

УДК 621.396.96

В. Й. КЛИМЧЕНКО, кандидат технічних наук,
доцент,

Г. Г. КАМАЛТИНОВ, кандидат технічних наук
(Науковий центр Повітряних Сил Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба, м. Харків),

О. В. БЕЛАВІН, головний інженер
радіотехнічних військ

(Командування Повітряних Сил Збройних Сил
України, м. Вінниця),

І. Л. ЄФІМОВ, провідний науковий співробітник
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Особливості розрахунку коефіцієнта використання радіогоризонту в оглядових радіолокаційних станціях метрового діапазону хвиль

Розглядається аналітичний спосіб визначення коефіцієнта використання радіогоризонту радіолокаційними станціями (РЛС) метрового діапазону хвиль на основі методу відбивного трактування. Визначені умови та фактори, що впливають на величину коефіцієнта використання радіогоризонту, і отримані розрахункові співвідношення для його обчислення з урахуванням конкретних умов бойового застосування РЛС.

Доведена можливість використання означеного способу визначення коефіцієнта використання радіогоризонту для розрахунку дальності виявлення цілей з різними значеннями ефективної поверхні розсіювання на малих і середніх висотах з урахуванням характеру рельєфу позицій, на яких розгорнуті радіолокаційні станції.

Ключові слова: радіолокаційні станції метрового діапазону хвиль, зона виявлення повітряних об'єктів, коефіцієнт використання радіогоризонту.

Рассматривается аналитический способ определения коэффициента применения радиогоризонта радиолокационными станциями (РЛС) метрового диапазона волн на основе метода отражательной трактовки. Определены условия и факторы, влияющие на величину коэффициента использования радиогоризонта, и получены расчетные соотношения для его определения с учетом конкретных условий боевого применения РЛС.

Доказана возможность использования этого способа определения коэффициента использования радиогоризонта для расчета дальности обнаружения целей с разными значениями эффективной поверхности рассеяния на малых и средних высотах с учетом характера рельефа позицій, на которых развернуты РЛС.

Ключевые слова: радиолокационные станции метрового диапазона волн, зона обнаружения воздушных объектов, коэффициент использования радиогоризонта.

У тактичних розрахунках можливостей радіотехнічних підрозділів і частин з виявлення цілей на малих і середніх висотах досить часто користуються таким поняттям, як коефіцієнт використання радіогоризонту [1–3], під яким розуміють відношення реальної дальності виявлення радіолокаційною станцією цілі на заданій висоті польоту $r(h_{ц})$ до дальності прямої видимості цілі на цій же висоті $r_{пв}(h_{ц})$. При цьому для кожного типу РЛС означений коефіцієнт задається як постійна величина, що отримана в процесі полігонних випробувань і вноситься в формуляр РЛС як її технічна характеристика.

Проте використання означеного коефіцієнта в процесі моделювання бойових дій [4, 5] неодноразово призводило до значної невідповідності реальних і розрахункових можливостей підрозділів радіотехнічних військ, особливо тих, які мають на озброєнні РЛС метрового діапазону хвиль. Причиною таких розходжень є невідповідність умов, за яких визначався коефіцієнт використання радіогоризонту в процесі полігонних випробувань, умовам бойового застосування РЛС.

Останніми роками в цьому напрямі здійснюються певні пошуки щодо визначення нижньої межі зон виявлення цілей без проведення обльотів РЛС. Актуальність цих пошуків визначається необхідністю проведення полігонних випробувань перспективних РЛС за обмежених можливостей випробувальної бази в Україні. У [6] розглядається ітераційний експериментально-розрахунковий метод визначення дальності виявлення повітряних об'єктів (ПО) на різних висотах за даними розових обльотів на певній висоті. У [7] викладена методика визначення окремих параметрів зони виявлення ПО за польотами рейсових літаків.

Метою статті є розробка розрахункового способу визначення коефіцієнта використання радіогоризонту радіолокаційними станціями метрового діапазону хвиль на основі методу відбивного трактування для розрахунку дальності виявлення цілей з різними значеннями ефективної поверхні розсіювання на малих і середніх висотах з урахуванням характеру рельєфу позицій, на яких розгорнуті радіолокаційні станції.

