

408

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК  
до практичних занять з дисципліни  
"ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІОЛОКАЦІЇ"

Одеса, 2005

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК

до практичних занять з дисципліни

"ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІОЛОКАЦІЇ"

для студентів 4 курсу гідрометеорологічного інституту

"Затверджено"  
на засіданні методичної комісії  
гідрометеорологічного інституту  
протокол № 8  
від "7" "03" 2005 р.

Одеса, 2005

Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни "Теоретичні основи радіолокації" для підготовки студентів 4 курсу гідрометеорологічного інституту за напрямом підготовки "Гідрометеорологія", спеціальністю "Метеорологія", спеціалізацією "Експериментальна метеорологія" / Укладач: Д.І. Вельміскін, канд. техн. наук, доцент. ОДЕКУ, 2005 р., 29 с.

## ПЕРЕДМОВА

Перед проведенням практичних занять студенти повинні повторити теоретичну частину збірника методичних вказівок.

В результаті проведення практичних занять студенти повинні знати:

- фізичний зміст поняття "ефективна відбиваюча поверхня об'єктів";
- від яких параметрів МРЛ та об'єктів залежить дальність радіолокаційного виявлення, точність та роздільна здатність МРЛ;

вміти:

- розраховувати ефективну відбиваючу поверхню різних об'єктів;
- визначати дальність виявлення, точність вимірювання координат об'єктів за допомогою МРЛ та роздільну здатність МРЛ.

Практичні заняття проводяться за трьома темами курсу: "Вторинне випромінювання радіохвиль", "Дальність радіолокаційного виявлення МРЛ", "Точність та роздільна здатність МРЛ".

## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 1 Загальна характеристика вторинного випромінювання

#### 1.1 Визначення ефективної площі розсіювання

Вторинним випромінюванням називають випромінювання, яке відбувається внаслідок розсіювання (відбиття) хвиль від об'єкту.

Характеристикою поля вторинного випромінювання є ефективна відбиваюча поверхня (ЕВП) або ефективна площа розсіювання (ЕПР).

ЕВП (ЕПР)  $\sigma$  називається площа такої умовної поверхні, яка розсіює або відбиває всю енергію, що на неї падає, не направлено і створює в точці прийняття таке ж поле, як і реальний об'єкт [1].

В загальному випадку ЕВП (ЕПР) розраховується за формулою:

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{E_{np}^2}{E^2} = 4\pi r^2 \frac{H_{np}^2}{H^2}, \quad (1.1)$$

де  $r$  – дальність до об'єкту;

$E$ ,  $E_{np}$ ,  $H$ ,  $H_{np}$  – напруженість МРЛ, що характеризується кутом між нормаллю до об'єкту  $n$  і напрямком на МРЛ. Залежність ЕВП (ЕПР)  $\sigma$  від кута  $\theta$  називають діаграмою зворотнього вторинного випромінювання (ДЗВВ).

#### 1.2 Класифікація об'єктів

За методом визначення ЕВП (ЕПР) об'єкти можна розділити на прості і складні. ЕВП (ЕПР) простих об'єктів можна визначити аналітично. Розрахунок можливий тільки для обмеженого числа об'єктів найпростіших форм, які виконані з ідеального відбитого матеріалу. Прикладами простих об'єктів можуть служити металевий кут, лист, вібратор, кутові відбивачі. Характеристики розсіювання простих об'єктів наведені в табл. 1.1

ЕВП складних об'єктів визначається експериментально. До складних об'єктів відноситься переважна більшість реальних метеоб'єктів.

З точки зору роздільної здатності складні об'єкти можна поділити на точкові та розподілені.

Умови, за яких об'єкти можна вважати точковими:

$$L < \Delta r \text{ – при розділенні за дальністю;} \quad (1.2)$$

$$L < \Delta \beta r \text{ – при розділенні за азимутом;} \quad (1.3)$$

$$L < \Delta \varepsilon r - \text{при розділенні за кутом місця,} \quad (1.4)$$

де  $L$  – максимальний розмір об'єкту;

$\Delta r, \Delta \beta, \Delta \varepsilon$  – роздільна здатність за дальністю, азимутом, кутом місця.

Таблиця 1.1 - Характеристики розсіювання простих об'єктів

Тип випромінювання	ЕВП, м <sup>2</sup>			Ширина діаграми зворотн. вторинного випромінювання на рівні 0,5 град.
	Розрахункова формула	Максимальне значення		
		$\lambda=3$ см	$\lambda=10$ см	
Напівхвильовий вібратор довжиною $L = \lambda/2$	$\sigma = 0,86 \cdot \lambda^2 \sin^4 \theta$	$0,77 \cdot 10^3$	$0,86 \cdot 10^3$	$\sim 65^\circ$
Металічна куля $d_k / 4\lambda$	$\sigma = \pi d_k / 4$	$0,78 d_k^2$	$0,76 d_k^2$	Діаграма-сфера
Квадратний металічний лист площею $S = a^2$ , де $a$ – сторона квадрата	$\sigma = \pi S / \lambda^2$	$14 \cdot 10^3 S^2$	$1,26 \cdot 10^3 S^2$	$30^\circ \lambda / a$
Кутовий відбивач з трикутними гранями	$\sigma = 4\pi a^4 / \lambda^2$ , де $a$ – довжина ребра	$4,6 \cdot 10^3 a^4$	$0,46 \cdot 10^3 a^4$	$60^\circ$
З квадратичними гранями	$\sigma = 12 \pi a^4 / \lambda^2$	$42,3 \cdot 10^3 a^4$	$3,78 \cdot 10^3 a^4$	$35^\circ$
Металевий конус	$\sigma = \pi a^2 \operatorname{tg}^2(\alpha/2)$ де $a$ – радіус основи $\alpha$ – кут при вершині			

Розподіленими об'єктами називаються об'єкти, для яких вказані вище відношення не виконуються. Розподілені об'єкти можуть бути поверхневими та об'ємними. До поверхневих об'єктів відносяться поверхня суші, водна поверхня, різного роду бетоні покриття, ліс і т. д.

До об'ємних об'єктів відносяться метеоб'єкти (туман, хмари, дощ, град, метеори, сніг та інше). Простішими відбивачами в об'ємних об'єктах є краплі води сферичної форми.

ЕІР сферичної частинки при умові, що довжина хвилі більше розміру частинки, дорівнює:

$$\sigma_1 = \frac{\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (1.5)$$

де  $d$  – діаметр частинки;

$\lambda$  – довжина випромінюваної хвилі;

$m$  – коефіцієнт заломлення.

