

ОЦІНКА ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ВТРАТ ПРИ ОДНОЧАСНІЙ РЕЖЕКЦІЇ ПАСИВНОЇ ПЕРЕШКОДИ І ПЕРЕВІДБИТОГО СИГНАЛУ ПРИ ВИЯВЛЕННІ ЦІЛЕЙ НА МАЛИХ ВИСОТАХ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПРОСТОРОВОГО РЕЖЕКТОРНОГО ФІЛЬТРА

Втрати у відношенні сигнал/шум, що зумовлені інтерференцією сигналів, відбитих від цілі, можна істотно зменшити, якщо здійснювати кутову селекцію сигналів цілі, перевідбитих поверхнею Землі. При цьому матиме місце та частина інтерференційних втрат, яка обумовлена ослабленням щільності потоку потужності зондуючого сигналу радіолокаційної станції в точці знаходження цілі і втрати за рахунок просторового режекторного фільтра. У статті теоретично обґрунтовано та підтверджена методом математичного моделювання принципова можливість зменшення інтерференційних втрат при радіолокації цілей у приземному шарі з високою потенційною ефективністю.

Встановлено, що одночасна селекція пасивної перешкоди і перевідбитого від Землі сигналу цілі допустима лише за наявності запасу у відношенні сигнал/шум.

Ключові слова: радіолокаційна станція, інтерференційні втрати, просторовий режекторний фільтр.

Постановка проблеми. Радіолокація цілей в приземному шарі є однією з найбільш складних завдань, що вирішуються оглядовими радіолокаційними станціями (РЛС), як загального призначення, так і спеціалізованих (РЛС аеродромного забезпечення) [1]. Складність завдання обумовлена дією цілого ряду факторів, з яких, окрім природних (кривизна земної поверхні), слід виділити вплив інтенсивних перешкод за рахунок відбиття зондуючого сигналу від поверхні Землі, явище інтерференції прямого і перевідбитого поверхнею сигналів за рахунок двопроменевого поширення радіохвиль. При обґрунтуванні вимог до інформаційних характеристик РЛС акцентовано увагу на двох основних напрямках вдосконалення алгоритмів і структури систем виявлення РЛС при виявленні цілей у приземному шарі: по-перше, підвищення ефективності системи захисту РЛС від пасивних перешкод, обумовлених відбиттям зондуючого сигналу від земної поверхні; по-друге, необхідністю істотного зниження інтерференційних втрат енергії сигналу за рахунок двопроменевого розповсюдження радіохвиль.

