Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.96

DOI: 10.30748/nitps.2021.42.11

В.Й. Климченко¹, В.О. Тютюнник¹, Д.А. Дончак², К.А. Тах'ян¹

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

² Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

АНАЛІЗ ПРИЧИН НЕВІДПОВІДНОСТІ ФОРМУЛЯРНИХ І РЕАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОН ВИЯВЛЕННЯ ЦІЛЕЙ ОГЛЯДОВИМИ РЛС КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Проаналізовані чинники, що визначають параметри зони виявлення цілей оглядовим радіолокатором. З'ясовані причини невідповідності формулярних і реальних значень параметрів зон виявлення цілей оглядовими РЛС контролю повітряного простору. Визначено вплив погіршення технічних характеристик РЛС через тривалу експлуатацію на параметри зон виявлення та встановлено припустимі межі зниження основних технічних параметрів РЛС, за яких вона ще зберігає працездатність. Визначено вплив різних чинників на параметри зон виявлення цілей радіолокаційними станціями при розгортанні їх на реальних позиціях.

Ключові слова: оглядові радіолокаційні станції, зона виявлення цілей, рельєф, підстильна поверхня, гідрометеоутворення.

Вступ

Постановка проблеми. Для тих РЛС, які були прийняті на озброєння до 1992 року, параметри зон виявлення визначались в процесі тривалих обльотів під час державних випробувань на полігоні Капустин Яр. Рельєф в районі цього полігону являє собою ідеальну рівнинну напівпустиню з рідкою трав'яною рослинністю. Це давало змогу визначити параметри зон виявлення експериментально-аналітичними методами, за яких обльотами визначались дальності виявлення цілей на окремих висотах польоту (найчастіше на висотах 100, 200, 500, 1000, 5000, 10000 метрів), а проміжні значення визначались аналітичними методами. При правильному врахуванні характеру рельєфу та відбиваючих властивостей місцевості результати аналітичних розрахунків збігаються з даними обльотів. Для рівнинної однорідної місцевості, якою є полігон Капустин Яр, ніяких проблем з врахуванням рельєфу не виникало, через що аналітичні розрахунки досить точно збігались з практичними даними.

Реальні позиції, на яких розгортаються РЛС, значною мірою відрізняються від полігонних умов. Тому паспортні дані щодо параметрів зон виявлення потребують уточнення для кожної позиції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уточнення паспортних даних щодо параметрів зон виявлення мають здійснюватися через проведення обльотів РЛС на конкретних позиціях. В [1] доведено, що для визначення зони виявлення цілей (дальностей на висотах 100, 500, 4000...6000 і 10000...12000 метрів)

типової оглядової РЛС необхідно провести понад 20–25 спеціальних обльотів. А при більш детальному оцінюванні суцільної границі зони виявлення (перерізу її вертикальною площиною) необхідні додаткові обльоти на інших, проміжних, висотах, наприклад, 200, 1000...2000, 8000...9000 метрів, через що кількість обльотів зростає до 35–40. При цьому тривалість обльоту однієї РЛС може досягати кількох десятків годин. Обльоти здійснюються, як правило, літаками тактичної авіації, вартість години польоту яких [2] становить десятки тисяч гривень.

В здійсненні обльотів на великих та стратосферних висотах при розгортанні РЛС на середньопересіченій місцевості особливої потреби, як правило, не виникає. Паспортні дані збігаються з реальними, оскільки вплив місцевості на формування зони виявлення на великих і середніх висотах незначний. За необхідності проблема обльотів на великих та стратосферних висотах частково може бути вирішена за рахунок використання рейсових польотів літаків цивільної авіації. Така можливість може бути успішно реалізована в РЛС нового покоління з розвинутою системою документування інформації. В РЛС старого парку накопичення такої інформації здійснюється, як правило, в спеціальних журналах вручну і є менш ефективним.

Більш гострою є проблема обльотів РЛС на малих та гранично малих висотах. Вирішення її значною мірою ускладнюється з кількох причин.

По-перше, проведення обльотів РЛС у необхідному обсязі є надзвичайно витратним заходом і вимагає багато часу.

По-друге, проведення обльотів на гранично малих висотах є надзвичайно небезпечним.

По-третє, обльоти мають здійснюватись відповідно обладнаними літальними апаратами і спеціально підготовленими екіпажами.

По-четверте, проведення обльотів оглядових РЛС з дальністю виявлення цілей в кілька сотень кілометрів є просторово масштабним заходом і в густонаселених регіонах України обльоти можуть здійснюватись тільки в окремих напрямках.

Тому на сьогодні при визначенні реальних можливостей з виявлення цілей радіолокаційними засобами, розгорнутими на конкретних позиціях, широко застосовують експериментально-розрахункові методи, які засновані на частковому використанні натурних даних, отриманих в процесі державних випробувань, і математичного моделювання. Таке поєднання дозволяє оцінити характеристики РЛС з необхідною достовірністю в усіх умовах її практичного застосування при мінімальних витратах часу і засобів [3].

Метою цієї статті є з'ясування причин невідповідності формулярних і реальних значень параметрів зон виявлення цілей оглядовими РЛС контролю повітряного простору та визначення впливу різних чинників на параметри зон виявлення цілей радіолокаційними станціями при розгортанні їх на реальних позиціях.

Виклад основного матеріалу

1. Чинники, що визначають параметри зони виявлення цілей оглядовим радіолокатором.