Якщо  $\lambda > r_k$ , де  $r_k$  – радіус краплі, то ЕІР  $\sigma_1$  однієї краплі дорівнює

$$\sigma_1 = 1,8 \cdot 10^4 r_k / \lambda^4. \quad (1.6)$$

Для сніжинки радіусом  $r_{сн}$  ЕІР буде дорівнювати:

$$\sigma_1 = 0,4 \cdot 10^4 r_{сн}^6 / \lambda^4. \quad (1.7)$$

Питома ЕВП  $\sigma_0$  дорівнює:  $\sigma_0 = \sigma_1 n$ ,

де  $n$  – кількість простих відбивачів, які припадають на одиницю об'єму.

В табл. 1.2 наведено значення  $n$  і  $\sigma_0$  для туману і хмар в залежності від дальності видимості.

Таблиця 1.2 - Питома відбиваюча густина водяної пари

Видимість, м	30	60	90	150	220	300
$n \cdot 10^4$	55	20	12	6	3	2
$\sigma_0 \cdot 10^9, \text{ м}^2/\text{м}^3$	13	4,8	2,8	1,4	0,7	0,5

На рис. 1.1 наведені залежності  $\sigma_0$  для дощу від його інтенсивності  $P$  і довжини хвилі МРЛ.

Середнє значення ЕВП об'ємного об'єкта знаходиться за формулою:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 V, \quad (1.8)$$

де  $V$  – роздільний об'єм МРЛ.

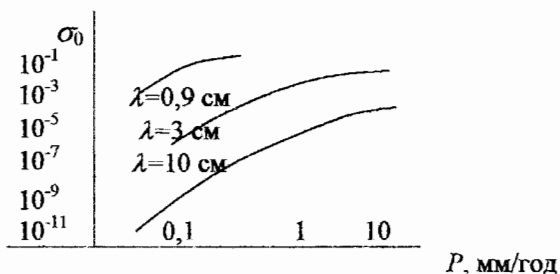


Рис. 1.1 - Питома відбита площа дощу

Величина роздільного об'єму МРЛ визначається відношенням:

$$V = \pi c \tau_I \Delta\beta_{0,5} \Delta\varepsilon_{0,5}/8, \quad (1.9)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла;

$\tau_I$  – тривалість випромінюваного імпульсу МРЛ;

$\Delta\beta_{0,5}$ ,  $\Delta\varepsilon_{0,5}$  – ширина діаграми напрямку антени МРЛ на рівні половинної потужності.

#### Контрольні запитання

- 1.1 Дати визначення ефективної площі розсіювання.
- 1.2 Що таке точковий об'єкт?
- 1.3 Що таке розподілений об'єкт?
- 1.4 Вивести аналітичний вираз для ЕПР метеоб'єкта.
- 1.5 Пояснити залежність ЕПР дощу від довжини хвилі при постійній інтенсивності дощу.
- 1.6 Від яких характеристик МРЛ залежить величина його роздільного об'єму?



## 2 Дальність виявлення МРЛ

Максимальною дальністю дії МРЛ називається найбільша відстань між локатором і ціллю, на якій сигнали об'єкту виявляються з заданими імовірностями вірного виявлення  $D$  і фальшивої тривоги [2].

У вільному просторі для імпульсного локатора максимальна дальність виявлення точкового об'єкту визначається за формулою:

$$r = 4 \sqrt{\frac{P_I G_{\text{прд}} S_e \bar{\sigma}}{16\pi^2 P_{\text{прмін}}}}, \quad (2.1)$$

де  $P_I$  – імпульсна потужність локатора;

$G_{\text{прд}}$  – КСД антени передавача;

$S_e$  – ефективна площа приймача антени;

$\bar{\sigma}$  – середня ЕВП об'єкта;

$P_{\text{прмін}}$  – чутливість приймального пристрою.

В імпульсних локаторах на прийом та передачу використовується одна антена. Враховуючи зв'язок між  $G$  і  $S_e$ :  $G = 4\pi S_e / \lambda^2$ , одержимо два варіанти запису формули (2.1) [3]

$$r_{\text{макс}} = 4 \sqrt{\frac{P_I S_e^2 \bar{\sigma}}{4\pi P_{\text{прмін}} \lambda^2}}, \quad (2.2)$$

$$r_{\text{макс}} = 4 \sqrt{\frac{P_I G^2 \lambda^2 \bar{\sigma}}{64\pi^2 P_{\text{прмін}}}}, \quad (2.3)$$

Дальність дії локатору при роботі по метеооб'єктам визначається формулою:

$$r_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{P_I C \tau_1 \pi^3 \Delta\beta \Delta\varepsilon K_3}{512\lambda^2 P_{\text{прмін}}} N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2}, \quad (2.4)$$

де  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\varepsilon$  – ширина діаграми спрямованості антени за азимутом, кутом місця;

$N$  – число частинок в роздільному об'ємі;

$d$  – діаметр частинок;

$m$  – комплексний показник заломлення середовища;

$K_3$  – коефіцієнт, що враховує ступінь заповнення роздільного об'єму;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла.

У випадку неоднакових сферичних часток в роздільному об'ємі вираз (2.4) можна записати у вигляді

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{P_I C \tau_I \pi^3 \Delta \beta_{0,5} \Delta \varepsilon_{0,5} K_3}{512 \lambda^2 P_{\text{прмін}}} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \sum_d N(d) d^6}. \quad (2.5)$$

Найбільш повно визначити дальність дії МРЛ із врахуванням напрямку антени дозволяє зона видимості. Зона видимості МРЛ – область простору, в границях якої об'єкт виявляється із заданими імовірностями, вірності виявлення  $D$  і фальшивої кривої  $F$  [4].

Якщо  $F(\beta, \varepsilon)$  – нормована діаграма напрямку антени по напруженості поля, а  $\beta, \varepsilon$  – кути, які визначають напрямок на об'єкт, то зона видимості може бути подана таким чином

$$r(\beta, \varepsilon) = r_{\max} F(\beta, \varepsilon) \quad (2.6)$$

В активній радіолокації на об'єкт встановлюють відповідач, який приймає сигнали запиту, що посилає МРЛ, та посилає відповідні радіосигнали.

Максимальна дальність дії по каналу запиту дорівнює:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{P_{I3} G_3 S_{E0}}{4\pi P_{\text{пр3мін}}}} \quad (2.7)$$

по каналу відповіді:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{P_{I0} G_0 S_{E3}}{4\pi P_{\text{пр0мін}}}} \quad (2.8)$$

В формулі (2.7) і (2.8) нижні індекси характеризують: 3 – параметри запитувача (МРЛ), 0 – параметри відповідача.

