Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396 DOI: 10.30748/nitps.2018.33.07

В.Ф. Зюкін, В.Й. Климченко, С.В. Кукобко

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

ВИМОГИ ДО ВІДДАЛЕННЯ І ВИСОТИ РОЗМІЩЕННЯ ІМІТАТОРІВ АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД ПРИ ПОЛІГОННИХ ВИПРОБУВАННЯХ ОГЛЯДОВИХ РЛС

Розраховується точність оцінки параметрів зони виявлення оглядових РЛС РТВ залежно від віддалення і висоти розміщення випромінюючого пристрою, що імітує реальний постановник активних перешкод. Враховуються сферичність фазового фронту падаючої на антенну решітку РЛС електромагнітної хвилі, а також перевідбиття перешкоди підстилаючою поверхнею. Визначаються вимоги до віддалення і висоти розміщення імітатора перешкод при випробуваннях РЛС. Отримані результати дозволяють також аналізувати параметри зон виявлення при використанні противником передавачів перешкод, що закидаються на позицію РЛС, або таких, що розміщуються на міні-БПЛА, які здійснюють польоти в межах ближньої зони антени РЛС.

Ключові слова: *постановник активних перешкод, імітатор активних маскуючих перешкод, віддалення від РЛС і висота розміщення імітатора перешкод, зона виявлення РЛС при дії активних маскуючих перешкод.*

Вступ

Оцінка якісних показників оглядових РЛС в умовах застосування повітряним противником активних шумових перешкод є важливою і досить трудомісткою частиною програм випробувань засобів радіолокації на полігонах. При випробуваннях в умовах перешкод зазвичай оцінюються параметри зони виявлення цілей, точнісні характеристики і роздільні здатності, можливості придушення перешкод і точності пеленгації їх джерел [1–4]. У більшості випадків для створення перешкодової обстановки замість польотів реальних постановників активних перешкод (ПАП) використовуються малопотужні імітуючи пристрої, встановлені, як правило [5–6], в дальній (чи в проміжній) зоні антени РЛС на відстані

$$r \geq kr_{мін} = kd^2/2\lambda , \qquad (1)$$

де $r_{мін} = d^2/2\lambda$ – межа ближньої зони антени (межа зони Френеля);

d – максимальний розмір апертури антени;

λ – довжина хвилі РЛС;

k – коефіцієнт, що приймає, за даними різних джерел [1; 3], значення від 1 до 4. Можна вважати, що умова $1 \leq k \leq 4$ відповідає межі між зонами Френеля і Фраунгофера (проміжній зоні антени).

Надмірне віддалення імітатора r небажане, оскільки ростуть вимоги до потужності його випромінювання, висоти встановлення $h_{ім}$, ускладнюються проблеми електромагнітної сумісності, технічного обслуговування імітатора та ін. Розміщення імітатора у ближній зоні може привести до отримання некоректних результатів випробувань [6–9].

Метою статті є уточнення умови (1) (значення коефіцієнта k) на основі аналізу спільного впливу як величини r, так і висоти встановлення $h_{ім}$ імітатора на точність оцінки конкретних показників перешкодозахищеності при випробуваннях оглядових РЛС. В умовах істотного перевідбиття радіохвиль земною поверхнею враховується також вплив висоти встановлення антени РЛС, яка визначає еквівалентний вертикальний розмір апертури.

Основна частина

1. Розрахунок залежності точності оцінки параметрів зони виявлення РЛС від віддалення імітатора перешкод r і висоти його встановлення $h_{ім}$.

Нехай РЛС, яка розміщена на рівній горизонтальній поверхні, з плоскою вертикально орієнтованою прямокутною еквідистантною антенною решіткою (АР) забезпечує виявлення (за вибраним критерієм [10–12]) цілей заданого типу на ізодальнісній ділянці зони виявлення навкруги на дальності $R_{мак}$ (далі $R_{мак}$=280 км). В умовах шумових перешкод, що створюються ПАП, зона виявлення стискається і зовнішня межа ізодальнісної ділянки буде функцією поточного азимута антени РЛС β:

$$R(\beta) = R_{мак}/k_{ст}(\beta) , \qquad (2)$$

© Зюкін В.Ф., Климченко В.Й., Кукобко С.В., 2018

де коефіцієнт стискування зони виявлення [1]:

$$k_{ст}(\beta)=\left[1+(N)^{-1}\sum_{i=1}^{m}\frac{P_i G_i A_i^{'}}{\Delta f_i 4\pi r_{пi}^2}\right]^{0,25}, \qquad (3)$$

де N – спектральна густина потужності власного шуму приймального пристрою РЛС;

i та m – номер і число ПАП;

P_i, Δf_i, G_i – параметри випромінювання i-го ПАП: ефективно випромінювана потужність передавача перешкод, ширина енергетичного спектру шумової перешкоди, коефіцієнт посилення антени передавача перешкод;

$r_{пi}$ – віддалення i-го ПАП;

$A_i^{'}$ – ефективна площа приймальної антени (антенної решітки) РЛС для напряму приходу і поляризації перешкодового коливання i-го ПАП.

За допомогою коефіцієнта стискування зони виявлення $k_{ст}(\beta)$ оцінимо відмінності в дальності виявлення $R(\beta)$ і ширині сектора ефективного придушення $\Delta\beta_{еф}$ при заміні стандартного ПАП, що впливає на РЛС ($m=1$, тому далі індекси "i" опускаємо), на імітатор перешкод.