Зоною виявлення (ЗВ) цілей є область простору, в межах якої виявлення цілі із заданою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР) здійснюється радіолокатором в кожному огляді з імовірністю не менш заданої P_e при рівні хибних тривог не більше заданого значення F_{xm} .

В загальному вигляді аналітичний опис зони виявлення цілей здійснюється [4] як набір вертикальних її перетинів на різних азимутальних напрямках:

$$r(\varepsilon, \beta) = \sqrt[4]{\frac{P_{cp} T_o G_e A_{ef} \sigma_u}{(4\pi)^2 \cdot v_{nor} \cdot L_{PLC} \cdot k \cdot T \cdot III \cdot L_z}} \cdot F_o(\varepsilon) \cdot \Phi_z(\varepsilon, \beta), \quad (1)$$

де P_{cp} – середня потужність передавача;

T_o – період огляду простору;

A_{ef} – ефективна площа антени;

σ_u – ЕПР цілі;

v_{nor} – поріг виявлення оброблених ехосигналів, за якого забезпечується виявлення цілі з імовірністю не менш заданої P_e при рівні хибних тривог не більше заданого значення F_{xm} ;

L_{PLC} – сумарні втрати сигналів в РЛС в трактах обробки;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – стала Больцмана;

$T \approx 300^\circ$ – приведена шумова температура;

III – коефіцієнт шуму приймального пристрою;

L_z – затухання електромагнітних коливань при поширенні в атмосфері;

$F_o(\varepsilon)$ – діаграма спрямованості у вертикальній площині у вільному просторі;

G_e – направленість зони огляду простору;

$\Phi_z(\varepsilon, \beta)$ – інтерференційний множник Землі.

Для РЛС із регулярним круговим оглядом простору

$$G_e = \frac{2}{\int_0^{\pi/2} F_o^2(\varepsilon) \cdot \cos \varepsilon \cdot d\varepsilon}. \quad (2)$$

Інтерференційний множник Землі $\Phi_z(\varepsilon, \beta)$ є найбільш складним та невизначеним елементом у формулі (1). Інтерференційний множник Землі у загальному вигляді описується виразом [5]:

$$\Phi_z(\varepsilon, \beta) = \sqrt{1 + R^2(\varepsilon, \beta) \frac{F_o^2(\varepsilon_m + \varepsilon)}{F_o^2(\varepsilon_m - \varepsilon)} + 2R(\varepsilon, \beta) \frac{F_o(\varepsilon_m + \varepsilon)}{F_o(\varepsilon_m - \varepsilon)}} \times \cos \left(2\pi \frac{2h_a}{\lambda} \sin \varepsilon + \psi(\varepsilon, \beta) \right), \quad (3)$$

де $R(\varepsilon, \beta)$, $\psi(\varepsilon, \beta)$ – модуль і аргумент коефіцієнта віддзеркалення від землі;

ε_m – кут нахилу максимуму ДНА $F_o(\varepsilon)$ над лінією горизонту.

Отже, форма і розміри зони виявлення визначаються багатьма чинниками, які можна звести в чотири групи:

- відбиваючі властивості цілей;
- технічні параметри радіолокатора та режими огляду простору;
- рельєф місцевості в районі позиції;
- дія тропосфери на поширення радіохвиль.

2. Вплив погіршення технічних характеристик РЛС через тривалу експлуатацію на параметри зон виявлення.

Зв'язок між параметрами зони виявлення цілі з ЕПР σ_u і технічними параметрами РЛС визначається співвідношенням (1). Це співвідношення можна подати в іншому вигляді

$$r(\varepsilon, \beta) = r_{\max} \cdot F_o(\varepsilon) \cdot \Phi_z(\varepsilon, \beta), \quad (4)$$

де

$$r_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{cp} T_o G_e A_{ef} \sigma_u}{(4\pi)^2 \cdot v_{nor} \cdot L_{PLC} \cdot k \cdot T \cdot III \cdot L_z}} \quad (5)$$

максимальна дальність виявлення цілей, яку можна виразити через енергетичний потенціал РЛС:

$$r_{\max} = 4 \sqrt{E \frac{\sigma_y}{L_3}}, \quad (6)$$

де

$$E = \frac{P_{cp} T_o G_e A_{ef}}{(4\pi)^2 \cdot v_{nop} \cdot L_{PLC} \cdot k \cdot T \cdot \Pi} \quad (7)$$

є енергетичний потенціал РЛС.

В процесі експлуатації реально можуть змінюватись такі технічні параметри РЛС, як середня потужність передавача P_{cp} , коефіцієнт шуму приймального пристрою Π і сумарні втрати сигналів в РЛС в трактах обробки L_{PLC} . Решта параметрів (G_e , A_{ef} , T_o , $F_o(\epsilon)$) з часом залишаються незмінними, якщо відсутні явні механічні пошкодження, які б порушували конструкцію антенної системи.

Середня потужність з часом роботи має тенденцію до зниження, а коефіцієнт шуму та втрати сигналів в трактах обробки збільшуються.

У відповідності з [6] РЛС вважається працездатною, якщо її основні технічні параметри (серед них і ті, які впливають на ЗВ) оцінюються не нижче, ніж “задовільно”, тобто відхилення параметрів від норм технічних умов не перевищує 15 % (коефіцієнт шуму приймальних каналів не перевищує технічні умови більш як на дві одиниці, чутливість у децибелах не нижче 4 % від технічних умов).