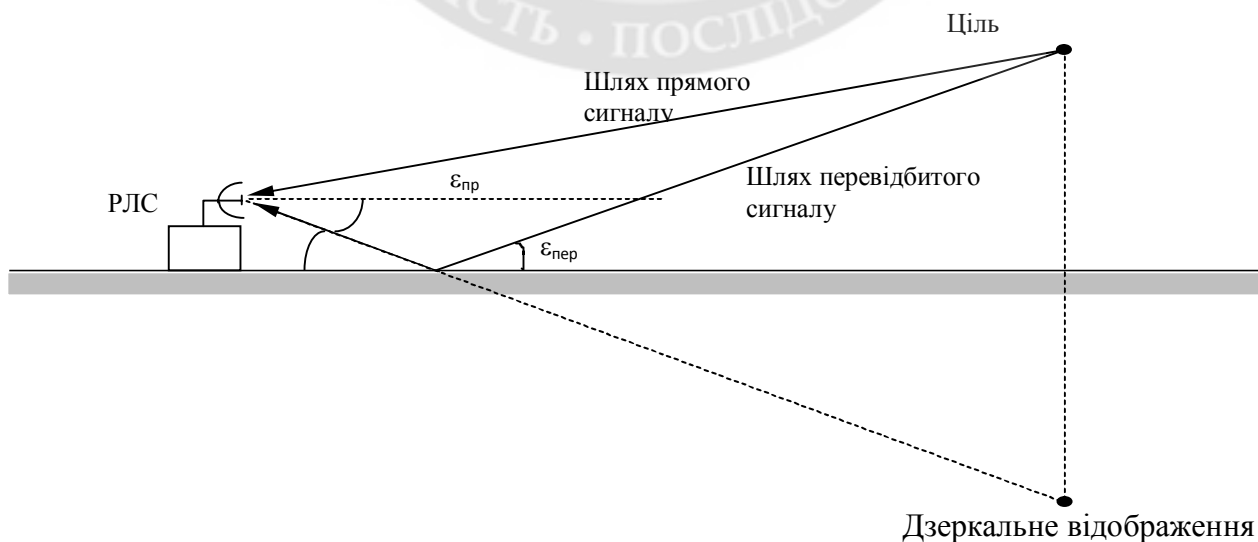


Рис. 1. Ілюстрація інтерференційних втрат

Розв'язання проблеми. Вплив інтерференції прямого і перевідбитого сигналів на результати радіолокації (виявлення - вимірювання) прийнято оцінювати за величиною додаткових втрат (втрати інтерференції - $L_{\text{ІНТ}}$), а також складової середньоквадратичної помилки $\sigma_{\text{ІНТ}}$, зумовленої інтерференцією. Наявність інтерференційних втрат обумовлена двопробневим поширенням сигналів в РЛС виявлення цілей на малих висотах (рис. 1).

Відповідно до рис. 1 результуючий сигнал цілі на вході приймального тракту РЛС можна визначити наступним чином [2]:

$$\dot{u}_{\text{ср}}(t) = \dot{u}_{\text{с пр}}(t) + \dot{u}_{\text{с пер}}(t), \quad (1)$$

де $\dot{u}_{\text{с пр}}(t)$ – прямий сигнал, відбитий від цілі;

$\dot{u}_{\text{с пер}}(t)$ – сигнал від цілі, перевідбитий поверхнею Землі.

Різниця фаз прямого і перевідбитого сигналів у співвідношенні (1) дорівнює:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - 4\pi h_a / \lambda \sin \varepsilon_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де φ_0 – скачок фази при відбитті радіохвиль від поверхні Землі (при горизонтальній поляризації радіохвиль $\varphi_0 \approx \pi$).

Використовуючи (1), коефіцієнт, що визначає втрати за рахунок інтерференції ($L_{\text{ІНТ}}$) можна визначити як:

$$L_{\text{ІНТ}} = \left| \dot{u}_{\text{с пр}}(t) \right|^2 / \left| \dot{u}_{\text{ср}}(t) \right|^2. \quad (3)$$

З урахуванням (2) співвідношення (3) для РЛС виявлення із дзеркальною антеною приймає вигляд:

$$L_{\text{ІНТ}1} = 1 / [1 + \delta^2 - 2\delta \cos(4\pi h_a / \lambda \cdot \sin \varepsilon_{\text{ц}})], \quad (4)$$

де $\delta = k_0 \sqrt{G_{\text{дзер}} / G_{\text{ц}}}$;

k_0 – модуль коефіцієнта відбиття радіохвиль від поверхні Землі;

$G_{\text{ц}}$, $G_{\text{дзер}}$ – коефіцієнти підсилення (по потужності) антени РЛС у напрямках на ціль і точку, відповідну її дзеркальному відображенню ("антипод" цілі).

Співвідношення (4) визначає інтерференційні втрати при односторонньому поширенні сигналу. При двосторонньому поширенні сигналів інтерференційні втрати в РЛС виявлення цілей на малій висоті дорівнюють $L_{\text{ІНТ рез}} = L_{\text{ІНТ}1}^2$.

Радикальний спосіб зниження інтерференційних втрат, як це впливає зі співвідношення (4), зводиться до вибору параметрів діаграми спрямованості антени РЛС, при яких виконується умова:

$$\frac{G(\varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_0)}{G(\varepsilon_{\text{ц}} + \varepsilon_0)} \ll 1, \quad (5)$$

де ε_0 – кут місця максимуму діаграми спрямованості антенної решітки в кутомісній площині.