Для стандартного ПАП приймається [1; 5], що при дії із зони баражування на віддаленні $r_п$ =200 км при висоті польоту 7...10 км (кут місця $\varepsilon_п=1,3...2,2^o$) його спектральна густина потужності випромінювання $N_п=PG/\Delta f$ =10…100 Вт/МГц (10^{-5}…10^{-4} Вт/Гц), а спектральна густина потоку потужності в точці фазового центру антени РЛС $N_{пРЛС}=N_п/4\pi r_п^2$ Вт/Гц м^2.

Вважатимемо, що сферичні координати ПАП ($\beta_п$, $\varepsilon_п$, $r_п$) і імітатора відрізняються тільки дальностями $r_п$ і r (або дальностями і кутами місця $\varepsilon_п$ і $\varepsilon_{iм}$), при цьому імітатор забезпечує (з дальності r при $\varepsilon_{iм}=\varepsilon_п$) таку ж спектральну густину потоку потужності біля антени РЛС, як і стандартний ПАП. Тоді вираз (2) можна представити у вигляді

$$R_j(\beta)=R_{мак}\big/k_{ст\,j}(\beta)=$$

$$=R_{мак}\Big/\left[1+(N)^{-1}N_{пРЛС}AF_j^2(\beta-\beta_п,\varepsilon_п)\right]^{0,25}, \qquad (4)$$

де j – номер даної моделі випробувань РЛС;

A – ефективна площа АР;

$F_j(\beta,\varepsilon)$ – нормоване вираження (характеристика направленості АР), що описує характер модуляції перешкодових коливань при круговому огляді простору для j-ї моделі випробувань РЛС.

Як і в [6], при $\varepsilon_{iм}=\varepsilon_п$ розглянемо три аналітичні моделі, що відповідають різним умовам випробувань. У першій ($j=1$) покладається, що на РЛС впливає стандартний ПАП (з дальності $r_п$ =200 км, коли фазовий фронт електромагнітної хвилі, що падає на АР, можна вважати плоским); перевідбиттям перешкоди від підстилаючої поверхні можна нехтувати. Тоді $F_1(\beta,\varepsilon)$ описує діаграму направленості (ДН) АР у вільному просторі, нормовану до її максимального значення $F_{1мак}$.

Друга аналітична модель ($j=2$) відрізняється від першої тим, що при розрахунку функції $F_2(\beta,\varepsilon)$ необхідно враховувати спотворення характеристики направленості АР, обумовлені перевідбиттям електромагнітних хвиль підстилаючою поверхнею.

У третій моделі, на відміну від другої, стандартний ПАП замінюється віддаленим на відстань $r\sim r_{мін}\ll r_п$ імітатором перешкод, тому при розрахунку функції $F_3(\beta,\varepsilon)$ додатково враховується залежна від r сферичність фазового фронту електромагнітної хвилі, що падає на АР.

Функції $F_2(\beta,\varepsilon)$, $F_3(\beta,\varepsilon)$, як і $F_1(\beta,\varepsilon)$, нормуються до максимального значення $F_{1мак}$.

При такій постановці задачі вирази $F_1(\beta,\varepsilon)$ і $F_2(\beta,\varepsilon)$ можуть розглядатися як окремі випадки (при $r\to r_п$) функції $F_3(\beta,\varepsilon)$, методику розрахунку якої (згідно [6] для $\varepsilon_{iм}=\varepsilon_п$) розглянемо окремо.

2. Методика розрахунку характеристики направленості АР F(β, ε).

При виконанні умови (1) спрямовані властивості елементарних випромінювачів АР не залежать від відстані до імітатора r, тому усі еволюції характеристики направленості АР (і зони виявлення РЛС) визначаються тільки множником системи [1; 13].

Для розрахунку множника системи $F_3(\beta,\varepsilon)$ скористаємося геометричними побудовами рис. 1, де, на основі використання відбивного трактування впливу

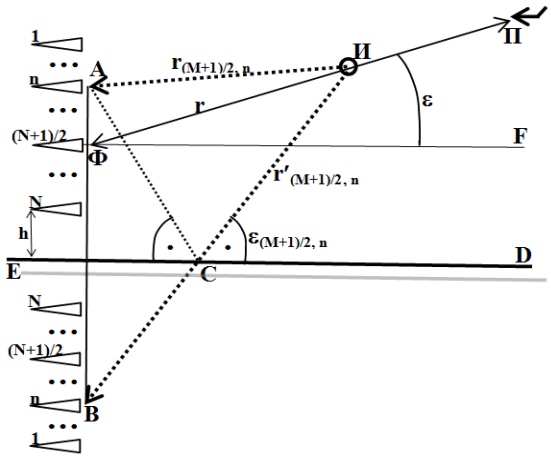

Рис. 1. Геометричні співвідношення для розрахунку виразу $F_3(\beta,\varepsilon)$

підстилаючої поверхні, показані елементи ($n = 1,...,N$) центрального стовпчика $M \times N$ елементної АР (розміром $d_M \times d_N$) і його дзеркальне відображення відносно плоскої, однорідної і горизонтальної віддзеркалювальної поверхні, позначеної горизонталлю ED. Число стовпців M і рядків N вибране непарним, так що, при симетричному амплітудно-фазовому розподілі (при симетричних вагових коефіцієнтах елементів АР $V_m, m = 1,...,M$; W_n, $n = 1,...,N$), положення центрального елементу (зі значеннями $m = (M+1)/2$; $n = (N+1)/2$ в точці Ф на рис. 1) співпадає з положенням фазового центру антени і не змінюється при її обертанні за азимутом.