Відповідно до визначення коефіцієнта використання радіогоризонту $K_{врг}$ можна записати так:

$$K_{врг} = \frac{r(h_{ц})}{r_{пв}(h_{ц})}. \quad (1)$$

Що стосується дальності прямої видимості $r_{пв}(h_{ц})$, то вона визначається з урахуванням рефракції через еквівалентний радіус Землі $r_{зе}$ за відомим співвідношенням

$$r_{пв} = \sqrt{2R_{зе}} \cdot (\sqrt{h_{ц}} + \sqrt{h_{а}}), \quad (2)$$

де $h_{а}$ – висота електричного центра антени над поверхнею землі. У виразі (2) усі величини мають однакову розмірність. Для випадку нормальної рефракції $r_{зе} = 8470$ км і вираз (2) набуває широко вживаного на практиці вигляду

$$r_{пв} = 4,12 \cdot (\sqrt{h_{ц}} + \sqrt{h_{а}}), \quad (3)$$

в якому дальність прямої видимості $r_{пв}$ виражена в кілометрах, а висота польоту цілі $h_{ц}$ і висота електричного центра антени над поверхнею $h_{а}$ – в метрах.

Щодо визначення дальності виявлення цілі на заданій висоті польоту, то, як уже зазначалося, використовувались дані обльотів і на підставі їх за співвідношенням (1) розраховувався $K_{врг}$. Такий підхід є абсолютно правильним, але результат є справедливим лише для конкретної позиції, конкретного типу цілі і тих висот, на яких здійснювався обліт. Поширення отриманих у такий спосіб результатів на інші умови, особливо для РЛС метрового діапазону хвиль, є помилковим, оскільки дальність виявлення цілі $r(h_{ц})$ на заданій висоті польоту залежить від багатьох чинників, що необхідно враховувати.

Для цього необхідно мати розрахункові співвідношення, які б дозволяли теоретично оцінювати можливості з виявлення цілей за різних умов застосування РЛС.

При формуванні діаграми направленості антени РЛС метрового діапазону хвиль суттєво впливає поверхня Землі. За певних умов при визначенні результуючої діаграми спрямованості антени (ДСА) може успішно використовуватись добре опрацьований і відомий метод відбивного трактування [9].

Сукупна ДСА антени РЛС метрового діапазону хвиль являє собою добуток ДСА антени у вільному просторі $F_0(\epsilon)$ та інтерференційного множника Землі $\Phi(\epsilon)$:

$$F(\epsilon) = F_0(\epsilon) \cdot \Phi(\epsilon). \quad (4)$$

Інтерференційний множник Землі, виходячи з геометрії рис. 1 та з урахуванням розходження хвиль при відбитті від сферичної поверхні Землі, у загальному вигляді описується [8] виразом

$$\Phi(\epsilon) = \left\{ 1 + \rho^2 R^2(\epsilon) \frac{F_0^2(\epsilon_m - 2\epsilon_{пв} + \epsilon)}{F_0^2(\epsilon_m - \epsilon)} + 2\rho \cdot R(\epsilon) \frac{F_0(\epsilon_m - 2\epsilon_{пв} + \epsilon)}{F_0(\epsilon_m - \epsilon)} \cos \left(2\pi \frac{2h_a}{\lambda} \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) + \psi(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

де ρ – коефіцієнт розходження хвиль при відбитті від сферичної поверхні Землі; $R(\epsilon)$, $\psi(\epsilon)$ – модуль і аргумент коефіцієнта відбиття від землі; ϵ_m – кут нахилу максимуму ДСА $F_0(\epsilon)$ над лінією горизонту; $\epsilon_{пв}$ – кут прямої видимості; h_a – висота електричного центра антени над підстильною поверхнею.

