

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.101>

УДК 621.396.669

PACS: 84.40.Xb, 84.30.Vn

І.М. Миценко, О.М. Роєнко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

вул. Акад. Проскури, 12, Харків, 61085, Україна

E-mail: igor.mytsenko@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ДО ЦІЛІ ПРИ ПАСИВНІЙ РАДІОЛОКАЦІЇ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Предмет і мета роботи. Як відомо, пасивна радіолокація в порівнянні з методами активної радіолокації, поруч із перевагами, тобто більшою дальністю виявлення цілей, прихованістю, меншим споживанням енергії, має суттєвий недолік, а саме неможливість визначення відстані до цілі та її координат за наявності одного опорного приймального пункту. Мета досліджень полягає в розробці методу визначення відстані до цілі за наявності одного опорного приймального пункту при пасивній радіолокації над морською поверхнею та засобів для реалізації такого методу.

Методи та методологія. В основу запропонованого методу визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації покладено ідею використання надводного радіобуя, встановленого за межами радіогоризонту. Передавальний пристрій, встановлений на радіобуї, не загрожує опроміненням прибережної території, а приймальний пристрій, розташований на березі, приймає прямий сигнал від радіобуя та відбитий від надводного об'єкту. Для оцінки роботи системи використано методи аналізу та числового моделювання.

Результати роботи. Ретельно проаналізовано механізми поширення радіохвиль за радіогоризонтом. На основі цього аналізу розроблено функціональну схему запропонованого пасивного радара, в якому використовується надводний радіобуй, оснащений передавачем і підсилювачем-ретранслятором. У цій схемі додатковий шлях поширення радіохвиль виникає від цілі до підсилювача-ретранслятора, а потім до наземного приймача на березі. Визначено часову затримку між сигналом радіомаяка та основним сигналом від цілі, а також кут між напрямками цілі та радіомаяка. Встановлено різницю довжин шляхів сигналу вздовж основного та додаткового шляхів. Для практичної реалізації запропонований принцип роботи пасивного радара доповнено алгоритмами визначення дальності до надводної цілі. Детально описано роботу пристроїв.

Висновки. Розроблено метод побудови загоризонтної пасивної радіолокаційної системи, яка визначає дальність до цілі, використовуючи, серед іншого, підсилювач-ретранслятор, встановлений на радіобуї за радіогоризонтом. Алгоритм визначення дальності до надводної цілі було перевірено за допомогою математичного моделювання траєкторій поширення радіолокаційних сигналів.

Ключові слова: пасивна радіолокація, радіобуй, підсилювач-ретранслятор, відстань до цілі.

Вступ

У наш час сучасні технології та стрімке зростання продуктивності обчислювальної техніки, нові «інтелектуальні» методи обробки інформації

дозволяють виявляти найменші ознаки наявності відбитого від цілі сигналу, у тому числі при пасивній радіолокації. Як відомо [1–7], перевага пасивної радіолокації порівняно з активною, коли сама ціль випромінює сигнал, полягає в біль-

Цитування: Миценко І.М., Роєнко О.М. Визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації надводних об'єктів. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 2. С. 101–108. <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.101>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

шій дальності виявлення, прихованості, меншому споживанні енергії, меншій вазі конструкції та ін. До недоліків пасивної радіолокації можна віднести неможливість визначення відстані до цілі та її координат за наявності одного опорного приймального пункту. Для цього, залежно від завдань, потрібно кілька таких приймальних пунктів, що суттєво ускладнює та здорожує пасивну РЛС і не завжди може бути здійснено через відсутність умов розміщення додаткового приймального пункту.

