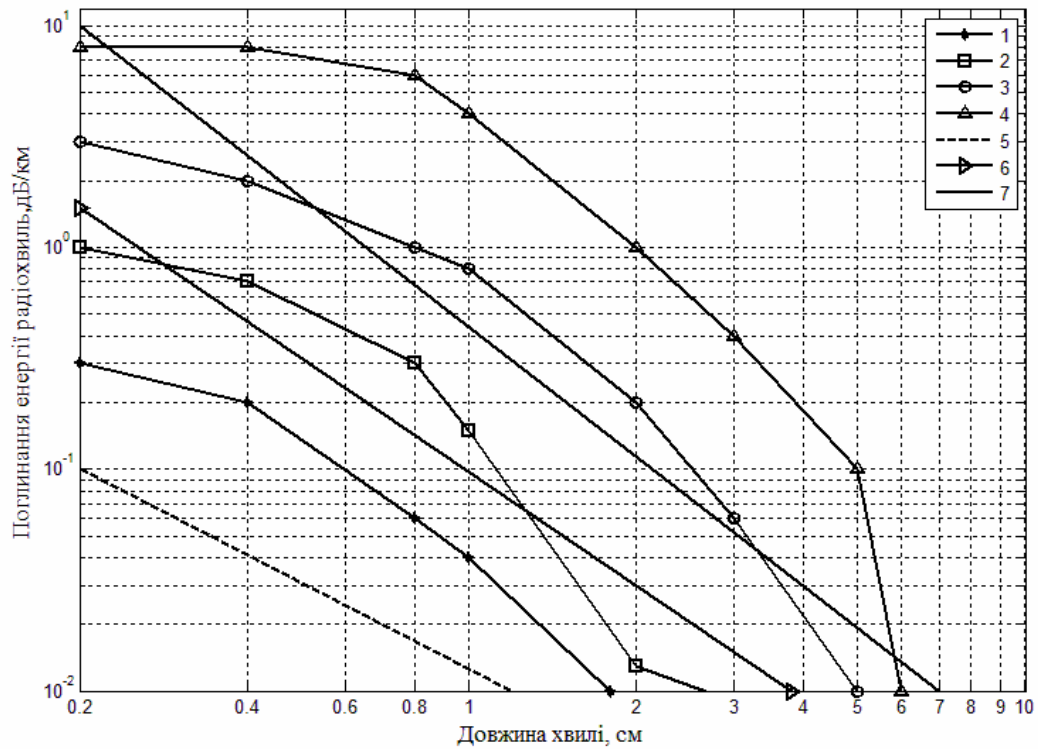


Рисунок 2.6 - Залежність поглинання енергії радіохвиль від довжини хвилі та виду гідрометеорів:

1 - дуже слабкий дощ (0,2 мм/г); 2 - слабкий дощ (1 мм/г); 3 - середній дощ (4 мм/г); 4 - сильний дощ (16 мм/г); 5 - видимість 600 м; 6 - видимість 130 м; 7 - видимість 30 м

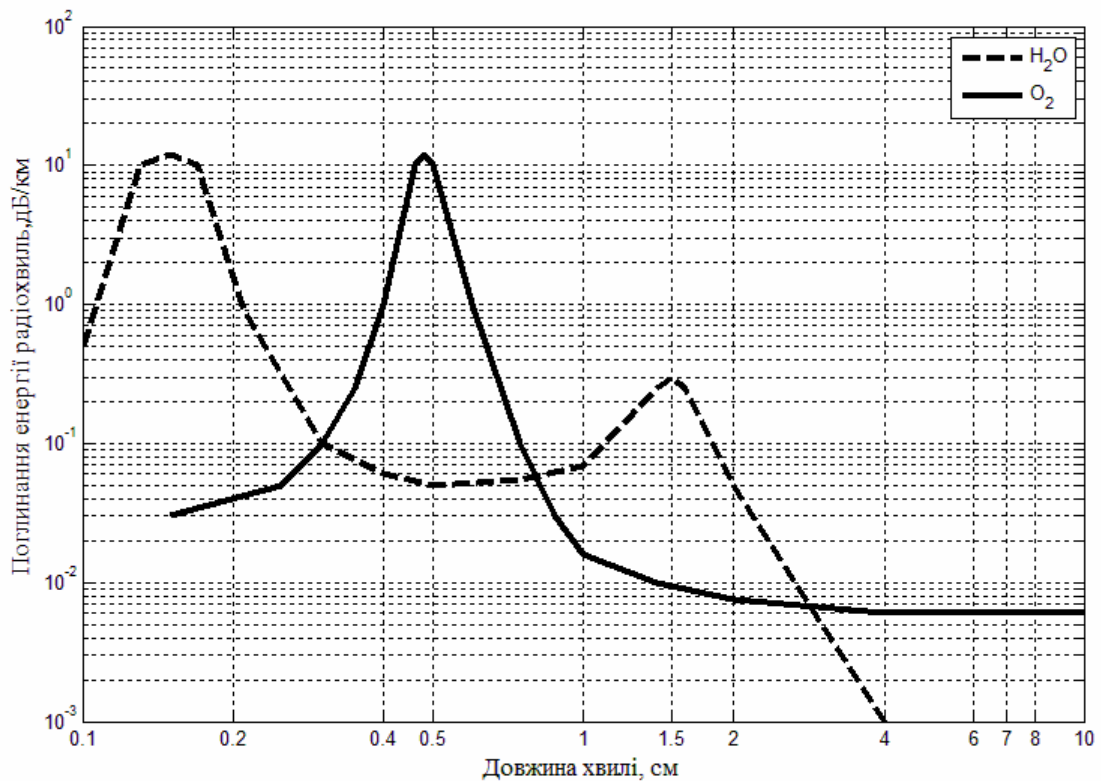


Рисунок 2.7 - Залежність коефіцієнта поглинання енергії радіохвиль у кисні (O_2) та парах води (H_2O) від довжини хвилі

Розв'язання рівняння визначається точкою перетину двох графіків: $y_1 = \lg x$, $y_2 = -a \cdot x$. На рис. 2.8,а показаний графік функції $\lg x$. Наносячи на нього лінію ($a \cdot x$) для конкретного значення коефіцієнта a , можна знайти скорочення дальності дії x . Оцінка максимальної дальності дії може вироблятися і за допомогою графіків, наданих на рис. 2.8,б, де по осі абсцис відкладена дальність без урахування поглинання, а по осі ординат - дальність при поглинанні. Параметром є коефіцієнт поглинання [9].

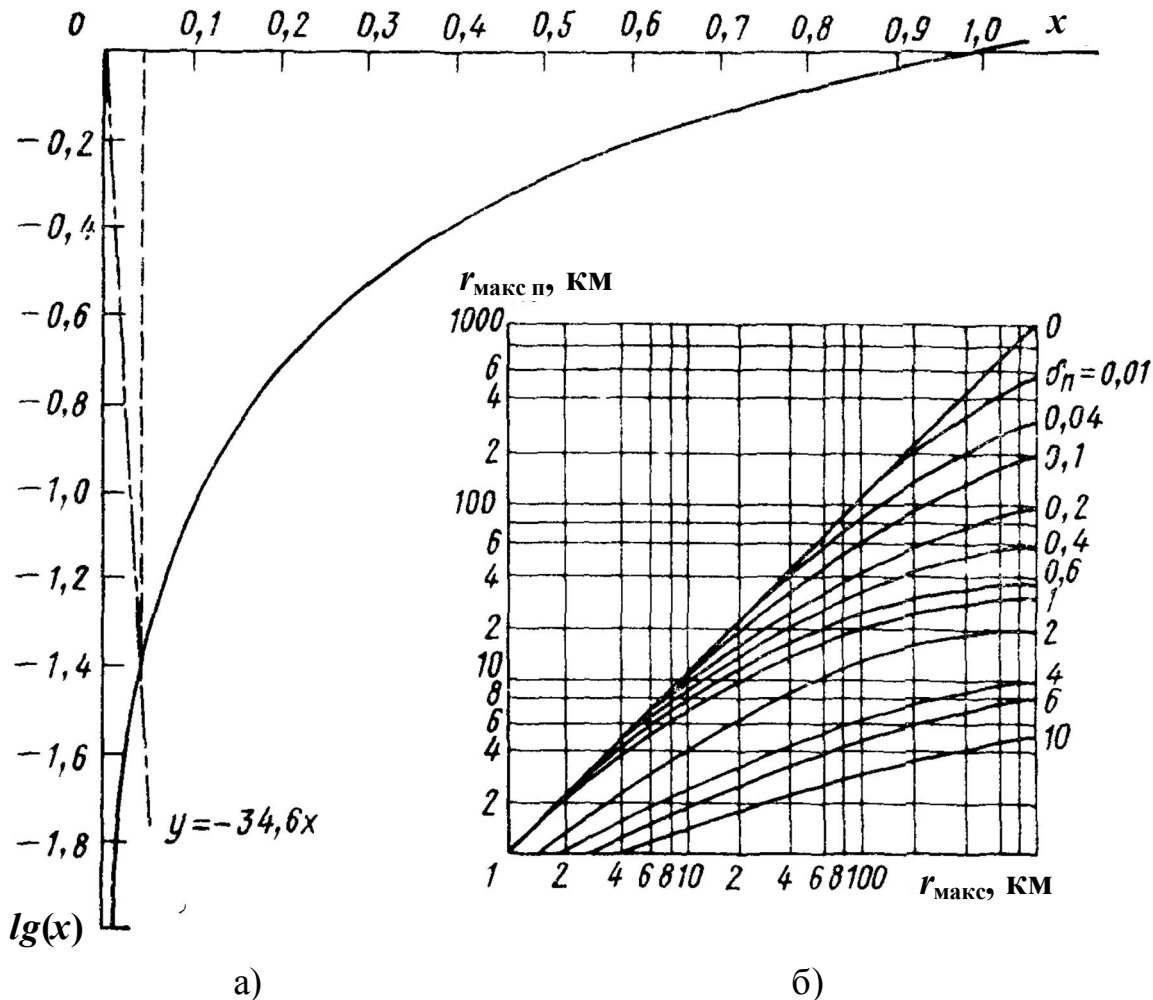


Рисунок 2.8 – Графіки для оцінки скорочення дальності дії РЛС:
а) графік функції $\lg(x)$, $x = r_{\text{макс } n} / r_{\text{макс}}$; $r_{\text{макс } n}$ - дальність дії з урахуванням поглинання; б) графік, що характеризує скорочення дальності дії через поглинання радіохвиль

При використанні ультракоротких хвиль дальність дії РЛС обмежується кривизною земної поверхні. Так звана *гранична дальність дії РЛС* для стандартної атмосфери дорівнює

$$r_{\text{гранична}} = 130 \cdot (\sqrt{H_a} + \sqrt{H_{об}}), \quad (5.14)$$

де H_a - висота антени РЛС над поверхнею Землі; $H_{об}$ — висота об'єкта радіолокаційного спостереження. Всі величини надані в кілометрах.

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожній задачі використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. На якій висоті H має знаходитись літак, який оснащено станцією виявлення низьколетячих об'єктів радіолокаційного спостереження для того, щоб була повністю використана максимальна дальність дії РЛС $r_{\text{макс}} = 100 \cdot M$ км? Висота польоту об'єктів - не менше N м.

2. Розрахувати максимальну дальність дії $r_{\text{макс}}$ у вільному просторі наземної станції радіолокації, що характеризується наступними даними:

$$P_{\text{РЛС}} = M \text{ МВт}; \quad \tau_i = M \text{ мкс}; \quad S_{\text{пер}} = S_{\text{пр}} = (13 + M) \text{ м}^2; \quad \bar{\sigma} = (10 + M) \text{ м}^2;$$

$$k_{\text{ш}} = 10 \cdot M; \quad k_p = (23 + M); \quad \lambda = N \text{ см}; \quad T_0 = 300^\circ \text{ К}.$$

3. Оцінити максимальну дальність дії РЛС $r_{\text{макс}}$, дані якої наведені в завданні 3, з урахуванням поглинання енергії радіохвиль у дощі інтенсивністю N мм/г до висоти $(M + 4)$ км і в парах води/кисню до висоти $(10 \cdot M + 10)$ км. Кут нахилу осі променя РЛС до горизонту прийняти рівним 1° .

