

Військово-технічні проблеми

УДК 621.396.96:551.501.815

Д.В. Атаманський¹, Д.С. Рачков², А.В. Семеняка²

¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ТОЧНІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ВІДБИВАНОСТІ МЕТЕООБ'ЄКТІВ ВІЙСЬКОВИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ ЗАСОБАМИ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ

Для типових радіолокаційних засобів (РЛЗ) радіотехнічних військ (РТВ) визначені і проаналізовані помилки оцінювання відбиваності метеооб'єктів. Показано, що вказані РЛЗ потенційно спроможні з необхідними показниками якості забезпечувати вимірювання відбиваності небезпечних метеоутворень на етапі їх розпізнавання. При оснащенні розглянутих РЛЗ спеціальними каналами обробки відбиттів від метеоутворень (метеосигналів), вони можуть стати вагомим додатковим джерелом метеоінформації державної системи гідрометеорологічних спостережень і прогнозування.

Ключові слова: метеорологічний радіолокатор, вобуляція інтервалів зондування, метеорологічні утворення, відбиваність метеоб'єктів.

Вступ

Оповіднення населення про небезпечні атмосферні явища – важливий елемент в комплексі заходів щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру [1 – 3]. Зазвичай, основними засобами отримання оперативної інформації про метеорологічну обстановку над заданою територією є метеорологічні радіолокатори (МРЛ). На даний час національна мережа МРЛ укомплектована недостатньо. Передбачена в [2] закупівля сучасних закордонних метеолокаторів потребує значних фінансових витрат і лише частково може задовольнити потребу в МРЛ для створення над територією держави необхідного радіолокаційного поля розпізнавання метеоявищ (РЛП РМЯ). Для зменшення вартості вітчизняної метеомережі і забезпечення необхідних параметрів РЛП РМЯ пропонується поряд з потужними базовими МРЛ використовувати дешеві малопотужні автоматизовані когерентні поляриметричні метеорологічні радіолокатори X – діапазону з автоматичним режимом прийому і передачі радіолокаційних даних [4]. Менший радіус дії і екологічна чистота таких МРЛ дозволить розміщувати їх, керуючись лише вимогами забезпечення необхідного покриття території.

Ідеологію доповнення або навіть створення метеомережі на базі великої кількості малопотужних МРЛ не обов'язково реалізовувати з залученням спеціалізованих МРЛ. Для цього теоретично підходять радіолокаційні засоби (РЛЗ) сантиметрового діапазону, які використовуються для рішення інших завдань при умові їх комплектації спеціальним каналом для обробки метеосигналів. Такі РЛЗ можуть бути вагомим джерелом додаткової метеоінформації державної системи гідрометеорологічних спостережень і прогнозування. При такому підході створюються умови для додаткової економії коштів за ра-

хунок “подвійного використання” антено-фідерної системи та генераторного пристрою, які складають головну частину вартості МРЛ.

Цікавим та привабливим в цьому плані є використання багаточисельного парку військових РЛЗ, зокрема, радіолокаційних засобів радіотехнічних військ (РТВ) сантиметрового діапазону хвиль, які ведуть постійну розвідку повітряного противника. Для цих засобів в [5] визначені потенційні можливості виявлення і розпізнавання метеоявищ (МЯ) за умов відсутності вбудованих в РЛЗ метеоканалів, вказана потенційна спроможність РЛС РТВ видавати споживачам метеоінформацію за умов оснащення цих засобів спеціальними метеоканалами. В реальних умовах обмеженого часу спостереження за метеоб'єктами (МО) ступінь досягнення потенційних можливостей залежить від методів обробки та обсягу доступної для обробки вхідної вибірки прийнятих сигналів і супроводжується помилками вимірювань параметрів метеоб'єктів. Визначення рівня цих помилок для вказаних умов для РЛЗ РТВ залишилось поза увагою авторів [5] і є предметом розгляду даної статті.

В ній досліджуються помилки виміру відбиваності метеоцілей, яка використовується в переважній більшості методів розпізнавання й визначення ступеня небезпеки метеоутворень [6, 7]. Інформація про відбиваність міститься в інтенсивності (відношенні потужності прийнятого сигналу до потужності шумів приймача) відбиттів від метеоб'єктів [6 – 8]. Тому статистичні характеристики оцінок відбиваності будуються та аналізуються по відповідним характеристикам оцінок інтенсивності метеовідбиттів. Аналіз проводиться для типових РЛЗ РТВ сантиметрового діапазону, різних значень ширини і форми доплерівського спектра швидкостей МО та практично можливих обсягів навчаючої вибірки.

Мета статті: доповнити і кількісно конкретизувати проведений в [5] аналіз якості метеоінформації, яку можуть добувати оглядові РЛЗ РТВ сантиметрового діапазону хвиль, та визначити спроможність ведення ними радіолокаційної розвідки погоди з заданими показниками ефективності в реальних умовах апріорної невизначеності і обмеженого часу спостереження за метеооб'єктами.