При пасивній радіолокації існує чимало методів для визначення відстані до цілі та її координат, таких як кутомірний (триангуляційний), різницево-далекомірний, кутомірно-різницево-далекомірний та ін. Однак жоден з існуючих методів не дозволяє визначити відстань до цілі за наявності одного опорного пункту, однієї пасивної РЛС. Реалізація цих методів є досить складним і дорогим завданням [6]. У роботі [8] наведено оцінку можливості визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації та дальньому тропосферному поширенні радіохвиль на основі дистанційних залежностей і статистичних параметрів амплітудних флуктуацій сигналу від цілі за межами радіогоризонту. У цьому методі точність визначення відстані до цілі невелика й потребує наявності бази даних дистанційних залежностей статистичних параметрів сигналу.

Мета роботи полягає в розробці методу визначення відстані до цілі за наявності одного опорного приймального пункту при пасивній радіолокації над морською поверхнею та засобів для реалізації такого методу.

1. Метод визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації

В основу запропонованого в роботі методу визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації покладено ідею використання надводного радіобуя, встановленого за межами радіогоризонту. Застосування плавучого активного радіобуя детально описано у роботі [9] у межах концепції побудови екологічно безпечної активної РЛС. На рис. 1 надано функціональну схему активної РЛС 3-см діапазону [9]. У ній для зменшення впливу ослаблення радіохвиль на дальність дії РЛС запропоновано використовувати

плавучий активний радіомаяк, встановлений за межами радіогоризонту.

Приймальний опорний пункт А, встановлений на березі, складається з антени з високим коефіцієнтом посилення, що обертається, 1, приймачів відбитого сигналу 2 і 4. Приймання прямого сигналу відбувається постійно за допомогою антени 5 і приймача прямого сигналу 4. На щоглі радіобуя В встановлено антену з круговою діаграмою направленості в горизонтальній площині, а на самому буї — передавальний пристрій 6, що випромінює зондувальний сигнал. Залежно від завдань випромінюваний радіобуєм сигнал може бути як безперервним, так і імпульсним. Відстань до цілі R_1 визначається з трикутника ABC. Знаючи відстань $R_0 = \text{const}$, кут α і сумарну відстань $R_\Sigma = R_1 + R_2$, що проходить прямий сигнал від радіобуя до цілі і відбитий від неї до пункту А,

$$R_1 = \frac{R_\Sigma^2 - R_0^2}{2(R_\Sigma - R_0 \cos \alpha)}.$$

Найзручніше визначати $\Delta R = R_\Sigma - R_0$

$$R_1 = \frac{\Delta R^2 + 2\Delta R R_0}{2(\Delta R + R_0(1 - \cos \alpha))}.$$

При використанні імпульсної модуляції в зондувальному сигналі $\Delta R = \Delta t \cdot c$, де Δt — різниця в часі приходу прямого й відбитого сигналів, а c — швидкість світла. При використанні безперервного сигналу для визначення ΔR вводиться частотна модуляція сигналу, що випромінюється передавачем, і для випадку лінійної частотної модуляції $\Delta R = (c \cdot f_b) / a_f$, де a_f — швидкість зміни частоти передавача, а f_b — частота биття в блоці обробки при складанні прямого й відбитого сигналів.

Пасивна радіолокація полягає в прийманні власного випромінювання цілі, у нашому випадку надводного об'єкту. Насамперед це сигнали РЛС різного призначення, які встановлено на судах, з імпульсною модуляцією зондувального сигналу. На рис. 2 наведено спрощену функціональну схему запропонованої пасивної РЛС із використанням радіобуя, де 1 — антена з високим коефіцієнтом посилення, що обертається, яку встановлено на березі, 2 — приймальний пристрій, 3 — підсилювач-ретранслятор, встановлений на радіобуї,

4 — антена підсилювача-ретранслятора з круговою діаграмою направленості в горизонтальній площині та звуженою у вертикальній.

