

УДК 621.396.967

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3\(23\).58-61](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3(23).58-61)

**П. М. ФЕДОРОВ**, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>

**В. В. БОГУЧАРСЬКИЙ**, кандидат технічних  
наук, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>

(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, м. Київ)

## Інтерференційне ослаблення радіолокаційних сигналів Від маловисотних цілей

У статті розглянуто явище інтерференційного ослаблення радіолокаційних сигналів від маловисотних цілей. Показано, що для маловисотних цілей через малість кута ковзання променя, відбитого від земної поверхні, відбувається практично протифазне підсумовування (фактично віднімання) сигналів прямого й відбитого променів, що мають приблизно однакові амплітуди. Результатом цього є значне зниження дальності радіолокаційного спостереження маловисотних цілей. Подано розрахункові відношення для оцінки додаткових втрат енергії сигналу при виявленні маловисотних цілей. Запропоновано просту методику врахування інтерференційних процесів у конкретних умовах радіолокаційного спостереження.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, інтерференційний множник, маловисотна ціль, додаткові втрати.

В статье рассмотрено явление интерференционного ослабления радиолокационных сигналов от маловысотных целей. Показано, что для маловысотных целей из-за малости угла скольжения луча, отраженного от земной поверхности, происходит практически противофазное суммирование (фактически вычитание) сигналов прямого и отраженного лучей с приблизительно равными амплитудами. Результатом этого является значительное снижение дальности радиолокационного наблюдения маловысотных целей. Представлены расчетные соотношения для оценки дополнительных потерь энергии сигнала при обнаружении маловысотных целей. Предложена простая методика учета интерференционных процессов в конкретных условиях радиолокационного наблюдения.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, интерференционный множитель, маловысотная цель, дополнительные потери.

### ВСТУП

У наземних радіолокаційних станціях (РЛС), антени яких розміщуються в безпосередній близькості до поверхні землі, через інтерференцію прямої й відбитої хвиль утруднено виявлення об'єктів, що перебувають на малій висоті, – маловисотних цілей (МВЦ). До маловисотних цілей відносять як так звані низьколітні цілі, тобто літальні апарати, що здійснюють політ на малій висоті, огинаючи нерівності рельєфу, так і об'єкти, розташовані безпосередньо на земній поверхні, наприклад, автомобілі або кораблі, на значному віддаленні від РЛС.

Для маловисотних цілей характер згасання енергії прийнятого радіолокаційного сигналу значною мірою відрізняється від загально відомого закону зворотної пропорційності відстані в четвертому степені [1], який є типовим для сигналів, відбитих від повітряних цілей, що здійснюють політ на відносно великій висоті. На практиці радіолокаційні сигнали від МВЦ згасають значно швидше, що необхідно обов'язково враховувати при розрахунках дальності дії або потрібного енергопотенціалу РЛС.

**Метою** даної статті є оцінка додаткових втрат енергії сигналу, що мають місце при радіолокаційному спостереженні маловисотних цілей, для врахування цих втрат при експлуатації або проектуванні радіолокаційних станцій.

Відмінності умов поширення радіохвиль над землею поверхнею від випадку вільного простору, що враховують двопробієвий характер підсумкового поля, описують за допомогою інтерференційного множника  $L_{\text{инт}}$  [2]:

$$L_{\text{инт}} = \frac{F(\theta_2)}{F(\theta_1)} \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\varphi + 2\pi \frac{\delta}{\lambda})}, \quad (1)$$

у якому:

$F(\theta_1)$ ,  $F(\theta_2)$  – значення нормованої амплітудної характеристики спрямованості антени РЛС у площині кута місця в напрямках поширення відповідно прямої й відбитої від земної поверхні хвиль;

$\dot{p} = \rho e^{-i\varphi}$  – комплексний коефіцієнт відбиття від земної поверхні,  $\rho$  – його амплітуда,  $\varphi$  – його фаза;

$$\delta = \frac{2h_1 h_2}{d} \quad (2)$$

– різниця ходу променів, що залежить від висоти антени РЛС  $h_1$ , висоти цілі над горизонтом  $h_2$  і горизонтальної дальності до цілі  $d$ ;

$\lambda$  – робоча довжина хвилі РЛС.