Горизонтальний і вертикальний кроки між елементами АР, розміщеними у вузлах прямокутної сітки, відповідно рівні $\Delta d_M = d_M/(M-1)$ і $\Delta d_N = d_N/(N-1)$. Нижній (N-й) елемент АР розташований над віддзеркалювальною поверхнею на висоті h (далі, стосовно, наприклад, до РЛС метрового діапазону типу 1Л13, МР-1 і т.п., h =3 м; довжина хвилі λ =1,5 м; вертикальній розмір d_N =5 м; висота фазового центру АР $h_ф = h + d_N/2 = 5,5$ м).

На лінії ФП, що сполучає фазовий центр АР і стандартне джерело перешкод (ПАП), в точці И на віддаленні r ($ФИ = r$, при цьому $r > d_M$ і $r > d_N$) розміщений імітатор перешкод. Напрям на обидва джерела перешкод у вертикальній площині (лінія ФП) утворює з горизонталлю ФF, проведеною через фазовий центр АР, кут ε. Висота установки імітатора $h_{iм} = h_ф + r\sin\varepsilon$.

Пунктирними лініями $АИ = r_{(M+1)/2,n}$ і $АС + СИ = ВС + СИ = r'_{(M+1)/2,n}$ показані шляхи проходження прямої і відбитої електромагнітних хвиль від імітатора до n-го елемента центрального стовпчика АР. Шляхи проходження хвиль до різних елементів АР не паралельні, що обумовлено сферичністю фазового фронту електромагнітної хвилі, яка падає на АР. Для відбитої хвилі, що падає на поверхню розділу під кутом $ИСD = \varepsilon_{(M+1)/2,n}$, реальний шлях АС замінюється еквівалентним (рівним) йому уявним шляхом ВС, а для обліку спотворень вводиться комплексний коефіцієнт відбиття $P(\varepsilon)$ (приймемо $P(\varepsilon) = -\exp(-\varepsilon/2\varepsilon_л)$, де $\varepsilon_л$ – ширина променя ДН АР в кутомісній площині по рівню половинної потужності).

Вважаючи ДН антени імітатора ізотропною, нехтуючи просторовою і поляризаційною вибірковістю окремих елементів АР (переходячи до обчислення множника АР), а також нехтуючи запізнюванням комплексної обвідної перешкодового коливання від джерел перешкод в межах апертури АР та її дзеркального відображення, представимо суму комплексних амплітуд коливань в n-му елементі центрального стовпця АР у вигляді

$$u_{(M+1)/2,n} = E\exp(-j2\pi r_{(M+1)/2,n}/\lambda) + P(\varepsilon_{(M+1)/2,n})E\exp(-j2\pi r'_{(M+1)/2,n}/\lambda), \quad (5)$$

де E і $\exp(-j2\pi r_{(M+1)/2,n}/\lambda)$, $E\exp(-j2\pi r'_{(M+1)/2,n}/\lambda)$ – комплексна амплітуда перешкодового коливання, обумовленого прямою електромагнітною хвилею, і фазові множники, що враховують її запізнювання на шляху $АИ = r_{(M+1)/2,n}$ і $ВИ = r'_{(M+1)/2,n}$. Вигляд єдиного для усіх елементів АР співмножника E (з урахуванням подальшого нормування) несуттєвий, тому без втрати спільності приймемо E =1.

Для обчислення (5) в якості опорних використовуємо значення r, ε і параметри АР. З розгляду косокутних трикутників АФИ і ВФИ ($АФ = \Delta d_N\left|(N+1)/2 - n\right|$; $ВФ = 2\Delta d_N(N-n) + 2h$; кут $АФИ = \pi/2 - \varepsilon$ при $n < (N+1)/2$ і кут $АФИ = \pi/2 + \varepsilon$ при $n > (N+1)/2$; кут $ВФИ = \pi/2 + \varepsilon$) з використанням теореми косинусів неважко отримати:

$$r_{(M+1)/2,n} = \{r^2 + [\Delta d_N((N+1)/2 - n)]^2 - 2r\Delta d_N((N+1)/2 - n)\sin(\varepsilon)\}^{0,5}; \quad (6а)$$

$$r'_{(M+1)/2,n} = \{r^2 + [\Delta d_N((3N-1)/2 - n) + 2h]^2 + 2r[\Delta d_N((3N-1)/2 - n) + 2h]\sin(\varepsilon)\}^{0,5}. \quad (6б)$$

У записі (6а) знак модуля (у третьому доданку справа) опущений, що дозволяє усунути неоднозначність кута АФИ при різних значеннях n.

З трикутника ВФИ, в якому кут $ФВИ = \pi/2 - \varepsilon_{(M+1)/2,n}$, з використанням теореми синусів знайдемо:

$$\varepsilon_{(M+1)/2,n} = \arccos[(\cos\varepsilon)r / r'_{(M+1)/2,n}]. \quad (6в)$$

Вираз для суми комплексних амплітуд коливань в n-му елементі довільного (m-го) стовпчика АР $u_{m,n}$ отримаємо з (5) шляхом заміни значень (6а–6в) на $r_{m,n}$, $r'_{m,n}$, $\varepsilon_{m,n}$, які знайдемо з використанням рис. 2, де показаний фрагмент рис. 1 в аксонометричній проекції. Фрагмент представлений горизонтальною площиною Р, розташованою на висоті фазового центра АР (точка Ф), і горизонталлю ФF. Усі лінії на площині Р (рис. 2) суцільні, поза площиною – пунктирні. Пунктирна лінія $ФИ = r$, як і на рис. 1, сполучає фазовий центр АР та імітатор (точка И) і проходить під кутом ε до площини Р, а точка G є проекція точки И на площину. Лінія

$\Phi Z = \Phi Z'$ представляє фрагмент центрального рядка АР при розвороті антени в горизонтальній площині відносно напряму на імітатор на кут β, причому Φ і Z – точки розташування $(M+1)/2$-го і m-го елементів рядка, тому $\Phi Z = \Delta d_M \,|\,(M+1)/2 - m\,|$.