1. Методика аналізу, моделі й припущення

А. В якості показників ефективності оцінювання відбиваності метеооб'єкта виступає середня потужність

$$\sigma_{\Sigma \delta z}^2 = m_{\delta z}^2 + \sigma_{\delta z}^2 \quad (1)$$

випадкової помилки

$$\delta z = 10 \log_{10} \hat{Z}_e - 10 \log_{10} Z_e = 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{Z}_e}{Z_e} \right), \quad (2)$$

де Z_e та \hat{Z}_e – справжнє значення відбиваності та її оцінка¹, $\frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3}$; $m_{\delta z}$ та $\sigma_{\delta z}^2$ – математичне сподівання та дисперсія помилки δz .

Відбиваність Z_e пов'язана з середньою потужністю \bar{P}_c прийнятого від МО сигналу співвідношенням МУ [6, с.81]

$$\bar{P}_c = \frac{\Omega_a \pi^2 P_i G_{\text{прд}} G_{\text{пр}} \cdot c \cdot \tau_i \cdot Z_e |k_w|^2 \chi k_3 k_n K_{\text{АВ}}}{2^7 \cdot k_a \cdot \lambda^2 \cdot r^2} \quad (3)$$

де P_i – потужність зондувального імпульсу радіолокаційного засобу, Вт; $G_{\text{прд}}$ і $G_{\text{пр}}$ – коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антени відповідно; $k_a = 2 \ln 2$ – коефіцієнт, який враховує апроксимацію ДН антени гаусовими функціями; $\Omega_p \approx \pi \Delta \varepsilon \Delta \beta / 4$ – тілесний кут, стеррад; $\Delta \beta$ і $\Delta \varepsilon$ – ширина діаграми спрямованості антени в горизонтальній і вертикальній площинах на рівні 0,5 потужності, рад; c – швидкість поширення електромагнітних коливань в атмосфері, м/с; $K_{\text{АВ}}$ – коефіцієнт корисної дії високочастотного тракту; λ – довжина хвилі, м; r_0 – дальність до елемента відбиття, від якого отримано сигнал, м; χ – ослаблення радіохвиль в газах атмосфери, хмарах та опадах при їх розповсюдженні на шляху $2r_0$, рази; $|k_w|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2$ – множник діелектричної проникливості гідрометеорів²; m – комплексний

показник заломлення на довжині хвилі λ ; k_n – коефіцієнт втрат в приймачі (в середньому $k_n = -2.3$ дБ [6]); k_3 – коефіцієнт заповнення елемента розділення (будемо вважати $k_3 = 1$); Z_e – еквівалентна радіолокаційна відбиваність, м^3 .

Діленням лівої і правої частини (2) на середню потужність $\bar{P}_{\text{ш}}$ шумів приймального пристрою одержимо зв'язок Z_e з інтенсивністю η відбиттів

$$Z_e = D \frac{\bar{P}_c}{\bar{P}_{\text{ш}}} = D \eta, \quad (4)$$

де $D, \text{м}^3$ – розмірна константа.

З урахуванням (4) δz (2) можна визначити через з інтенсивність η відбиттів та її оцінку $\hat{\eta}$:

$$\delta z = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\hat{\eta}}{\eta} \right) = 10 \cdot \log_{10}(\hat{q}). \quad (5)$$

Б. За оцінку ($\hat{\eta}$) інтенсивності МО η нижче виступає випадкова величина

$$\hat{\eta} = \frac{1}{M} \cdot \text{tr}(\hat{\Phi}) = \frac{1}{M \cdot K} \cdot \text{tr}(\mathbf{A}),$$

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \cdot \mathbf{A}, \quad (6, \text{а})$$

$$\mathbf{A} = \{ a_{\ell m} \}_{\ell, m=1}^M = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^*,$$

що являє собою середнє арифметичне значення елементів головної діагоналі $M \times M$ оцінки $\hat{\Phi}$ кореляційної матриці (КМ) міжперіодних флуктуацій відліків відбиттів від МО. Ця оцінка сформована по K – мірній вибірці

$$\mathbf{Y} = \{ \mathbf{y}_j \}_{j=1}^K, \quad \mathbf{y}_j = \{ y_{\ell j} \}_{\ell=1}^M \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \Phi),$$

$$\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j^* = \mathbf{0}_M, \quad i \neq j, \quad i, j \in 1, K \quad (6, \text{б})$$

гаусових взаємно незалежних M -мірних векторів \mathbf{y}_i , $i \in 1, K$ комплексних амплітуд адитивної суміші шуму приймача й відбиттів із M суміжних інтервалів зондування K суміжних елементів розділення по дальності.

В. Припускається, що кореляційна матриця Φ адитивної суміші відбиттів від метеооб'єкта й внутрішнього шуму приймача допускає таке подання:

$$\Phi = \{ \varphi_{\ell m} \}_{\ell, m=1}^M = \overline{\mathbf{y}_j \cdot \mathbf{y}_j^*} = \mathbf{I}_M + \eta \cdot \rho, \quad (7)$$

$$j \in 1, K$$

де \mathbf{I}_M – одинична $M \times M$ КМ M – елементної пачки некорельованих внутрішніх шумів приймача з однакою (одиночною) дисперсією (потужністю);

$\rho = \{ \rho_{\ell m} \}_{\ell, m=1}^M$ – нормована ($\rho_{\ell \ell} = 1$, $\ell \in 1, M$) КМ міжперіодних флуктуацій відбиттів від МО.