Модуль і фазу коефіцієнту відбиття в рівнянні (1) розраховують за формулою коефіцієнтів Френеля для плоских хвиль горизонтальної або вертикальної поляризації [3, 4]. Вони залежать від комплексної відносної діелектричної проникності ґрунту  $\dot{\epsilon} = \epsilon - i60g\lambda$ , де  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність, а  $g$  – питома провідність ґрунту, а також кута ковзання

$$\Psi = \theta_2 = \arctg\left(\frac{h_1 + h_2}{d}\right). \quad (3)$$

Формули (1–3) характеризують процеси інтерференції прямої й відбитої хвиль у моделі плоскої Землі в припущенні дзеркального відбиття від земної поверхні. Згідно із критерієм Релея [1, 3], відбиття від плоскої шорсткої поверхні можна вважати дзеркальними, якщо розміри нерівностей не перевищують величини  $\Delta = \frac{\lambda}{16 \sin \Psi}$ . При малих кутах ковзання навіть для хвиль сантиметрового діапазону величина  $\Delta$  має порядок декількох метрів. Це означає, що інтерференційна формула (1) застосовна практично в будь-яких умовах місцевості за винятком сильно пересіченої.

Через інтерференцію прямої хвилі й хвилі, відбитої від земної поверхні, при радіолокаційному спостереженні може відбуватися як «підсилення», так і ослаблення сигналу в порівнянні з випадком вільного простору. Максимального «підсилення» зазнають сигнали від тих точок, для яких пряма й відбита від землі хвилі додаються синфазно, і, відповідно, мінімуми розташовані там, де пряма й відбита хвилі протифазні.

Для МВЦ сума висот антени РЛС і цілі набагато менша за відстань до цілі, тому, згідно формули (3), кут ковзання невеликий і становить десяти-соті частки градуса. Для таких малих кутів ковзання при будь-яких спостережуваних на практиці параметрах ґрунту  $\varepsilon$  і  $g$  модуль коефіцієнта відбиття  $\rho$  не сильно відрізняється від одиниці, а фаза коефіцієнта відбиття  $\varphi$  наближається до  $\pi$ .

Так, за даними [4], для цілей, віддалених від РЛС на відстань  $d$ , що перевищує величину

$$d_{\pi} = \frac{h_1 + h_2}{\alpha}, \quad (4)$$

фаза коефіцієнта відбиття від плоскої земної поверхні практично не відрізняється від  $\pi$ . Для радіохвиль сантиметрового діапазону коефіцієнт  $\alpha$  у формулі (3) дорівнює 0,1 у випадку відбиття від морської поверхні, й, відповідно, 0,3 або 0,45 при поширенні радіохвиль над вологим або сухим ґрунтом [4].

Для маловисотних цілей, величина  $d_{\pi}$ , розрахована за формулою (4), зовсім мала. Тому на відстані від радіолокатора, що становить практичний інтерес, фазу коефіцієнта відбиття від земної поверхні можна з високим ступенем точності вважати такою, що дорівнює  $\pi$ . Крім того, у цих умовах  $F(\theta_2) \approx F(\theta_1)$ .

З урахуванням цих факторів інтерференційна формула (1) для випадку виявлення МВЦ спрощується до виду:

$$L_{\text{инт}} = 2 \left| \sin \left( \frac{\pi \delta}{\lambda} \right) \right| = 2 \left| \sin \left( \frac{2\pi h_1 h_2}{d \lambda} \right) \right|. \quad (5)$$

Аналізуючи рівняння (5), приходимо до висновку, що синфазне додавання прямої й відбитої хвиль спостерігається для радіолокаційних сигналів від тих точок, у яких різниця ходу променів  $\delta$  становить непарне число півхвиль. Мінімуми ж сумарного поля спостерігаються там, де геометричні довжини шляхів прямого й відбитого променів відрізняються на парне число півхвиль.

Дальності максимумів  $d_{n \max}$  і мінімумів  $d_{n \min}$  інтерференційного множника можна розрахувати за допомогою співвідношень:

$$d_{n \max} = \frac{d_{1 \max}}{2n-1}, \quad d_{n \min} = \frac{d_{1 \max}}{2n}, \quad (6)$$

$$\text{де } d_{1 \max} = \frac{4h_1 h_2}{\lambda}, \quad (7)$$

$n=1, 2, \dots$  – натуральне число, що позначає порядок максимуму або мінімуму.

Перший максимум розташовано на найбільшій відстані  $d_{1 \max}$ , яку обчислюють за формулою (7). Максимуми більших порядків спостерігаються на віддаленні від РЛС  $d_{1 \max}/3, d_{1 \max}/5, d_{1 \max}/7$  і т.д., тобто в непарне число разів меншому за  $d_{1 \max}$ . Між цими максимумами розташовані мінімуми на відстані  $d_{1 \max}/2, d_{1 \max}/4, d_{1 \max}/6 \dots$ . Типовий вигляд залежності інтерференційного множника від відстані показаний на рис. 1.