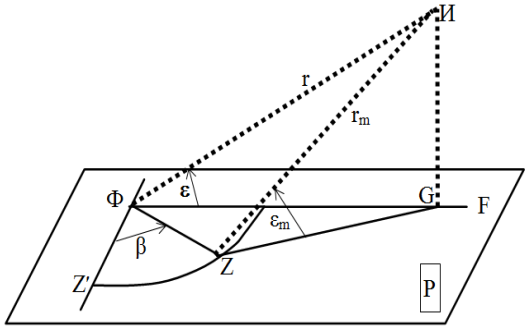

Рис. 2. Взаємне розташування рядка з елементами АР (лінія ΦZ) і імітатора (точка И)

З побудов рис. 2 очевидно, що якщо центральному елементу $(M+1)/2$-го стовпчика АР відповідають опорні значення $ФИ = r$ і кут $ИФG = \varepsilon$, то для центрального елементу m-го стовпця АР, в силу його зміщення, опорними значеннями слід вибрати $ZИ = r_m$ і кут $ИZG = \varepsilon_m$, тобто при розрахунку $u_{m,n}$ використовуємо (5), замінюючи в (6) значення r і ε на r_m і ε_m.

Оскільки $\Phi G = r\cos\varepsilon$, $ИG = r\sin\varepsilon$, кут $Z\Phi G = \pi/2 - \beta$ при $m < (M+1)/2$ і кут $Z\Phi G = \pi/2 + \beta$ при $m > (M+1)/2$, то з трикутника $ZФG$ по теоремі косинусів, з урахуванням запису (6а), знайдемо:

$$ZG = \{(r\cos\varepsilon)^2 + [\Delta d_M((M+1)/2 - m)]^2 - $$
$$- 2r\cos\varepsilon\cdot\Delta d_M((M+1)/2 - m)\sin\beta\}^{0.5};$$

а з прямокутного трикутника $ZGИ$ остаточно отримаємо:

$$r_m = \{r^2 + [\Delta d_M((M+1)/2 - m)]^2 -$$
$$-2r\cos\varepsilon\cdot\Delta d_M((M+1)/2 - m)\sin\beta\}^{0.5}; \quad (7а)$$
$$\varepsilon_m = \arcsin[(\sin\varepsilon)\,r/r_m]. \quad (7б)$$

Замінюючи в (6) значення r і ε на r_m і ε_m згідно (7), отримаємо:

$$r_{m,n} = \{r_m^2 + [\Delta d_N((N+1)/2 - n)]^2 -$$
$$-2r_m\,\Delta d_N((N+1)/2 - n)\sin(\varepsilon_m)\}^{0.5}; \quad (8а)$$
$$r'_{m,n} = \{r_m^2 + [\Delta d_N((3N-1)/2 - n) + 2h]^2 +$$
$$+2r_m\,[\Delta d_N((3N-1)/2 - n) + 2h]\sin(\varepsilon_m)\}^{0.5}; \quad (8б)$$
$$\varepsilon_{m,n} = \arccos[(\cos\varepsilon_m)\,r_m/r'_{m,n}] =$$
$$= \arccos\{[r_m^2 - (r\sin\varepsilon)^2]^{0.5}/r'_{m,n}\}. \quad (8в)$$

З урахуванням (8), загальний вираз для суми (5) комплексних амплітуд коливань в довільному елементі АР, який відповідає перетину m-го стовпця і n-го рядка АР, представимо у вигляді

$$u_{m,n} = u_{m,n}(\beta,\varepsilon,r) = \exp(-j2\pi\, r_{m,n}/\lambda) +$$
$$+ P(\varepsilon_{m,n})\exp(-j2\pi r'_{m,n}/\lambda). \quad (9)$$

Отримані комплексні амплітуди $u_{m,n}(\beta,\varepsilon,r)$ описують амплітудно-фазовий розподіл коливань по елементах АР при довільному значенні r. У результаті вираз $F_3(\beta,\varepsilon)$ визначається як значення нормованого модуля когерентної суми «зважених» комплексних амплітуд коливань (9) всіх елементів АР:

$$F_3(\beta,\varepsilon) = (1/F_{1\,мак})\left|\sum_{m,n} V_m W_n u_{m,n}(\beta,\varepsilon,r)\right|. \quad (10)$$

Цей вираз є функцією не тільки кутових координат β, ε, але і залежить від віддалення імітатора r, що обумовлене сферичністю фазового фронту падаючої на АР електромагнітної хвилі.