4. До якої межі $r_{\text{макс}}$ доцільно збільшувати дальність дії наземної станції виявлення літаків, якщо максимальна висота їх польоту відповідає $(N + 4)$ км? Поглинання в атмосфері не враховувати.

5. Літакова РЛС з урахуванням поглинання енергії радіохвиль в тропосфері повинна мати дальність дії $(20 \cdot M)$ км. Яка має бути її дальність r у вільному просторі, якщо $\lambda = M$ см і враховується поглинання в дощі інтенсивністю 4 мм/г і в кисні повітря на усій дальності дії станції?

6. Яка дальність виявлення r наземною станцією радіолокації штучного супутника Землі, що летить на висоті $(300 + N)$ км над землею поверхнею?

7. Яка дальність приймання сигналів r у відповідь ретранслятора (без урахування поглинання енергії радіохвиль при поширенні) при наступних значеннях параметрів ретранслятора:

$$P_{\text{РЛС}} = M \text{ Вт}; \quad \tau_i = M \text{ мкс}; \quad G_{\text{пер}} = 5$$

та запитуючої станції:

$$S_{\text{пр}} = 0,5 \text{ м}^2; \quad k_{\text{ш}} = (10 \cdot M); \quad k_p = (23 + M); \quad T_0 = 300^\circ \text{ К}.$$

8. Визначити дальність r виявлення джерела активного випромінювання станцією радіолокації, якщо це джерело випромінює середню потужність M Вт у смузі M МГц і має коефіцієнт посилення антени $G_a = (M + 4)$, а РЛС характеризується наступними даними:

$$S_{\text{пр}} = 0,5 \text{ м}^2; \quad k_{\text{ш}} = (10 + N); \quad k_p = (67 + M); \quad T_0 = 300^\circ \text{ К}.$$

9. Використовується напівактивна система наведення ракет на об'єкт (об'єкт опромінюється станцією радіолокації, а апаратура ракети приймає відбиті сигнали). Побудувати графік залежності максимальної відстані захоплення сигналів об'єктів ракетою від відстані між РЛС і об'єктом при наступних значеннях параметрів РЛС:

$$P_{\text{випр}} = (200 + N) \text{ кВт}; \quad \tau_i = M \text{ мкс}; \quad G_{\text{пер}} = (500 + N); \quad \bar{\sigma} = (10 + M) \text{ м}^2; \quad \lambda = (1 + M) \text{ см};$$

апаратура ракети:

$$G_{\text{пр}} = (70 + N), k_{\text{ш}} = (23 + M), k_{\text{р}} = (8 + M).$$

Поглинання енергії радіохвиль у тропосфері не брати до уваги.

10. Оцінити дальність дії РЛС метрового діапазону r для $\varphi_{\text{км}} = 0,5^\circ$, якщо висота піднімання антени дорівнює $(2 + M)$ м, довжина хвилі - $(4 + M)$ м, а дальність дії у вільному просторі - $(130 + N)$ км.

11. Дальність дії корабельної РЛС у вільному просторі складає $(40 + N)$ км. Яка дальність дії $r_{\text{п}}$ цієї станції при сильному тумані (видимість $(10 + N)$ м) на усій дальності, якщо $\lambda = (2 + M)$ см?

12. Коефіцієнт поглинання енергії радіохвиль не перевищує 0,1 дБ/км. В яких межах може змінюватися дальність дії РЛС (r) у вільному просторі, якщо допустиме скорочення дальності через поглинання не має перевищувати $(10 + N)$ %?

13. Проектується наземна РЛС. Вимагається практично виключити вплив віддзеркалення від земної поверхні на діаграму видимості станції. Яка умова має бути виконана для задоволення цієї вимоги?

14. При постійній ефективній площі антени змінюється довжина хвилі РЛС з $(2 + M)$ до $(9 + M)$ см. Наскільки зміниться дальність дії РЛС? Вважати, що в РЛС як підсилювач високої частоти використовується лампа бігучої хвилі.

15. У напрямі РЛС один за іншим на дистанції $(100 \cdot M)$ м летять декілька однотипних літаків. Наскільки дальність виявлення групи більше дальності виявлення поодинокого літака, якщо $\tau_i = M$ мкс?

16. Літакова панорамна РЛС має дальність дії $(150 \cdot M)$ км по кораблю з $\bar{\sigma} = (3 + M) \cdot 1000 \text{ м}^2$. Яка дальність дії цієї РЛС по берегу моря $r_{\text{м}}$, що відповідає необробленому ґрунту, якщо ширина променя за азимутом дорівнює M° , тривалість імпульсів - M мкс, висота польоту - $(9 + M)$ км?

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід розв'язання та відповіді занести в зошит для практичних занять.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати главу 6 (с.355) [8]; главу 5 (с.148) [9], главу 5 (с. 115) [7], главу 4 (с. 93) [6].

Практичне заняття № 3

ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо методів оцінки дальності за допомогою частотних методів радіодальнометрії, точності цих методів та інших практичних питань.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

1. ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ЧАСТОТНИМ МЕТОДОМ

Частотний метод радіодальнометрії базується на використанні частотної модуляції (ЧМ). Таким чином, цей метод характеризується безперервним випромінюванням зонduючого сигналу. Модуляція дозволяє розрізнити прямий і відбитий сигнали за різницею їх частот і тим самим не лише виявляти об'єкт радіолокаційного спостереження, але і виміряти до нього дальність. При використанні ЧМ здійснюється вимірювання приросту частоти передавача під час поширення сигналу до об'єкта радіолокаційного спостереження і назад.

На практиці використовуються різні види періодичної модуляції ЧМ сигналу, наприклад: симетричний та несиметричний пилкоподібні закони, синусоїдальний закон.

Закон модуляції зонduючого сигналу в разі симетричного пилкоподібного закону модуляції описується таким чином:

$$f_1(t) = \begin{cases} f_0 - \Delta f_m / 2 + 2\Delta f_m t / T_m & \text{при } 0 < t < T_m / 2; \\ f_0 + \Delta f_m / 2 - 2(\Delta f_m t / T_m)(t - T_m / 2) & \text{при } T_m / 2 < t < T_m; \\ f_1(t + kT_m) & \text{при будь-якому } t, \end{cases} \quad (3.1)$$

де f_0 - центральна (несуча) частота ЧМ сигналу;

$\Delta f_m = f_{\max} - f_{\min}$ - девіація частоти;

T_m - період частотної модуляції.

Узагальнену структурну схему такої РЛС (дальноміра) показано на рис. 3.1. Генератор модулюючого сигналу формує послідовність пилкоподібних імпульсів із заданими параметрами, що модулює за частотою зонduючий сигнал. Крім того, сигнал передавача подають на вхід приймача (у змішувач) за спеціальною лінією. Відбитий від нерухомого об'єкта радіолокаційного спостереження сигнал, що також подають на вхід приймача, запізнюється на час t_3 . В результаті змішування двох коливань на вході приймача утворюються биття. Миттєва частота биття дорівнює абсолютному значенню різниці миттєвих значень частот випромінюваного і відбитого сигналів $|f_6(t)| = |f_n(t) - f_c(t)|$, хоча формально можна враховувати знак частоти $f_6(t)$.

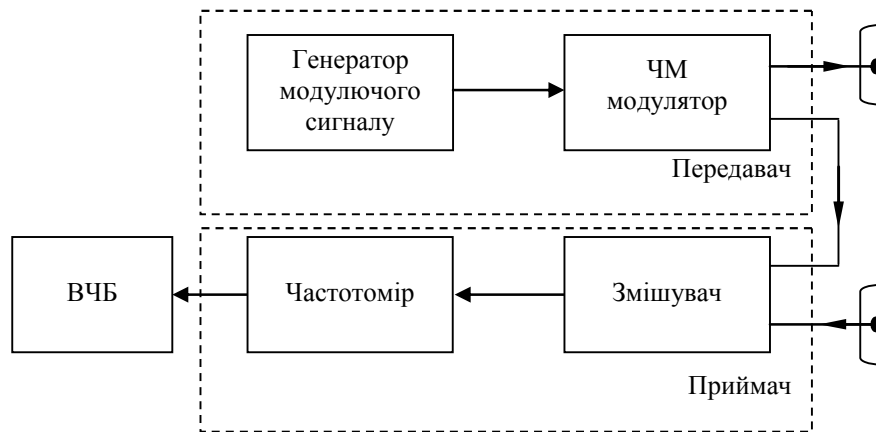


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема РЛС вимірювання дальності з ЧМ до одного об'єкта радіолокаційного спостереження

Частота биття

$$f_{\delta_0} = \frac{4\Delta f_m \cdot f_m}{c} r, \quad (3.2)$$

де Δf_m - девіація частоти;

$f_m = 1 / T_m$ - частота модуляції.

Частота Δf_m складає декілька десятків мегагерц, а f_m - сотні герц.

Після детектування в змішувачі виділяється обвідна биття. Щоб визначити дальність, вимірюють f_{δ_0} за допомогою аналізатора спектра або вимірювача частоти биття (ЗЧБ).

Під час вимірювання дальності частотним методом має місце методична помилка вимірювання дальності, що відповідає (3.2):

$$\sigma_r = \frac{c\Delta f_{\delta_0}}{4\Delta f_m \cdot f_m} = \frac{cf_m}{4\Delta f_m \cdot f_m} = \frac{c}{4\Delta f_m}. \quad (3.3)$$

Мінімальна вимірювана дальність визначається наступним чином

$$r_{\min} = \frac{c\Delta f_{\delta_0 \min}}{4\Delta f_m \cdot f_m} = \frac{c}{4\Delta f_m}. \quad (3.4)$$

У свою чергу максимальна вимірювана дальність буде такою

$$r_{\max} = \frac{c\Delta f_{\delta_0 \max}}{4\Delta f_m \cdot f_m} = \frac{c}{4f_m}. \quad (3.5)$$

2. РЕАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЧАСТОТНИХ РАДІОДАЛЬНОМІРІВ

Реалізація вимірювання частотного биття. Для застосувань, що вимагають незначних розмірів вимірювача, знайшов широке використання простий метод вимірювання частоти биття з рахунком кількості імпульсів.

При цьому перетворений сигнал (рис. 3.2,а) піддається обмеженню і диференціюванню (рис. 3.2, б), після чого позитивні або негативні імпульси запускають формувач, що виробляє стандартні імпульси (певної амплітуди, тривалості і форми). Їх кількість визначається в лічильнику.

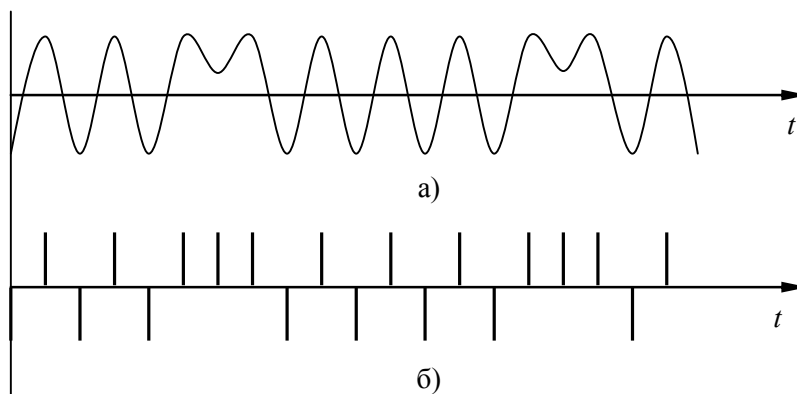


Рисунок 3.2 - Метод підрахунку кількості імпульсів:

а) перетворений сигнал; б) сигнал після обмеження та диференціювання

При симетричному пилкоподібному законі модуляції кількість імпульсів за період модуляції відповідає

$$n_T = f_{\delta_0} \cdot T_m = \frac{4\Delta f_m \cdot r}{c} \quad (3.6)$$

Кількість імпульсів у секунду, тобто середня частота повторення імпульсів, що фіксується лічильником, відповідає такій

$$n_1 = n_T / T_m = \frac{4\Delta f_m \cdot f_m \cdot r}{c} \quad (3.7)$$

В даному випадку незалежно від часу вимірювання має місце методична помилка дискретності слідування відліків. Для зміни відображуваних результатів вимірювання потрібно, щоб за період модуляції кількість імпульсів n_T змінилася принаймні на один. Цей факт вимагає зміни дальності на $\sigma_r = \frac{c}{4\Delta f_m}$.