¹ Використовують і інші одиниці виміру відбиваності [7]: $Z_e, \text{м}^3 = 10^{-18} [Z_e, \text{мм}^6 / \text{м}^3]$; $Z_e, \text{дБЗ} = 10 \log_{10} [Z_e, \text{мм}^6 / \text{м}^3]$

² Для $\lambda = 0.01 \dots 0.1$ значення $|k_w|^2 = 0.91 \dots 0.93$.

Відбиття від МО апроксимуються [9 – 11] процесом авторегресії (АР – процесами) різного (цілого) порядку $p \geq 1$ з нормованою КМ ρ із елементами [9 – 11]

$$\rho_{\ell m} = \frac{1}{C} \cdot \int_0^{1/2} \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot x \cdot (\gamma_\ell - \gamma_m))}{(1 - 2 \cdot x_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x) + x_0^2)^p} dx, \quad (8)$$

$\ell, m \in 1, M$

де

$$C = \int_0^{1/2} \frac{1}{(1 - 2 \cdot x_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x) + x_0^2)^p} dx \quad (9)$$

– константа, що забезпечує нормування $\rho_{\ell\ell} = 1$, $\ell \in 1, M$;

$$\gamma_\ell = \tau_\ell / T_{av}, \quad \tau_\ell = \sum_{i=1}^{\ell-1} T_i, \quad \ell \in 1, M \quad (11)$$

– часовий інтервал між першим і ℓ -м імпульсами M – елементної пачки, нормований до середнього інтервалу зондування

$$T_{av} = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^{M-1} T_i, \quad (12)$$

x_0 – корінь характеристичного рівняння АР-процесу, що визначається по заданому коефіцієнту кореляції $\rho(T_{av})$ відліків відбиттів від МУ за середній інтервал зондування T_{av} з рівняння:

$$|\rho(T_{av})| = \frac{1-x_0^2}{2 \cdot x_0} \cdot \left\{ z - \frac{\Lambda_{p-2}(z)}{\Lambda_{p-1}(z)} \right\}, \quad z = \frac{1+x_0^2}{1-x_0^2}, \quad (13, a)$$

де $\Lambda_n(z)$ – поліном Лежандра степені n от z , $\Lambda_{-1}(z) = \Lambda_0(z) = 1$ [13].

Корені x_0 характеристичного рівняння пов'язують між собою коефіцієнт кореляції $\rho(T_{av})$ і нормовану до частоти слідування відліків ширину ΔF спектра АР-процесу з КМ (7) (8), яка на рівні $1/d$ від максимуму дорівнює [12]

$$\Delta F = \frac{1}{\pi} \cdot \arccos \frac{1+x_0^2 - \sqrt{d} \cdot (1-x_0)^2}{2 \cdot x_0}. \quad (13, б)$$

Для окремого випадку АР – процесу порядку $p \rightarrow \infty$ елементи КМ ρ визначаються по формулі [12, с. 318]

$$\rho_{\ell m} = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{e^{x_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (x-x_0))}}{I_0(x_0)} \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\gamma_\ell - \gamma_m)} dx, \quad (14)$$

де $I_\nu(x)$ – модифікована функція Бесселя ν -го порядку [13, с. 195].

У цьому випадку нормована до частоти слідування відліків ширина ΔF_g спектру на рівні $1/d$ від максимуму визначається з виразу [12]

$$\Delta F_g = \frac{1}{\pi} \cdot \arccos \left(1 - \frac{\ln(d)}{x_0} \right). \quad (15, a)$$

Тут параметр x_0 – корінь рівняння

$$|\rho(T)| = I_1(x_0) / I_0(x_0). \quad (15, б)$$

Конкретне значення ΔF (ΔF_g) задається шириною доплерівського спектра швидкостей (ДСШ)

$$W = \lambda \cdot \Delta F (\Delta F_g) / 2, \quad (16)$$

яка вважається відомою величиною.

В. Для описаних моделей вхідних впливів відома щільність розподілу $p_q(x)$ випадкової величини q [8]

$$p_q(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^\infty A(t) \cdot \cos(x \cdot t) dt, \quad x \geq 0; \quad (17, a)$$

$$p_q(x) = 0, \quad x < 0.$$

$$A(t) = \frac{R(t)}{R^2(t) + I^2(t)}; \quad (17, б)$$

$$z(t) = |\mathbf{I}_M - \mathbf{j} \cdot t \cdot \Lambda|^K = \prod_{i=1}^M (1 - \mathbf{j} \cdot t \cdot \lambda_i)^K = R(t) + \mathbf{j} \cdot I(t), \quad (17, в)$$