При поглинанні енергії радіохвиль в атмосфері на обмежених ділянках максимальна дальність оцінюється за формулою:

$$r_{\text{максП}} = r_{\text{макс}} 10^{-0,05\delta_{\text{П}} \cdot l} = r_{\text{макс}} e^{-0,115\delta_{\text{П}} \cdot l} \quad (2.9)$$

$$r_{\text{максП}} = r_{\text{макс}} 10^{-0,05 \sum_{i=1}^n \delta_{\text{П}} \cdot l_i} = r_{\text{макс}} e^{-0,115 \sum_{i=1}^n \delta_{\text{П}} \cdot l_i} \quad (2.10)$$

де  $r_{\text{максП}}$  - дальність дії з поглинанням;

$r_{\text{макс}}$  - дальність дії при відсутності поглинання;

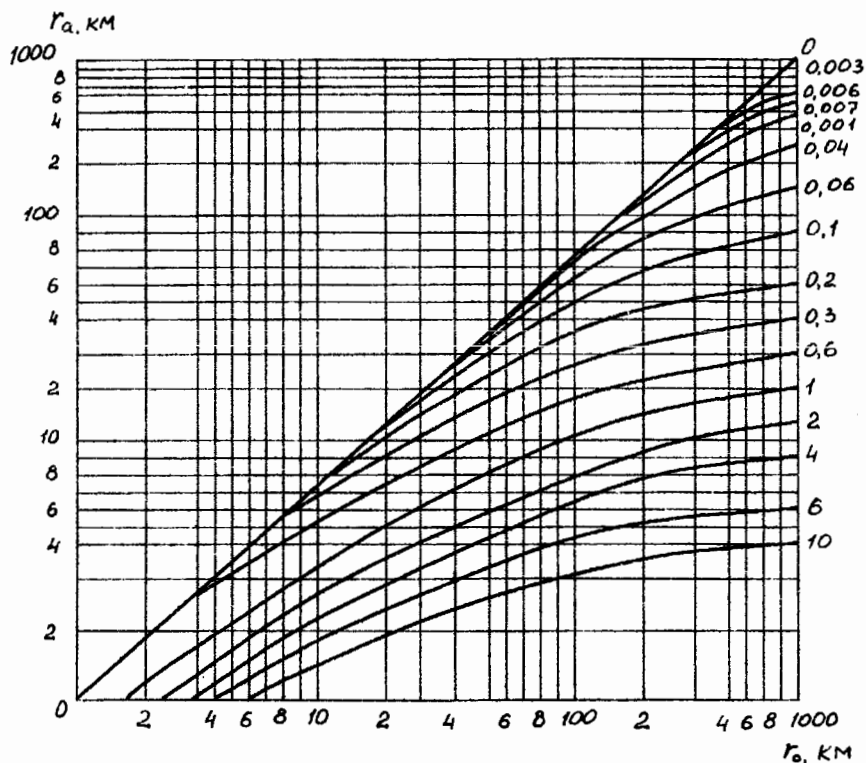


Рис. 2.1 – Залежність дальності дії МРЛ в атмосфері  $r_{\text{максП}}$  від дальності дії без врахування поглинання для різноманітних значень коефіцієнта поглинання  $\sigma_n$

$\sigma_n$  – коефіцієнт поглинання хвилі в децибелах на км;

$\sigma_{ni}$  – коефіцієнт поглинання на  $i$ -тій ділянці траси;

$l$  – довжина траси в км;

$l_i$  – довжина  $i$ -тої ділянки траси в км.

На рис. 2.1 представлена залежність дальності дії МРЛ в атмосфері  $r_{\max\Pi}$  від дальності дії без врахування поглинання для різних значень коефіцієнта поглинання  $\sigma_n$  [5].

На рис. 2.2 представлена залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі  $\lambda$  в парах води та кисню.

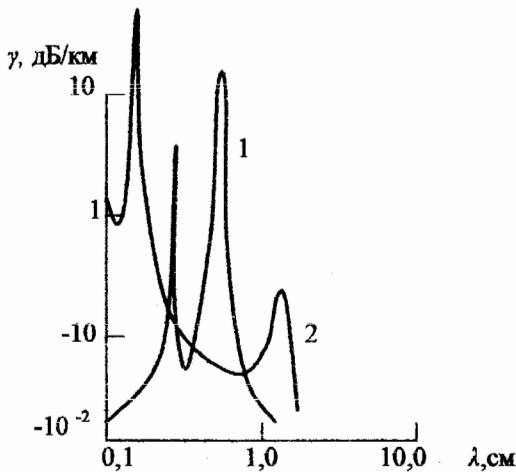


Рис. 2.2 – Залежність коефіцієнта поглинання  $\sigma_n$  від довжини хвилі  $\lambda$  в парах води та кисню

На рис. 2.3. представлена залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для різної інтенсивності дощу.

На рис. 2.4 представлена залежність коефіцієнта поглинання  $\sigma_n$  від довжини хвилі  $\lambda$  для різної інтенсивності туману.

При практичному використанні відношення (2.4) зручно представити у вигляді:

$$P_{np} = \Pi Z / r^2, \quad (2.11)$$

де  $\Pi$  – потенціал МРЛ;

$Z$  – відбиваність метеооб'єкта.

Потенціал МРЛ визначається відношенням:

$$\Pi = \frac{\pi^4 G P_I \tau_I S_E}{8 \lambda^4} \quad (2.12)$$

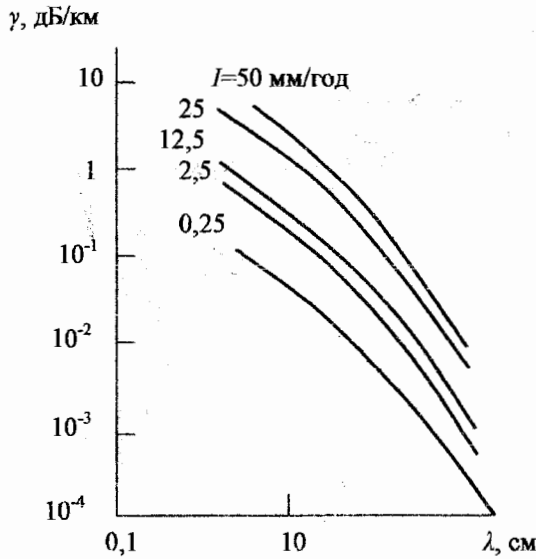


Рис. 2.3 – Залежність коефіцієнта поглинання  $\sigma_{\lambda}$  від довжини хвилі  $\lambda$  для різної інтенсивності дощу