Для розрахунку виразу $F_2(\beta,\varepsilon)$ (друга аналітична модель випробувань: на РЛС впливає стандартний ПАП; враховуються спотворення ДН, обумовлені перевідбиттям електромагнітних хвиль підстилаючою поверхнею) скористаємося (10), вважаючи, що для даної моделі дальність до ПАП $r = r_п$ еквівалентна $r \to \infty$. Спростивши (7–8) з використанням граничного переходу, отримаємо незалежний від r вираз:

$$F_2(\beta,\varepsilon) = (1/F_{1\,мак})\left|\sum_{m,n} V_m W_n u_{m,n}(\beta,\varepsilon)\right|, \quad (11)$$

де

$$u_{m,n}(\beta,\varepsilon) = \exp\{j2\pi[\cos\varepsilon\,\Delta d_M((M+1)/2 - m)\sin\beta +$$
$$+\Delta d_N((N+1)/2 - n)\sin\varepsilon]/\lambda\} +$$
$$+P(\varepsilon)\exp\{j2\pi[\cos\varepsilon\,\Delta d_M((M+1)/2 - m)\sin\beta -$$
$$-[\Delta d_N((3N-1)/2 - n) + 2h]\sin\varepsilon]/\lambda\}. \quad (12)$$

Аналітичний вираз для першої моделі отримаємо з (11):

$$F_1(\beta,\varepsilon) = F_2(\beta,\varepsilon\,|\,P(\varepsilon) \equiv 0). \quad (13)$$

Вочевидь, (13), як і (11), від віддалення r не залежить. З (13), при дійсних вагових коефіцієнтах V_m, W_n, знайдемо:

$$F_{1\,мак} = \sum_{m,n} V_m W_n. \quad (14)$$

Отримані співвідношення для $F_j(\beta,\varepsilon)$ дозволяють перейти до розрахунку віддалення зовнішньої межі зони виявлення $R_j(\beta)$ при випробуваннях РЛС в різних умовах впливу активних маскуючих перешкод.

3. Зіставлення дальності виявлення цілей при перешкодовому впливі на РЛС стандартного ПАП та імітуючого пристрою.

На рис. 3а, 3б, в прямокутних координатах азимут – дальність $(\beta - R)$, представлені (у районі сектора ефективного придушення при $\beta_п = 0$) фрагменти зони виявлення РЛС метрового діапазону, розраховані з використанням (4;10–11). Передбачається, що на РЛС впливають перешкоди від стандартного ПАП зі спектральною густиною потужності випромінювання шумової перешкоди $N_п = 10$ Вт/МГц (крива $R_2(\beta)$) або від імітатора, встановленого на різних відстанях (криві $R_3(\beta)$).

Потужність випромінювання імітатора залежить від дальності (забезпечує, з дальності r при $\varepsilon_{ім} = \varepsilon_п$, таку ж спектральну густину потоку потужності в точці стояння антени РЛС $N_{п\,РЛС}$, як і стандартний ПАП) і не залежить від висоти його установки $h_{ім}$.

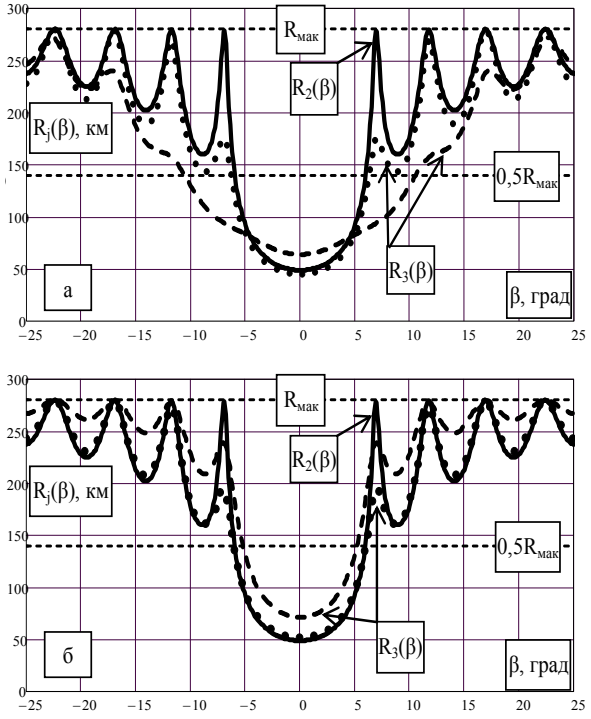

Рис. 3. Фрагменти зони виявлення при впливі на РЛС стандартного ПАП (криві $R_2(\beta)$) і імітатора перешкод:
а – віддалення імітатора r =50 м і r =350 м (штрихова і пунктирна криві $R_3(\beta)$ відповідно, кут місця імітатору $\varepsilon_{ім} = \varepsilon_п$);
б – віддалення імітатора r = 350 м, кут місця імітатора $\varepsilon_{ім} = 0°$ і $0{,}5\varepsilon_п$ (штрихова і пунктирна криві $R_3(\beta)$ відповідно)

Межа зони виявлення за відсутності перешкод позначена штриховою прямою $R_{мак} = 280$ км. Допоміжна штрихова пряма при $R = 0{,}5\,R_{мак}$ служить для оцінки ширини сектору ефективного придушення.

Криві $R_3(\beta)$ на рис. 3, а дозволяють оцінити ступінь спотворення межі зони виявлення при віддаленні імітатору r на 50 м і 350 м і незмінному куті місця $\varepsilon_{ім} = \varepsilon_п$ (висота установки імітатора $h_{ім} = h_ф + r\sin\varepsilon_п$ складає 7,3 м і 18 м).

Криві $R_3(\beta)$ на рис. 3, б дозволяють врахувати ступінь спотворення межі зони виявлення при незмінному віддаленні $r = 350$ м і різних кутах місця імітатора: $\varepsilon_{ім} = 0^o$ і $0{,}5\varepsilon_п$ (висота імітатора $h_{ім}$ складає 5,5 м і 12 м).

Аналогічні криві $R_3(\beta)$ на рис. 4 характеризують спотворення межі зони виявлення при незмінному куту місця імітатора $\varepsilon_{ім} = 0^o$ (висота імітатора $h_{ім} = h_ф = 5{,}5$ м) і різних віддаленнях: r = 50, 350, 700 і 1400 м.