Спектроаналізатор для частотних радіодальномірів. Частотний дальномір, вихідним пристроєм якого є вимірювач частоти биття, може вимірювати дальність лише до одного об'єкта і тому не має роздільної здатності за дальністю. За необхідності вимірювання дальності до декількох об'єктів вимірювач дальності повинен містити спектроаналізатор, розрахований на послідовний або паралельний аналіз частот биття. Найбільш часто застосовують паралельний аналіз спектра.

Багатоканальний паралельний спектроаналізатор складається із вузькосмугових фільтрів $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n$, детекторів $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ та індикаторів $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$. Сигнал з виходу змішувача потрапляє в набір фільтрів, кожен з яких підключений до детектора.

Смуги пропускання фільтрів примикають одна до одної й охоплюють весь діапазон вимірюваних частот дальності $f_{\delta_0 \max} - f_{\delta_0 \min}$. За номерами індикаторів можна судити про те, до якої ділянки (каналу) дальності відноситься дальність до кожного спостережуваного об'єкта. Індикатори можуть бути також реалізовані з цифровою індикацією виміряної дальності до об'єктів. Чим вужче смуга

пропускання фільтра Δf_ϕ кожного з каналів спектроаналізатора, тим вище роздільна здатність за дальністю і тим менше можливі розбіжності між істиною і вказаними індикатором дальностями до об'єкта радіолокаційного спостереження. Цьому ж сприяє збільшення частоти модуляції і девіації частоти.

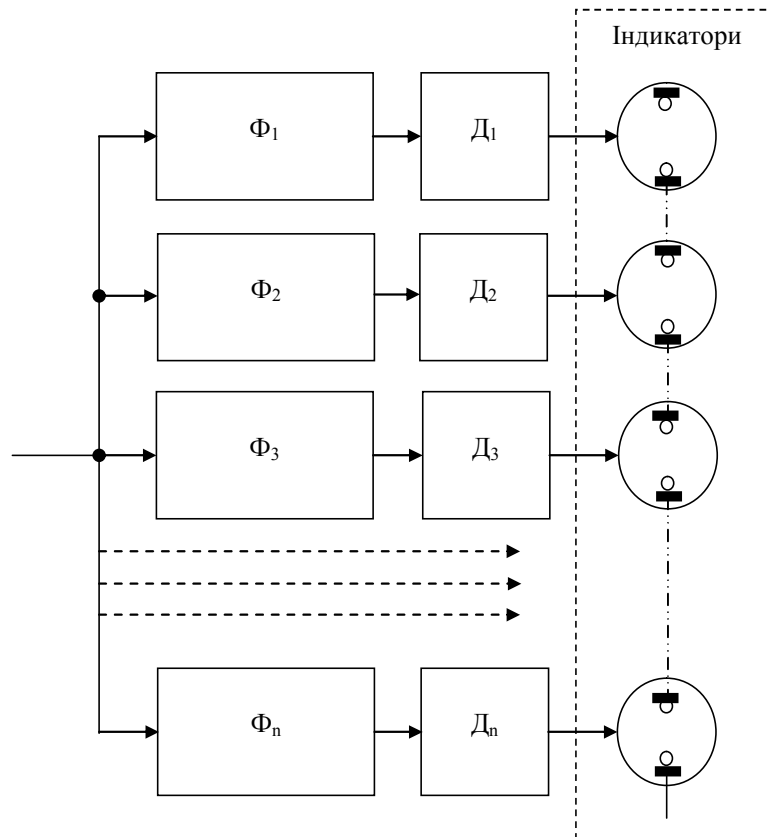


Рисунок 3.3 - Функціональна схема багатоканального паралельного спектроаналізатора

Оцінимо роздільну здатність за дальністю. Два об'єкти можна вирішити за дальністю, якщо відповідні ним частоти $f_{\delta_{01}}$ і $f_{\delta_{02}}$ розрізняються більше, ніж смуга пропускання фільтрів Δf_ϕ , тобто $f_{\delta_{02}} - f_{\delta_{01}} \geq \Delta f_\phi$.

Тому що $f_{\delta_{01}} = \frac{4\Delta f_m \cdot f_m}{c} r_1$; $f_{\delta_{02}} = \frac{4\Delta f_m \cdot f_m}{c} r_2$, тоді умовою розрізнення є

$$r_2 - r_1 \geq \frac{c \cdot \Delta f_\phi}{4\Delta f_m \cdot f_m}.$$

Тобто роздільна здатність відповідає такій:

$$\delta(r) = \frac{c \cdot \Delta f_\phi}{4\Delta f_m \cdot f_m}. \quad (3.8)$$

В оптимальному випадку смуга фільтра має бути узгоджена з часом дії відповідного перетвореного сигналу. Смуга пропускання узгодженого фільтра

$\Delta f_{\text{сф}} \approx 1/T_m = f_m$ і потенційна роздільна здатність $\delta(r)_{\text{пот}} \approx \frac{\Delta f_{\text{сф}}}{4\Delta f_m \cdot f_m} = \frac{c}{4\Delta f_m}$ (для симетричного закону $\delta(r)_{\text{пот}} \approx \frac{c}{2\Delta f_m}$).

Потенційна роздільна здатність збігається з величиною дискретності відліку дальності і мінімальної дальності.

Оцінімо точність методу. Якщо середня частота спектра основних частот биття при вимірюванні дальності f_{ϕ_0} потрапляє у смугу частот фільтра Δf_ϕ , то частота f_{ϕ_0} приймається рівною резонансній частоті цього фільтра. Припустимо, що значення f_{ϕ_0} може відповідати з однаковою ймовірністю будь-якому значенню в межах смуги Δf_ϕ . Тоді з (3.8) отримуємо

$$\sigma_r = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{c \cdot \Delta f_\phi}{4 \cdot f_m \cdot \Delta f_m}. \quad (3.9)$$

Для спрощення спектрального аналізу можна зменшити число фільтрів, але збільшивши при цьому їх смугу пропускання Δf_ϕ . Це призведе до погіршення роздільної здатності і точності.

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожній задачі використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. Частота радіовисотоміра змінюється за симетричним пилкоподібним законом від $(130+N)$ до $(200+M)$ МГц і назад з періодом $(7+M)$ мс. На якій висоті знаходитиметься літак, на якому встановлений цей радіовисотомір, якщо показання його вимірювача частоти биття складає: а) $(230+N)$ Гц; б) $(1000 \cdot M)$ Гц і в) $(5300+N)$ Гц.

2. Радіовисотомір малих висот має два діапазони: $0 \dots (100+N)$ м і $0 \dots (1000+N)$ м. Девіація частоти для першого діапазону дорівнює $(40+M)$ МГц. Визначити девіацію частоти для другого діапазону, якщо період модуляції не змінюється, а різниці частоти прямого і відбитого сигналів однакові для обох діапазонів.

3. У радіовисотомірі малих висот використовується частотна модуляція. При цьому частота сигналу дорівнює $(60+M)$ МГц, частота модуляції дорівнює $(150+M)$ Гц. Визначити різницеву частоту на висоті $(80+N)$ м. Якою має бути частота модуляції, щоб на висоті $(800+N)$ м різницева частота залишилася б такою ж, як на висоті $(80+N)$ м?

4. Два радіовисотоміри характеризуються рівними частотами модуляції $(4 \cdot M)$ кГц і девіацією частоти $(6+M)$ МГц, але різними законами модуляції: перший - пилкоподібний симетричний, другий - пилкоподібний несиметричний. Визначити однозначно вимірювану висоту першого і другого радіовисотомірів і значення максимальної різницевої частоти при положенні літака на максимальній висоті.

5. У РЛС з симетричним пилкоподібним законом зміни частоти коливань $f_m = (200 \cdot M)$ Гц, $\Delta f_m = (100 + N)$ Гц, а дальність до виявленого об'єкта $(10 \cdot N)$ км. Чому дорівнює різницева частота сигналу в приймачі?

6. Частота випромінюваних коливань частотного дальноміра змінюється за синусоїдальним законом

$$f = f_0 + (0,1 \cdot M + N/10) \cdot \Delta f_m \cdot \cos \Omega_m t$$

Як змінюється різницева частота в приймачі дальноміра, якщо дальність до об'єкта радіолокаційного спостереження постійна? Передбачається, що час затримки відбитих сигналів набагато менше періоду частотної модуляції ($t_3 \ll T_m$).

7. У радіоелектронній системі для оцінки дальності до об'єкта радіолокаційного спостереження використовують частотний радіодальномір з симетричним законом модуляції носійного коливання. РЛС проектується для роботи з максимальним значенням часу надходження зонduючого сигналу на вхід приймача радіодальноміра після його випромінювання, яке відповідає $(100 + N)$ мкс, в той час як мінімальне значення цього часу має відповідати $(5 + M)$ мкс. Якими мають бути параметри зонduючого сигналу (частота модуляції, девіація частоти) для такої РЛС?

8. За умов попередньої задачі скільки буде спостерігатись зон обернення в прийнятому зонduючому сигналі, якщо час його надходження на вхід приймача відповідає 75 мкс.

9. Мінімальний час затримки, з яким працює частотний радіодальномір, відповідає $(4 + M)$ мкс. Об'єкт радіолокаційного спостереження перебуває на відстані $(23 + N)$ км від РЛС. Якими будуть значення кількості імпульсів за період модуляції та кількість цих імпульсів за секунду, що будуть фіксуватись вимірювачем частоти биття на базі використання лічильника імпульсів?

10. За умов попереднього завдання якою буде помилка вимірювання дальності в частотному радіодальномірі? Яким чином в цьому випадку можливо зменшити помилку вимірювання дальності в $(1 + M)$, $(3 + M)$ та $(5 + M)$ разів?

11. Для польоту в гірській місцевості на літаку встановлена РЛС з частотною модуляцією. Станція служить для попередження зіткнень. Визначити помилку у свідченнях РЛС по дальності, обумовлену ефектом Допплера, якщо радіальна швидкість літака $(1200 + N)$ км/г, девіація частоти M МГц, період модуляції $(0,001 \cdot M)$ с, середня носійна частота $(440 + N)$ МГц.

12. На літаку встановлена РЛС з частотною модуляцією, використовується для визначення відстаней до об'єктів радіолокаційного спостереження на трасі польоту. Визначити помилку у вимірюванні дальності, якщо швидкість польоту літака $(1000 + N)$ км/г, девіація частоти випромінюваних сигналів M МГц, період модуляції $(0,01 \cdot M)$ с, середнє значення частоти випромінювання $(400 + N)$ МГц.

13. У частотному дальномірі для виділення різницевої частоти є тільки один фільтр, налаштований на частоту f_{ϕ} . Смуга пропускання фільтра Δf_{ϕ} набагато менше можливого діапазону зміни частот:

$$\Delta f_{\phi} \ll (f_{\phi \max} - f_{\phi \min})$$

Як можна забезпечити в такій станції вимірювання дальності об'єктів в усьому робочому діапазоні від $r_{\min}$ до $r_{\max}$?

14. Дальномір, що працює за частотним методом радіодальнометрії, і оснащений багатоканальним паралельним спектроаналізатором має наступні параметри: частота модуляції $f_m = (100 + N)$ Гц, девіація частоти $\Delta f_m = (5 \cdot M)$ МГц, смуга пропускання одного каналу $\Delta f_{\phi} = (5 \cdot M)$ кГц, максимальна частота биття $f_{\phi \max} = (10 \cdot M)$ кГц. Визначити характеристики радіодальноміра: мінімальну і максимальну вимірювану дальність, потенційну роздільну здатність за дальністю, кількість каналів спектроаналізатора.

15. Частота радіовисотоміра змінюється за симетричним пилкоподібним законом від $(100 \cdot M)$ МГц до $(200 \cdot M)$ МГц з періодом N мс. На якій висоті знаходиться літак якщо показання вимірника частоти биття складають N кГц.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід розв'язання та відповіді занести в зошит для практичних занять.