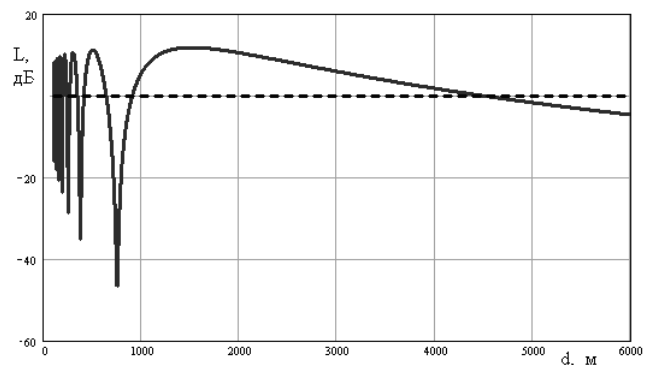


Рис. 1. Типовий вигляд залежності інтерференційного множника від відстані.

Як бачимо, чим ближче до РЛС, тим частіше чергуються максимуми й мінімуми інтерференційного множника. При збільшенні відстані рознесення між екстремумами також збільшується, поки не буде досягнуто максимум першого порядку, розташований на віддалі  $d_{1 \max}$ . При подальшому збільшенні відстані відбувається монотонне зменшення сили радіолокаційного сигналу.

На відстані від РЛС, більшій від  $d_{1 \max}$ , скориставшись тим, що за малих значень функція синус мало відрізняється від свого аргумента, інтерференційну формулу (1), (5) можна ще більше спростити – до формули Введенського [4]:

$$L_{\text{инт}} = \frac{4\pi h_1 h_2}{d \lambda}. \quad (8)$$

Очевидною ближньою межею зони, у якій радіолокаційну ціль можна вважати маловисотною, є відстань  $d_{\text{МВЦ}}$ , для якої інтерференційний множник  $L_{\text{инт}}$  дорівнює одиниці. З формули (8) випливає, що

$$d_{\text{НЛЦ}} = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda}. \quad (9)$$

Для маловисотних цілей через майже протифазне підсумовування (фактично віднімання) прямого й відбитого променів приблизно однакової інтенсивності

потужність прийнятого сигналу обернено пропорційна відстані у *восьмому* степені [1, 4], що приводить до значного зниження дальності радіолокаційного спостереження. На відстані, більшій за  $d_{\text{МВЦ}}$ , сигнал від цілі завжди менше сигналу, який би спостерігався у випадку поширення радіохвиль у вільному просторі, на величину інтерференційних втрат  $L_{\text{интдБ}}$ , які можна розрахувати за допомогою рівняння:

$$L_{\text{интдБ}} = 40 \lg \left( \frac{d}{d_{\text{нлц}}} \right). \quad (10)$$

Коефіцієнт «40» у формулі (10) враховує той факт, що інтерференційного ослаблення при виявленні маловисотної цілі радіолокаційний сигнал зазнає двічі: як на шляху від передавача РЛС до цілі, так і на зворотній трасі від цілі до приймача РЛС.

Слід зазначити, що вплив різних нерівностей земної поверхні не змінює положень максимумів і мінімумів інтерференційного множника, показаного на рис. 1. Наявність недзеркального відбиття приводить лише до «вирівнювання» інтерференційної «картинки»: максимуми й мінімуми стають меншими за абсолютною величиною.

### РОЗРАХУНКИ

Розглянемо приклад – наземну РЛС Х-діапазону, що працює на довжині хвилі  $\lambda=3,2$  см. Нехай фазовий центр антени РЛС розташовано на висоті  $h_1=3$  м над поверхнею Землі, а об'єктом спостереження виступає автомобіль, що виступає над землею поверхнею на висоту  $h_2=2$  м. Згідно з формулою (9), у цих умовах  $d_{\text{МВЦ}}=2,356$  км.

Починаючи із цієї відстані, потрібно враховувати додаткові інтерференційні втрати, які, наприклад, на дальності 7 км досягають, у відповідності до формули (10), величини 19 дБ. Очевидно, що для успішного радіолокаційного спостереження автомобіля на такій відстані передавач РЛС повинен мати запас потужності, достатній для компенсації високих додаткових втрат.

Альтернативою настільки марнотратному використанню потужності передавача може служити або зменшення робочої довжини хвилі, або піднімання антени РЛС на більшу висоту. Так, наприклад, при збільшенні  $h_1$  до 6 м (за тієї ж робочої довжини хвилі) удвічі збільшується  $d_{\text{МВЦ}}$ , і на віддалі 7 км додаткові інтерференційні втрати при виявленні автомобіля з  $h_2=2$  м складуть уже значно меншу величину 7 дБ.

### ВИСНОВКИ

При розрахунках енергопотенціалу наземної РЛС, призначеної для виявлення цілей, що перебувають на невеликій висоті над землею поверхнею, тобто так званих маловисотних цілей, в обов'язковому порядку необхідно враховувати інтерференційні втрати. Дальність  $d_{\text{МВЦ}}$ , починаючи з якої цілі можна вважати маловисотною, розраховують за формулою (9). Якщо відстань до цілі перевищує  $d_{\text{МВЦ}}$ , то мають місце інтерференційні втрати, які визначають за допомогою рівняння (10).