де $\Lambda = \text{diag} \{ \lambda_\ell \}_{\ell=1}^M$ – діагональна $M \times M$ матриця позитивних власних чисел $\lambda_\ell \geq 0$; $\ell \in 1, M$ матриці

$$\Phi_v = \frac{\Phi}{K \cdot \text{tr}(\Phi)}.$$

Розподіл $p_q(x)$ (16) з урахуванням (5) дозволяє визначити щільність розподілу випадкової величин $\hat{\delta}z$:

$$p_{\hat{\delta}z}(y) = p_q(\varphi(y)) \cdot \left| \frac{d\varphi(y)}{dy} \right| = \left[\frac{2}{\pi} \cdot \int_0^\infty A(t) \cdot \cos(10^{0.1} \cdot t) dt \right] \times \ln(10^{0.1}) \cdot 10^{0.1} \cdot y, \quad (18)$$

де $\varphi(y)$ – зворотна функція; $|d\varphi(y)/dy|$ – модуль якобіана перетворення.

Ця щільність в подальшому використовується для отримання середнього значення

$$m_{\hat{\delta}z} = \int_{-\infty}^\infty y \cdot p_{\hat{\delta}z}(y) dy, \quad (19, a)$$

та дисперсії

$$\sigma_{\hat{\delta}z}^2 = \int_{-\infty}^\infty (y - m_{\hat{\delta}z})^2 p_{\hat{\delta}z}(y) dy \quad (19, б)$$

випадкової помилки $\hat{\delta}z$ (2) та її середньої потужності $P_{\hat{\delta}z}$ (1).

Г. Потужність $P_{\hat{\delta}z}$ (1), що виступає в ролі показника якості оцінки \hat{Z}_e , розраховується для типового [14] діапазону (0.2...5 м/с) ширини W доплерівських спектрів швидкостей (ДСШ) складових метеоутворень (МУ), двох видів ($p=1$, $p \rightarrow \infty$) кореляційної функції МУ, справжньої відбиваності Z_e та $M \times K$ пакетів Y (6б) різного обсягу. Розмірність пакету M відповідає числу імпульсів пачки сигналів, відбитих від елемента розділення. Для оглядових РЛС це число обчислюється з виразу [15]

$$M = \Delta\beta \cdot F_{av} / (\sqrt{2} \cdot 6 \cdot \Omega), \quad (20, a)$$

для висотомірів

$$M = \Delta\epsilon \cdot F_{av} \cdot 60 / (\sqrt{2} \cdot 2 \cdot n_k \cdot \epsilon_c), \quad (20, б)$$

де $\Delta\beta$ та $\Delta\epsilon$ – ширина (в градусах) діаграми спрямованості антени в азимутальній та кутомісцевій площинах на прийом по рівню відліку початку пачки; $F_{av} = 1/T_{av}$ – середня частота слідування зондувальних імпульсів (Гц); Ω – швидкість обертання антени (об/хв); ϵ_c – ширина сектора сканування по куту місця (град); n_k – кількість “хитань” антени в кутомісцевій площині (град/хв).

В табл. 1 приведені округлені до цілих значення M при відліку початку пачки по рівню -3 дБ та типові значення технічних характеристик РЛЗ РТВ, потенційно спроможних вести радіолокаційну розвідку метеоб'єктів.

Під РЛЗ-1 розуміються РЛС типу 19Ж6 (35Д6) та їх модернізованих варіантів [15 – 18], під РЛЗ-2 – РЛС типу 79К6, а під РЛЗ-3, 4 – висотоміри ПРВ-13, 16 відповідно [18].

Таблиця 1

Типові значення деяких технічних параметрів РЛЗ, що розглядаються та розміри $M \times K$ пакетів, що очікуються.

		РЛЗ-1					РЛЗ-2		РЛЗ-3		РЛЗ-4		
Тип сигналу		ПРІ					ЛЧМ		ПРІ		ПРІ		
$F_{п\text{ ср}}, \text{ Гц}$		“С”		“Р”		“НР”		991,6		“С”		“Р”	
		1522		761		380				699		400	
$\tau_i, \text{ мкс}$		1,5		3		6		43,3		1,5		1,7	
$\Omega, \text{ об/хв}$		6	12	6	12	6	6	12	–		–		
$n_x, 1/\text{хв}$		–					–		25		20		
$\Delta\beta, \text{ рад}$		0,0349					0,0332		0,0349		0,0407		
$\Delta\epsilon, \text{ рад}$		0,0261					0,04		0,0145		0,00814		
$\epsilon_c, \text{ град}$		-0,33...30					0...32		-2...28		1,5...22		
M		59	29	29	14	14	36	18	19	9	17	8	
K	$R_{ст} = 1,2 \text{ км}$	5	5	2	2	1	3	3	5	2	9	4	
	$1,5 \text{ км}$	6	6	3	3	1	4	4	6	3	11	5	
	2 км	8	8	4	4	2	5	5	8	4	15	7	

“С”, “Р”, “НР” – режим випромінювання зондуючих імпульсів: частий, рідкий, надрідкий відповідно.