Використовувані при розрахунках параметри РЛС мають наступні значення.

Спектральна густина потужності власного шуму приймального пристрою (при коефіцієнті шуму $Ш = 2...3$) $N = 10^{-20}$ Дж.

Коефіцієнт придушення шумових перешкод при реалізації алгоритмів просторової (і поляризаційної) селекції їх джерел K = 20 дБ.

Ефективна площа приймальної антени РЛС (антенної решітки)

$$A = F_{l\,мак}\,(d_M \times d_N)/(M \times N),$$

де добуток горизонтального і вертикального розмірів АР $d_M \times d_N = 15 \times 5$ м^2, а добуток числа стовпчиків на число рядків $M \times N = 15 \times 5$.

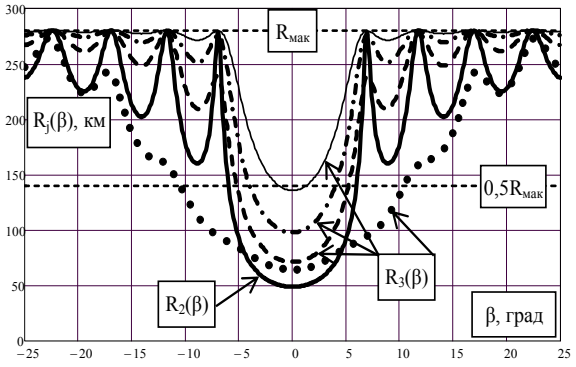

Рис. 4. Фрагмент зони виявлення при дії на РЛС стандартного ПАП (крива $R_2(\beta)$) і імітатора перешкод при його установці під кутом місця $\varepsilon_{ім} = 0^o$ і віддаленні r = 50, 350, 700 і 1400 м (пунктирна, штрихова, штрих-пунктирна і суцільна тонка криві $R_3(\beta)$ відповідно)

Амплітудно-фазовий розподіл (АФР) по горизонталі АР задається косинусоїдальною функцією $V_m = 1/3 + (2/3)\cos[\pi/2 - \pi(m-1)/(M-1)]$, що забезпечує азимутну ширину головного променя $\beta_л = 6^o$. При аналогічному АФР W_n по вертикалі ширина променя АР в кутомісній площині $\varepsilon_л = 20^o$. Для зменшення інтерференційної порізаності промінь відхилений по куту місця на кут $\varepsilon_н = 5^o$, тому вагові коефіцієнти W_n у формулах (10–11) домножені на комплексні співмножники $f_n = \exp[-j2\pi\,\Delta d_N((N+1)/2 - n)\sin(\varepsilon_н)/\lambda]$.

При істотному відбитті радіохвиль [1; 3] земною поверхнею ($P(\varepsilon) \approx -1$) вимоги до коефіцієнта k у виразі (1) можуть зрости, оскільки замість вертикального розміру апертури антени повинен враховуватися її еквівалентний вертикальний розмір, що включає дзеркальне відображення АР.

Висновки

1. Результати розрахунків показують, що при порівняно малих віддаленнях (1) імітатора ПАП ($r \sim r_{мін} = d^2/2\lambda \approx 75$ м; коефіцієнт $k \sim 1...2$) мають місце значні спотворення (зсув, згладжування, розмиття) характеристики направленості АР, що приводять до спотворень спостережуваної форми зони виявлення (рис. 3,а–4) і погрішностям в оцінці її параметрів. Так, помилки в оцінці ширини сектора ефективного придушення можуть досягати +(70…150)% щодо тієї ширини, яка була б при дії стандартного ПАП. Погрішності в оцінці дальності виявлення РЛС (при дії джерел перешкод з напрямів, відповідних ближнім бічним пелюсткам ДНА) складають мінус 50…100 км. Зміна висоти установки імітатора в межах $h_{ім} \approx 5...20$ м практично не впливає на вказані погрішності оцінок.

2. Коректні оцінки параметрів зони виявлення РЛС можуть бути отримані при віддаленні $r \approx 400...500$ м (коефіцієнт $k \sim 5...6$) і розміщенні імітаторів на вежах, що забезпечують висоту $h_{ім} \approx 15...30$ м (рис. 3,а–б) для виконання умови $\varepsilon_{ім} \approx \varepsilon_п$.

3. Часто використовується наземне розміщення імітаторів при забезпеченні прямої видимості між антенами РЛС і імітатора (наприклад, стосовно рис. 4 висота імітатора $h_{ім} = h_ф = 5,5$ м, що відповідає куту місця $\varepsilon_{ім} = 0^o$). Якщо потужність імітатора коректується тільки з урахуванням дальності r, то при його наземному розміщенні і віддаленні спостережувана форма зони виявлення РЛС істотно спотворюватиметься через додаткове ослаблення перешкоди (рис. 4). Обумовлено це формуванням (у напрямі $\varepsilon_{ім} = 0^o$) в характеристиці направленості АР $F_3(\beta, \varepsilon)$ інтерференційного провалу, глибина якого зростає із збільшенням r. Відповідним додатковим коректуванням потужності випромінювання імітатора можна добитися (при $r \geq 350$ м) задовільного збігу кривих $R_2(\beta)$ і $R_3(\beta)$ (рис. 4), що дозволить отримати коректні оцінки параметрів зони виявлення РЛС і при наземному розміщенні імітаторів перешкод.

4. При істотному відбитті радіохвиль земною поверхнею і збільшеній висоті установки антени РЛС h максимальний розмір апертури d в (1) повинен обчислюватися з урахуванням еквівалентного вертикального розміру апертури $d_{Nє} = 2(d_N + h)$, який включає дзеркальне відображення розкриву (рис. 1).