Також має бути проведена відповідна робота для підготовки до виконання лабораторної роботи.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати розділ 2.8 (с. 111) [8]; глава 1 (с. 15) [9], розділ 10.2 (с. 233) [7], розділ 18 (с. 75) [6], розділ 2.4.2 (с. 21) [4], підрозділи 2 (с. 29), 3 (с. 37) та 4 (с. 44) [10] або будь-які інші джерела інформації, наведені, зокрема, у переліку літератури до цього посібника.

Практичне заняття № 4

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ РІЗНИХ ТИПІВ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо точності вимірювання в радіолокаційних станціях різних типів та методів її підвищення.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

На точність вимірювання координат об'єкта радіолокаційного спостереження можуть впливати не лише обмеження конкретного методу реалізації вимірювання координат, але й інші чинники. Саме аналізу цих чинників і присвячено це практичне заняття.

Наявність завад на вході й усередині приймального пристрою призводить до появи випадкових помилок вимірювання параметрів сигналу. Точність вимірювання найчастіше характеризують середньоквадратичною помилкою. Закон розподілу помилок зазвичай є нормальним. В цьому випадку для перерахунку помилок з однієї категорії в іншу може бути використана табл. 4.1.

Щоб, наприклад, виразити квазімаксимальну помилку з вірогідністю 0,9 (90 %) через вірогідну (серединну) помилку, необхідно помножити значення вірогідної помилки на коефіцієнт, що стоїть у вертикальному стовпці з графою "квазімаксимальна, 90%" напроти горизонтальної графи "вірогідна" [9].

Таблиця 4.1 - Таблиця перерахунку помилок

Категорія помилки	Вірогідна	Середньоквадратична	Квазімаксимальна			
			80 %	90 %	95 %	99 %
Вірогідна	1,00	1,48	1,90	2,44	2,91	3,81
Середньоквадратична квазімаксимальна	0,68	1,00	1,28	1,64	1,96	2,57
80%	0,53	0,78	1,00	1,28	1,53	2,01
90%	0,41	0,61	0,78	1,00	1,19	1,56
95%	0,34	0,51	0,65	0,84	1,00	1,31
99%	0,26	0,39	0,50	0,64	0,76	1,00

Чинниками, що впливають на точність вимірювання параметрів сигналу, є - відношення енергії сигналу, що приймається, до енергії шумів, форма зондуєчого сигналу, прийнятий спосіб обробки сигналу, міра досконалості виконання окремих вузлів радіоелектронного вимірювального пристрою, метод відліку і час вимірювання, що допускається, умови поширення радіохвиль.

Точність роботи РЛС може бути визначена експериментально або розрахунковим шляхом. При експериментальному методі багаторазово вимірюються координати якого-небудь еталонного об'єкта за допомогою радіоелектронного

пристрою, знаходяться помилки окремих вимірювань, будується їх закон розподілу й обчислюється середньоквадратична помилка.

Якщо вимірювана координата (параметр) α відома з великою точністю, що перевершує передбачувану точність РЛС, то середньоквадратична помилка може бути обчислена за формулою [9]

$$\sigma(\alpha) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i^2 / (n-1)}, \quad (4.1)$$

а систематична помилка - за формулою

$$\Delta\alpha_{\text{сист}} = \alpha_0 - \alpha_{\text{серед}} \quad (4.2)$$

де $\Delta\alpha_i = \alpha_0 - \alpha_i$ - помилка 1-го вимірювання; α_0 - істинне значення параметра;

α_i - значення параметра, отримане при i -му вимірюванні; $\alpha_{\text{серед}} = \sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i^2 / n$ - середнє значення параметра; n - кількість вимірювання ($n \gg 1$).

Експериментальний метод застосований до вже діючої апаратури. При проектуванні нових РЛС застосовують розрахунковий метод. Він заснований на визначенні окремих складових загальної помилки, відповідних кожному з чинників, які впливають на точність вимірювання.

Загальну помилку вимірювання можна поділити на потенційну помилку, залежну тільки від форми зонduючого сигналу і відношення енергії сигнал/шум, і помилки, що викликаються усіма іншими чинниками. Потенційна помилка визначає граничну точність роботи РЛС за обраних параметрів зонduючого сигналу і шумів [9].

Потенційна середньоквадратична помилка вимірювання координати визначається формою зонduючого сигналу і методом/ підходом вимірювання.

Прикладами такого типу помилки вимірювання координати є такі:

– потенційна середньоквадратична помилка вимірювання дальності при одиночному частотно-модульованому імпульсі з гауссівською формою

$$\sigma(r)_{\text{пот}} = 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} / k_{\text{ст}} \sqrt{\pi \cdot q_0}, \quad (4.3)$$

за відсутності частотної модуляції

$$\sigma(r)_{\text{пот}} = 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} / \sqrt{\pi \cdot q_0}, \quad (4.4)$$

де $q_0 = 2 E_c / N_0$ - відношення сигнал/шум для відомого сигналу;

– потенційна середньоквадратична помилка вимірювання частоти для немодульованих і модульованих одиночних імпульсів визначається формулою:

$$\sigma(\Delta\omega)_{\text{пот}} = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot q_0} / \tau_{\text{имп}}; \quad (4.5)$$

– потенційна середньоквадратична помилка вимірювання радіальної швидкості визначається за формулою:

$$\sigma(\nu_p)_{\text{пот}} = 0,5 \cdot c \cdot \sqrt{\pi \cdot q_0} / \pi \cdot f \cdot \tau_{\text{имп}}; \quad (4.6)$$

де f - частота носійного коливання зонduючого сигналу;

– потенційна середньоквадратична помилка вимірювання кутових координат в оглядовій РЛС при апроксимації обвідної вихідного сигналу кривою Гаусса визначається за формулою:

$$\sigma(\varphi)_{\text{пот}} = \theta_{0,5} / \sqrt{\pi \cdot q_0}, \quad (4.7)$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленості на рівні 0,5 за потужністю;

– середньоквадратичні потенційні помилки вимірювання дальності і швидкості при одночасному їх вимірюванні для одиночного частотно-модульованого імпульсу з формою Гаусса відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} \sigma(r)_{\text{пот}} &= 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} / \sqrt{\pi \cdot q_0}; \\ \sigma(v_p)_{\text{пот}} &= 0,5 \cdot c \cdot k_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\pi \cdot q_0} / \tau_{\text{имп}} \cdot \pi \cdot f = 0,5 \cdot \lambda \cdot k_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\pi \cdot q_0} / \tau_{\text{имп}} \cdot \pi. \end{aligned} \quad (4.8)$$

При немодульованому сигналі слід приймати $k_{\text{ст}} = 1$.

При застосуванні сигналів у вигляді некогерентної пачки імпульсів потенційні помилки вимірювання дальності і швидкості визначаються за тими же формулами, що і для одиночного імпульсу [9].

При сигналі у вигляді когерентної пачки потенційна помилка вимірювання дальності визначається за формулою (7.4), а помилка вимірювання швидкості зменшується приблизно в $N_c T_{\text{имп}} / \tau_{\text{имп}}$ порівняно зі значенням за формулою (7.6), тобто

$$\sigma(v_p)_{\text{пот}} = \frac{c}{2\pi \cdot f \cdot N_c \cdot T_{\text{имп}}} \cdot \sqrt{\pi / q_0} = \frac{\lambda}{2\pi \cdot N_c \cdot T_{\text{имп}}} \cdot \sqrt{\pi / q_0}. \quad (4.9)$$

Результуюча реальна середньоквадратична помилка вимірювання будь-якої координати α може бути представлена у виді

$$\sigma(\alpha) = \sqrt{\sigma^2(\alpha)_{\text{пот}} + \sigma^2(\alpha)_{\text{розп}} + \sum_{i=1}^n \sigma^2(\alpha)_i}, \quad (4.10)$$

де $\sigma(\alpha)_{\text{пот}}$ - потенційна помилка, розрахована за наведеними вище формулами;
 $\sigma(\alpha)_{\text{розп}}$ - помилка через викривлення траєкторій радіохвиль при поширенні;
 $\sigma(\alpha)_i$ - помилка, викликана погіршенням точності в i -му вузлі РЛС; n - загальна кількість вузлів.

Результуючу помилку (7.10) можна представити у виді

$$\sigma(\alpha) = \eta_\alpha \sigma(\alpha)_{\text{пот}}, \quad (4.11)$$

де

$$\eta_\alpha = \sqrt{1 + \left(\sigma^2(\alpha)_{\text{розп}} + \sum_{i=1}^n \sigma^2(\alpha)_i \right) / \sigma^2(\alpha)_{\text{пот}}} \quad (4.12)$$

- коефіцієнт погіршення потенційної точності вимірювання.

У багатьох випадках можна нехтувати помилками поширення, а з апаратних помилок враховувати тільки помилки вихідного пристрою. Тоді

$$\eta_\alpha = \sqrt{1 + \left(\sigma^2(\alpha)_{\text{вп}} \right) / \sigma^2(\alpha)_{\text{пот}}}. \quad (4.13)$$

Значення η_a можуть коливатися в значному діапазоні - від 1 до 10 ... 15.

Помилки, пов'язані з умовами поширення радіохвиль бувають систематичними і випадковими. Систематичні помилки виникають через викривлення траєкторій радіохвиль при поширенні у середовищі зі змінним коефіцієнтом заломлення. Випадкові помилки виникають за наявності на шляху поширення випадкових локальних неоднорідностей [9].

На рис. 4.1а наведені залежності систематичної помилки вимірювання дальності $\Delta(r)$ від висоти H при поширенні в тропосфері, а на рис. 4.1,б - при поширенні в іоносфері для різних кутів місця об'єкта радіолокаційного спостереження $\varphi_{\text{км}}$.

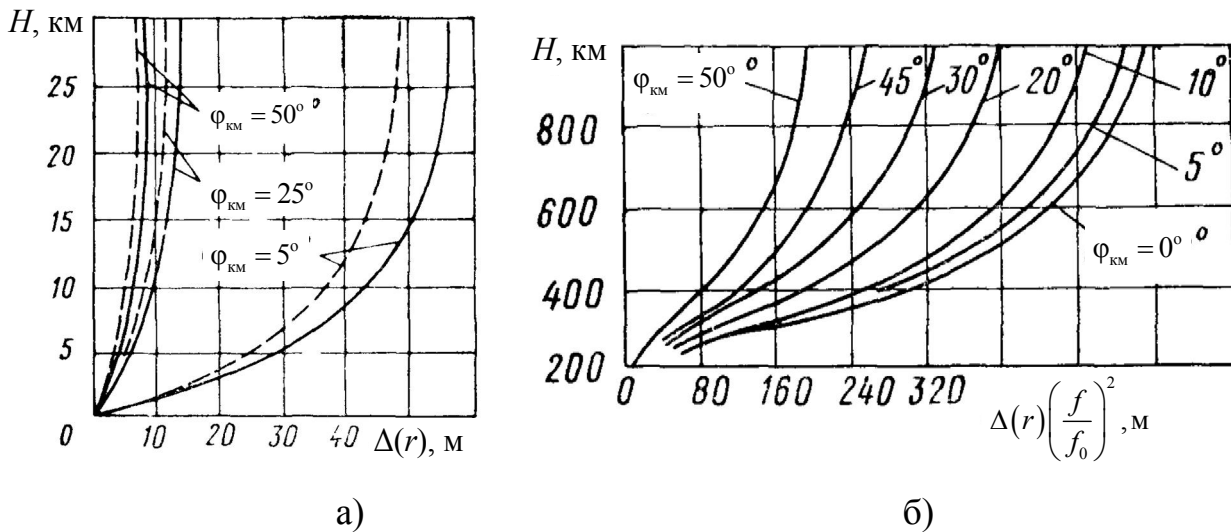


Рисунок 4.1 - Залежність систематичної помилки вимірювання дальності $\Delta(r)$ від висоти об'єкта радіолокаційного спостереження H при:

а) поширенні радіохвиль у тропосфері з відносною вологістю 100% (—) і 0% (---)

б) при поширенні радіохвиль в іоносфері; f - частота РЛС,
 $f_0 \approx 7$ МГц - плазмова частота

На рис. 4.2,а і 4.2,б наведені аналогічні залежності для помилок вимірювання кута місця об'єкта радіолокаційного спостереження $\Delta(\varphi_{\text{км}})$.