Радіолокаційна відбиваність метеорооб'єкту, який складається із однакових сферичних частинок, визначається виразом:

$$Z = \sum N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 K_3, \quad (2.13)$$

а якщо визнаний закон розподілення частинок за розмірами  $N(d)$  (без врахування останнього відношення):

$$Z = \int_0^{\infty} N(d) d^6 dd. \quad (2.14)$$

$$\Pi = \frac{\pi^4 G P_I \tau_I S_E}{8 \lambda^4} \quad (2.12)$$

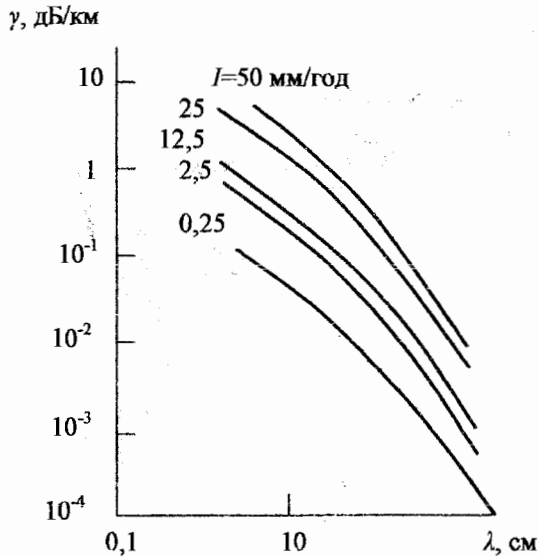


Рис. 2.3 – Залежність коефіцієнта поглинання  $\sigma_{\text{н}}$  від довжини хвилі  $\lambda$  для різної інтенсивності дощу

Радіолокаційна відбиваність метеоб'єкту, який складається із однакових сферичних частинок, визначається виразом:

$$Z = \sum N d^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 K_3, \quad (2.13)$$

а якщо визнаний закон розподілення частинок за розмірами  $N(d)$  (без врахування останнього відношення):

$$Z = \int_0^{\infty} N(d) d^6 dd. \quad (2.14)$$

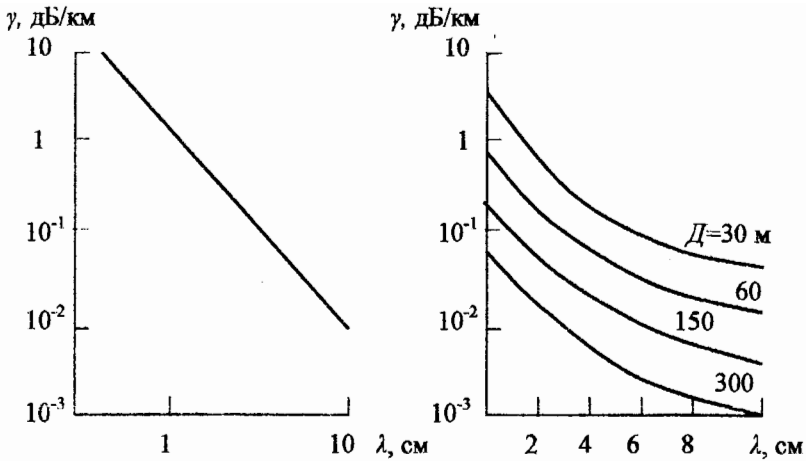


Рис. 2.4 – Залежність коефіцієнта поглинання  $\sigma_n$  від довжини хвилі для різної інтенсивності дощу

Відбиваність хмар та опадів пов'язана із водністю хмар  $W$  та інтенсивністю опадів  $I$ , оскільки вони залежать від розмірів частинок, закону їх розподілу за розмірами. Ці залежності визначаються виразами:

$$I = \frac{\pi \rho}{6} \int_0^{\infty} N(d) d^3 V(d) dd, \quad (2.15)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(d) d^3 dd, \quad (2.16)$$

де  $\rho$  - густина води;

$V(d)$  – закон розподілу швидкості падіння крапель.

Для помірних широт відбиваність хмар та опадів погоджується з експериментальними даними такими залежностями:

$$\text{для дощу} \quad z = 200 I_D^{1.6}, \quad (2.17)$$

$$\text{для снігу} \quad z = 2000 I_{CH}^2, \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \text{для хмар} \quad (d = 29 \text{ мкм і } w = 1,3 \text{ г/м}^3) \\ z = 0,048 w^2, \end{aligned} \quad (2.19)$$

де  $I_D$  – інтенсивність дощу, мм/год;

$I_{сн}$  – інтенсивність снігопаду, перерахована на воду, мм/год;  
 $W$  – водність хмар, г/м<sup>3</sup>.

#### Контрольні запитання

- 2.1 Отримати вираз для максимальної дальності виявлення метеоб'єкта.
- 2.2 Дати визначення зони виявлення МРЛ.
- 2.3 Чому в МРЛ-5 вибрали довжину хвилі 3,2 см та 10 см?
- 2.4 Чому в МРЛ-2 вибрали довжину хвилі 3,2 см, а не 1 см та 15 см?
- 2.5 Чому максимальна дальність виявлення точкового об'єкта менше ніж дальність виявлення метеоб'єкта?



### 3 Роздільна здатність і точність виміру координат МРЛ

#### 3.1 Роздільна здатність МРЛ

Роздільна здатність МРЛ будь-якого параметру  $\alpha$  може бути представлена у вигляді:

$$\Delta(\alpha) = \Delta(\alpha)_{nom} + \sum(\Delta(\alpha)_i = \gamma_\alpha \Delta(\alpha)_{nom}. \quad (3.1)$$

де  $\Delta(\alpha)_{nom}$  – потенційна роздільна здатність;

$\Delta(\alpha)_i$  – похибка роздільної здатності в  $i$ -тому вузлі пристрою;

$$\gamma_\alpha = 1 + \sum \Delta(\alpha)_i / \Delta(\alpha)_{nom}. \quad (3.2)$$

$\gamma_\alpha$  – коефіцієнт похибки потенціальної роздільної здатності за параметром.

Звичайно найбільшу похибку вносить вихідний пристрій, тому

$$\Delta(\alpha) = \Delta(\alpha)_{nom} + \Delta(\alpha)_{en}. \quad (3.3)$$

$$\gamma_\alpha = 1 + \Delta(\alpha)_{en} / \Delta(\alpha)_{nom}. \quad (3.4)$$

При використанні ЕЛТ найбільша похибка роздільної здатності відбувається за рахунок кінцевих розмірів плями на екрані

$$\Delta(\alpha)_{en} = d M_\alpha. \quad (3.5)$$

$d$  – діаметр плями;

$M_\alpha$  – масштаб шкали по параметру.