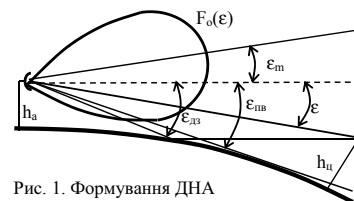


Рис. 1. Формування ДНА під малими кутами місця

При розташуванні РЛС на рівнинній місцевості величина h_a не перевищує 10...20 метрів, і тільки при розташуванні РЛС на урвистому березі моря висота знаходження електричного центра антени над підстильною поверхнею може становити кілька сотень метрів. Але навіть за таких значень h_a коефіцієнт розходження

хвиль при відбитті від сферичної поверхні Землі $\rho \approx 1$ [8], і тоді вираз (5) набуде вигляду

$$\Phi(\epsilon) = \left\{ 1 + R^2(\epsilon) \frac{F_0^2(\epsilon_m - 2\epsilon_{пв} + \epsilon)}{F_0^2(\epsilon_m - \epsilon)} + 2R(\epsilon) \frac{F_0(\epsilon_m - 2\epsilon_{пв} + \epsilon)}{F_0(\epsilon_m - \epsilon)} \cos \left(2\pi \frac{2h_a}{\lambda} \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) + \psi(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

Співвідношення (6) має пелюстковий характер, максимуми якого орієнтовані під кутами місця

$$\epsilon_{\max(n)} = \arcsin \left(\frac{(2n-1)\lambda}{4h_a} \right) + \epsilon_{пв}, \quad (7)$$

а мінімуми – під кутами місця

$$\epsilon_{\min(n)} = \arcsin \left(\frac{2n \cdot \lambda}{4h_a} \right) + \epsilon_{пв}, \quad (8)$$

де $n=1, 2, \dots$ – номер максимуму та мінімуму.

При типових значеннях $h_a = 6 \dots 10$ м і $\lambda = 1,5 \dots 2$ м кут місця першого максимуму $\epsilon_{\max(1)} = 3^\circ \dots 4^\circ$. Це означає, що для РЛС з максимальною дальністю виявлення цілей 300...400 км усі цілі входять у зону виявлення в області нижньої межі першої пелюстки (рис. 2).

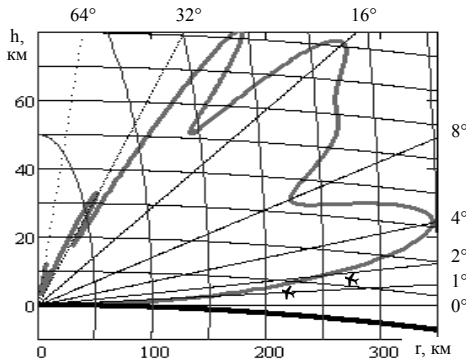


Рис. 2. Типова форма зони виявлення цілей РЛС метрового діапазону хвиль

Для кутів місця $\epsilon < 4^\circ$ майже при усіх типах підстильних поверхонь і незалежно від поляризації хвиль модуль коефіцієнта відбиття від землі $R(\epsilon) \approx 1$, а аргумент $\psi(\epsilon) \approx \pi$ [9]. За таких умов нижня межа першої пелюстки інтерференційного множиника Землі може бути описана виразом

$$\Phi(\epsilon) = b \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} \cdot \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right|, \quad (9)$$

де $1 \leq b \leq 2$ – коефіцієнт інтерференції, величина якого залежить від величини співвідношення $R(\epsilon) \frac{F_0(\epsilon_m - 2\epsilon_{пв} + \epsilon)}{F_0(\epsilon_m - \epsilon)}$ у виразі (6).

Отже, нижня межа сукупної ДСА антени РЛС метрового діапазону хвиль (1) з урахуванням (9) набуде вигляду

$$F(\epsilon) = F_0(\epsilon) \cdot b \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} \cdot \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right|, \quad (10)$$

а нижня межа зони виявлення цілей такою РЛС може бути описана виразом

$$r(\epsilon) = r_0 \cdot F_0(\epsilon) \cdot b \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} \cdot \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right|, \quad (11)$$