Д. Істотна неоднорідність (нестационарність) метеоутворень за дальністю обмежує можливі значення K , які визначаються з виразу:

$$K = \text{floor}(\Delta R_c / \Delta r), \quad (21)$$

де ΔR_c – інтервал просторової стаціонарності метеоутворення; Δr – інтервал розділення за дальністю; $\text{floor}(x)$ – оператор округлення числа до меншого цілого.

Як показують результати натурних експериментів [19, 20] інтервал просторової стаціонарності переважної більшості метеоутворень не перевищує 2 км ($\Delta R_c \leq 2 \text{ км}$). Вказаний інтервал використовується при визначенні K для РЛЗ, що розглядаються (табл. 1).

Є. Особливістю РЛЗ (табл. 1) є відчутно різні параметри ($F_{п\text{ ср}}, \Omega$ та ін.) режимів зондування прос-

тору. Розрахунки показують, що ці параметри впливають на чисельні значення помилки $\hat{\delta}z$ (2), але не порушують закономірностей “поведінки” $\hat{\delta}z$ в залежності від обсягу навчаючої вибірки, форми та ширини спектру, інтенсивності МУ та ін. Аналіз цих закономірностей, який для конкретності проведено для РЛС-1, присвячений наступний пункт.

2. Результати розрахунків та їх аналіз

А. На рис. 1 і 2 показані сімейства щільностей і функцій розподілу помилки $\hat{\delta}z$ (2) оцінки відбиваності Z_e МО. На графіках рис. 2 осі абсцис обмежені значеннями в точках $x = -1$ (ліворуч) і $x = 1$ (праворуч). Різниця ординат функцій розподілу помилки $\hat{\delta}z$ (2) в цих точках відповідає імовірності $p(|\hat{\delta}z| \leq 1)$ виміру відбиваності МО із точністю

± 1 дБЗ, необхідною при розпізнаванні метеоявищ [7, 14]. З графіків (рис. 2 а,б,г) видно, що ця ймовірність тим більше, чим більше ширина доплерівського спектру швидкостей (ДСШ) МУ, або, враховуючи (16), (15, б), менше коефіцієнт міжперіодної кореля-

ції $\rho(T_{av})$ відбиттів від МО. Зменшення взаємної кореляції відліків M -елементної пачки відбиттів, як відомо, збільшує ефект усереднення оцінок їхньої потужності.

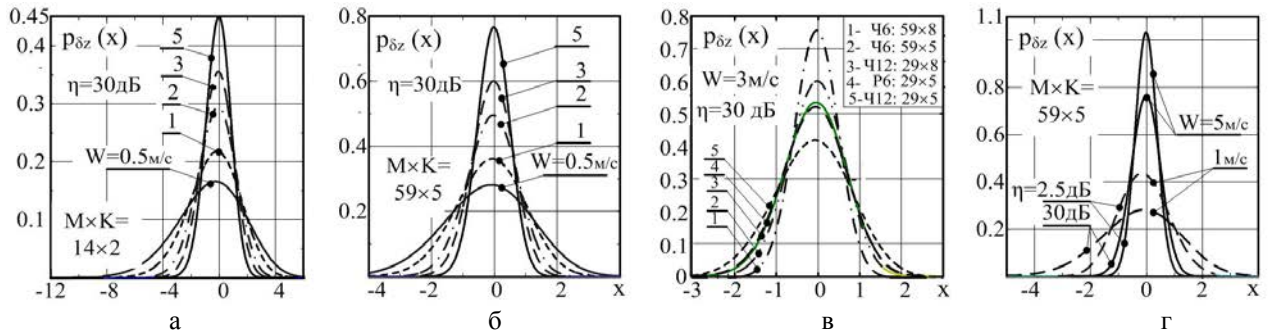


Рис. 1 Щільності розподілу помилки δz (2) оцінки відбиваності Z_e РЛС-1 ($p \rightarrow \infty$)

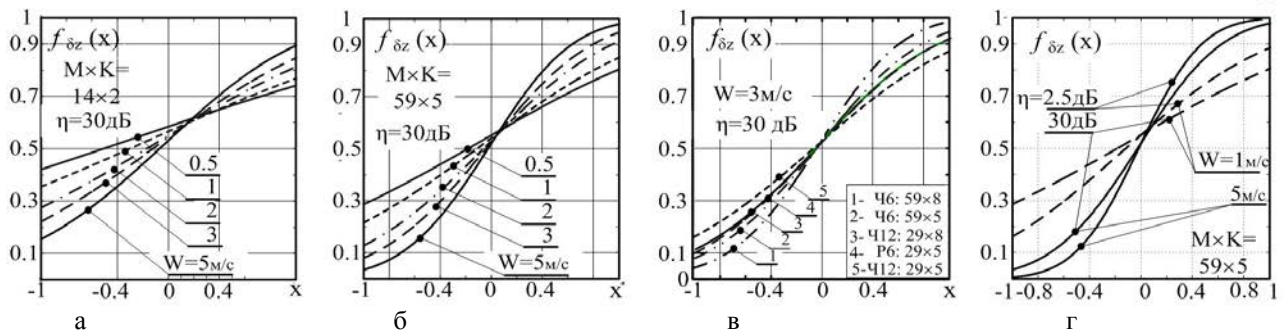


Рис. 2 Функції розподілу помилки δz (2) оцінки відбиваності Z_e РЛС-1 ($p \rightarrow \infty$)

Вплив коефіцієнта кореляції (КК) на точність виміру відбиваності МО проявляється тим сильніше, чим вище оцінювана відбиваність (рис. 2, г).