Для сигналу у вигляді імпульса з прямокутною огинаючою роздільної здатності за відстанню визначається як

$$\Delta r_{nom} = 0,5c \tau_I, \quad (3.6)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла;

$\tau_I$  – тривалість випроміненого імпульсу.

Якщо прийняти ширину спектру сигналу рівною

$$\Delta f = 1/\tau_I,$$

то роздільна здатність по протяжності

$$\Delta r_{nom} = 0,5 c / \Delta f. \quad (3.8)$$

Потенційна роздільна здатність по кутових координатах при апроксимації діаграми напрямку дзвонової кривої порівнюється

$$\Delta \varphi_{nom} = \varphi_{0,5}, \quad (3.9)$$

де  $\varphi_{0,5}$  - ширина діаграми напрямку по рівню 0,5.

У МРЛ вихідними пристроями є: індикатор кругового огляду (ІКО) та індикатор дальності кути місця [6].

ІКО характеризується масштабом та розміром плями у кілометрах. Масштаб за дальністю визначається відношенням

$$M_r = r_m / K_e d_e, \quad (3.10)$$

де  $r_m$  - граничне значення шкали дальності для даного масштабу;

$K_e = 0,4$  - коефіцієнт використання екрану;

$d_e$  - діаметр екрану трубки.

Ціна плями характеризує роздільну здатність ІКО і визначається із наступних відношень

$$d_n = M_r r_m d / K_e d_e = r_m / K_e Q_\phi, \quad (3.11)$$

де  $Q_\phi = d_e / d$  - якість фокусування трубки.

Масштаб за азимутом у ІКО є функцією відстані відмітки від об'єкту до центру екрану і визначається за формулою:

$$M_\beta = 360^\circ / 2 \pi r_{відм}, \quad (3.12)$$

де  $r_{відм}$  - відстань відмітки від цілі до центру екрану.

Дану формулу можна представити у вигляді:

$$M_\beta = 180^\circ r_m / \pi K_e d_e r_{відм}. \quad (3.13)$$

Розмір плями у градусах для відмітки від об'єкту визначається з відношень:

$$d_n = 180^0 d_k / \pi r = 180^0 r_{шк} / \pi K_e Q_\phi r_{відм}. \quad (3.14)$$

У МРЛ в якості індикатора “дальність-кут місця” використовується ІКО зі слідкуючою синхронно за антеною за кутом місця відхиляючою системою [7].

### Контрольні запитання

3.1 Дати визначення роздільної здатності МРЛ за дальністю, кутових координатах.

3.2 Дати визначення потенційної роздільної здатності.

3.3 Чим визначається реальна роздільна здатність МРЛ за дальністю?

3.4 Чим визначається реальна роздільна здатність за кутовими координатами?

3.5 Чому в центрі ІКО точність визначення азимута метеоб'єкта гірше, ніж на краях?

## ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

### Практичне завдання 1

“Розрахунок ефективної відбиваючої поверхні об’єкта”

Мета практичного заняття – одержати практичні навички розрахунку ефективної відбиваючої поверхні (ЕВП) різних метеоб’єктів, проведення порівнювального аналізу об’єктів по ЕВП і оцінки впливу характеристик МРЛ на ЕВП.

Приклад 1. МРЛ має довжину хвилі 3 см, імпульсну потужність  $P_I = 200$  кВт, чутливість приймача  $P_{пр\ min} = 10^{-14}$  Вт, ефективну площу антени  $S_{ef} = 6$  м<sup>2</sup>, виявляє метеоб’єкт на дальності 300 км. Визначити середню ЕВП метеоб’єкта.

Розв’язання:

1) Визначимо густину потоку потужності об’єкта.

$$P = \frac{P_I G}{4\pi r^2} = \frac{P_I S_{ef}}{r^2 \lambda^2} \quad (1)$$

2) Густина потоку потужності в точці прийняття рівна:

$$P_{пр} = \frac{P \bar{\sigma}}{4\pi r^2} = \frac{P_I S_{ef} \bar{\sigma}}{4\pi r^4 \lambda^2} \quad (2)$$

3) З іншої сторони густина потоку потужності в точці прийняття рівна:

$$P_{пр} = P_{пр} / S_{ef} \quad (3)$$

4) Порівнюючи вирази (2), (3) одержуємо:

$$\bar{\sigma} \approx 0,13 \text{ м}^2 \quad (4)$$

Приклад 2. Відомо, що МРЛ має тривалість випромінюваного імпульсу  $\tau_I = 1$  мкс, ширину променя антени  $\beta = 0,8$ ,  $\varepsilon = 0,8^0$ . Виходячи з умови попередньої задачі, визначити вид метеоб’єкту.

Розв'язання:

1) Використовуючи вираз (1.8), отримаємо:

$$\sigma_0 = \sigma / V$$

2) Роздільний об'єм МРЛ дорівнює:

$$V = \frac{\pi c \tau_I \Delta\beta_{0,5} \Delta\epsilon_{0,5}}{8} = 0,02 r^2 = 0,18 \cdot 10^{10} \text{ (м}^2\text{)}$$

3) Визначимо  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{\bar{\sigma}}{V} = \frac{0,13}{0,18 \cdot 10^{10}} = 0,72 \cdot 10^{-10} \text{ (м}^2\text{/м}^3\text{)}$$

4) Аналізуючи графік рис. 1.1, можна зробити висновок про те, що далекий метеорооб'єкт не є дощовим. Із аналізу даних таблиці 1.2 видно, що  $\sigma_0 = 0,1 \times 10^{-9} \text{ м}^2\text{/м}^3$  відповідає туман або хмара з видимістю більше 300 м.

Приклад 3: МРЛ має довжину хвилі  $\lambda = 10$  см, ширину променя антени  $\Delta\beta_{0,5} = \Delta\epsilon_{0,5} = 0,8^0$ , тривалість випромінюваного імпульса 1 мкс, імпульсну потужність  $P_I = 1$  МВт, чутливість приймача  $P_{пр\ min} = 10^{-14}$  Вт, ефективну площу антени  $S_{ef} = 6 \text{ м}^2$ . Визначити інтенсивність дощу на дальності 300 км.