Умова (5) може бути виконана або за рахунок зменшення ширини діаграми спрямованості антени в кутомісній площині, або за рахунок збільшення кута місця ε_0 . В останньому випадку з'являються втрати у відношенні сигнал/шум, що зумовлені зниженням щільності потоку потужності, створюваної РЛС, в точці знаходження цілі на малих висотах і зменшенням ефективної площі прийомної антени РЛС. Величина цих втрат може виявитись неприпустимо великою.

Втрати у відношенні сигнал/шум, що зумовлені інтерференцією сигналів, відбитих від цілі, можна істотно зменшити, якщо здійснювати кутову селекцію сигналів цілі, перевідбитих поверхнею Землі. При цьому матиме місце та частина інтерференційних втрат, яка обумовлена ослабленням щільності потоку потужності зондуючого сигналу РЛС в точці

знаходження цілі і втрати за рахунок ПРФ. Метод зниження інтерференційних втрат на основі принципу кутової режекції перевідбитого поверхнею сигналу запропонований в [3].

Оцінка можливостей щодо зниження інтерференційних втрат методом кутової селекції за умови, що до складу заважаючої перешкоди входить тільки сигнал цілі перевідбитий поверхнею Землі розглянуто у [4]. Метою даної роботи є оцінка інтерференційних втрат при одночасній режекції пасивної перешкоди і перевідбитого сигналу цілі.

Коефіцієнт, що враховує втрати у відношенні сигнал/шум при кутовій режекції джерела пасивної перешкоди $L_{\text{угл реж}}$, можна визначити як

$$L_{\text{угл реж}} = 1/(1 - r_{02}^2), \quad (6)$$

де $(1 - r_{02}^2)$ - співмножник у, що являє собою коефіцієнт використання енергії сигналу при кутовому розрізненні двох цілей.

Достовірність співвідношень (6) підтверджується результатами розрахунку втрат у відношенні сигнал / заважача перешкода методом статистичних випробувань [5].

При одночасній кутовій селекції джерела пасивної перешкоди і перевідбитого від Землі сигналу цілі будемо мати:

$$\text{Pr}_{\perp(2)} = \frac{\vec{v}_n \vec{v}_n^H - \vec{v}_n r_{12} \vec{v}_c^H - \vec{v}_c \text{пер} r_{12}^* \vec{v}_n^H + \vec{v}_c \text{пер} \vec{v}_c^H \text{пер}}{1 - r_{12}^2}, \quad (7)$$

$$\text{де } r_{12} = \left| \vec{v}_n^H \cdot \vec{v}_c \text{пер} \right| = \left| \frac{\sin[N\pi/2(\sin \varepsilon_{\text{пп}} + \sin \varepsilon_{\text{ц}})]}{N \cdot \sin[\pi/2(\sin \varepsilon_{\text{пп}} + \sin \varepsilon_{\text{ц}})]} \right|, \quad - \text{модульні значення коефіцієнта}$$

кореляції набігів фаз в розкритті антенної решітки (АР) сигналу пасивної перешкоди і сигналу цілі, перевідбитого від Землі (індекс у дужках відповідає числу джерел перешкод, які підлягають одночасній кутовій селекції в РЛС виявлення МВЦ).

Потужність прямого сигналу на виході векторного помножувача дорівнюватиме [3]:

$$p_{\text{с вых}} = p_{\text{с1}} \cdot (\vec{v}_0^H \text{Pr}_{\perp(2)} \vec{v}_0)^2 = p_{\text{с1}} \cdot \left(\frac{r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01}r_{12}r_{02}}{1 - r_{12}^2} \right)^2, \quad (8)$$

де r_{02} – коефіцієнт кореляції набігів фаз прямого сигналу цілі і сигналу, відбитого від ділянки Землі, дальність до якого збігається з дальністю до цілі, в розкритті АР;