Це пов'язано з тим, що відбиваність визначається через інтенсивність МО, яка в свою чергу вимірюється не безпосередньо по сигналам від МО, а по їх адитивній суміші із внутрішнім шумом приймача, наявність якого спотворює справжній КК. "Спотворений" внутрішнім шумом приймача коефіцієнт кореляції $r(T)$ дорівнює добутку "коефіцієнта шуму" χ і КК $\rho(T)$ власне сигналу від МО

$$r(T) = \chi \cdot \rho(T), \quad \chi = \frac{\eta}{1 + \eta} < 1. \quad (22)$$

З (22) слідує, що при збільшенні інтенсивності η МО "коефіцієнт шуму" $\chi \rightarrow 1$ й $r(T) \rightarrow \rho(T)$. При зменшенні інтенсивності $\chi < 1$ й $r(T) < \rho(T)$.

Це приводить до того, що при однаковому коефіцієнті міжперіодної кореляції відліків відбиттів та інших рівних умовах інтенсивність потужних МУ буде вимірятися із меншою точністю, чим інтенсивність слабких МУ (рис. 2, г).

Зменшення кореляції відліків при фіксованому значенні ширини ДСШ W і відповідно зменшення помилок вимірювань відбиваності МО досягається

переходом від частого до рідкого режиму зондування простору. При такому переході та однакових об'ємах $M \times K$ навчальної вибірки в РЛС-1 вдається зменшити помилки вимірювань (рис. 2, в криві 4 і 5) і зберегти помилку на попередньому рівні при зменшенні значення K (рис. 2, в криві 4 і 3).

Б. Поряд з коефіцієнтом кореляції ймовірність $p(|\hat{\delta z}| \leq 1)$ також залежить від об'єму $M \times K$ навчальної вибірки, що використовується для оцінювання відбиваності МО. За інших рівних умов ця ймовірність буде тим більше, чим більше значення $M \times K$. Збільшення об'єму навчальної вибірки симетризує щільності розподілу помилки $\hat{\delta z}$ (рис. 1, а, б, в). При цьому медіани відповідних розподілів, які визначаються абсцисами точок перетину функцій розподілу і горизонтальної прямої на рівні 0.5, прагнуть до нуля. Це означає, що при збільшенні об'єму $M \times K$ вибірки математичне сподівання (зсув) оцінки (\hat{Z}_e) відбиваності МО щодо її справжнього значення зменшується.

Наявність ненульового зсуву обумовила використання в якості показника ефективності оцінювання середню потужність $\sigma_{\Sigma \hat{\delta z}}^2$ (1) помилки $\hat{\delta z}$ (2) замість дисперсії $\sigma_{\hat{\delta z}}^2$ помилки, що зазвичай використовується як традиційний статистичний показник якості оцінки.

В. Викладені результати справедливі також при апроксимації відбиттів від МО АР-процесами кінцевого порядку ($p < \infty$), зокрема, для крайнього випадку – АР-процесу з $p = 1$. Однак кількісні значення $\sigma_{\Sigma\delta z}^2$ (1) помилки $\hat{\delta z}$ (2) в цьому випадку можуть відчутно відрізнятись від випадку $p \rightarrow \infty$. Щоб упевнитись в цьому достатньо проаналізувати значення КК $\rho(T_{av})$ при фіксованому значенні ширини ДСШ W у випадках $p = 1$ та $p \rightarrow \infty$.

Відповідні залежності $\rho(T_{av})$ від W отримані з використанням виразів (16), (13), (15) і приведені на рис. 3.

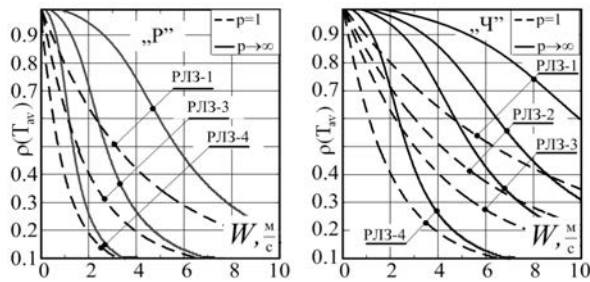


Рис. 3 Залежності коефіцієнта кореляції $\rho(T_{av})$ відліків відбиттів від МО від ширини ДСШ при їх апроксимації АР-процесами з $p \rightarrow \infty$ (суцільні криві) та $p = 1$ (пунктирні криві)

З них слідує, що при $p = 1$ значення $\rho(T_{av})$ для будь-якого фіксованого значення ширини ДСШ W менше за відповідне значення $\rho(T_{av})$ при $p \rightarrow \infty$. Це обумовлює зменшення значень $\sigma_{\Sigma\delta z}^2$ (1) помилки $\hat{\delta z}$ при $p = 1$. Оцінювання можливих на практиці МУ, відбиття від яких апроксимуються АР-процесами вищих порядків ($p > 1$), буде супроводжуватись зростанням помилки виміру відбиваності, поступово наближаючись до помилки при $p \rightarrow \infty$.