Принцип роботи запропонованої пасивної РЛС із використанням радіобуя такий (рис. 2). Надводний об'єкт T має власне випромінювання P_{rad} і знаходиться на відстані R_1 від приймального пристрою A , встановленого на березі. Цю відстань R_1 і необхідно визначити. Сигнал власного випромінювання цілі приймається приймачем 2, і, таким чином, можна виявити ціль, як це робиться у випадку пасивної радіолокації. Проте відстань до цілі R_1 визначити неможливо. Сигнал від цілі на вході берегового приймача, коли гостроспрямовану антену 1 наведено на ціль, порівнюватиме

$$P_{inp} = \frac{P_{rad} G_t G_1 \lambda^2}{(4\pi R_1)^2} V_1, \quad (1)$$

де P_{rad} — потужність власного випромінювання цілі; G_t — коефіцієнт посилення антени РЛС цілі, так як вона невідома, приймаємо $G_t = 1$; G_1 — коефіцієнт посилення антени 1 берегового приймача; λ — довжина хвилі випромінювання; R_1 — відстань до цілі; V_1 — значення множника ослаблення на трасі ціль — приймач РЛС (рис. 2, б).

Для визначення відстані до цілі R_1 на радіобуї (рис. 2, б) встановлюється підсилювач-ретранслятор (повторювач) 3 та антенна система 4. Остання складається з двох антен із круговими діаграмами направленості в горизонтальній площині. Одна антена приймає власне випромінювання цілі, її підключено до входу підсилювача. Іншу підключено до виходу підсилювача 3, вона випромінює власний сигнал цілі, посилений підсилювачем без спотворень.

Підсилювач 3 має необхідний коефіцієнт підсилення та смугу пропускання, які виключають самозбудження системи. Далі вихідний сигнал підсилювача-ретранслятора 3 надходить на антену 4 і випромінюється в простір, проходить відстань R_0 (рис. 2, б) і приймається приймачем 2, встановленим на березі.

Отже, власний сигнал, що випромінюється ціллю, проходить відстань R_2 від цілі до буя, де посилюється і далі без спотворень проходить відстань R_0 від буя до приймача 2 або сумарну відстань $R_\Sigma = R_0 + R_2$. У результаті роботи такої РЛС за аналогією з активною системою [9] з'яв-

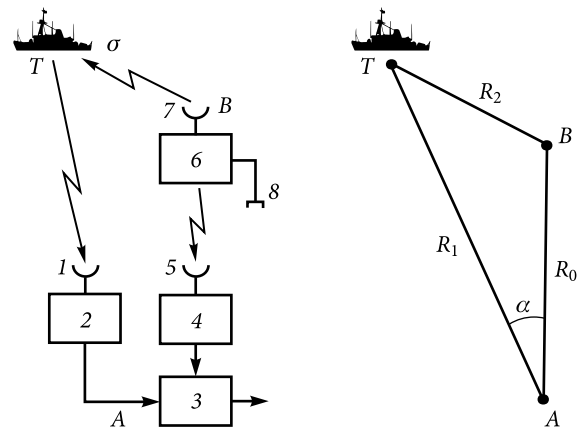


Рис. 1. Бістатична РЛС із використанням активного радіобуя

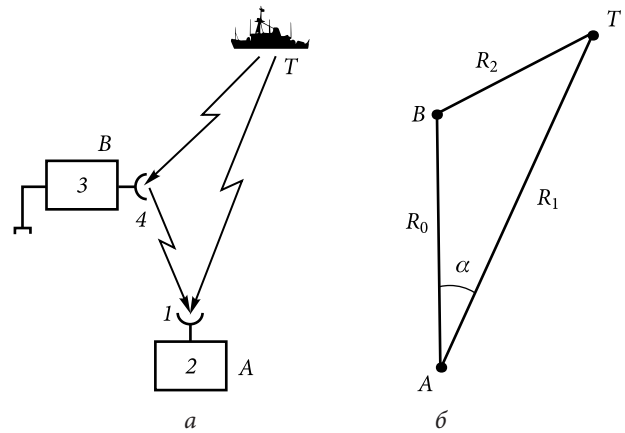


Рис. 2. Спрощена функціональна схема запропонованої пасивної РЛС із використанням радіобуя

ляється можливість визначити відстань до цілі R_1 . Для цього за допомогою антени 1 необхідно визначити кут α між напрямком на ціль і напрямком на буй. Відстань до буя R_0 відома. Відстань до цілі R_1 можна визначити з трикутника ABT (рис. 2, б).