Отже, припустимо, що потужність передавача знизилась на 15%, тобто до значення $0,85 \cdot P_{cp}$, а коефіцієнт шуму і втрати збільшились до значень $1,15 \cdot \Pi$ і $1,15 \cdot L_{PLC}$ відповідно. При цьому потенціал РЛС знизиться до 0,64 від початкового (штатного) значення. Підставивши означені дані в (5–6) визначимо що максимальна дальність виявлення

$$r'_{\max} = 4 \sqrt{\frac{0,85}{1,15 \cdot 1,15}} r_{\max} = 0,9 \cdot r_{\max}. \quad (8)$$

Це означає, що максимальна дальність виявлення цілей зменшиться всього лише на 10 відсотків, а дальність виявлення під малими кутами місця, тобто на малих і гранично малих висотах зменшиться ще менше, що наочно наведено на рис. 1–2.

На рис. 1:

- суцільна крива – за штатного значення енергетичного потенціалу;
- штрихова крива – за 15% погіршення основних технічних характеристик;
- пунктирна крива – за чверто зниженого енергетичного потенціалу.

В [4] показано, що у випадку повного віддзеркалення електромагнітних хвиль від підстильної поверхні (підстильна поверхня являє собою ідеальне дзеркало, $R(\epsilon, \beta) = 1$, $\psi(\epsilon, \beta) = -\pi$), дальність виявлен-

ня маловисотних цілей, що здійснюють політ на постійній висоті відносно поверхні Землі, залежить від потенціалу РЛС, як

$$r'(h) = \sqrt[8]{\frac{E'}{E}} r(h) = 0,95 \cdot r(h), \quad (9)$$

тобто зменшиться лише на 5 %.

Рис. 1. Вертикальний перетин зони виявлення цілей

РЛС 19Ж6 ($\sigma = 2,5 \text{ м}^2$, $P=0,5$, $F_{xm} = 10^{-5}$)

Джерело: розроблено авторами.

Рис. 2. Нижня крайка зони виявлення цілей РЛС

19Ж6 ($\sigma = 2,5 \text{ м}^2$) з імовірністю правильного виявлення $P=0,5$ та імовірністю хибних тривог

$$F_{xm} = 10^{-5}$$

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2:

- суцільна крива – за штатного значення енергетичного потенціалу;
- штрихова крива – за 15% погіршення основних технічних характеристик;
- пунктирна крива – за чверто зниженого енергетичного потенціалу.

У випадку повного поглинання електромагнітних хвиль підстильною поверхнею ($R(\epsilon, \beta) = 0$, $\Phi_3(\epsilon, \beta) = 1$), дальність виявлення маловисотних цілей, що здійснюють політ на постійній висоті відносно поверхні Землі, визначається тільки прямою видимістю, доки вона не перевищить дальність ви-

явлення цілей РЛС під кутом видимості ε_{np} у вільному просторі:

$$r(h) = \begin{cases} r_{np}(h), & \text{якщо } r_{np}(h) \leq r_{\max} F_o(\varepsilon_{np}); \\ r_{\max} F_o(\varepsilon_{np}), & \text{якщо } r_{np}(h) > r_{\max} F_o(\varepsilon_{np}). \end{cases} \quad (10)$$

За реальних умов підстильна поверхня на позиціях підрозділів є частково дзеркальною і частково поглинаючою. Тому до дальності

$$r \leq r_{\max} F_o(\varepsilon_{np}) \cdot (1 - R(0)), \quad (11)$$

де $R(0) < 1$ є коефіцієнт віддзеркалення за нульового кута ковзання, діє принцип прямої видимості, а далі проявляється ефект множника Землі. Саме з цієї причини в радіолокаційних станціях контролю повітряного простору дальність виявлення цілей на гранично малих висотах до 50...100 м визначається дальністю прямої видимості, а на більших висотах дальність виявлення цілей завжди менше дальності прямої видимості і пов'язана з дальністю прямої видимості таким співвідношенням:

$$r(h) = r_{np}(h) \cdot K_{epz}, \quad (12)$$

де K_{epz} – коефіцієнт використання радіогоризонту.

Отже, при погіршенні основних технічних характеристик до рівня, нижче якого РЛС за чинними нормативними документами [6] вважається непридатною, дальність виявлення цілей на великих і стратосферних висотах зменшується лише на 10%, на малих висотах – на 5%, а на гранично малих практично залишається без змін. Навіть при зменшенні енергетичного потенціалу РЛС вчетверо через, наприклад, зменшення потужності передавача вдвічі і збільшення коефіцієнта шуму приймального пристрою вдвічі, дальності виявлення цілей на великих, малих і гранично малих висотах зменшуються на 40%, 20% і (5...10)% відповідно і РЛС залишається частково здатною виконувати свої функції, як засіб радіолокаційної розвідки повітряного простору.

Таким чином, невідповідність технічних характеристик РЛС паспортним даним, якщо вона не приводить до зменшення енергетичного потенціалу РЛС вчетверо і більше, суттєвого впливу на параметри зон виявлення не чинить.

3. Вплив підстильної поверхні на параметри зон виявлення.

У формуванні діаграми направленості антени РЛС бере участь поверхня Землі. За певних умов при визначенні результуючої ДНА може успішно використовуватись добре опрацьований і відомий метод відбивного трактування. При цьому позиція РЛС повинна задовольняти певним вимогам щодо розміру та рельєфу площадки, яка суттєво впливає на формування діаграми направленості антени (ДНА) у вертикальній площині, а отже, і на розміри та форму зони виявлення цілей.