На рис. 4.3,а і 4.3,б наведені залежності систематичних помилок вимірювання частоти Допплера $\Delta(F_d)$ від значення носійної частоти f для висоти 30 і 300 км при радіальній швидкості об'єкта радіолокаційного спостереження 6 км/с [9].

Середньоквадратичне значення випадкової помилки у вимірюванні дальності може бути обчислене за формулою:

$$\sigma(r)_{\text{розн}} = 1,3 \cdot \sqrt{\alpha^2 \cdot d \cdot d_0} \quad (4.14)$$

де α^2 - дисперсія показника заломлення в неоднорідності; d - загальна довжина шляху поширення; d_0 - довжина шляху поширення у випадковій неоднорідності.

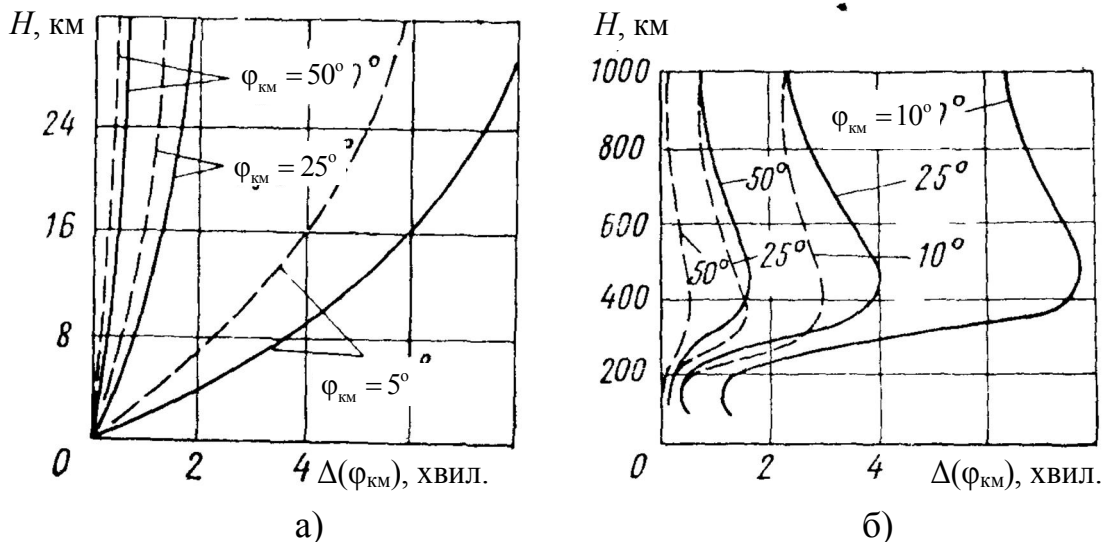


Рисунок 4.2 - Залежність систематичної помилки вимірювання кута місця $\Delta(\varphi_{\text{KM}})$ від висоти об'єкта радіолокаційного спостереження H при поширенні радіохвиль у тропосфері (а) з відносною вологістю 100% (—) і 0% (---) та при поширенні радіохвиль в іоносфері (б) вдень і вночі (---)

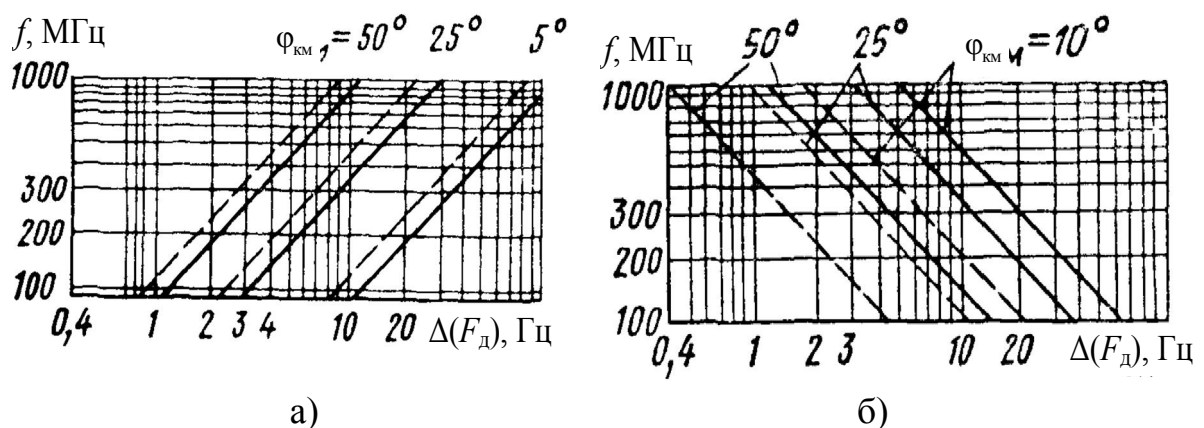


Рисунок 4.3 - Залежність систематичної помилки вимірювання доплерівської частоти $\Delta(F_D)$ від носійної частоти f для об'єкта радіолокаційного спостереження, що летить з радіальною швидкістю 6 км/с на висоті 30 км при відносній вологості 100 % (—) і 0 % (---) (а) та при поширенні радіохвиль в іоносфері (б) вдень (—, висота іонізованих шарів 300 км) і вночі (---, висота іонізованих шарів 250 км)

Аналогічна формула для середньоквадратичного значення помилки вимірювання кута місця має вигляд [9]

$$\sigma(r)_{\text{розн}} = 1,9 \cdot \sqrt{\alpha^2 \cdot d / d_0} . \quad (4.15)$$

Випадкові помилки, що виникають при вимірюванні у самій РЛС, в більшості випадків можуть бути зведені до помилок вихідного пристрою. При використанні індикаторних вихідних пристроїв величина помилок залежить від масштабу шкали, її виду і методу відліку.

При використанні механічної шкали середньоквадратична помилка відліку приблизно може бути оцінена за формулою:

$$\sigma(\alpha)_{\text{інд}} = 0,15 \cdot \Delta l \cdot M_{\alpha}, \quad (4.16)$$

де Δl - відстань між сусідніми поділками шкали; M_{α} - масштаб шкали по координаті α (дальність, кут, швидкість);

– при використанні електронної шкали

$$\sigma(\alpha)_{\text{інд}} = (0,05 \dots 0,1) \cdot \Delta l \cdot M_{\alpha}; \quad (4.17)$$

– при використанні двошкального методу відліку, за грубою і точною (розтягнутою шкалою)

$$\sigma(\alpha)_{\text{інд}} = \sqrt{\sigma^2(\alpha)_{\text{гр}} + \sigma^2(\alpha)_{\text{точн}}}, \quad (4.18)$$

де $\sigma^2(\alpha)_{\text{гр}}$ - помилка відліку за грубою шкалою, що викликається нестабільністю затримки; $\sigma^2(\alpha)_{\text{точн}}$ - помилка відліку за точною шкалою, що приймається рівній помилці інтерполяції і визначається по формулі (4.17).

При використанні електронного візира, що поєднується з відміткою об'єкта радіолокаційного спостереження

$$\sigma(\alpha)_{\text{інд}} = \sqrt{\sigma^2(\alpha)_{\text{нест}} + \sigma^2(\alpha)_{\text{суміщ}} + \sigma^2(\alpha)_{\text{інт}}}, \quad (4.19)$$

де $\sigma^2(\alpha)_{\text{нест}}$ - помилка, що викликається нестабільністю роботи схеми електронного візира ($\approx 0,1$ % від часу затримки); $\sigma^2(\alpha)_{\text{суміщ}}$ - помилка поєднання візиря з відміткою мети (0,3 ... 0,5 від ціни діаметру плями на екрані); $\sigma^2(\alpha)_{\text{інт}}$ - помилка інтерполяції при відліку за шкалою пристрою установки візиря (0,05 ... 0,1 від ціни поділу шкали).

При використанні дискретного вихідного пристрою, що з'єднує РЛС з процесором комп'ютера, середньоквадратична помилка відліку визначається за формулою [9]

$$\sigma(\alpha)_{\text{вп}} = \sqrt{\sigma^2(\alpha)_{\text{дискр}} + \sigma^2(\alpha)_{\text{дж}}}, \quad (4.20)$$

де

$$\sigma^2(\alpha)_{\text{дискр}} = \Delta\alpha_{\text{ет}} / 2\sqrt{3} \quad (4.21)$$

- помилка через дискретність відліку; $\Delta\alpha_{\text{ет}}$ - ціна інтервалу еталонних імпульсів в електронному лічильнику; $\sigma^2(\alpha)_{\text{дж}}$ - помилка через нестабільність частоти еталонних імпульсів, причому у разі стабілізації частоти кварцем

$$\sigma^2(\alpha)_{\text{дж}} \approx (10^{-4} \dots 10^{-5}) \cdot \alpha. \quad (4.22)$$

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

У кожній задачі використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. Визначити вид зонduючого сигналу, що забезпечує найкращу потенційну точність вимірювання, : а) тільки дальності; б) тільки радіальної швидкості; в) дальності і радіальної швидкості.

2. Точно відомий сигнал у вигляді одиночного радіоімпульсу з формою Гаусса тривалістю M мкс і з носійною частотою $(2000 \cdot M)$ МГц виявляється за відношення сигнал/шум $q = (20 + N)$. Знайти потенційні середньоквадратичні помилки вимірювання дальності і радіальної швидкості.

3. Яку тривалість сигналу в попередньому завданні потрібно вибрати, щоб отримати середньоквадратичну помилку у вимірюванні швидкості, рівну $(200 \cdot M)$ м/с? Яка при цьому помилка у вимірюванні дальності?

4. Який вид сигналу слід застосувати, щоб забезпечити точність одночасного вимірювання дальності і швидкості $(20 + N)$ м і $(200 \cdot M)$ м/с відповідно? РЛС працює на довжині хвилі $\lambda = (30 + N)$ см, з частотою імпульсів $F_{\text{імпл}} = (2000 \cdot M)$ Гц і має інтервал однозначного вимірювання дальності $(20,5 + N)$ км.

5. Тривалість імпульсів, вибрана з енергетичної точки зору, має бути не менше $(100 + M)$ мкс, а потенційна середньоквадратична помилка вимірювання дальності не має бути більше $(8 + M)$ м при $q_0 = (20 + N)$. Яке технічне рішення слід застосувати в цьому випадку?

6. Виявляється точно відомий сигнал за відношення сигнал/шум $q = (20 + N)$. Як слід вибрати ширину $\theta_{0,5}$ променя антени, щоб при пеленгації по максимуму мати потенційну середньоквадратичну помилку вимірювання кута не більше $(M+1)^\circ$?

7. Середньоквадратична помилка вимірювання азимута кожної з двох об'єктів радіолокаційного спостереження окремо дорівнює M° . Яка середньоквадратична помилка $\sigma(\varphi_{\text{аз}})$ вимірювання кута між цими об'єктами? Яке її квазімаксимальне значення при вірогідності 0,95?

8. Визначити систематичну помилку вимірювання дальності через викривлення траєкторії радіохвиль, якщо об'єкт радіолокаційного спостереження спостерігається на відстані $(300 + N)$ км і висоті $(20 + M)$ км. Вологість повітря $(40 + N)$ %.

9. Для умов попереднього завдання знайти систематичну помилку у визначенні кута місця об'єкта радіолокаційного спостереження.

10. Визначити середньоквадратичну помилку вимірювання дальності, якщо на шляху поширення довжиною $(300 + N)$ км знаходиться область неоднорідності протяжністю $(M+1)$ км, а дисперсія коефіцієнта заломлення $\overline{\alpha^2} = 10^{-10}$.

11. Визначити середньоквадратичну помилку вимірювання кута місця для умов попереднього завдання.

12. Оцінити середньоквадратичну помилку відліку дальності по індикатору з механічною шкалою, що має граничне значення $(400 + N)$ км й інтервал між ді-

леннями $(12 + M)$ мм. Використовується трубка з діаметром екрану 300 мм, коефіцієнт використання екрану $k_{\text{екр}} = 0,8$.