Розв'язання:

1) Використовуючи вираз (4) приклада 1, визначимо середню ЕВП:

$$\bar{\sigma} = \frac{4\pi r^4 \lambda^2 P_{пр\ min}}{P_I S_{ef}^2} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

2) Із приклада 2 відомо, що роздільний об'єм МРЛ на дальності 300 км

$$V = 0,18 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$$

3) Питома ЕВП  $\sigma_0$  дощу дорівнює:

$$\sigma_0 = \sigma / V = 0,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{м}^3$$

4) За графіком рис. 1.1 знаходимо питому ЕВП  $\sigma_0$  при довжині хвилі МРЛ  $\lambda=10$  см інтенсивність дощу, яка рівна критерію 15–0,2 мм/год.

Приклад 4: Пасажирський літак, який має  $\sigma_c = 20 \text{ м}^2$  здійснює політ у районі випадіння опадів у вигляді дощу інтенсивністю  $I = 10 \text{ мм /год}$ . Політ здійснюється на дальності 100 км від МРЛ. Чи можна виявити літак на цій дальності за допомогою МРЛ, вважаючи, що виявлення відбувається при умові  $\sigma_c > \sigma_d$ ?

Розв'язання:

1) Визначимо  $\sigma_d$  по графіку рис. 1.1 при  $\lambda=3$  см та інтенсивності дощу 10 мм /год, знаходимо  $\sigma_d = 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{м}^3$ .

2) Використовуючи (1.9), визначимо роздільний об'єм МРЛ на дальності 100 км, який дорівнює  $V = 2 \times 10^8 \text{ м}^3$ .

3) Середнє значення ЕЛР, згідно з (1.8), дорівнює:

$$\sigma_g = 2 \times 10^3 \text{ м}^2.$$

Із отриманого результату можна зробити висновок про те, що пасажирський літак на фоні дощу виявити неможливо.

## Практичне заняття 2

“Розрахунок дальності виявлення метеопцілей радіолокатором”

Мета практичного заняття – отримати практичні навички в розрахуванні дальності виявлення локаторів та оцінки впливу параметрів локатора на дальність виявлення.

Приклад 1.

МРЛ має дані:  $P_f = 200 \text{ кВт}$ ,  $\lambda = 3,2 \text{ см}$ ,  $P_{np \text{ min}} = 10^{-13} \text{ Вт}$ ,  $S_e = 6 \text{ м}^2$ .

МРЛ виявляє об'єкт на дальності  $r = 300 \text{ км}$ . Визначити мінімальну  $\sigma$  для виявлення об'єкта.

Розв'язання:

Використовуючи (2.1), отримаємо

$$\bar{\sigma} = \frac{4\pi P_{\text{прмін}} \lambda^2 r^4_{\text{макс}}}{P_I S_e^2} \approx 1,27 \text{ м}^2$$

Приклад 2.

За допомогою МРЛ, використовуючи умови з попередньої задачі, визначити інтенсивність опадів, якщо  $\tau_I = 1$  мкс,  $\Delta\beta_{0,5} = \Delta\varepsilon_{0,5} = 0,8^\circ$ .

Розв'язання:

На дальності 300 км МРЛ має роздільний об'єм

$$V = \frac{\pi c \tau_I r^2 \Delta\beta_{0,5} \Delta\varepsilon_{0,5}}{8} \approx 0,18 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$$

Питома ЕПР опадів дорівнює

$$\sigma_0 = \sigma / V = 10^{-10} \text{ м}^2 / \text{м}^3$$

Даній питомій ЕПР відповідає туман з видимістю більше 220 км (табл. 1.2).

Приклад 3.

МРЛ має дані із умови прикладу 1, виявляє літак, який має  $\sigma = 20 \text{ м}^2$ . Визначити максимальну дальність виявлення літака.

Розв'язання:

1. Згідно (2.2)  $r_{\text{макс}} \approx 20$  км.

2. Отримані результати в прикладах 1, 2, 3 дозволяють зробити деякі висновки.

По-перше, МРЛ використовують для виявлення точкових об'єктів нещільноспрямовано, але можливо.

По-друге, виявлення за допомогою МРЛ метеооб'єктів здійснюється найбільш успішно.

Приклад 4.

МРЛ має дані із умови прикладу 1, 2, на шляху розповсюдження хвиль є туман протяжністю 20 км. Визначити, в скільки разів зменшиться дальність виявлення метеооб'єкту.

Розв'язання:

1 За графіками рис. 2.4 при довжині хвилі  $\lambda = 3,2$  см визначасмо коефіцієнт поглинання туману при різній видимості

$$\begin{aligned}\delta_n 30\text{м} &= 0,2 \text{ дБ / км}; & \delta_n 60\text{м} &= 0,08 \text{ дБ / км}; \\ \delta_n 150\text{м} &= 0,03 \text{ дБ / км}; & \delta_n 300\text{м} &= 0,01 \text{ дБ / км}.\end{aligned}$$

2 Використовуючи (2.9), визначимо значення коефіцієнта послаблення для різної видимості туману.

$$\begin{aligned}K_1 &= 10^{-0,05 \delta_{п30\text{м}} l} = 0,63; & K_3 &= 10^{-0,05 \delta_{п150\text{м}} l} = 0,93; \\ K_2 &= 10^{-0,05 \delta_{п60\text{м}} l} = 0,83; & K_4 &= 10^{-0,05 \delta_{п300\text{м}} l} = 0,97.\end{aligned}$$

3 Тоді:

$$\begin{aligned}\left(\frac{r_{\text{максП}}}{r_{\text{макс}}}\right)_{30\text{м}} &= 0,63; & \left(\frac{r_{\text{максП}}}{r_{\text{макс}}}\right)_{60\text{м}} &= 0,83; \\ \left(\frac{r_{\text{максП}}}{r_{\text{макс}}}\right)_{150\text{м}} &= 0,93; & \left(\frac{r_{\text{максП}}}{r_{\text{макс}}}\right)_{300\text{м}} &= 0,97.\end{aligned}$$

Отриманий результат свідчить про те, що при тумані видимістю 30 м, дальність виявлення зменшиться на 37%, при видимості 60 м – 17%, при видимості 150 м – 7% та при видимості 300 м – 3%.

#### Приклад 5.

Який характер має залежність потужності випромінювання від довжини хвилі, при заданій дальності виявлення та постійних значеннях інших характеристик МРЛ?

Розв'язання:

1. Для деякої оптимальної довжини хвилі потрібна мінімальна потужність передавача.

2. Якщо  $\lambda < \lambda_{\text{опт}}$ , то необхідно збільшити потужність випромінювання  $P_r$ , тому що збільшуються послаблюючі властивості атмосфери.