Введемо параметр $\Delta R = R_\Sigma - R_1$, або $\Delta R = R_2 + R_0 - R_1$, звідки

$$R_2 = \Delta R - R_0 + R_1. \quad (2)$$

З трикутника ABT (рис. 2, б) отримаємо

$$R_2^2 = R_0^2 + R_1^2 - 2R_0R_1 \cos \alpha. \quad (3)$$

Підставляючи значення R_2 з виразу (2) до (3), отримаємо

$$[(\Delta R - R_0) + R_1]^2 = R_0^2 + R_1^2 - 2R_0R_1 \cos \alpha.$$

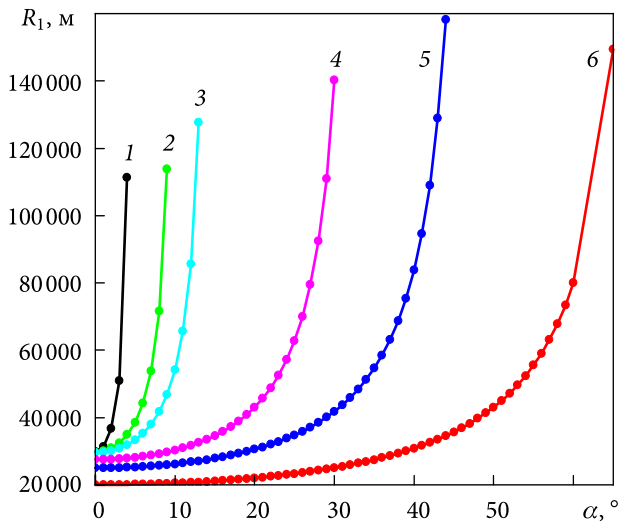


Рис. 3. Залежність $R_1 = f(\alpha)$ при різних значеннях ΔR

Після нескладних перетворень знаходимо R_1

$$R_1 = \frac{2\Delta R R_0 - \Delta R^2}{2(\Delta R - R_0(1 - \cos \alpha))} = \frac{\Delta R(2R_0 - \Delta R)}{2(\Delta R - R_0(1 - \cos \alpha))}. \quad (4)$$

Вираз (4) можна перетворити до вигляду

$$R_1 = \frac{\Delta R^2 - 2\Delta R R_0}{2(R_0(1 - \cos \alpha) - \Delta R)}. \quad (5)$$

Цим виразом і будемо користуватися надалі. Однак попередньо проведемо його верифікацію при різних значеннях кутів α і ΔR при $R_0 = \text{const}$.

Нехай кут $\alpha = 0$, а $R_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ м} = \text{const}$.

В цьому випадку вираз (5) можна спростити

$$R_1 = \frac{\Delta R^2 - 2\Delta R R_0}{-2\Delta R} = R_0 - \frac{\Delta R}{2}, \quad (6)$$

1) якщо ціль T знаходиться в місці розташування радіобуя, то сигнали від цілі та від буя проходять однакову відстань, тобто $\Delta R = 0$. Тоді відповідно до виразу (6) $R_1 = R_0$, що також відповідає дійсності.

2) при розташуванні цілі між буєм і приймальним пристроєм A необхідно визначити ΔR і скористатися виразом (6).

3) якщо ціль T при $\alpha = 0$ знаходиться на відстані більший, ніж відстань до буя R_0 , відстань R_1 ,

як і при звичайній пасивній радіолокації, визначити неможливо.