При точній настройці ПРФ, в силу ортогональності підпростору, утвореного ортогональним доповненням підпростору, натягнутого на стовпці матриці, і заважають сигналів (пасивної перешкоди і перевідбитого від Землі сигналу цілі) потужності пасивної перешкоди і перевідбитого від Землі сигналу на виході векторного помножувача [4] дорівнюватимуть нулю. Тому що заважає перешкода на виході векторного помножувача в ідеальному випадку буде визначатися тільки внутрішніми шумами прийомних каналів АР. Потужність заважаючої перешкоди на виході векторного помножувача з урахуванням (6) дорівнюватиме:

$$p_{\text{мш}} (\text{ППРФ}) = v_0^H \text{Pr}_{\perp(2)} \overline{Y_{\text{ш}i} \cdot Y_{\text{ш}i}^H} \text{Pr}_{\perp(2)} v_0 = p_{\text{ш1}} (v_0^H \text{Pr}_{\perp(2)} v_0) \text{в} \quad (9)$$

У виразі (9) враховано властивість проекторів, в силу якого $(\text{Pr}_{\perp(2)})^2 = \text{Pr}_{\perp(2)}$.

Результати розрахунку потужності заважаючих шумів на виході векторного помножувача за формулою (9) і методом Монте-Карло [5] наведено на рис. 2 (позначені відповідно суцільною лінією і значком *).

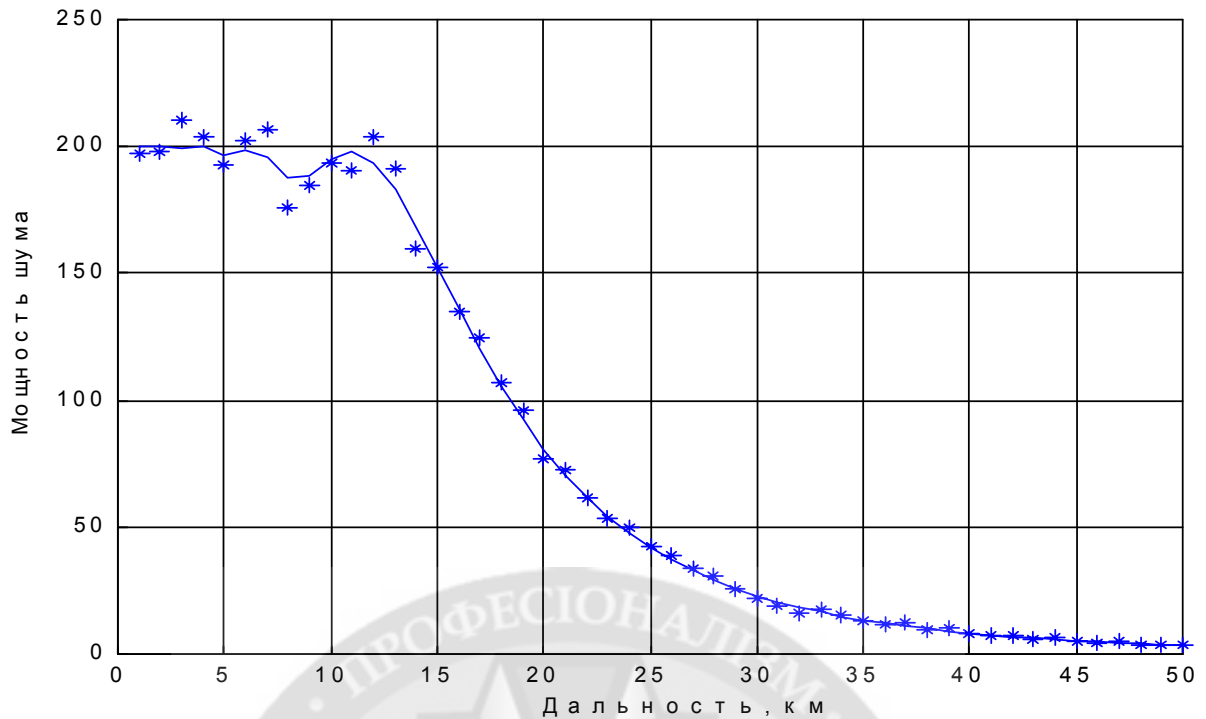


Рис. 2. Результати розрахунку потужності заважаючих шумів

По осі ординат на рис. 2 відкладено відношення $p_{\text{мш (ПРФ)}}/p_{\text{ш}}$. Число незалежних шумових вибірок при оцінці потужності заважає шуму на виході векторного помножувача методом Монте-Карло вибиралося рівним 500.