де r_0 – максимальна дальність виявлення цілей у вільному просторі, яка визначається енергетичним потенціалом РЛС, типом цілі та умовами поширення хвиль і для оглядового радіолокатора може бути подана так [10]:

$$r_0 = 4 \sqrt{\frac{P_{cp} T_0 G_e A_{ef} \sigma_{ц}}{(4\pi)^2 \cdot v_{пор} \cdot L_{РЛС} \cdot k \cdot T \cdot \text{Ш} \cdot L_3}} = 4 \sqrt{\frac{\sigma_{ц}}{L_3}}, \quad (12)$$

де P_{cp} – середня потужність передавача; T_0 – період огляду простору; G_e – направленість зони огляду простору без урахування впливу поверхні Землі (для РЛС кругового огляду $G_e = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_0^2(\epsilon) \cdot \cos \epsilon \cdot d\epsilon$); A_{ef} – ефективна площа

антени; $\sigma_{ц}$ – ефективна відбиваюча поверхня цілі; $v_{пор}$ – поріг виявлення оброблених ехосигналів; $L_{РЛС}$ – сумарні втрати сигналів у РЛС у фідерних трактах та при обробці; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – стала Больцмана; $T \approx 300^\circ$ – приведена шумова температура; Ш – коефіцієнт шуму приймального пристрою; L_3 – затухання електромагнітних коливань при поширенні в атмосфері; E – енергетичний потенціал РЛС, $E = \frac{P_{cp} T_0 G_e A_{ef}}{(4\pi)^2 v_{пор} L_{РЛС} k T \text{Ш}}$.

Зважаючи на те, що в межах $3^\circ \dots 4^\circ$ ДС антени РЛС метрового діапазону у вільному просторі $F_0(\epsilon)$ змінюється мало (її ширина на рівні половинної потужності становить, як правило, $30^\circ \dots 40^\circ$), вираз (11) можна подати у вигляді

$$r(\epsilon) = r_{\max} \cdot \left| \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} \cdot \sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) \right) \right|, \quad (13)$$

де $r_{\max} = r_0 \cdot F_0(4^\circ) \cdot b$ – дальність виявлення цілі в максимумі нижньої пелюстки ДСА. Через малість кутів ϵ і $\epsilon_{пв}$ величина

$$\sin(\epsilon - \epsilon_{пв}) \approx \sin \epsilon - \sin \epsilon_{пв} \quad (14)$$

і вираз (13) набуде вигляду

$$r(\epsilon) = r_{\max} \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} (\sin \epsilon - \sin \epsilon_{пв}) \right). \quad (15)$$

Отже, за відомого значення r_{\max} нижня межа зони виявлення цілей РЛС метрового діапазону хвиль може бути однозначно описана виразом (15).

Для визначення дальності виявлення цілі на заданій висоті необхідно рівняння (15) перевести з полярної системи координат у прямокутну. Для цього необхідно кут місця цілі виразити через прямокутні координати

$$\sin \epsilon = \frac{h'}{r}, \quad (16)$$

де h' – приведена висота цілі, тобто висота точки розташування цілі відносно горизонтальної площини, що проходить через точку стояння РЛС. Тоді вираз (15) набуде вигляду

$$r = r_{\max} \cdot \sin \left(2\pi \frac{h_a}{\lambda} \left(\frac{h'}{r} - \sin \epsilon_{пв} \right) \right). \quad (17)$$

Змінна h' пов'язана з висотою польоту цілі h над поверхнею Землі з урахуванням нормальної рефракції і висоти розташування електричного центра антени РЛС таким співвідношенням:

$$h' = h_{ц} - \frac{r^2}{2R_{зе}} - h_a. \quad (18)$$

Отже, при відомому значенні r_{\max} можна розрахунковим методом за співвідношенням (17) визначити дальність виявлення цілей на висотах

$$h \leq h'_{\max} + \frac{r_{\max}^2}{2R_{зе}} + h_a, \quad (19)$$

де величина h'_{\max} є висотою положення точки максимуму першої пелюстки зони виявлення відносно горизонтальної площини, що проходить через точку стояння РЛС, і визначається з рівняння (17) при $r = r_{\max}$:

$$h'_{\max} = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot h_a} - \sin \epsilon_{пв} \right) \cdot r_{\max}. \quad (20)$$

Завдання ускладнюється лише тим, що рівняння (17) є трансцендентним відносно аргументу r .