5. Спотворення характеристики направленості АР при імітації ПАП приведуть до погрішностей в оцінці й інших показників якості радіолокаційної інформації. Розрахунок таких погрішностей може ґрунтуватися на отриманому вище амплітудно-фазовому розподілі коливань по елементах АР з урахуванням сферичності фазового фронту електромагнітної хвилі (9), використовуваному зазвичай в різних алгоритмах обробки інформації.

6. Викладена методика обґрунтування вимог до засобів імітації перешкодової обстановки може бути використана при організації та проведенні полігонних випробувань оглядових РЛС різних типів і діапазонів довжин хвиль.

7. Отримані результати дозволяють також аналізувати параметри зон виявлення при використанні противником передавачів перешкод, що закидаються на позицію РЛС, або розміщуваних на міні-БПЛА, що здійснюють польоти в межах ближньої зони антени РЛС.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

2. Бархударян М.В. Основні завдання та вимоги до полігонного випробувального комплексу / М.В. Бархударян, К.К. Кулагін, О.М. Мішуков, Б.О. Чумак // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 2(34). – С. 2-5.

3. Skolnik M.I. Radar Handbook. Third Ed. / M.I. Skolnik. – McGraw-HillBook Company, 2008, ISBN 0071485473.

4. Keysight Technologies, 5990-7036RURU (5990-5442EN/5990-5442RURU). 2017. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.keysight.com.

5. Литвинов В.В. Обзор работ ВИРТА ПВО по безоблетному контролю зон обнаружения РЛС / В.В. Литвинов, В.Ф. Зюкин, М.Р. Арасланов // Прикладная радиоэлектроника. – Харків: АНПРЕ, ХНУРЕ. – 2009. – № 4. – С. 469-476.

6. Зюкин В.Ф. Требования к удалению имитаторов активных помех при полигонных испытаниях РЛС / В.Ф. Зюкин, А.В. Белавин, Д.Ю. Свистунов // Системи обробки інформації. – 2013. – №1(108). – С. 56-60.

7. Gorobets N.N. Fields of a rectangular loop antenna in the near-field zone / N.N. Gorobets, A.V. Trivaylo // Telecommunication and radio engineering – 2010. – Vol. 69, issue 11. – P. 947-957.

8. Gorobets N.N. Curved Dipole in the Near-Field and Far-Fiel Zones of Observation / N.N. Gorobets, A.V. Trivaylo // ICAT, 7-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 6-9 October 2009: conf. proc. – Lviv, 2009. – P. 102-104.

9. Gregson S.F. Conical Near-Field Antenna Measurements [AMTA Corner] / S.F. Gregson, G.E. Hindman // Antennas and Propagation Magazine, IEEE. – 2009. – T. 51. – No. 1. – P. 193-201.

10. Зюкин В.Ф. Предельная дальность обнаружения и опознавания движущейся цели обзорной РЛС военного назначения / В.Ф. Зюкин, Д.А. Гриб, А.Н. Колесник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2011. – № 2(6). – С. 65-68.

11. Бєлавін О.В. Експериментально-розрахунковий метод оцінки параметрів зон виявлення первинних та вторинних РЛС / О.В. Бєлавін, Г.Г. Камалтинов, О.С. Маляренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – № 3(9).– С. 69-73.

12. Бєлавін О.В. Експериментально-аналітичний спосіб визначення нижньої крайки зони виявлення повітряних об'єктів перспективною РЛС МР-1 / О.В. Бєлавін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – №1(4). – С. 69-73.

13. Radartutorial.eu. Ingenieurburo Christian Wolff 2018 – [Electronic resource]. – Available at: www.slideshare.net/hossamzein/radartutorial.eu.

References

1. Shirman, Ya.D., Bagdasaryan, S.T. and Malyarenko, A.S. (2007), "*Radioelektronnyie sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop.*" [*Radio electronic systems: Bases of construction and theory. Reference book.*], Radio engineering, Moscow, 512 p.

2. Barkhudarian, M.V., Kulahin, K.K., Mishukov, O.M. and Chumak, B.O. (2013), "Osnovni zavdannia ta vymohy do polihonnoho vyprobuvalnoho kompleksu" [The basic requirements and tasks of ground proof-of-concept complex], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2(34), pp. 2-5.

3. Skolnik, M.I. (2008), *Radar Handbook*, Third Ed. McGraw-HillBook Company, ISBN 0071485473.

4. (2017), *Keysight Technologies*, 5990-7036RURU (5990-5442EN/5990-5442RURU), available at: www.keysight.com.

5. Litvinov, V.V., Zyukin, V.F. and Araslanov, M.R. (2009), "Obzor rabot VIRTA PVO po bezobletnomu kontrolyu zon obnaruzheniya RLS" [Review of works of VIRTA PVO on control of areas of discovery radar], *Applied radio electronics*, No. 4, ANPRE, HNURE, Kharkiv, pp. 469-476.

6. Zyukin, V.F., Belavin, A.V. and Svistunov, D.Yu. (2013), "Trebovaniya k udaleniyu imitatorov aktivnyih pomeh pri poligonnyih ispyitaniyah RLS" [Requirement to the delete of active noise simulators at ground tests radar], *Information Processing Systems*, No. 1(108), pp. 56-60.

7. Gorobets, N.N. and Trivaylo, A.V. (2010), Fields of a rectangular loop antenna in the near-field zone, *Telecommunication and radio engineering*, Vol. 69, No. 11, pp. 947-957.