Використовуючи (8) і (9), можна визначити втрати у відношенні сигнал/шум за рахунок ПРФ при одночасній кутовій селекції пасивної перешкоди і перевідбитого від Землі сигналу:

$$L_{\text{угл реж (2)}} = 1/(1-r_3^2), \quad (10)$$

де позначено

$$r_3^2 = \frac{r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}}{1 - r_{12}^2}. \quad (11)$$

З (11) випливає, що $r_3^2 \geq r_{01}^2$ і $r_3^2 \geq r_{02}^2$. Це означає, що зі збільшенням числа одночасно селектуємих по куту місця джерел перешкод збільшуються втрати у відношенні сигнал/шум в РЛС виявлення з ПРФ. На рис. 3 зображені графіки, що ілюструють залежність втрат у відношенні сигнал/шум, обумовлених використанням в РЛС виявлення маловисотних цілей просторового режекторного фільтра, від дальності до цілі при одночасній кутовій селекції перевідбитого від Землі сигналу цілі і сигналу пасивної перешкоди. Залежність, позначена цифрою 1, відповідає випадку точної настройки ПРФ, а залежність, позначена цифрою 2, відповідає випадку розлагодженого ПРФ переовідбитого від Землі сигналу. Величина розлагодження така ж, як і для рис. 2. Видно, що при одночасній селекції по куту місця одночасно декількох джерел перешкод втрати у відношенні сигнал/шум істотно збільшуються.