Розміри рівної площадки повинні бути не менше області, істотної для віддзеркалення радіохвиль і визначуваної, в основному, першою зоною Френеля [7]. Для випадку, коли висота встановлення фазового центра антени над відбиваючою поверхнею значно менше висоти польоту цілі $h_a \ll H_u$ потрібний радіус рівного майданчика визначається [8] співвідношенням:

$$R_{nl} \geq a_1 + x_{o1} \approx 23,3 \frac{h_a^2}{\lambda}. \quad (13)$$

Припустима величина нерівностей майданчика визначається критерієм Релея [9]:

$$h_{\max} \leq \frac{\lambda}{16 \sin \theta}, \quad (14)$$

де θ – кут падіння електромагнітної енергії.

Застосування методу відбивного трактування має певні обмеження в залежності від діапазону хвиль.

В метровому діапазоні хвиль при $\lambda = 1,5 \dots 2$ м і висотах розташування фазового центра антен $h_a = 5 \dots 10$ м максимальний радіус рівного майданчика має становити від 400 до 1300 м, а припустима величина нерівностей на краях майданчика становить від 2 до 5 м. Для більшості позицій, розташованих на рівнинній і навіть середньопересіченій місцевості означені умови виконуються, що є підставою для застосування методу відбивного трактування в розрахунках зон виявлення цілей радіолокаційними станціями метрового діапазону, як в процесі випробувань, так і на реальних позиціях в підрозділах.

В сантиметровому діапазоні хвиль при $\lambda = 0,1$ м і висотах розташування фазового центра антен $h_a = 5 \dots 10$ м максимальний радіус рівного майданчика у відповідності з (13) повинен становити від 6 до 20 км. На таких відстанях перепади висот на середньопересіченій місцевості можуть становити 10...15 м, а отже дзеркальною, виходячи з вимог критерію Релея, вона може вважатися лише при кутах ковзання $\theta < (0,04 \dots 0,06)^\circ$. Це означає, що в РЛС сантиметрового діапазону підстильна поверхня впливає лише на саму нижню крайку зони до кутів $(0,04 \dots 0,06)^\circ$. Під більшими кутами ефект віддзеркалення зникає і підстильна поверхня на формування ДСА не впливає.

Відбивні властивості поверхні повністю характеризуються комплексним коефіцієнтом віддзеркалення. Комплексний коефіцієнт віддзеркалення (відбиття) $\dot{R}(\varepsilon) = R(\varepsilon)e^{j\Psi(\varepsilon)}$ залежить від поляризації і довжини радіохвиль, властивостей підстильної поверхні (електричних характеристик, ступеню нерівності (шорсткості), ступеню поглинання радіохвиль рослинністю) та кута падіння, який ще називають

кутом ковзання. Коефіцієнт відбиття включає в себе три складові [10]:

$$\dot{R}(\varepsilon) = \dot{p}_0(\varepsilon)(1 - K_{ш})(1 - K_n), \quad (15)$$

де $\dot{p}_0(\varepsilon)$ – коефіцієнт відбиття радіохвиль від гладкої поверхні;

$K_{ш}$ – коефіцієнт шорсткості поверхні;

K_n – коефіцієнт поглинання радіохвиль розлинністю.

Усі три складові, які визначають коефіцієнт відбиття (15), мають щоразу визначатись для конкретних умов, і точний їх розрахунок практично неможливий через вплив на них багатьох випадкових чинників.

4. Вплив рельєфу на параметри зон виявлення.

Рельєф створює кути закриття і таким чином сильно впливає на дальність виявлення цілей на малих та гранично малих висотах.

В загальному вигляді кут закриття визначається співвідношенням

$$\varepsilon_3 = \begin{cases} \varepsilon_1, & \text{якщо } \varepsilon_1 > \varepsilon_2; \\ \varepsilon_2, & \text{якщо } \varepsilon_1 \leq \varepsilon_2, \end{cases} \quad (16)$$

де ε_1 – кут закриття, що створюється елементом рельєфу або об'єктами інфраструктури;

ε_2 – кут закриття, за рахунок кривизни Землі.

Кут закриття, що створюється елементом рельєфу або об'єктами інфраструктури, визначається положенням точки стояння РЛС і елементом рельєфу (верхньої точки об'єкта) над рівнем моря і відстанню між ними:

$$\varepsilon_1 = a \cos \left(\frac{(R_{зе} + H_{плс} + h_a)^2 + r_3^2 - (R_{зе} + H_3)^2}{2(R_{зе} + H_{плс} + h_a) \cdot r_3} \right) - \frac{\pi}{2}, \quad (17)$$

де $R_{зе} = 8470$ км – еквівалентний радіус Землі;

$H_{плс}$ – висота позиції над рівнем моря;

h_a – висота електричного центра антени над підстильною поверхнею;

H_3 – висота елемента рельєфу (об'єкта), що створює закриття, над рівнем моря;

r_3 – дальність від точки стояння РЛС до елемента рельєфу (об'єкту), що створює закриття.

Кут закриття, за рахунок кривизни Землі визначається висотою розташування РЛС над рівнем моря:

$$\varepsilon_2 = -a \cos \left(\frac{R_{зе}}{R_{зе} + H_{плс} + h_a} \right). \quad (18)$$

Нааявність кутів закриття обмежує дальність прямої видимості цілей, що летять на висоті h_y :

$$r_{np}(h_y) = -R_{зе} \cdot \sin \varepsilon_3 + \sqrt{(R_{зе} \cdot \sin \varepsilon_3)^2 + 2R_{зе} \cdot h_y}. \quad (19)$$

В залежності від того, на якій відстані від РЛС знаходиться об'єкт, що створює кут закриття, вплив його на дальність виявлення маловисотних цілей буде різним.