13. Оцінити результуючу помилку вимірювання дальності в завданні 12, якщо в РЛС використовуються імпульси з формою Гаусса тривалістю $(M+1)$ мкс і сигнал виявляється при $q_0 = (10 + N)$. Визначити коефіцієнт погіршення потенційної точності.

14. Використовуючи умови і дані завдань 12 і 13, змінимо з метою підвищення точності вимірювання метод відліку - застосуємо двошкальний відлік зі ступінчастою затримкою розгортки з $r_{\text{шк}} = (90 + N)$ км. Відлік за цією шкалою ведеться по електронних позначках з інтервалом $(8 + M)$ мм. Визначити результуючу помилку вимірювання дальності і коефіцієнт погіршення точності.

15. Як зміниться помилка вимірювання дальності, визначена в попередньому завданні, якщо відлік за шкалою $r_{\text{шк}} = (90 + N)$ км виробляти не за електронною шкалою, а поєднанням вимірювального імпульсу (електронного візира) з відміткою об'єкта радіолокаційного спостереження з наступним відліком за шкалою потенціометра, що має ціну ділення $(90 + N)$ м? Прийняти якість фокусування $Q_{\text{ф}} = (280 + N)$ і коефіцієнт використання екрану $k_{\text{екр}} = 0,8$.

16. РЛС виявляє об'єкт радіолокаційного спостереження на відстані $(300 + N)$ км. Тривалість зондуючих гауссівських імпульсів $\tau_{\text{имп}} = (M + 1)$ мкс, $q_0 = (15 + N)$. Вихідним пристроєм є преселектор з перетворювачем дальності у двійковий код. Частота еталонних імпульсів тригерного лічильника - $\tau_{\text{имп}} = (M + 4)$ МГц. Визначити середньоквадратичну помилку вимірювання дальності і коефіцієнт погіршення точності.

17. Визначити частоту еталонних імпульсів у перетворювачі дальності, що забезпечує загальну середньоквадратичну помилку вимірювання дальності $\sigma(r) = (N + 10)$ м, якщо в РЛС застосовуються імпульси з формою Гаусса тривалістю $\tau_{\text{имп}} = (0,1 \cdot M)$ мкс і об'єкт радіолокаційного спостереження виявляється на відстані $r = (100 + N)$ км при $q_0 = (15 + N)$.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід рішення та відповіді має бути занести в зошит для практичних занять.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати главу 7 (с. 170) [9], главу 5 (с. 132) [7] або будь-які інші джерела інформації, наведені, зокрема, у переліку літератури до цього посібника.

Практичне заняття № 5

ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо методів оцінки дальності за допомогою імпульсного методу радіодальнометрії, точності та особливостей цього методу й інших практичних питань.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

Найбільш розповсюдженим методом вимірювання дальності є імпульсний метод, за якого аналізується час надходження складових імпульсного сигналу в приймач після його відбиття від об'єкта радіолокаційного спостереження й потім визначається відстань.

Цей імпульсний сигнал, що модулює безперервне колювання, має низку частотних та енергетичних параметрів, що визначають експлуатаційні параметри РЛС.

Частота повторення зондуючих імпульсів:

$$f_r = \frac{1}{T_r}. \quad (5.1)$$

Період d_t , впродовж якого в РЛС здійснюють передавання імпульсу:

$$d_t = \frac{\tau_i}{T_r}. \quad (5.2)$$

Середня випромінювана потужність:

$$P_{\text{серед}} = P_t \cdot d_t, \quad (5.3)$$

де P_t - пікова випромінювана потужність передавача РЛС.

Енергія імпульсу зондуючого сигналу

$$E_p = P_t \cdot \tau = P_{\text{серед}} \cdot T_r = \frac{P_{\text{серед}}}{f_r}. \quad (5.4)$$

Важливим параметром РЛС є роздільна здатність. В радіодальнометрії розглядають роздільну здатність за дальністю.

Роздільною здатністю за дальністю $\delta(r)$ називають метрику, яка описує здатність РЛС виявляти і розрізняти об'єкти радіолокаційного спостереження, розташовані на близькій відстані один від одного, як окремі. Системи радіодальнометрії прийнято характеризувати потенційною (мінімальною) роздільною здатністю за дальністю.

Потенційна роздільна здатність за дальністю $\delta(r)_{\text{пот}}$ визначається як $\delta(r)_{\text{пот}} = c \tau_i / 2$.

Мінімальна дальність дії (мертва зона) імпульсної РЛС $r_{\text{мін}}$ обмежується можливістю роздільного приймання зондуючого і відбитого від найближчого

об'єкта імпульсів. Дальність $r_{\min}$ більше відстані $\delta(r)_{\text{пот}}$, характеризуючої роздільну здатність дальноміра, що пов'язана з реалізацією РЛС із застосуванням антенного перемикача. Особливістю таких реалізацій є те, що РЛС під час випромінювання зондуючих імпульсів протягом якогось часу не має можливості приймати сигнали, при цьому, якщо об'єкт радіолокаційного спостереження знаходиться на відстані, меншому $r_{\min}$, то його не буде виявлено. Крім того, необхідно мінімізувати вплив передаваного сигналу на сигнали, що приймаються. Реалізувати все це можна застосуванням якогось часового інтервалу, що називають *часом відновлення* t_b .

Звідси мінімальна дальність визначається таким чином

$$r_{\min} = c(\tau_i + t_b) / 2. \quad (5.5)$$

Межа однозначного відліку дальності $r_{\text{одн}}$. Кожна РЛС відповідно до своїх енергетичних характеристик має максимальну дальність дії $r_{\text{макс}}$, якій відповідає час затримання сигналу $t_{3\text{макс}} = 2r_{\text{макс}}/c$. Необхідно, щоб період слідування імпульсів T_r був більший, ніж $t_{3\text{макс}}$. Якщо ця умова не дотримується, то сигнал, відбитий від досить віддаленого об'єкта, приймається після випромінювання чергового зондуючого імпульсу і відлік дальності стає неоднозначним.

Таким чином, однозначний відлік дальності обмежується періодом T_r :

$$r_{\text{одн}} \leq cT_r / 2 = c / 2f_r \quad (5.6)$$

Потенційна точність вимірювання дальності виражається формулою, справедливою для всіх методів дальнометрії:

$$\sigma_r = \frac{c\tau_i}{2\sqrt{\pi q_0}} = \frac{c}{2\Delta f_e \sqrt{\pi q_0}} \quad (5.7)$$

де σ_r - потенційна середньоквадратична помилка визначення дальності; τ_i - тривалість сигналу; Δf_e - ефективна ширина спектра сигналу.

Загальна закономірність саме така: *потенційна точність вимірювання дальності, як і роздільна здатність РЛС за дальністю, тим вище, чим більше відношення сигнал/шум і менше тривалість сигналу (ширше його спектр).*

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожній задачі використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. Визначити час затримки відбитого імпульсу і максимальну частоту повторення зондуючих імпульсів при визначенні дальності до місяця (середня відстань до місяця дорівнює 385 000 км).

2. Передавач РЛС формує радіоімпульси тривалістю $(1+M)$ мкс. Максимальна дальність виявлення РЛС складає $(100+N)$ км. Визначити сумарний час випромінювання передавача РЛС за $(7+M)$ годин його роботи.

3. Діапазон однозначного визначення дальності складає $(100 + N)$ км. Ширина смуги частот імпульсного дальноміра становить M МГц. Визначити частоту, період повторення імпульсів та їх тривалість, а також роздільну здатність по дальності.

4. Період повторення зондуючих імпульсів РЛС у декілька разів менше максимального часу затримки відбитих сигналів. Чому дорівнює час затримки відбитих сигналів, вимірюваний подібною РЛС? Пояснити графічно.

5. Розроблюваний імпульсний радіодальномір має вести спостереження за трьома об'єктами радіолокаційного спостереження одночасно на максимальній відстані $(8 + N)$ км. Енергетичними параметрами (пікова та середня потужність) задатись самостійно з огляду типових потужностей РЛС. Якими мають бути розміри об'єктів радіолокаційного спостереження щоб вони спостерігались як окремі?

6. За умов завдання 5 визначити, за яких розмірів об'єкти не будуть розрізняватись як окремі?

7. За умов завдання 5 визначити, за однакових розмірів об'єктів радіолокаційного спостереження, на якій мінімальній відстані вони мають розташовуватись, щоб їх розрізняли як окремі об'єкти (випадок 1) та один великий об'єкт (випадок 2)? Розглянути обидва випадки.

8. Передавач імпульсної РЛС з піковою потужністю $P_t = (N + M + 2)$ кВт випромінює дві послідовності імпульсів з частотами $f_{r1} = M$ кГц і $f_{r2} = N \cdot 10$ кГц. Визначити необхідну ширину імпульсів та їх енергію для кожної послідовності, якщо середня випромінювана потужність передавача постійна та відповідає величині $P_{\text{серед}} = \frac{(N + M + 2)}{10}$ кВт.

9. Обчислити необхідні параметри випромінюваного сигналу РЛС - частоту повторення імпульсів f_r , T , ΔR , τ для заданих значень діапазону відстаней однозначного вимірювання дальності $R_u = (N + M) \cdot 10$ км і ширини смуги частот $B = \frac{N}{30}$ МГц.

10. Розрахувати потенційні роздільну здатність за дальністю і середньоквадратичну помилку вимірювання дальності, мінімальну дальність і межу однозначного відліку вимірюваної дальності за наступних вихідних даних імпульсного дальноміра: тривалість імпульсу $\tau_{\text{имп}} = N$ мкс, час відновлення $t_v = (M + 0,5)$ мкс, частота дотримання імпульсів $f_r = N \cdot 100$ Гц і відношення сигнал/шум $q_0 = (N + M)$.

11. Знайти тривалість зондуючого імпульсу $\tau_{\text{имп}}$, за якого буде забезпечуватись роздільна здатність за тривалістю $\Delta r_{\text{мін}} \leq 15$ м.

12. Відстань між Місяцем і Землею 385000 км. Знайти частоту повторення імпульсів, за якої забезпечуватиметься однозначне вимірювання дальності до місяця.

13. У скільки разів імпульсна випромінювана потужність буде більше середньої випромінюваної потужності, якщо $r_{\text{макс}} = (100 + N)$ км, $\delta(r)_{\text{пот}} \leq (75 + M)$ м.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід рішення та відповіді занести в зошит для практичних занять.

Також має бути проведена відповідна робота для підготовки до виконання лабораторної роботи.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати розділ 1.1 (с. 15) [8], главу 1 (с. 15) [9], розділ 10.3 (с. 240) [7], розділи 16 (с. 61) та 17 (с. 66) [6], розділ 2.4.3 (с. 23) [4], підрозділ 1 (с. 48) [10] або будь-які інші джерела інформації, наведені, зокрема, у переліку літератури до цього посібника.

Практичне заняття № 6

РАДІОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ПЕЛЕНГАЦІЇ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо фазових та амплітудних методів оцінки напрямку на об'єкт радіолокаційного спостереження за допомогою радіопеленгації.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

1. ПРИНЦИП ФАЗОВОГО МЕТОДУ РАДІОПЕЛЕНГАЦІЇ

При пеленгації фазовим методом застосовують антенну систему, яка дозволяє розрізняти сигнали, що надходять з різних напрямів, шляхом аналізу фаз сигналів, що приймаються декількома антенами.

Відстань між антенами має відповідати відстані b , що називається базою системи (рис. 6.1). Антену 1 віддалено від джерела випромінювання відносно антени 2 на відстань $\Delta r = b \cdot \sin \alpha$, яка відповідає різниці часу приходу коливань на вказані вібратори:

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c} = \frac{b}{c} \cdot \sin \alpha. \quad (6.1)$$

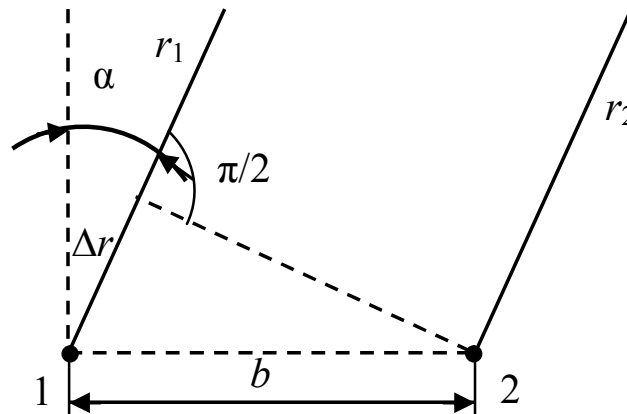


Рисунок 6.1 – Вимірювання пеленга на об'єкт фазовим методом

При цьому фази коливань з виходу антени 1 та антени 2 відрізняються на величину

$$\Delta \varphi = 2\pi f_0 \Delta t = 2\pi \frac{b}{\lambda} \sin \alpha. \quad (6.2)$$

де λ - довжина хвилі;

$\Delta \varphi$ - різниця фаз.