Для оперативного врахування інтерференційних явищ при радіолокації маловисотних цілей може бути корисною проста *методика*, подана нижче.

1. За відомою робочою довжиною хвилі  $\lambda$  визначають параметр  $d_0 = \frac{4}{\lambda}$ , який має фізичний зміст відстані до першого (найдалшого від РЛС) максимуму інтерференційного множника, розрахованого за умови, що антена локатора й цілі розташовані на висоті  $h_1 = h_2 = 1$  м. Наприклад, якщо радіолокатор працює на довжині хвилі  $\lambda = 3,2$  см,  $d_0 = 125$  м.

2. Знаючи конкретні значення (у метрах) висоти установки антени й висоти цілі, за формулою  $d_{1\text{max}} = d_0 h_1 h_2$  розраховують положення першого максимуму  $d_{1\text{max}}$ . Так, у випадку установки антени на висоті  $h_1 = 2,5$  м і виявлення автомобіля з  $h_2 = 2,0$  м,  $d_{1\text{max}} = 625$  м.

3. Інші максимуми інтерференційного множника розташовані на відстанях  $d_{1\text{max}}/3$ ,  $d_{1\text{max}}/5$ ,  $d_{1\text{max}}/7 \dots$ . Для розглянутого випадку це будуть відстані 208 м, 125 м, 89 м ... відповідно.

4. Між інтерференційними максимумами на відстанях  $d_{1\text{max}}/2$ ,  $d_{1\text{max}}/4$ ,  $d_{1\text{max}}/6 \dots$  спостерігаються «провали». У розглянутому випадку вони розташовані на відстанях 312 м, 156 м, 104 м ...

5. Потроєна відстань  $d_{1\text{max}}$  визначає ближню межу  $d_{\text{МВЦ}}$  зони, у якій цілі можна вважати маловисотною. У цій зоні сигнал від цілі завжди менше сигналу, який спостерігався б у випадку поширення радіохвиль у вільному просторі, на величину інтерференційних втрат (див. формулу (10)). Для розглянутих у прикладі умов радіолокаційного спостереження  $d_{\text{МВЦ}} = 1875$  м.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Skolnic, M. I. (2008), *Radar handbook*, 3-d ed., McGraw-Hill Companies, 1351 p.
2. Расстригин О. О., Сергиенко В. Д., Федоров П. М., Чучмій А. В. Вплив умов поширення радіохвиль на дальність спостереження надводних цілей береговою радіолокаційною станцією. Зб. наук. пр. ЦНДІ ОБТ ЗС України. Вип. 4(59). 2015. С. 128–140.
3. Boithais Lucien (1987), *Radio Wave Propagation*, McGraw-Hill Book Company. New York.
4. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связьиздат, 1972. 336 с.

### REFERENCES

1. Skolnic, M. I. (2008), *Radar handbook*, 3-d ed., McGraw-Hill Companies, 1351 p.
2. Rasstryhin, O. O., Serhiienko, V. D., Fedorov, P. M. and Chuchmii, A. V. (2015), «Vplyv umov poshyrennia radiokhvyly na dalnist sposterezhenia nadvodnykh tsilei berehovoii radiolokatsiinoiu stantsiieiu» [The influence of radio waves propagation conditions on the range of observation of above-water targets by a coastal radar], *Col. Papers of the Central Research Inst. of*

- Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, No. 4(59), pp. 128–140.
3. Boithais Lucien (1987), *Radio Wave Propagation*, McGraw-Hill. New York.
  4. Dolukhanov, M. P. (1972), «*Rasprostranenie radiovoln*» [*Propagation of Radio Waves*], Sviazizdat, M., 336 p.

**Відомості про авторів:****Федоров Павло Миколайович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України,  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>  
e-mail: pamyf@i.ua

**Богучарський Вячеслав Вікторович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
начальник науково-дослідного відділу, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України,  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>  
e-mail: bogww@ukr.net

**Information about the authors:****Pavlo Fedorov**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
Leading researcher, Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1359-2757>  
e-mail: pamyf@i.ua

**Viacheslav Bohucharskyi**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Research  
Head of a research department, Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5514-1642>  
e-mail: bogww@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 24.07.2019 р.

**Рецензент М. І. Луханін**, д-р техн. наук, професор  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)  
<https://orcid.org/0000-0002-1919-8526>

**Рецензент В. В. Зубарєв**, д-р техн. наук, професор  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)  
<https://orcid.org/0000-0002-4998-726X>