Але якщо рівняння (17) з урахуванням (18) виразити відносно змінної h' , то отримаємо

$$h' = \frac{\lambda \cdot r}{2\pi \cdot h_a} \left[\arcsin \left(\frac{r}{r_{\max}} \right) + \frac{2\pi \cdot h_a}{\lambda} \sin \epsilon_{пл} \right] + h_a. \quad (21)$$

Ізовисотна траєкторія польоту цілі над поверхнею Землі на висоті h описується рівнянням

$$h' = h_{ц} - \frac{r^2}{2R_{зе}}. \quad (22)$$

Вирішуючи систему рівнянь (21) та (22), можна знайти точку перетину з координатами r, h' , де r – дальність виявлення цілі, яка летить на висоті $h_{ц}$, а h' є супутньою величиною і означає висоту польоту цілі відносно горизонтальної площини, що проходить через точку стояння РЛС.

Визначену в такий спосіб дальність виявлення цілі на заданій висоті необхідно підставити у вираз (1) і з використанням виразу (2) або (3) розрахувати коефіцієнт використання радіогоризонту $K_{врг}$.

Але такий спосіб визначення дальності виявлення цілі на заданій висоті є малоприматним для практики через свою складність. Більш оперативним способом є апроксимація виразу (21) поліномом другого степеня. Для цього достатньо замінити у виразі (21) функцію $\arcsin \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)$ її аргументом і тоді вираз (21) набуде вигляду

$$h' = \frac{\lambda \cdot r^2}{2\pi \cdot h_a \cdot r_{\max}} + r \cdot \sin \epsilon_{пв} + h_a. \quad (23)$$

Наскільки правомірна така заміна наочно показує графічне зіставлення функцій (21) і (23), показане на рис. 3, а розрахунки за формулами (21) і (23) доводять, що в діапазоні дальності від 0 до $\frac{2}{3}r_{\max}$ різниця аргументів

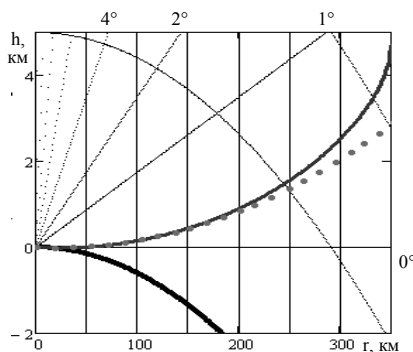


Рис. 3. Апроксимація нижньої межі зони виявлення цілей

при одному й тому ж значенні функції не перевищує 1,5 км. Отже, в означеному діапазоні таке спрощення є цілком правомірним.

Замінивши в рівнянні (23) величину h' її залежністю (22), отримуємо квадратне рівняння відносно змінної r , в якому висота польоту цілі над поверхнею Землі $h_{ц}$ є параметром:

$$r^2 \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot h_a \cdot r_{\max}} + \frac{1}{2R_{зе}} \right) + r \cdot \sin \epsilon_{пв} + h_a - h = 0. \quad (24)$$

Рішенням цього рівняння є залежність дальності виявлення цілі від висоти її польоту над поверхнею Землі $h_{ц}$ при відомих значеннях λ, h_a, r_{\max} і $\epsilon_{пв}$:

$$r = \frac{-\sin \epsilon_{пв} + \sqrt{\sin^2 \epsilon_{пв} - 4(h_a - h_{ц}) \left(\frac{\lambda}{2\pi h_a r_{\max}} + \frac{1}{2R_{зе}} \right)}}{\frac{\lambda}{\pi h_a r_{\max}} + \frac{1}{R_{зе}}}. \quad (25)$$