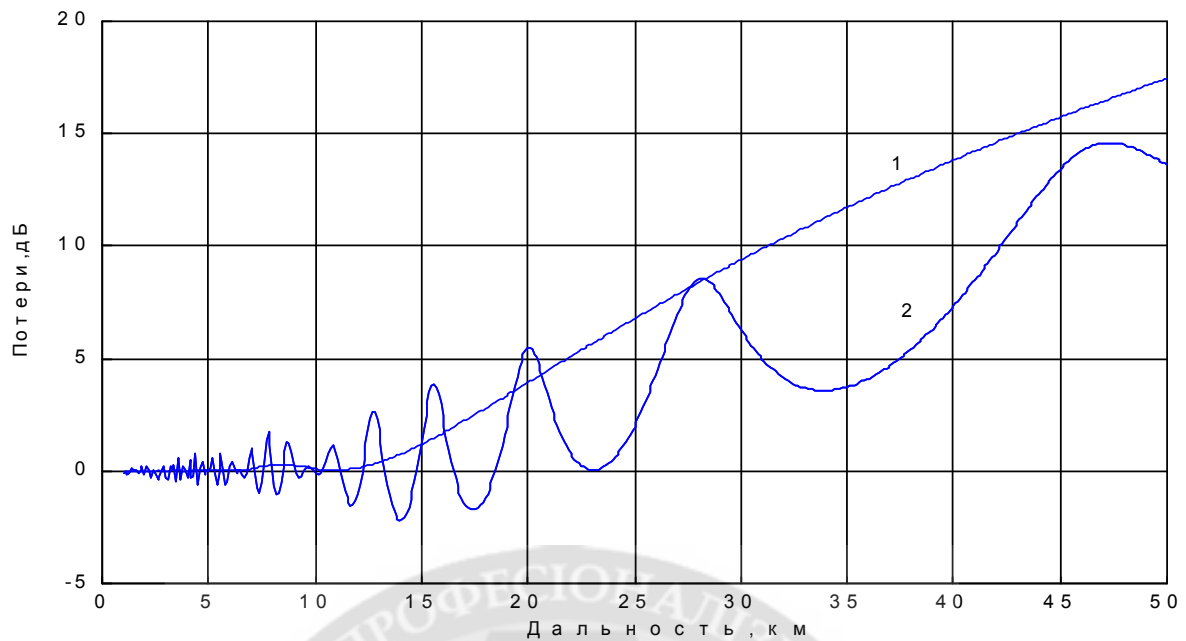


Рис. 3. Графіки залежності втрат у відношенні сигнал/шум

Так, наприклад, якщо при кутовій селекції тільки перевідбитого Землею сигналу втрати у відношенні сигнал/шум при дальності до цілі, рівної 50 км, не перевищують 4 дБ [4], то при одночасній кутовій селекції перевідбитого сигналу цілі і сигналу пасивної завади ці втрати збільшуються до 17 дБ при точній настройці ПРФ перевідбитого від Землі сигналу і до 14 дБ при розладі ПРФ перевідбитого від Землі сигналу.

Висновок. Таким чином, одночасна кутова селекція пасивної перешкоди і перевідбитого сигналу допустима тільки при наявності в РЛС відчутного запасу у відношенні сигнал/шум.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. – М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.
2. Теорія радіолокаційних систем / Під ред. Ленкова С.В. – К.:КГУ.
3. Ленков С.В. Повышение качества обнаружения маловысотных целей методом угловой селекции / С.В. Ленков, А.В. Селюков, Р.Ю. Кольцов // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2013. – № 40. – С.45-51.
4. Кольцов Р.Ю. Повышение эффективности радиолокации целей в приземном слое на основе применения пространственных фильтров селекции / Р.Ю. Кольцов, Ленков Е.С., Лоза В.М. // «Система обробки інформації». – Харків, – 2013. – №1(108). – С.75 – 78.
5. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Сов. радио, 1971. – 328 с.
6. Бондаренко Б.Ф., Предельное качество обнаружения и разрешения сигналов в обнаружителе на основе согласованного проектора / Б.Ф. Бондаренко, Г.Н. Бондарчук, В.Ю. Тимчук // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – М., 2005 – Т48, №3 – С 24 – 33.

Рецензент: д.т.н., проф. Сбітнев А.І., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н., с.н.с. Мирошниченко О.В., к.т.н. Гришин С.П., Халиманенко С.Н.

ОЦЕНКА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ РЕЖЕКЦИИ ПАССИВНОЙ ПОМЕХИ И ПЕРЕОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЦЕЛЕЙ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЕЖЕКТОРНОГО ФИЛЬТРА

Потери в отношении сигнал / шум, обусловленные интерференцией сигналов, отраженных от цели, можно существенно уменьшить, если осуществлять угловую селекцию сигналов цели, переотраженного поверхностью Земли. При этом будет иметь место и часть интерференционных потерь, которая обусловлена ослаблением плотности потока мощности зондирующего сигнала радиолокационной станции в точке нахождения цели и потери за счет пространственного режекторного фильтра. В статье теоретически обоснована и подтверждена методом математического моделирования принципиальная возможность уменьшения интерференционных потерь при радиолокации целей в приземном слое с высокой потенциальной эффективностью.

Установлено, что одновременная селекция пассивной помехи и переотраженного от Земли сигнала цели допустима только при наличии запаса в отношении сигнал/шум.

Ключевые слова: радиолокационная станция, интерференционные потери, пространственный режекторный фильтр.

Ph.D. Miroshnichenko O.V., Ph.D. Grishin S.P., Halimanenko S.N.

ASSESSMENT OF INTERFERENCE IN SIMULTANEOUS LOSSES REJECT CLUTTER AND MULTIPATH SIGNAL WHEN TARGET DETECTION LOW-LEVEL DUE TO THE USE OF SPACE NOTCH FILTER

Losses in the signal / noise ratio due to the interference of the signals reflected from the target, can be significantly reduced if the selection signals to carry out the angular goal Backlight Earth. This will take place of the interference loss, which is caused by the weakening of the power flux density probing radar signal at the location of the target and the loss due to spatial notch filter. The paper theoretically proved and confirmed by mathematical modeling principle possible to reduce interference with the loss of radar targets in the surface layer with a high efficiency potential.

It was found that the simultaneous selection of passive interference and signal re-scattered by the Earth's purpose is permissible only if the stock in the signal / noise ratio.

Keywords: radar, interference losses spatial notch filter.