За виміряною різницею фаз та відомими базою та довжиною хвилі можливо визначити величину α , що характеризує напрям на об'єкт.

Радіопеленгатори характеризують пеленгаційною характеристикою та пеленгаційною чутливістю. Різні реалізації фазового радіопеленгатора мають різ-

ні характеристики вказаного типу. Під час практичних занять пропонується розглянути дві з них, наведені на с. 71 методичного посібника [9] – з фазообертачем та без нього.

Пеленгаційна характеристика $F_1(\alpha)$ фазового радіопеленгатора без фазообертача (випадок 1) визначається виразом:

$$F_1(\alpha) = \cos \left(2\pi \left(\frac{b}{\lambda} \right) \sin \alpha \right). \quad (6.3)$$

Для випадку фазового радіопеленгатора з фазообертачем (випадок 2) пеленгаційна характеристика відповідає такій:

$$F_2(\alpha) = \sin \left(2\pi \left(\frac{b}{\lambda} \right) \sin \alpha \right). \quad (6.4)$$

Чутливість пеленгації визначається як крутизна характеристики пеленгації при нульовому значенні кута, коли антенна система направлена на об'єкт випромінювання.

У випадку 1 чутливість пеленгації визначається таким чином:

$$S_1 = \left. \frac{dF_1(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = 0. \quad (6.5)$$

А у випадку 2 цей параметр буде іншим

$$S_2 = \left. \frac{dF_2(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \frac{2\pi b}{\lambda} \quad (6.6)$$

й буде тим вище, чим більше відношення бази системи до довжини хвилі.

Отже, для збільшення точності вимірювання кута слід збільшувати довжину бази по відношенню до довжини хвилі. Проте вже при $b > \lambda/2$ з'являється неоднозначність вимірювання кута. Дійсно, однозначне визначення різниці фаз коливань, що приймаються, можливо лише в межах 2π , а при використанні фазового детектора - лише в межах π . Діапазон же максимальної зміни різниці фаз складає

$$\Delta\phi_{\max} - \Delta\phi_{\min} = \frac{2\pi b}{\lambda} - \left(-\frac{2\pi b}{\lambda}\right) = \frac{4\pi b}{\lambda}. \quad (6.7)$$

Враховуючи це, умова однозначності вимірювання кута є такою:

$$\alpha_{\text{одн}} = \frac{\pi\lambda}{2\pi b} = \frac{\lambda}{2b};$$

$$\frac{4\pi b}{\lambda} \leq 2\pi. \quad (6.8)$$

Тобто бачимо, що однозначні показання пеленгатора можливо отримати, якщо кут $2\pi b\alpha/\lambda$ не виходить за межі π (від $-\pi/2$ до $\pi/2$).

З (6.8) отримуємо, що

$$b \leq \frac{\lambda}{2}. \quad (6.9)$$

При його невиконанні з'являються зони неоднозначності, число яких

$$N = E\left(\frac{2b}{\lambda}\right) + 1 \approx \frac{2b}{\lambda}, \quad (6.10)$$

де $E(x)$ – ціла частина від числа x .

Потенційна (мінімальна) середньоквадратична величина помилки вимірювання кута характеризується таким чином:

$$\sigma_{\alpha_{\min}} = \frac{\lambda}{2\pi b} \cos \alpha \sqrt{q}, \quad (6.11)$$

де q – відношення сигнал/шум.

Тобто помилка тим менше, чим більше відношення сигнал/шум та відношення бази до довжини хвилі, а також чим менше відхиляється напрям на об'єкт радіолокаційного спостереження від перпендикуляра до бази антен (менше α).

2. ПРИНЦИПИ АМПЛІТУДНИХ МЕТОДІВ РАДІОПЕЛЕНГАЦІЇ

Крім фазового методу вимірювання кутових координат об'єкта радіолокаційного спостереження на практиці отримали широке використання амплітудні методи радіопеленгації. Ці методи, в основному, базуються на використанні направлених антен у станції радіолокації спостереження та аналізі змінення характеристик діаграм направленості.

Точність вимірювання за амплітудної радіопеленгації визначається діаграмою направленості. Вона визначається виразом

$$f(\alpha) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \alpha\right) / \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \alpha\right) \quad (6.12)$$

Оскільки, типово для антени РЛС (зазвичай працюють у діапазоні НВЧ) розміри розкриву значно перевищують довжину хвилі ($D \gg \lambda$), то $\sin \alpha \approx \alpha$. Тоді перший нуль діаграми направленості знаходиться на відстані $\alpha = \frac{\lambda}{D}$.

Важливим параметром є ширина діаграми направленості антени з розмірами розкриву D . Ширина діаграми направленості (на рівні 0,707 та при довжині хвилі λ) приблизно дорівнює

$$\theta_{\alpha} = \frac{\lambda}{D}. \quad (6.13)$$

Направлені властивості антени дозволяють отримати кутове “зabarвлення” сигналу, що приймається. Сенс забарвлення полягає в тому, що амплітуда і фаза сигналу на виході антени залежать від кутової координати джерела випромінювання.

За способом реалізації амплітудний метод прийнято класифікувати на:

- метод максимуму;
- метод мінімуму;
- метод порівняння амплітуд сигналів (рівносигнальний метод);
- сумарно-різнецевий метод.

Більш детально методи розглянуто на с. 78 методичного посібника [9].

Пеленгаційна характеристика $F_1(\alpha)$ радіопеленгатора, що працює за методом максимуму, визначається виразом:

$$F_1(\alpha) = \cos \left(\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sin \alpha \right). \quad (6.14)$$

Для випадку радіопеленгатора, що працює за методом мінімуму, пеленгаційна характеристика відповідає такій:

$$F_2(\alpha) = \sin \left(\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sin \alpha \right). \quad (6.15)$$

Якщо ж в амплітудному радіопеленгаторі використовують сумарно-різнецевий метод, тоді отримаємо таку пеленгаційну характеристику:

$$F_3(\alpha) = \operatorname{tg} \left(\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sin \alpha \right). \quad (6.16)$$

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожному завданні використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком у навчальній групі; M - номер групи.

1. Побудувати діаграму направленості антени, що працює в діапазоні НВЧ, з розмірами розкриву $(4+M)$ м. Якою має бути ширина діаграми направленості такої РЛС щоб точність вимірювання була достатньо високою?

2. У фазовому пеленгаторі з робочою частотою $f_0 = ((N \cdot M) \cdot 100)$ МГц була прийнята відбита від об'єкта електромагнітна хвиля: в антені 1 через $(N+M)/2$ нс, а в антені 2 - через $N/30$ нс. Визначити, чи буде така радіолокаційна система однозначно вимірювати напрям на об'єкт, подати зафіксовані показання індикатора фазового пеленгатора. В тому разі, якщо виявилось, що система не забезпечує однозначного вимірювання, тоді необхідно вказати, за яких умов цей недолік буде усунено.

3. Визначити середньоквадратичну помилку при пеленгації фазовим методом за відношення сигнал/шум у каналі $q = (N \cdot M + 5)$, відношенні $b/\lambda = 10$ та $\alpha = N$.

4. Визначити азимут об'єкта спостереження при роботі фазового радіопеленгатора. База системи складає $(10+M)$ см. Частота носійної пеленгатора $(45+N)$ МГц. Різниця фаз становить $(1+M)^\circ$.

5. Пеленгація проводиться у горизонтальній площині у секторі $\pm (55+N)^\circ$ фазовим методом. Середньоквадратична помилка визначення кута на краях сектора складає $0,5^\circ$. Визначити необхідне рознесення антен для за-

безпечення заданої точності пеленгації. Визначити сектор однозначного пеленгування при отриманому рознесенні антен.

6. Побудувати характеристику пеленгації фазового кутомірного пристрою (по виходу фазового детектора) без фазообертача при зміні напрямку на об'єкт радіолокаційного спостереження в межах від $-(15+N)^\circ$ до $(15+N)^\circ$. Довжина хвилі дорівнює $(9,2+M)$ см, відстань між антенами $(55+M)$ см. Визначити сектор неоднозначності вимірювання кута.

7. Побудувати характеристику пеленгації фазового кутовимірного пристрою (по виходу фазового детектора) з застосуванням фазообертача при зміні напрямку на об'єкт радіолокаційного спостереження в межах від $-(20+N)^\circ$ до $(20+N)^\circ$. Довжина хвилі дорівнює $(12,2+M)$ см, відстань між антенами $(60+M)$ см. Визначити сектор однозначності вимірювання кута.

8. Побудувати пеленгаційну характеристику та визначити пеленгаційну чутливість амплітудних пеленгаторів, що працюють за методом максимуму, мінімуму та сумарно-різнецевого методу за розмірів розкриву антени $(45+M)$ см, довжини хвилі $(10+N)$ см. В чому полягають переваги сумарно-різнецевого методу амплітудної радіопеленгації порівняно з іншими наведеними методами?

9. Визначити потенційну роздільну здатність радіопеленгатора, який працює за методом мінімуму і що має антену діаметром $(10+M)$ м при довжині хвилі $(10+N)$ см.

10. Визначити потенційну роздільну здатність радіопеленгатора, який працює за методом максимуму і що має антену діаметром $(10+M)$ м при довжині хвилі $(10+N)$ см.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід розв'язання та відповіді занести в зошит для практичних занять.

Також має бути проведена відповідна робота для підготовки до виконання лабораторної роботи.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати главу 1 (с.15) [9], главу 11 (с. 252) [7], розділи 21 (с. 87) та 22 (с. 91) [6], розділ 2.5 (с. 25) [4], с. 68-87 [10] або будь-які інші джерела інформації, наведені, зокрема, у переліку літератури до цього посібника.

Практичне заняття № 7

РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ У РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ

Мета заняття: вирішення практичних завдань, що дозволять закріпити теоретичні знання щодо основних чинників, які впливають на роздільну здатність радіолокаційної станції, а також нададуть можливість визначати характеристики РЛС за цим параметром при різних зондуючих сигналах.

КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

Роздільна здатність - одна з найважливіших характеристик радіолокаційних систем, що визначає здатність роздільного спостереження об'єктів, які мають малу відмінність у дальності, кутових координатах і швидкості.

Реальна роздільна здатність РЛС за будь-якою координатою α може бути представлена у виді

$$\delta(\alpha) = \delta(\alpha)_{\text{пот}} + \sum_{i=1}^m \delta(\alpha)_i = \gamma_{\alpha} \delta(\alpha)_{\text{пот}}, \quad (7.1)$$

де $\delta(\alpha)_{\text{пот}}$ - потенційна роздільна здатність, що визначається формою сигналу і відношенням сигнал/ шум; $\delta(\alpha)_i$ - погіршення роздільної здатності в i -му вузлі пристрою оброблення сигналів; n - кількість вузлів пристрою оброблення сигналів [9];

$$\gamma_{\alpha} = 1 + \sum_{i=1}^m \delta(\alpha)_i / \delta(\alpha)_{\text{пот}} \quad (7.2)$$

- коефіцієнт погіршення потенційної роздільної здатності за параметром α .

Зазвичай найбільші погіршення вносить вихідний пристрій, тому можна прийняти

$$\delta(\alpha) = \delta(\alpha)_{\text{пот}} + \delta(\alpha)_{\text{вп}}; \quad (7.3)$$

$$\gamma_{\alpha} = 1 + \delta(\alpha)_{\text{вп}} / \delta(\alpha)_{\text{пот}}. \quad (7.4)$$

При використанні у вихідних пристроях електронно-променевих трубок найбільше погіршення роздільної здатності вноситься за рахунок кінцевих розмірів плями на екрані (мішені).