Для визначення відстані до цілі R_1 при інших значеннях кута α відповідно до виразу (2) необхідно визначити $\Delta R = R_\Sigma - R_1 = \Delta t \cdot c$, де Δt — різниця в часі приходу прямого сигналу від цілі та сигналу від цілі до буя, посиленого підсилювачем-ретранслятором і далі поширеного на відстань від радіобуя до основного приймального пункту 2. За допомогою приймального пристрою 2 визначаємо Δt (рис. 2) та, використовуючи вираз (8), знаходимо відстань до цілі R_1 . На рис. 3 показано залежності відстані до цілі R_1 як функції від кута α , $R_1 = f(\alpha)$ при відстані до радіобуя $R_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ м} = \text{const}$ і $\Delta R = 100, 500, 1000, 5000, 10000$ і 20000 м , позначені відповідно індексами 1—6.

При цьому необхідно враховувати особливості виразу (5). Аналіз показує, що при незмінному $R_0 = \text{const}$ і змінах кута α ($\alpha \neq 0$) і ΔR відстань до цілі R_1 може мати як позитивні, так і негативні значення. Це пов'язано з тим, що чисельник виразу (5) $\Delta R^2 - 2\Delta R R_0$ на практиці завжди буде негативним, оскільки R_0 завжди більше ΔR , тоді як знаменник $2(R_0(1 - \cos \alpha) - \Delta R)$ може мати як негативні значення, коли $\Delta R > R_0(1 - \cos \alpha)$, так і позитивні, коли $\Delta R < R_0(1 - \cos \alpha)$. У першому випадку відстань до цілі R_1 матиме позитивне значення, а у другому — негативне. Крім того, при деяких значеннях кута α , назовемо їх α_{crit} , знаменник виразу (5) дорівнюватиме нулю. При цьому відстань до цілі $R_1 \rightarrow \infty$. Критичні значення кута α_{crit} будуть спостерігатися, коли в знаменнику виразу (5) $\Delta R = R_0(1 - \cos \alpha)$, звідки $\alpha_{crit} = \arccos(1 - \Delta R/R_0)$.

На рис. 4 показано залежність $\alpha_{crit} = f(\Delta R)$ при $R_0 = \text{const}$. Таким чином, позитивні значення відстані до цілі будуть спостерігатися при $\Delta R > R_0(1 - \cos \alpha)$. Саме ці значення повинні використовуватися при практичному використанні виразу (5).

2. Верифікація методу

У зв'язку з неможливістю в наш час провести експериментальну перевірку використання виразу (5) для розрахунку відстані до цілі при пасивній радіолокації будемо використовувати наступну методологію.

1. Задаємося передбачуваною відстанню до цілі R_1 , відстанню до радіобуя R_0 і кутом α .

2. Визначаємо відстань R_2 від цілі до радіобуя.
 $R_1^2 = R_0^2 + R_2^2 - 2R_0R_2 \cos \alpha$.

3. Знаючи R_0 , R_2 і R_1 , визначаємо $\Delta R = R_0 + R_2 - R_1$.

4. Знаючи ΔR , кут α і R_0 , за допомогою виразу (5) знаходимо R_1 . Задана величина відстані до цілі та значення R_1 , знайдене за допомогою виразу (5), повинні збігатися.

Було виконано декілька варіантів розрахунків при значенні відстані до цілі $R_1 = 7 \cdot 10^4$ м, відстані до радіобуя $R_0 = 3 \cdot 10^4$ м і різних значеннях кута $\alpha = 5^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ і 60° . При цьому отримано гарний збіг розрахункових і заданих значень відстані до цілі R_1 .

3. Визначення необхідного енергетичного потенціалу

Тепер оцінимо необхідний енергетичний потенціал пропонованої пасивної РЛС. Для визначення енергетичного потенціалу та можливостей пропонованої пасивної РЛС необхідно знати дистанційні залежності множника ослаблення радіохвиль $V(R)$ 3-см діапазону, який є основним параметром радіолокаційних трас поширення радіохвиль

$$V(R) = \frac{P(R)}{P_0(R)},$$

де $P(R)$ — потужність, що надходить на вхід приймача в реальних умовах; $P_0(R)$ — потужність, яка надходила б на вхід приймача у вільному просторі.