Якщо кут закриття створюється елементом рельєфу чи інфраструктури, що знаходиться в межах площадки, яка суттєво впливає на формування ДНА, то в цьому випадку незалежно від типу підстильної поверхні працює принцип прямої видимості і дальність виявлення цілі, що летить на висоті h_y , визначається співвідношенням (19). У випадку, коли отримана дальність виявлення цілі перевищує дальність її виявлення у вільному просторі, за таку приймається остання. Тобто

$$r(h_y) = \begin{cases} r_{np}(h_y), & \text{якщо } r_{np}(h_y) \leq r_{\max} F_o(\varepsilon_3); \\ r_{\max} F_o(\varepsilon_3), & \text{якщо } r_{np}(h_y) > r_{\max} F_o(\varepsilon_3), \end{cases} \quad (20)$$

де $r_{\max}$ – максимальна дальність виявлення цілі з ЕПР σ_y , визначена за співвідношенням (5);

$F_o(\varepsilon_3)$ – значення ДСА у вільному просторі під кутом закриття ε_3 .

Якщо кут закриття створюється елементом рельєфу чи інфраструктури, що знаходиться за межами площадки, яка суттєво впливає на формування ДНА, то необхідно враховувати відбиваючі властивості поверхні. Коефіцієнт віддзеркалення, як уже зазначалося, залежить від багатьох чинників, які мають щоразу визначатись для конкретних умов, і точний їх розрахунок практично неможливий.

Інтегральною характеристикою відбиваючих властивостей підстильної поверхні та її впливу на формування нижньої крайки зони виявлення є коефіцієнт використання радіогоризонту $K_{врг}$, який характеризує ступінь відриву нижньої крайки зони виявлення від лінії прямої видимості. Тобто, під коефіцієнтом використання радіогоризонту розуміють відношення дальності виявлення цілі на заданій висоті польоту до дальності прямої видимості її на тій же само висоті:

$$K_{врг} = \frac{r(h_y)}{r_{не}(h_y)}. \quad (21)$$

Для РЛС сантиметрового діапазону, в яких віддзеркалюючі властивості підстильної поверхні виражаються слабо, коефіцієнт використання радіогоризонту фактично є постійною величиною і може бути легко знайденим через порівняння дальності виявлення цілей на різних висотах, отриманих під час державних випробувань і наведених в формулах на РЛС, з дальністю прямої видимості на цих же висотах. Для РЛС сантиметрового діапазону (19Ж6, 35Д6, ПРВ-13, ПРВ-16, П-37) величина $K_{врг} \approx 0,9$.

В РЛС метрового діапазону хвиль прийнято вважати $K_{\text{врг}} = 0,5 \dots 0,7$. Але на коефіцієнт використання радіогоризонту в цьому діапазоні сильно впливають висота розташування електричного центра антени над підстильною поверхнею і потенціал РЛС (ЕПР цілі). Залежність $K_{\text{врг}}$ від означених параметрів [12] для РЛС П-18 і 5Н84А наведена на рис. 3 і рис. 4 відповідно.

Рис. 3. Залежність $K_{\text{врг}}$ від ЕПР цілі для РЛС П-18
1 – $h_n = 3,9$ м; $h_g = 6,35$ м; 2 – $h_n = 5,9$ м; $h_g = 8,35$ м;
3 – $h_n = 7,9$ м; $h_g = 10,35$ м
Джерело: [12, С. 29].

Рис. 4. Залежність $K_{\text{врг}}$ від ЕПР цілі
для РЛС 5Н84А
Джерело: [12, С. 30].

Отже, якщо кут закриття створюється елементом рельєфу чи інфраструктури, що знаходиться за межами площадки, яка суттєво впливає на формування ДНА, то дальність виявлення цілей РЛС метрового діапазону хвиль з урахуванням $K_{\text{врг}}$ і (11) буде визначатися у відповідності з формулою

$$r(h_y) = \begin{cases} r_{np}(h_y) \cdot K_{\text{врг}}, & \text{якщо } r_{np}(h_y) > r_{\text{max}} F_o(\epsilon_3) \cdot (1 - R(0)); \\ r_{np}(h_y), & \text{якщо } r_{np}(h_y) \leq r_{\text{max}} F_o(\epsilon_3) \cdot (1 - R(0)), \end{cases} \quad (22)$$

де r_{max} – максимальна дальність виявлення цілі із заданою ЕПР;

$r_{np}(h_y)$ – дальність прямої видимості цілі, обчислена по (19);

$F_o(\epsilon_3)$ – значення ДСА у вертикальній площині у вільному просторі під кутом закриття ϵ_3 ;

$R(0) < 1$ – коефіцієнт віддзеркалення електромагнітних хвиль від підстильної поверхні за нульового кута ковзання.

Приблизні значення коефіцієнта віддзеркалення електромагнітних хвиль метрового діапазону горизонтальної поляризації від підстильної поверхні за нульового кута ковзання наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Значення $R(0)$ для різних типів підстильної поверхні

$R(0)$	Тип підстильної поверхні
1	Водна поверхня
0,9	Болотиста поверхня без чагарників
0,8	Поля з вологою поверхнею, луги, болотиста поверхня з рідким чагарником
0,7	Поля з вологою поверхнею і рідким чагарником,
0,6	Поля з сухою поверхнею
0,5	Поверхні з густим чагарником або лісом

Джерело: розроблено авторами за даними [5, С. 219], [9, С. 101]

Найкраща позиція для виявлення маловисотних цілей є така, коли площадка, яка суттєво впливає на формування ДНА, покрита чагарником або лісом і кути закриття є мінімально можливими.