При автоматичному зніманні координат у пристрої, що поєднує РЛС з цифровою обчислювальною машиною, реальна роздільна здатність визначається розміром інтервалу між еталонними імпульсами, за якими визначають параметр α [9].

При наближеній оцінці потенційної роздільної здатності зазвичай вважають відношення енергій зондуючого сигналу і шуму великим та нехтують шумовою складовою вихідної напруги.

Роздільна здатність за дальністю - мінімальна відстань між двома об'єктами радіолокаційного спостереження, що мають відносно РЛС однакові кутові координати, за якої ще можливе роздільне спостереження цих об'єктів.

Роздільна здатність за дальністю складається з двох складових:

- а) $\delta(r)_{\text{пот}}$ - потенційна, тобто максимально досяжна для даної РЛС, роздільна здатність за дальністю;
- б) $\delta(r)_{\text{інд}}$ - індикаторна роздільна здатність, обумовлена характеристикою індикатора.

Потенційна роздільна здатність за дальністю визначається тривалістю зондуючого сигналу та його формою. Формули для обчислення потенційної роздільної здатності наведені у відповідних практичних заняттях цього посібника.

Наприклад, величина потенційної роздільної здатності за дальністю для прямокутного сигналу визначається формулою

$$\delta(r)_{\text{пот}} = \frac{c \cdot \tau_{\text{имп}}}{2}. \quad (7.5)$$

Величина потенційної роздільної здатності за дальністю для сигналу Гаусса визначається формулою

$$\delta(r)_{\text{пот}} = 0,66 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} \quad (7.6)$$

Величина потенційної роздільної здатності за дальністю для сигналу у вигляді імпульсу форми Гаусса з внутрішньоімпульсною лінійною частотною модуляцією дорівнює

$$\delta(r)_{\text{пот}} = 0,66 \cdot \frac{c \cdot \tau_{\text{имп}}}{k_{\text{ст}}} = 0,66 \cdot \frac{c}{\Delta f_{\text{м}}}, \quad (7.7)$$

де $\Delta f_{\text{м}}$ - девіація частоти; $k_{\text{ст}}$ - коефіцієнт стиснення за тривалістю.

Індикаторна роздільна здатність за дальністю залежить від розміру електронної плями на індикаторі. Чим менше розмір електронної плями, тим краще роздільна здатність. Для індикатора колового огляду індикаторна роздільна здатність визначається таким чином [9]:

$$\delta(r)_{\text{інд}} = k \cdot d_n, \quad (7.8)$$

де $k = \frac{2 \cdot r_{\text{мах}}}{d_{\text{екр}}}$; d_n - діаметр плями (позначки); $d_{\text{екр}}$ - діаметр екрана; $r_{\text{мах}}$ - максимальна дальність дії РЛС.

Діаметр плями у свою чергу може бути знайдений як $d_n = \frac{d_{\text{екр}}}{Q}$, де Q - якість фокусування електронно-променевої трубки.

Таким чином, реальна роздільна здатність за дальністю визначається таким чином [9]:

$$\delta(r)_{\text{реал}} = \delta(r)_{\text{пот}} + \delta(r)_{\text{інд}}. \quad (7.9)$$

Роздільна здатність за кутовими координатами (азимута і кута місця) - це мінімальний кут між двома об'єктами радіолокаційного спостереження, що знаходяться на одній дальності відносно РЛС, за якої ще можливе їх роздільне спостереження.

Аналогічно роздільній здатності за дальністю, роздільна здатність за кутовими координатами складається з двох складових:

а) $\delta(\alpha)_{\text{пот}}, \delta(\beta)_{\text{пот}}$ - потенційна роздільна здатність по азимуту й куту місця відповідно, тобто максимально досяжна для даної РЛС роздільна здатність;

б) $\delta(\alpha)_{\text{інд}}, \delta(\beta)_{\text{інд}}$ - індикаторна роздільна здатність по азимуту й куту місця відповідно.

Потенційна роздільна здатність за кутовими координатами для оглядової РЛС при апроксимації діаграми направленості кривою Гаусса дорівнює

$$\delta(\alpha)_{\text{пот}} = 1,3 \cdot \theta_{0,5}, \quad (7.10)$$

а при прямокутній апроксимації

$$\delta(\alpha)_{\text{пот}} = \theta_{0,5}, \quad (7.11)$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленості антени у відповідній площині на рівні 0,5.

Індикаторна роздільна здатність за кутовими координатами залежить від дальності об'єкта радіолокаційного спостереження від початку розгортки:

$$\delta(\alpha)_{\text{інд}} = 0,573 \cdot \frac{r_{\text{шк}}}{r_{\text{об}} - r_{\text{затр}}} \quad (7.12)$$

де $r_{\text{шк}}$ - відображена на шкали індикатора дальність; $r_{\text{об}}$ - дальність до об'єкту радіолокаційного спостереження; $r_{\text{затр}}$ - відстань, що відповідає затримці початку розгортки індикатора по дальності.

Таким чином, реальна роздільна здатність за кутовими координатами визначається таким чином [9]:

$$\delta(\alpha)_{\text{реал}} = \delta(\alpha)_{\text{пот}} + \delta(\alpha)_{\text{інд}} \quad (7.13)$$

Роздільна здатність за швидкістю - мінімальна відмінність у швидкостях двох об'єктів радіолокаційного спостереження, що знаходяться на одній дальності і мають однакові кутові координати відносно РЛС, за якої ще можливе роздільне спостереження цих об'єктів.

Роздільна здатність за швидкістю залежить від ширини спектра сигналу. Чим вужче спектр зондуючого сигналу, тим вище роздільна здатність за швидкістю. У свою чергу ширина спектра сигналу залежить від його тривалості.

Потенційну роздільну здатність за швидкістю погіршують вихідні пристрої, такі як лінійка фільтрів Допплера або стежачий фільтр. В обох випадках роздільна здатність індикаторного пристрою визначається шириною смуги пропускання фільтрів.

Потенційна роздільна здатність за швидкістю визначається алгоритмом вимірювання швидкості, який використано в РЛС. Відповідні аналітичні співвідношення будуть визначені під час розгляду алгоритмів вимірювання швидкості в частині 2 цього методичного посібника.

Реальна роздільна здатність за швидкістю визначається таким чином [9]:

$$\delta(v)_{\text{реал}} = \delta(v)_{\text{пот}} + \delta(v)_{\text{інд}} \quad (7.14)$$

ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

В кожному завданні використано параметри M та N . Під час виконання самостійної роботи слід використовувати такі їх значення: N - номер студента за порядком в навчальній групі; M - номер групи.

1. Необхідно забезпечити потенційну роздільну здатність РЛС за дальністю не гірше $(50 + N)$ м. Яка має бути тривалість немодульованого зонduючого імпульсу з прямокутною і гауссівською обвідною?

2. РЛС випромінює зонduючі імпульси тривалістю $(2 + M)$ мкс. Для виявлення об'єктів використовується індикатор колового огляду з робочим діаметром екрану $(110 + N)$ мм. Діаметр електронної плями складає 0,4 мм. Чи можна окремо спостерігати позначки від двох об'єктів радіолокаційного спостереження, що летять один за одним у напрямі РЛС на відстані $(600 + N)$ м один від одного, якщо спостереження ведеться на шкалах $(1 + N)$ км і $(1 + N) \cdot 10$ км?

3. РЛС з індикатором колового огляду має наступні характеристики: тривалість зонduючих імпульсів M мкс, діаметр плями 0,5 мм, діаметр екрана $(200 + N)$ мм. Визначити межі шкали дальності для забезпечення роздільної здатності для об'єктів, що летять у напрямі РЛС на відстані $(300 + N)$ м.

4. Визначити роздільну здатність РЛС по дальності, якщо відомо, що передавач генерує радіоімпульси прямокутної форми, середня потужність, споживана передавачем від джерела живлення, складає $(200 + N)$ Вт. Потужність радіоімпульсу $(200 + N) \cdot 10$ кВт, середній ККД при перетворенні енергії джерела живлення в енергію високочастотних коливань 0,52. У РЛС застосований індикатор колового огляду з діаметром екрана $(300 + M)$ мм, діаметром електронної плями 0,5 мм. Максимальна дальність виявлення об'єктів складає $(400 + M)$ км.

5. Проектована станція радіолокації повинна мати мінімальну дальність дії $(160 + M)$ м і роздільна здатність за дальністю не гірше $(150 + N)$ м. Визначити необхідну тривалість імпульсу, якщо час відновлення розрядника, вживаного як антенний перемикач, дорівнює $(2 \cdot M)$ мкс.

6. Визначити можливо найбільш високу роздільну здатність РЛС за дальністю, якщо тривалість прямокутних імпульсів складає $(2 \cdot M)$ мкс, діаметр екрану індикатора колового огляду $(260 + N)$ мм, діаметр електронної плями 0,5 мм. У станції застосовується індикатор колового огляду з шкалами 30, 150 і 300 км.

7. Визначити роздільну здатність станції радіолокації за дальністю, якщо рівень середньої потужності передавача по відношенню до одного мВт складає 50 дБ, потужність в імпульсі $(78 + M)$ кВт, частота повторення зонduючих імпульсів $(1200 + N)$ Гц.

8. Вимагається забезпечити потенційну роздільну здатність за дальністю не гірше $(3 + M)$ м, причому з точки зору потрібної дальності виявлення тривалість сигналів має бути не менше $(9 + M)$ мкс. Чи буде виконано одночасно ці вимоги при застосуванні немодульованих імпульсів? Якщо ні, то сигнал якого виду слід вибрати для задоволення цих вимог?

9. Чи будуть два об'єкти спостерігатися на індикаторі колового огляду окремо, якщо вони знаходяться під кутом $4,5^\circ$ по азимуту один відносно одного на дальності $(10+N)$ км. Ширина діаграми направленості антени РЛС складає $(2+M)^\circ$. Дальність, визначувана на індикаторі колового огляду, складає $(200+M)$ км. Яку затримку запуску розгортки за дальністю необхідно ввести, щоб забезпечувалася роздільна здатність об'єкта по азимуту.

10. На поверхні річки для імітації наявності моста розташували відбивачі з відстанню між ними $(450+N)$ м. Розвідувальний літак пролетів спочатку під кутом $(20+N)^\circ$ по азимуту по відношенню до річки, потім уперек її. Чи буде введений в оману оператор РЛС літака, якщо РЛС випромінює зондуючі імпульси тривалістю $(2+M)$ мкс? Характеристики індикатора колового огляду (ІКО): діаметр екрану індикатора колового огляду $(120+M)$ мм, діаметр електронної плями 0,3 мм. У станції застосовується ІКО з шкалою $(80+N)$ км.

11. У пристрої інструментального знімання даних РЛС колового огляду використовуються еталонні імпульси для рахунку азимута на об'єкт з періодом повторення 0,1 с. Яка реальна роздільна здатність РЛС по азимуту, якщо час огляду дорівнює $(1+N)$ с, а ширина діаграми направленості $(1+M)^\circ$?

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ

Під час самостійної роботи слід вирішити завдання за темою цього практичного заняття в обсязі, що визначається викладачем. Якщо викладач не визначив обсяг, тоді слід вважати, що мають бути вирішені всі завдання згідно зі своїм індивідуальним варіантом.

В тому разі, якщо певні завдання не були розглянуті під час аудиторних занять – їх також потрібно вирішити. Хід розв'язання та відповіді має бути занесено в зошит для практичних занять.

Також має бути проведена відповідна робота для підготовки до виконання лабораторної роботи.

Для вирішення всіх вищевизначених завдань можна використати главу 6 (с. 159) [9]; главу 6 (с. 93) [4] або будь-які інші джерела інформації, наведені, зокрема, у переліку літератури до цього посібника.

Навчально-методичне видання

Баляр В.Б.,
Маковеснко Д.О.,
Салабай О.В.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ
з курсу**

"РАДІОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ"

Частина 1

Редактор *Л.А. Кодрул*

Комп'ютерне верстання *Ж.А. Гардиман*