Слід також відзначити істотно різну “швидкість спадання” залежностей $\rho(T_{av})$ від W для РЛЗ, що розглядаються. В радіолокаційних засобах з високою частотою випромінювання зондувальних імпульсів (РЛЗ-1, РЛЗ-2) висока кореляція відліків зберігається на всьому діапазоні можливих значень ширини ДСШ W (рис. 3). Тому в таких РЛЗ, в порівнянні з РЛЗ з низькою частотою випромінювання (РЛЗ-4), слід очікувати більші значення помилок оцінювання Z_e та їх “повільне” зменшення при помітному збільшенні об’єму $M \times K$ навчальної вибірки. Сформульовані вище висновки більш наочно ілюструють графіки рис. 4.

В. На рис. 4 показані залежності потужності $\sigma_{\Sigma\delta z}^2$ (1) помилки $\hat{\delta z}$ (2) від ширини ДСШ для РЛЗ (табл. 1) і різних модельних умов. Видно, що помилка виміру відбиваності залежить від виду кореля-

ційних функцій, якими апроксимуються відбиття від МО (рис. 3). Вона мінімальна при експонентній ($p = 1$) і максимальна при гаусовій ($p \rightarrow \infty$) кореляційній функції.

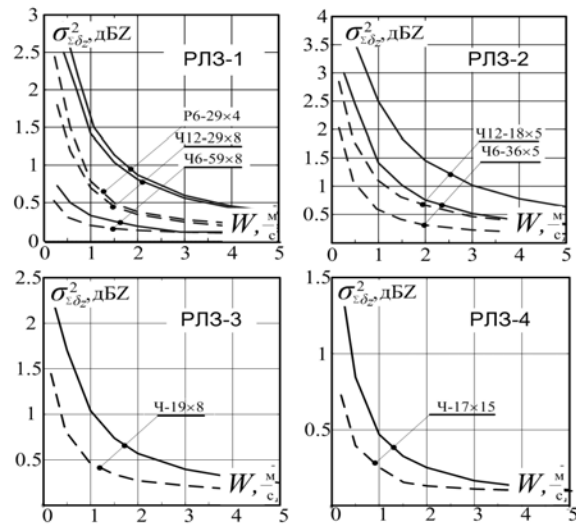


Рис. 4. Розрахункова середня потужність помилки $\hat{\delta z}$ (2) вимірювання відбиваності РЛЗ (табл. 3) при апроксимації відбиттів від МО АР-процесами з $p \rightarrow \infty$ (суцільні криві) та $p = 1$ (пунктир) при $\eta = 30$ дБ

Висока середня частота випромінювання зондувальних імпульсів в РЛЗ-1 ($F_{п,ср} = 1522$ Гц) спричинює високу кореляцію відліків відбиттів від МО. В наслідок цього вимірювання відбиваності в РЛЗ-1 здійснюється з більшою помилкою в порівнянні з РЛЗ-3, в якого $F_{п,ср} \approx 700$ Гц (рис. 3, РЛЗ-1, Ч12-29x8 і РЛЗ-3 Ч-19x8).

ВИСНОВКИ

1. Оцінювання відбиваності метеоутворень (МО) з необхідною ефективністю ($\sigma^2 = \pm 1$ дБЗ) у всьому діапазоні можливих ширин W доплерівського спектра швидкостей (ДСШ) забезпечується лише РЛЗ-4. Решта РЛЗ, що розглядалися, вимоги до якості оцінювання відбиваності забезпечують при $W \geq 2$ м/с, що достатньо для оцінювання потенційно небезпечних атмосферних явищ на етапі їх розпізнавання.

2. Розглянуті РЛЗ складають основу технічного парку РЛЗ РТВ. Вони розгорнуті практично рівномірно по всій території України, а їх кількість значно перевищує потрібну кількість спеціалізованих МРЛ для створення необхідного РЛП РМЯ над територією держави. При оснащенні розглянутих РЛЗ метеоканалами, вони можуть стати вагомим додатковим джерелом метеоінформації майбутньої єдиної національної інформаційної мережі гідрометеорологічного забезпечення та обслуговування

Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 29 травня 1996 р. N 579 "Про Державну програму науково-технічного переоснащення системи гідрометеорологічних спостережень та базової мережі спостережень за забрудненням навколишнього природного середовища". із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 24 вересня 1999 р. № 1763 (Офіційний вісник України, 1999 р., N 39, ст. 1943).
2. Проект Закону України „Про Загальнодержавну цільову соціальну програму захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012–2016 роки”, реєстр. №9542 від 06.12.11р.
3. Наказ Державної служби України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації, Міністерства охорони навколишнього середовища України, Міністерства оборони України "Про затвердження правил метеорологічного забезпечення авіації" №851/409/661. – К.: МО України, 2005. – 160 с.
4. Каталог продукції для гражданської авіації. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: www.gadar.net.ua.
5. Климченко В.І. Аналіз потенційних можливостей оглядових РЛС сантиметрового діапазону хвиль щодо забезпечення дії авіації Повітряних Сил України метеорологічною інформацією / В.І. Климченко, Г.Г. Камалтинов, В.Л. Місайлов // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – №1(25). – С. 21-27.
6. Довиак Р.Дж. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р.Дж. Довиак, Д.С. Зрнич; пер. с англ. под ред. А.А. Черникова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – 212 с.
7. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / [Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б. и др. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 209 с.
8. Рачков Д.С. Статистический анализ оценки средней мощности отражений от метеообразований / Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.И. Леховицкий, А.И. Дохов, В.И. Зарицкий // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Составные и перспективы развития» МРФ-2011, 18 – 21 октября 2011 г.: докл. – Х.: ХНУРЕ, 2011. – Т. 1, Ч. 1. – С. 86-89.
9. Леховицкий Д.И. Модифицированный метод парных импульсов для когерентных импульсных МРЛС с произвольными интервалами зондирования / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.В. Атаманский, А.А. Пушков // М.: Радиотехника / Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 3. – С. 25-45.
10. Леховицкий Д.И. Моделирование пассивных помех импульсным РЛС на основе процессов авторегрессии произвольного порядка / Д.И. Леховицкий, И.Г. Кириллов // Системи обробки інформації. – 2008. – № 3 (70). – С. 90-101.
11. Зубков О.В. Расширение области определения высотных профилей скорости ветра в наземных радиолокационных системах дистанционного зондирования атмосферы / О.В. Зубков, Д.А. Величко, Г.И. Сидоров // Радиозондирование. – 2003. – № 2. – С. 18-22.
12. Вопросы статистической теории радиолокации. Т. 1 / [Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др.]; под ред. Г.П. Тартаковского. – М.: Советское радио, 1963. – 424 с.
13. Справочник по специальным функциям. С формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган; пер. с англ. под ред. В.А. Диткина, Л.Н. Кармазиной. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 832 с.
14. Рыжков А.В. Характеристики метеорологических РЛС / А.В. Рыжков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 29-34.
15. Основы построения радиолокационного вооружения радиотехнических войск. / под ред. В.В. Литвинова. – Х.: ВИРТА ПВО, 1986. – 348 с.
16. Радиолокационная станция 36Дб. Эксплуатация и техническое обслуживание. Учебное пособие / [Май И. Д., Каспирович А. Г., Винник В. А. и др.]. – Запорожье, КЭМЗ "Искра", 2003. – 146 с.
17. Радиолокационная станция 36ДбМ. Эксплуатация и техническое обслуживание РЛС 36ДбМ. Учебное пособие / [Май И.Я., Каспирович А.Г., Винник В.А. и др.] – Запорожье, КЭМЗ "Искра", 2006. – 140 с.
18. Модернизация. Електрон. ресурс. – Режим доступу: <http://www.iskra.zp.ua/files/>.
19. Протокол первого этапа совместных испытаний адаптивных систем СДЦ, разработанных НИЦ ИИРЭСТ ХНУРЕ в рамках НИР "Прорыв-И" по договору № 05-3 от "03 " октября 2005 г. между КП НПК "Искра" и Харьковским национальным университетом радиоэлектроники. Запорожье, 17–19.07. 2006.
20. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.

Надійшла до редколегії 24.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Р.Е. Пашенко, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

ТОЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ОТРАЖАЕМОСТИ МЕТЕООБЪЕКТОВ ВОЕННЫМИ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Д.В. Атаманский, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка

Для типичных радиолокационных средств (РЛС) радиотехнических войск (РТВ) проанализированы и определены ошибки оценивания отражаемости метеообъектов. Показано, что указанные РЛС потенциально способны с необходимыми показателями качества обеспечивать измерение отражаемости опасных метеообразований на этапе их распознавания. При оснащении рассмотренных РЛС специальными каналами обработки отражений от метеообразований (метеосигналов), они могут стать весомым дополнительным источником метеоинформации государственной системы гидрометеорологических наблюдений и прогнозирования.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, вобуляция интервалов зондирования, метеорологические образования, отражаемость метеобъектов.

ACCURACY OF ESTIMATION OF METEOROLOGICAL OBJECTS REFLECTIVITY BY MILITARY RADAR MEANS OF CENTIMETER WAVEBAND

D.V. Atamanskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka

In the article, we determine and analyze the errors of meteorological objects' reflectivity estimation by typical radar means (RM) of radio engineering forces. It is shown that such radar means are potentially able to measure the reflectivity of hazardous meteorological formations (MF) with necessary quality factors at the stage of MF recognition. The considered radar means supplied with special channels for meteorological signal processing could serve as a substantial additional source of meteorological information for National integrated network of population warning about dangerous atmospheric phenomena.

Keywords: staggering of pulse repetition intervals, meteorological formation, statistical analysis.