На рис. 5 [10] показано усереднені дистанційні залежності $V(R)$ для 3-см діапазону та різних умов поширення радіохвиль над морською поверхнею: 1 — хвилевідне поширення, 2 — нормальна рефракція та 3 — субрефракція.

Для прикладу вважатимемо, що цілі, відстань до якої необхідно визначити, обладнано найвідомішою судновою РЛС «Дон». Імпульсна потужність випромінювання РЛС «Дон» P_{rad} дорівнює 100 кВт, а коефіцієнт посилення антени дорівнює ≈ 30 дБ, тобто еквівалентно ізотропно випромінювана потужність (ЕІВП) $P_{isotr} = 80$ дБ/Вт. Це значення і будемо використовувати у подальших розрахунках.

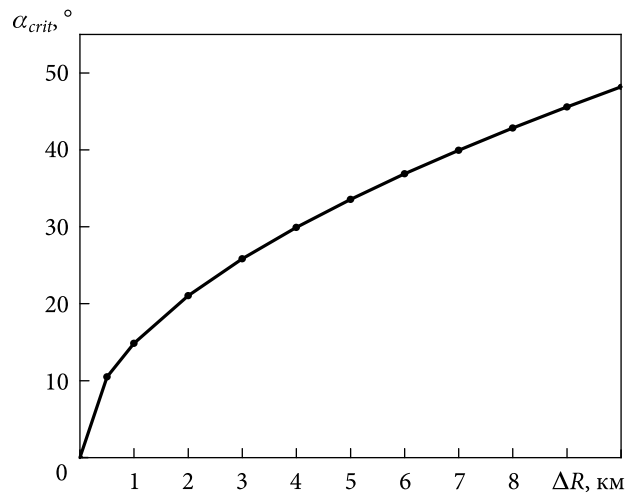


Рис. 4. Залежність $\alpha_{crit} = f(\Delta R)$ при $R_0 = 3 \cdot 10^4$ м

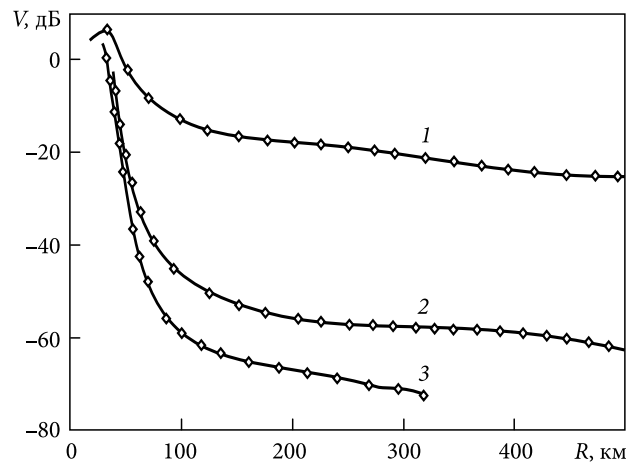


Рис. 5. Усереднені дистанційні залежності $V(R)$

Задаємося величиною коефіцієнта посилення антени 1 (рис. 2) приймального пристрою РЛС, встановленого на березі, $G_1 = 50$ дБ і смугою пропускання $\Delta f = 2$ МГц (припустимо приймання радіосигналів із тривалістю імпульсів $\tau_s \leq 1$ мкс) і коефіцієнтом шуму $F_{noise} = 1$ дБ малошумівного підсилювача (МШП), встановленого на вході приймача. Тоді чутливість приймального пристрою РЛС дорівнюватиме

$$P_{min} = F \cdot K \cdot T_0 \cdot \Delta f = -140 \text{ дБ/Вт},$$

де $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — стала Больцмана; T_0 — абсолютна температура.