Отримане розрахункове значення дальності виявлення цілі на заданій висоті польоту використовується для розрахунку $K_{врг}$ за співвідношеннями (1), (2):

$$K_{врг} = \frac{-\sin \epsilon_{пв} + \sqrt{\sin^2 \epsilon_{пв} - 4(h_a - h_{ц}) \left(\frac{\lambda}{2\pi h_a r_{\max}} + \frac{1}{2R_{зе}} \right)}}{\sqrt{2R_{зе}} (\sqrt{h_{ц}} + \sqrt{h_a}) \left(\frac{\lambda}{\pi h_a r_{\max}} + \frac{1}{R_{зе}} \right)}. \quad (26)$$

Вираз (26) дає змогу оцінити залежність коефіцієнта використання радіогоризонту $K_{врг}$ від енергетичного потенціалу РЛС r_{\max} , відносної висоти встановлення фазового центра антени $\frac{h_a}{\lambda}$, прямої видимості або кута закриття $\epsilon_{пв}$, висоти польоту цілі $h_{ц}$ та стану атмосфери $R_{зе}$.

Від висоти польоту цілі значення $K_{врг}$ при фіксованих значеннях решти параметрів практично не залежить (рис. 4). Але це не означає, що при розрахунках $K_{врг}$ за формулою (26) значення висоти $h_{ц}$ можна обирати довільно. Справа в тому, що формула (26) отримана в результаті апроксимації істинного закону зміни нижньої межі зони виявлення (13) спрощеним розрахунковим співвідношенням (23). Означена апроксимація є справедливою тільки в діапазоні дальності від 0 до $\frac{2}{3}r_{\max}$. При цьому діапазон висот становить від 0 до $(0,3 \dots 0,5)h'_{\max}$, де h'_{\max} – приведена висота положення точки першого максимуму зони виявлення, розрахована за формулою (20). Із цих міркувань необхідно і обирати значення висоти $h_{ц}$ у формулі (26). При $r_{\max} = 350$ км величина $h_{ц}$ є 4...5 км.

Залежність $K_{врг}$ від висоти розташування електричного центра антени над підстильною поверхнею за фіксованого значення інших параметрів показана на рис. 5.

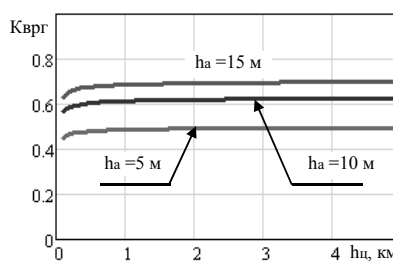


Рис. 4. Залежність $K_{врг}$ РЛС типу П-18 "Малахіт" від висоти польоту цілі за різних значень висоти підйому електричного центра антени по цілі з ЕПР $\sigma = 5 \text{ м}^2$

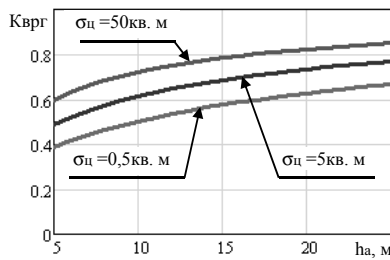


Рис. 5. Залежність $K_{\text{врг}}$ РЛС типу П-18 "Малахіт" від висоти підйому електричного центру антени за різних значень ЕПР цілі

Означена залежність показує, що піднімати антену на висоти більше 15...20 м над підстильною поверхнею не варто, оскільки подальший приріст $K_{\text{врг}}$ виражений слабо.

Коефіцієнт використання радіогоризонту значною мірою залежить від енергетичного потенціалу РЛС та від ЕПР цілі. При зміні енергетичного потенціалу РЛС змінюється величина r_{max} у виразах (25), (26) у відповідності до (12), а при зміні ЕПР цілі у виразах (25) і (26) необхідно замість величини r_{max} підставити величину

$r_{\text{max}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma_1}{\sigma_0}}$, де σ_0 – ЕПР цілі, максимальна дальність виявлення якої становить величину r_{max} , а σ_1 – ЕПР цілі, по якій необхідно розрахувати $K_{\text{врг}}$. Залежність $K_{\text{врг}}$ від ЕПР цілі зображена на рис. 6.