3. Якщо  $\lambda < \lambda_{опт}$ , то необхідно збільшити потужність випромінювання, оскільки переважаючим стає зменшення КСД антени.

Приклад 6.

Проектується наземний МРЛ. Потрібно повністю виключити вплив відображень від землі на діаграму спрямованості антени. Яка умова повинна бути виконана для задоволення цієї потреби?

Розв'язання:

Мінімальне значення кута між віссю діаграми спрямованості антени та горизонтальною площиною, яка проходить через геометричний центр антени, повинно бути не менше половини ширини діаграми спрямованості антени.

Приклад 7.

На дальності 100 км МРЛ виявляє опади в виді дощу. Визначити кількість крапель води при умові, що вони всі однакові та діаметр краплі води дорівнює в роздільному об'ємі МРЛ. МРЛ має дані:

$P_I = 200$  кВт,  $\tau_I = 1$  мкс,  $P_{пр\ min} = 10^{-13}$  Вт,  $\Delta\beta_{0,5} = \Delta\varepsilon_{0,5} = 0,8^\circ$ ,  $\lambda = 3,2$  см,  $K_3 = 1$ . Визначити інтенсивність дощу.

Розв'язання:

1. Використовуючи (2.4) отримаємо:

$$N = \frac{512 P_{пр\ min} \lambda^2 r^2}{\pi^3 P_I \tau_I C \Delta\beta_{0,5} \Delta\varepsilon_{0,5} K_3 d^6} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 = 19 \cdot 10^{20}.$$

2. ЕПР окремої краплі води визначається відношенням

$$\sigma_1 = 1,8 \cdot 10^4 \frac{d^6}{\lambda^4} = 1,8 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$$

3. ЕПР дощу, який має краплі у межах роздільного об'єму МРЛ, дорівнює

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 N = 34,2 \text{ м}^2$$

4. Роздільний об'єм МРЛ на дальності 100 км дорівнює

$$V = 0,02 \cdot 10^8 \text{ м}^3$$

5. Питома ЕПР одиниці роздільного об'єму МРЛ дорівнює

$$\sigma_0 = \frac{\bar{\sigma}}{V} = 17,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{м}^3$$

Даним значенням питомої ЕПР відповідає дощ, інтенсивність якого 3 мм/год при температурі 18<sup>0</sup>С.

Приклад 8.

Вказуючи дальність дії локатора, потрібно обов'язково вказувати відповідні імовірності вірного виявлення  $D$  та невірної тривоги  $F$ . Чому недостатньо вказувати значення тільки однієї із вказаних імовірностей, наприклад, імовірності вірного впевнення  $D$ .

Розв'язання:

При  $D = \text{const}$  імовірність  $F$  може лежати в межах від 0 до 1. Отже, не можна наперед сказати, в яких умовах спостерігається сигнал. Важлива не тільки присутність сигналу, але й відсутність шуму. При збільшенні імовірності  $F$  сигнал буде маскуватися шумами та виявлення буде неможливим. Тому необхідно вказати значення обох імовірностей:  $D$  та  $F$ .

### Практичне заняття 3

“Розрахунок роздільної здатності і точності вимірювання координат МРЛ”

Мета практичного заняття – отримати практичні навички у визначенні роздільної здатності різних локаторів і визначити точність вимірювання координат локаторами.

Приклад 1. Визначити потенціальну роздільну здатність МРЛ тривалістю імпульсу 1 мкс і 2 мкс з гольчатою діаграмою спрямованості шириною 0,8<sup>0</sup>.

Розв'язання:

1. Використовуючи (3.6) одержимо:

$$\Delta r_1 = 150 \text{ м} \quad \text{і} \quad \Delta r_2 = 300 \text{ м.}$$

2. Згідно (3.9):

$$\Delta\beta_{nom} = \Delta\varepsilon_{nom} = 0,8^{\circ}.$$

Приклад 2. Визначити реальну роздільну здатність МРЛ за відстанню та азимуту, якщо дано:  $\tau_I = 1$  мкс,  $\Delta\beta_{0,5} = 0,8^{\circ}$ , застосовуючи ІКО з діаметром екрану 30 см,  $Q_{\phi} = 400$ ,  $K_e = 0,4$ ,  $r_{max} = 300$  км, об'єкт спостерігається на відстані 200 км.

Розв'язання:

1. Використовуючи формулу (3.3), (3.11) отримаємо:

$$\Delta r = \Delta r_{nom} + \frac{r_{шк}}{K_e Q_{\phi}} = 2 \text{ км}$$

2. Використовуючи (3.9), (3.14) отримаємо:

$$\Delta\beta = \Delta\beta_{0,5} + 180^{\circ} r_{шк} / \pi K_e Q_{\phi} r \approx 1,3^{\circ}.$$

Приклад 3. Визначити коефіцієнт похибки роздільної здатності МРЛ з тривалістю та азимуту для умов попередньої задачі.

Розв'язання:

Використовуючи (3.4) отримаємо:

$$\gamma_r = 1 + \frac{\Delta r_{IKO}}{\Delta r_{nom}} = 1 + \frac{2 r_{шк}}{K_e Q_{\phi} C \tau_I} \approx 13$$

$$\gamma_{\beta} = 1 + \frac{\Delta\beta_{IKO}}{\Delta\beta_{nom}} = 1 + \frac{180^{\circ} r_{шк}}{\Delta\beta_{0,5} \pi K_e Q_{\phi} r} \approx 1,7$$

Приклад 4. Яка реальна роздільна здатність МРЛ за азимутом, якщо дано:  $\Delta\beta_{0,5} = 0,8^{\circ}$ , застосувавши ІКО з діаметром екрану 30 см,  $Q_{\phi} = 400$ ,  $r_{шк} = 25$  км, відмітка від об'єкту спостерігається на відстані 20 км.

Розв'язання:

Використовуючи (3.3), (3.14) отримаємо  $\Delta\beta = 1,23^0$ .

Приклад 5. Як зміниться реальна роздільна здатність МРЛ при умовах попередньої задачі, якщо  $r_{шк} = 100$  км?

Розв'язання:

Використовуючи (3.3), (3.14) отримаємо  $\Delta\beta = 2,6^0$ . Отримані результати у прикладах 2, 4, 5 дозволяють зробити деякі висновки.

По-перше, масштаб розгортки дальності повинен відповідати дальності до відмітки від об'єкту.

По-друге, зі збільшенням дальності до відмітки від об'єкту збільшується роздільна здатність МРЛ за азимутом.