5. Вплив гідрометеоутворень та атмосферних неоднорідностей на параметри зони виявлення цілей радіолокаторами.

В процесі поширення радіохвиль через гідрометеоутворення відбувається їх часткове поглинання і розсіювання, через що гідрометеоутворення чинять подвійну дію на РЛС. Внаслідок часткового поглинання радіохвиль зменшується дальність дії РЛС, а внаслідок розсіювання відбувається часткове відбиття радіохвиль у бік радіолокатора, яке діє на РЛС як пасивна перешкода природного походження. Степінь впливу гідрометеоутворень на РЛС залежить від їхньої інтенсивності і від діапазону хвиль. Відразу необхідно відзначити, що вплив гідрометеоутворень на роботу РЛС в метровому і дециметровому діапазоні настільки малий, що ним можна знехтувати. Радіолокатори сантиметрового діапазону є більш чутливими до впливу метеоутворень і степінь цього впливу вимагає додаткових досліджень.

Дальність виявлення цілей в умовах дії гідрометеоутворень описується виразом

$$r'(\epsilon, \beta) = r_{\max} \cdot 10^{\frac{-\gamma \cdot L}{20}} \cdot F_o(\epsilon) \cdot \Phi_3(\epsilon, \beta), \quad (23)$$

де γ – коефіцієнт ослаблення радіохвиль, дБ/км;

L – протяжність метеотворення в напрямку поширення радіохвиль, км.

Залежність коефіцієнта ослаблення радіохвиль від довжини хвилі для дощу різної інтенсивності і для різної густини туману наведені [9] на рис. 5 і рис. 6 відповідно.

Рис. 5. Залежність коефіцієнта ослаблення радіохвиль від довжини хвилі
Джерело: [9, С. 302].

На рис. 5:

0,25 мм/час – дрібний дощ; 1,25 мм/час – легкий дощ; 2,5 мм/час – помірний дощ; 15 мм/час – сильний дощ; 40 мм/час – дуже сильний дощ; 100 мм/час – злива.

Протяжність метеотворень в напрямку поширення радіохвиль може бути різною. Наприклад, метеотворення у вигляді туману може діяти на відстані не більше, ніж 100 км від РЛС, бо на цій відстані лінія прямої видимості проходить вже на висоті 1 км над поверхнею Землі. Та й дощові хмари розміром в 100 км також є досить потужним метеотворенням. Отже, при розрахунках впливу гідрометеотворень на РЛС можна обмежитись величиною протяжності метеотворень $L=100$ км. Степінь впливу гідрометеотворень на розміри зони виявлення цілей будемо оцінювати через коефіцієнт стиснення зони, під яким розуміється відношення дальності виявлення цілей за умов дії гідрометеотворень (23)

до дальності виявлення цілей за відсутності гідрометеотворень (4):

$$k_{cm} = \frac{r'(\epsilon, \beta)}{r(\epsilon, \beta)} = 10^{\frac{-\gamma \cdot L}{20}}. \quad (24)$$

Результати обчислень за співвідношенням (24) наведені в табл. 2. Обчислення проводились для умов сильного дощу і густого туману.

Отже, вплив складних метеоумов на РЛС РТВ є незначним за винятком радіовисотомірів ПРВ-16, для яких дальність виявлення цілей за умов сильного дощу та густого туману зменшується майже вдвічі.

Рис. 6. Залежність коефіцієнта ослаблення радіохвиль від довжини хвилі за умов туману різної густини
Джерело: [9, С. 304].

Таблиця 2

Вплив гідрометеотворень на розміри зони виявлення цілей

Тип РЛС	19Ж6, 35Д6 П-37	ПРВ-13	ПРВ-16	П-18, П-19, 5Н84А
λ , см	10	11	4,5	РЛС не схильні до впливу гідрометеотворень
k_{cm}	Сильний дощ	0,966	0,97	0,562
	Густий туман	0,933	0,94	0,562

Джерело: розроблено авторами.

Відбиття радіохвиль від гідрометеотворень діє на РЛС як пасивна перешкода природного походження. Потужність цих перешкод залежить не тільки від потужності гідрометеотворень, а й від величини імпульсного об'єму, який визначається технічними параметрами РЛС.

ЕПР гідрометеоутворень, які заповнюють імпульсний об'єм РЛС, визначається таким співвідношенням [9]:

$$\sigma_n = 0,14 \cdot r^2 \cdot \Delta\beta \cdot \Delta\epsilon \cdot \tau_i \cdot A, \quad (25)$$

де r – дальність до метеоутворення, км;

$\Delta\beta, \Delta\epsilon$ – ширина ДСА по горизонталі і вертикалі, град;

τ_i – тривалість стиснутого зондувального сигналу, мкс;

A – відбивна здатність одиниці об'єму метеоутворення, безрозмірна.

Залежність відбивної здатності одиниці об'єму дощових хмар наведена [9] на рис. 7.

Рис. 7. Залежність відбивної здатності одиниці об'єму дощових хмар від довжини хвилі
Джерело: [9, С. 308].