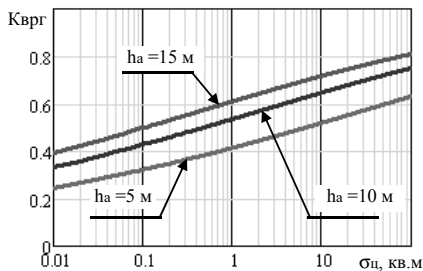


Рис. 6. Залежність $K_{\text{врг}}$ РЛС типу П-18 "Малахіт" від ЕПР цілі за різних значень висоти підйому електричного центру антени

Означена залежність показує, що величина коефіцієнта використання радіогоризонту при виявленні малорозмірних цілей типу крилатих ракет у разі менше, ніж при виявленні цілей типу бомбардувальник. Аналогічний характер має залежність $K_{\text{врг}}$ і від енергетичного потенціалу РЛС.

Висновки

1. Коефіцієнт використання радіогоризонту є технічною характеристикою, яка вноситься до формуляра РЛС. Але для РЛС метрового діапазону хвиль вона є справедливою лише для тих умов, за яких була отримана в процесі полігонних випробувань РЛС.

2. Отримане співвідношення, яке дає змогу оцінити залежність коефіцієнта використання радіогоризонту від потенціалу РЛС, ЕПР цілі, відносної висоти встановлення фазового центру антени та кута закриття.

3. Враховуючи безумовність уточнення дальності виявлення відомого типу маловисотної цілі після

розгортання РЛС на новій позиції, запропонована методика коефіцієнта використання радіогоризонту може бути внесена до експлуатаційної документації на РЛС протиповітряної оборони.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Керівництво з об'єкту наземних радіолокаційних станцій, розгорнутих на бойових позиціях [Текст]. – Вінниця : КПС ЗСУ, 2010. – 68 с. ДСК, інв. №2075/2.
2. Тактика радіотехнічних військ [Текст] : навч. посіб. / Б. В. Бакуменко, В. І. Боровий, В. В. Ковкін [та ін.] / за ред. Б. В. Бакуменка. – Харків : ХУПС, 2007. – 228 с.
3. Довідник з протиповітряної оборони [Текст] / А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник [та ін.]. – К. : МО України; Х. : ХВУ, 2003. – 368 с.
4. Обґрунтування напрямків створення єдиної системи розвідки та контролю повітряного простору України [Текст] : звіт про НДР (заключний) / ХУПС. – Шифр «Геркулес», № ДР 0101U001073; Інв. № 3109/2. – Х., 2011. – 155 с. ДСК.
5. Обґрунтування вимог до завадозахищеності перспективних зразків радіолокаційних станцій радіотехнічних військ від активних шумових завад [Текст] : звіт про НДР / ХУПС. – Шифр «Захист РТВ»; № ДР 0101U001468; Інв. № 3227/2. – Х., 2013. – 226 с. ДСК.
6. Белавін, О. В. Експериментально-розрахунковий метод оцінки параметрів зон виявлення первинних та вторинних РЛС [Текст] / О. В. Белавін, Г. Г. Камалтинов, О. С. Малярченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : наук.-техн. журн. 2012. – № 3 (9). – Х. : ХУПС, 2012. – С. 69–73.
7. ДОС. 8071, т. I, ІКАО, 1998. Руководство по испытаниям радионавигационных средств. Испытания обзорных радиолокационных систем [Текст] : Manual on Testing of Radionavigation AIDS. V. III. Testing of surveillance Radar Systems [DOC 8071].
8. Приземные зоны видимости РЛС с учетом влияния сферичности Земли и радиорефракции / Н. А. Арманд, В. А. Андрианов, Б. В. Ракитин [и др.]. – М. : ИРЭ АН СССР, 1977. – 80 с.
9. Марков, Г. Т. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст] / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – М. : Сов. радио, 1979. – 376 с.
10. Основы построения РЛС РТВ [Текст] / В. П. Блохин, Б. Ф. Бондаренко, В. Т. Неснов, В. Е. Угольников ; под ред. Б. Ф. Бондаренко. – К. : КВИРТУ ПВО, 1987. – 368 с.

Рецензент А. С. Довгополий, д-р техн. наук, проф. (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)