По-третє, роздільна здатність за азимутом на екрані ІКО змінна. У центрі екрану вона є самою низькою. Збільшити її можна шляхом запуску дальності раніше запуску передавача.

Приклад 6. Точно відомий сигнал у вигляді пачки 10 радіоімпульсів з тривалістю кожного імпульсу 1 мкс визначається на ІКО з імовірністю вірного визначення  $D = 0,9$  і імовірністю невірної безпеки  $F = 10^{-5}$ . Сигнал знаходиться на дальності 215 км. Визначити реальну точність відмірювання дальності.

Розв'язання:

1. Відношення сигнал / шум визначається за формулою

$$q = 2 \sqrt{\lg \frac{1}{F} - 1,4} + \sqrt{\lg \frac{1}{1-D} - 1,4}$$

2. Використовуючи формулу (3.19), визначимо потенціальну точність вимірювання дальності.

$$\sigma_{ном}(r) = \frac{c\tau_l}{2g\sqrt{M}} \approx 1,5 \text{ м}$$

3. За умовами задачі відмітка сигналу знаходиться на дальності 215 км. Використовується масштаб розгортки дальності 300 км. На цьому масштабі є основні десятикілометрові та додаткові п'ятидесятикілометрові мітки дальності. Приймаємо ціну мітки дальності  $\Delta z = 10$  км. Тоді

$$\sigma_{інд}(r) = 0,05 \Delta r_m = 0,5 \text{ км.}$$

4. Точність вимірювання дальності МРЛ дорівнює

$$\sigma(r) = \sqrt{\sigma_{\text{ном}}^2(r) + \sigma_{\text{інд}}^2(n)} \approx 500 \text{ м}$$

Приклад 7. МРЛ має ширину променя антени  $0,8^\circ$ , знаходить об'єкт за пачкою 10 радіоімпульсів з імовірністю  $D > 0,9$  і  $F = 10^5$ . Визначити реальну точність вимірювання азимуту на ІКО МРЛ. Врахувати сигнал відомим.

Розв'язання:

1. За результатами попередньої задачі  $q = 34$ .
2. Потенціальна точність вимірювання азимуту дорівнює

$$\sigma_{\text{ном}}(\beta) = \Delta\beta_{0,5} / q \text{ км} \approx 0,004^\circ.$$

3. ІКО має десятиградусні мітки азимуту. Приймаємо  $\Delta\beta_m = 10^\circ$ . Тоді

$$\sigma_{\text{інд}}(\beta) = 0,05 \Delta\beta_m = 0,5^\circ.$$

Висновки прикладів 6, 7 засвідчують, що точність вимірювання дальності і азимуту визначається ІКО.

Приклад 8.

Реально відображений сигнал від метеоб'єкту має випадкову фазу та амплітуду. Використовуючи умови задач прикладів 6, 7 визначити, як зміниться реальна точність вимірювання дальності і азимуту МРЛ. Відношення сигнал / шум для даного сигналу рахувати рівним 10.

Розв'язання:

1. Помилки, внесені ІКО не змінюються.
2. Змінюються потенційні точності вимірювання дальності і азимуту.

$$\sigma_{\text{ном}}(r) = \frac{c\tau_1}{2g\sqrt{M}} \approx 4,74 \text{ м},$$

$$\sigma_{\text{ном}}(\beta) = \frac{\Delta\beta_{0,5}}{g\sqrt{\pi M}} \approx 0,014^{\circ}$$

3. Використовувана точність вимірювання дальності і азимуту дорівнює

$$\sigma(r) \approx 500 \text{ м} \quad \text{і} \quad \sigma(\beta) \approx 0,5^{\circ}$$

Отриманий висновок засвідчує, що відношення сигнал/шум на точність вимірювання дальності і азимуту не впливає, вона визначається ІКО.

Приклад 9. Визначити середньоквадратичну похибку вимірювання дальності і кута місця МРЛ, якщо він знаходить об'єкт на дальності 300 км. На шляху розповсюдження хвиль знаходиться область шуму, протяжністю 50 км, а дисперсія коефіцієнта заломлення  $n^2 = 10^{-10}$ .

Розв'язання:

1. Згідно (3.17), (3.18) знаходимо:

$$\sigma_{\text{розп}}(r) = 1,3\sqrt{n^2} 2r_0 \approx 1,6 \text{ м,}$$

$$\sigma_{\text{розп}}(\varepsilon) = 1,9\sqrt{n^2} \frac{r}{r_0} \approx 0,08^{\circ}$$

Похибки розповсюдження за дальністю і кутом місця не існують. Практично при вимірюванні координат метеорооб'єкту її можна не враховувати.

Приклад 10. Середньоквадратична похибка вимірювання азимуту кожного з двох метеорооб'єктів окремо дорівнює  $0,5^{\circ}$ . Яка середньоквадратична похибка кута між цими метеорооб'єктами?

Розв'язання:

Похибка вимірювання кута між двома метеорооб'єктами визначається за формулою:

$$\sigma(\beta) = \sqrt{\sigma^2(\beta_1) + \sigma^2(\beta_2)} \approx 0,7^{\circ}$$

## Література

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1973.
2. Павлов Н.Ф. Аерология, радиометеорология я техника безопасности. – Л.: Гідрометеоздат, 1980.
3. Зайцева Н.А., Шляхов В.И. Аерология. – Л.: Гидрометеоздат, 1978.
4. Васин В.В., Степанов Б.М. Справочник – задачник по радиолокации. –М.: Сов. Радио, 1977.
5. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д.- М.: Сов. Радио, 1970.
6. Финкельштейн М.Н. Основы радиолокации. – М.: Сов. Радио, 1973.
7. Леонов А.Н., Фомичев К.И., Моноимпульсная радиолокация. – М.: Сов. радио, 1984.

Збірник методичних вказівок до практичних занять для студентів 4 курсу метеорологічного факультету за напрямом підготовки "Гідрометеорологія", спеціальністю "Метеорологія", спеціалізацією "Експериментальна метеорологія" / Укладач: Д.І. Вельміскін, канд. техн. наук, доцент. ОДЕКУ, 2005 р., 29 с.

 **ЕКОНОМІКА**  
приватне багатозагонове підприємство

45-45-90  
Свідоцтво ДП №68-р  
від 07.08.2001 г.  
Нізо - друк  
папір офсетний,  
наклад 50 примірників

Підп. до друку 03.05 Формат 60×84/16 Папір офс.

Умовн. друк. арк. 2.0 Тираж 50 Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

---

Одеський державний екологічний університет

65016, Одеса, вул. Львівська, 15

---