Розраховані за співвідношенням (25) значення ЕПР гідрометеоутворень у вигляді сильного дощу для різних РЛС наведені в табл. 3.

Аналіз табл. 3 свідчить про те, що серед РЛС сантиметрового діапазону виявляти цілі з $\sigma_{ц} = 1 \text{ м}^2$ на фоні сильного дощу можуть лише РЛС 19Ж6 і 35Д6.

Наявність атмосферних неоднорідностей та турбулентних утворень призводить до виникнення цілеподібних відбиттів в ясну безхмарну погоду, через що їх називають ще відбиттями ясного неба або "ангел-ехо".

Такі утворення виникають тільки в сантиметровому діапазоні хвиль переважно в ранкові часи над болотистими місцевостями, над заплавами річок та іншими місцевостями, над якими відбувається процес інтенсивного випаровування. В цілому природа утворення "ангел-ехо" досить різноманітна і на сьогодні недостатньо вивчена. В основному утворення типу "ангел-ехо" представляють собою відбиття від локальних неоднорідностей атмосфери або загоризонтне перевідбиття через шаруваті утворення атмосфери від віддалених місцевих предметів, через що мають чітку імпульсну структуру і за формою і параметрами дуже схожі з відбиттями від реальних маловисотних малошвидкісних цілей. Кількість їх в радіусі до 50...70 км може сягати кількох десятків і навіть сотень, що надзвичайно перевантажує системи обробки інформації. Єдине, чим метеоутворення типу "ангел-ехо", як об'єкти радіолокації, відрізняються від літальних апаратів – це характер переміщення у просторі: "ангел-ехо" переміщуються хаотично зі швидкістю до 50 м/с, літальні апарати – закономірно зі швидкістю до 1000 м/с. Крім того, є певні спектральні відмінності між відбиттями типу "ангел-ехо" і сигналами від реальних цілей.

Таблиця 3

ЕПР гідрометеоутворень (сильний дощ)

	19Ж6, 35Д6	П-37	ПРВ-13	ПРВ-16	П-18, П-19, 5Н84А
$\Delta\beta$, град	2	1	2	2,3	РЛС не схильні до впливу гідрометеоутворень
$\Delta\epsilon$, град	1,5	2,5	0,9	0,5	
τ_i , мкс	1,5; 3	1,7; 2,7	1,5; 3	0,85; 1,7	
A	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-1}	
σ_n , м^2	18,9; 37,8	17,85; 28,35	11,34; 22,68	136,85; 273,7	
Потрібне значення K_n для виявлення цілей з $\sigma_{ц} = 1 \text{ м}^2$, дБ	23; 26	23; 25	20; 23	32; 35	
Реальні значення K_n , дБ	40	20	18	16	

Джерело: розроблено авторами.

Для захисту від такого роду перешкод необхідно ще при проектуванні і розробленні РЛС закласти відповідні режими роботи РЛС та спеціальну апаратуру або алгоритми обробки сигналів. Оскільки з цією проблемою почали боротись тільки наприкінці 80-х років, то РЛС більш ранньої розробки захисту від означеного типу перешкод не мають.

Отже, серед тих типів РЛС ефективний захист від перешкод типу "ангел-ехо" мають лише РЛС 19Ж6 та 35Д6.

Висновки

1. Реальні значення параметрів зон виявлення цілей радіолокаційними станціями, розгорнутими на конкретних позиціях, значною мірою відрізняються від формулярних даних і потребують уточнення для кожної позиції з урахуванням технічного стану РЛС, характеру підстильної поверхні, рельєфу місцевості в районі позиції та гідрометеоумов.

2. Технічний стан РЛС характеризується ступенем відповідності технічних характеристик радіолокатора паспортним даним. Невідповідності технічних характеристик радіолокатора, за яких РЛС за чинними нормативними документами ще вважається працездатною, суттєвого впливу на параметри зон виявлення не чинять.

3. Вплив підстильної поверхні на параметри зон виявлення цілей залежить від її відбивних властивостей та діапазону хвиль. В метровому діапазоні хвиль для позицій, розташованих на рівнинній і середньопересіченій місцевості, підстильну поверхню можна вважати частково дзеркальною, і в розрахунках зон виявлення цілей можна використовувати метод відбивного трактування. В сантиметровому

діапазоні підстильна поверхня впливає лише на саму нижню крайку зони до кутів $(0,04...0,06)^\circ$. Під більшими кутами ефект віддзеркалення зникає і підстильна поверхня на форму зони виявлення не впливає.

4. Характер рельєфу сильно впливає на дальність виявлення цілей на малих та гранично малих висотах. Якщо елемент рельєфу чи інфраструктури, що створює кут закриття, знаходиться в межах площадки, яка суттєво впливає на формування ДСА, то незалежно від типу підстильної поверхні працює принцип прямої видимості. При розташуванні елемента рельєфу чи інфраструктури, що створює кут закриття, за межами площадки, яка суттєво впливає на формування ДНА, необхідно враховувати відбиваючі властивості поверхні через коефіцієнт використання радіогоризонту.

5. Вплив складних метеоумов на РЛС РТВ є незначним за винятком радіовисотомірів ПРВ-16, для яких дальність виявлення цілей за умов сильного дощу та густого туману зменшується майже вдвічі. Більш небезпечними є відбиття радіохвиль від гідрометеоутворень, які діють на РЛС сантиметрового діапазону як пасивна перешкода природного походження. Серед РЛС сантиметрового діапазону виявляти цілі з на фоні сильного дощу можуть лише РЛС 19Ж6, 35Д6 та 79К6.