8. Gorobets, N.N. and Trivaylo, A.V. (2009), Curved Dipole in the Near-Field and Far-Fiel Zones of Observation, *ICAT, 7-th International Conference on Antenna Theory and Techniques: conf. proc.,* October 6-9, 2009, Lviv, pp. 102-104.

9. Gregson, S.F. and Hindman, G.E. (2009), Conical Near-Field Antenna Measurements (AMTA Corner), *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, Vol. 51, No. 1, pp. 193-201.

10. Zyukin, V.F., Grib, D.A. and Kolesnik, O.M. (2011), "Predelnaya dalnost obnaruzheniya i opoznavaniya dvizhuscheysya tseli obzornoy RLS voennogo naznacheniya" [Maximum distance of discovery and identification of moving-target survey radar of military-oriented], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(6), pp. 65-68.

11. Bielavin, O.V., Kamaltynov, H.H. and Maliarenko, O.S. (2012), "Eksperymentalno-rozrakhunkovyi metod otsinky parametriv zon vyiavlennia pervynnykh ta vtorynnykh RLS" [Experimentally-calculation method of estimation of parameters of areas of discovery primary and second radar], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(9), pp. 69-73.

12. Bielavin, O.V. (2014), "Eksperymentalno-analitychnyi sposib vyznachennia nyzhnoi kraiky zony vyiavlennia povitrianykh obiektiv perspektyvnoiu RLS MR-1" [Experimentally analytical method of determination of lower limit of area of exposure of air objects by perspective radar of MR-1], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(4), pp. 69-73.

13. (2018), Radartutorial.eu, *Ingenieurburo Christian Wolff*, available at: www.slideshare.net/hossamzein/radartutorial.eu.

Надійшла до редколегії 18.09.2018
Схвалена до друку 22.10.2018

Відомості про авторів:

Зюкін Володимир Федорович
кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9461-9071

Information about the authors:

Volodimir Zyukin
Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior Research Associate of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9461-9071

Климченко Василь Йонович
кандидат технічних наук доцент
провідний науковий співробітник Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3999-8130

Vasyl Klimchenko
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Lead Researcher of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3999-8130

Кукобко Сергій Вікторович
кандидат технічних наук старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного відділу
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6289-4458

Sergiy Kukobko
Candidate of Technical Sciences Senior Research
Chief of Scientific Research Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6289-4458

ТРЕБОВАНИЯ К УДАЛЕНИЮ И ВЫСОТЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ИМИТАТОРОВ АКТИВНЫХ ПОМЕХ ПРИ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБЗОРНЫХ РЛС

В.Ф. Зюкин, В.И. Климченко, С.В. Кукобко

Рассчитывается точность оценки параметров зоны обнаружения обзорных РЛС РТВ в зависимости от удаления и высоты размещения излучающего устройства, имитирующего реальный постановщик активных помех. Учитывается сферичность фазового фронта падающей на антенную решетку РЛС электромагнитной волны, а также переотражение помехи подстилающей поверхностью. Определяются требования к удалению и высоте установки имитатора помех при испытаниях РЛС. Полученные результаты позволяют также рассчитывать параметры зон обнаружения при использовании противником передатчиков помех, забрасываемых на позицию РЛС, или размещаемых на мини-БПЛА, совершающих полеты в пределах ближней зоны антенны РЛС.

Ключевые слова: *постановщик активных помех, имитатор активных маскирующих помех, удаление от РЛС и высота размещения имитатора помех, зона обнаружения РЛС при воздействии активных маскирующих помех.*

REQUIREMENTS FOR THE REMOVAL AND HEIGHT OF THE ACTIVE INTERFERENCE IMITATORS LOCATION IN THE SURVEILLANCE RADARS GROUND TEST

V. Zyukin, V. Klimchenko, S. Kukobko

The accuracy of the radiotechnical troops surveillance radars detection zone parameters estimation is calculated as a function of the removal and the height of the radiating device location, which simulating the real jammer-carrying target. The sphericity of the electromagnetic wave phase front incident on the radar array is taken into account, as well as the reflection of the interference by the underlying surface. The requirements for removal and installation height of the interference imitator for radar tests are determined. It is shown that at relatively small distances (location in the Fresnel zone) of the active interference imitator, there are significant distortions (displacement, smoothing, blurring) of the antenna array directivity, leading to distortions in the observed shape of the detection zone and errors in the estimation of its parameters. Distortions in the directivity characteristic of the antenna array will lead to errors in the evaluation of other radar information quality indicators. The calculation of such errors can be based on the obtained amplitude-phase distribution of the oscillations along the lattice elements, taking into account the sphericity of the electromagnetic wave phase front. Correct estimates of the typical meter wavelength rang radar detection zone parameters can be obtained by placing imitator on towers 15 to 30 m high remote from the radar by 400...500 m. If the radar is significantly reflected by the earth's surface and the antenna height of the radar is increased, the aperture maximum size should be calculated taking into account the equivalent vertical aperture size, which includes a mirror image of the aperture. The presented methodology for substantiating the requirements for imitation of an interference situation can be used in organizing and conducting ground test of surveillance radars of various types and wavelength ranges. The obtained results also make it possible to calculate the parameters of the detection zones when the enemy uses interference transmitters thrown at the position of the radar or placed on mini UAVs flying within the near zone of the radar antenna.

Keywords: *jammer-carrying target, active masking interference imitator, the distance from the radar and the height of the interference imitator location, the radar detection zone under the influence of active masking interference, the detection zone when the enemy is throwing interference transmitters to the position of the radar.*