Список літератури

1. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А.И. Леонов, С.А. Леонов, Ф.В. Нагулинка и др.; под ред. А.И. Леонова. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.
2. Підсумки діяльності Повітряних Сил Збройних Сил України за 2006 рік // Матеріали засідання військової ради Повітряних Сил Збройних Сил України. – Вінниця: ГК ПС ЗСУ, 2006. – 130 с.
3. Методика розрахунку зон виявлення цілей оглядовими засобами радіолокації, розгорнутими на реальних позиціях / В.Й. Климченко, М.М. Петрушенко, О.С. Маляренко, І.М. Трофимов, В.С. Куц // Системи озброєння і військова техніка. – 2019. – № 2(58). – С. 17-23. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.03>.
4. Основы построения РЛС РТВ / В.П. Блохин, Б.Ф. Бондаренко, В.Т. Неснов, В.Е. Угольников; под ред. Б.Ф. Бондаренко. – Киев: КВИРТУ ПВО, 1987. – 368 с.
5. Основы построения радиолокационного вооружения радиотехнических войск / под ред. В.В. Литвинова. – Харьков: ВИРТА ПВО, 1986. – 348 с.
6. Тимчасове керівництво з організації технічної експлуатації та ремонту радіоелектронної техніки радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Затверджено наказом командувача Повітряних Сил Збройних Сил України 01.07.2010 № 187. – 266 с.
7. Skolnik M.I. Radar Handbook. Third Edition / M. Skolnik. – The McGraw-Hill Companies, 2008. – 1352 p.
8. Марков Г.Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.
9. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
10. 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.
11. Barton D.K. Radar Sistem Analysis and Modeling / David K. Barton. – Boston – London: Artech House, 2005. – 547 p.
12. Особливості розрахунку коефіцієнта використання радіогоризонту в оглядових РЛС метрового діапазону хвиль / В.Й. Климченко, Г.Г. Камалтинов, О.В. Белавін, І.Л. Єфімов // Озброєння та військова техніка: науковий журнал. – К.: ЦНДІ ОВТ. – 2016. – №4(12). – С. 27-31.

Надійшла до редколегії 03.11.2020

Схвалена до друку 15.12.2020

Відомості про авторів:**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>

Тютюнник Владислав Олександрович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
начальник науково-дослідної лабораторії
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7766-3246>

Дончак Дмитро Анатолійович

кандидат технічних наук
начальник відділу
Командування Повітряних Сил Збройних Сил України,
Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3301-7987>

Тах'ян Кристина Альбертівна

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

Information about the authors:**Vasyl Klimchenko**

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

Vladyslav Tiutiunnyk

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Chief of Research Laboratory
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7766-3246>

Dmytro Donchak

Candidate of Technical Sciences
Chief of Department
of Air Force Command of Armed Force of Ukraine,
Vinnitsya, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3301-7987>

Kristina Tahyan

Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕСООТВЕТСТВИЯ ФОРМУЛЯРНЫХ И РЕАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЗОН ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ОБЗОРНЫМИ РЛС КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

В.И. Климченко, В.А. Тютюнник, Д.А. Дончак, К.А. Тахьян

Проанализированы факторы, которые определяют параметры зоны обнаружения целей обзорным радиолокатором. Выявлены причины несоответствия формулярных и реальных значений параметров зон обнаружения целей обзорными РЛС контроля воздушного пространства.

Определено влияние ухудшения технических характеристик РЛС из-за длительной эксплуатации на параметры зон обнаружения и установлены допустимые пределы снижения основных технических параметров РЛС, при которых она еще сохраняет работоспособность.

Определено влияние различных факторов на параметры зон обнаружения целей радиолокационными станциями при развертывании их на реальных позициях.

Ключевые слова: обзорные радиолокационные станции, зона обнаружения целей, рельеф, подстилающая поверхность, гидрометеорообразования.

ANALYSIS OF REASONS OF DISPARITY OF FORMAL AND REAL VALUES OF PARAMETERS OF AREAS OF FINDING OUT AIMS BY SURVEY RADARS CONTROL OF AIR SPACE

V. Klimchenko, V. Tiutiunnyk, D. Donchak, A. Tachyan

Factors which determine the parameters of surveillance radar detection area are analyzed. Reasons of disparity of normal and real values of parameters of surveillance radar detection area are found out.

Influence of worsening of technical parameters due to protracted exploitation on the parameters of detection area are determinate. The possible limits of decrease of main technical parameters of radars, at which one saves a working capacity are determinate. It is shown that at decreasing of main technical parameters to the level, than radar, according normative documents, is not working capacity, real range of detection on high altitude decrease on 10%, on small altitude – on 5% and on extremal small high altitude practically remains without changes.

The method of accounting for influence of closing angle on detection range for radars of different frequencies band and different locating of obstacle objects, which create of closing angle, is offered. If obstacle object located into site, which significantly influence on form of antenna pattern, use the line of sight principle regardless of type of ground. If obstacle object located over site, which significantly influence on form of antenna pattern, the reflecting properties of ground take account.

It is shown the analysis of influence of reflecting properties of surface on forming of lower edge of detection area by the use of such integral description, as coefficient of the use of radiohorizon which characterizes the degree of tearing away of lower edge of radar detection area from the line of line-of-sight.

Influence of different meteorological factors on the parameters of radar detection area when one locates on the real positions is determinate.

Keywords: radar detection area, relief, meteorological factors, reflecting surface, surveillance radar.