Тепер визначимо дальність дії пасивної РЛС, встановленої на березі, у звичному режимі виявлення без визначення відстані до цілі, користу-



Рис. 6. Функціональна схема підсилювача-ретранслятора

ючись виразом (1). Дальністю дії вважатимемо відстань R_1 , у якому рівень сигналу від цілі дорівнює $P_{\min}$, тобто $P_{\text{inp}} = -140$ дБ/Вт

$$P_{\text{inp min}} = \frac{P_t G_t G_1 \lambda^2}{(4\pi R_1)^2} V_1,$$

$$R_{1 \max} = \sqrt{\frac{P_t G_t G_1 \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\text{inp min}}}} V_1,$$

де V_1 — множник ослаблення на трасі ціль — приймач РЛС (відповідно до рис. 1 [10] візьмемо $V_1 \approx -100$ дБ). Тоді після розрахунків отримаємо $R_{1 \max} = 723 \cdot 10^3$ м.

Виявлення можливо на відстані ≈ 723 км. Однак на практиці необхідно мати співвідношення сигнал/шум $\approx 10 \dots 20$ дБ, тому відстань виявлення істотно зменшиться. Тим не менш, така значна відстань виявлення ще раз свідчить про переваги пасивної радіолокації.

4. Оцінка параметрів пасивної РЛС

Перейдемо до оцінки необхідних параметрів пасивної РЛС із можливістю визначення відстані до цілі. Візьмемо такі дані щодо радіолокаційних трас: $\alpha = 20^\circ$, $R_0 = 3 \cdot 10^4$, $R_2 = 4.3 \cdot 10^4$ м і $R_1 = 7 \cdot 10^4$ м.

Визначимо рівень сигналу від цілі (ЕІВП ≈ 80 дБ/Вт) на вході підсилювача-ретранслятора, скориставшись виразом (1) і значеннями відстані $R_2 = 4.3 \cdot 10^4$ м і множника ослаблення $V_2 = -40$ дБ

$$P_{\text{inp B}} = \frac{P_t G_t G_{\text{buoy}} \lambda^2}{(4\pi R_2)^2} V_2 = 1.23 \cdot 10^{-10} \text{ Вт},$$

де $G_{\text{buoy}} = 6$ дБ — коефіцієнт посилення антени на вході підсилювача-ретранслятора.

Тепер знайдемо значення коефіцієнта посилення підсилювача-ретранслятора, яке на відстані $R_0 = 3 \cdot 10^4$ м і величині множника ослаблення $V_0 = -20$ дБ (рис. 5) дозволить на вході приймального пристрою мати сигнал, що перевищує його поріг чутливості $P_{\text{inp min}} = -140$ дБ/Вт (рис. 5).

Для цього спочатку визначимо, якою має бути вихідна потужність $P_{\text{out buoy}}$ підсилювача-ретранслятора на відстані $R_0 = 3 \cdot 10^4$ м від буя до приймального пристрою РЛС, встановленого на березі

$$P_{\text{inp A}} = \frac{P_{\text{out buoy}} G_{\text{buoy}} G_1 \lambda^2}{(4\pi R_0)^2} V_{\text{buoy}},$$

$$P_{\text{out buoy}} = \frac{P_{\text{inp A}} (4\pi R_0)^2}{G_{\text{buoy}} G_1 \lambda^2 V_{\text{buoy}}} = 3.95 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

Необхідний коефіцієнт посилення K_{rep} підсилювача-ретранслятора дорівнюватиме відношенню потужності на його виході P_{out} до потужності на його вході P_{inp}

$$K_{\text{rep}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{inp}}} = \frac{3.95 \cdot 10^{-4}}{1.23 \cdot 10^{-10}} = 3.2 \cdot 10^6.$$

Такий коефіцієнт посилення K_{rep} підсилювача-ретранслятора може бути реалізованим наступною функціональною схемою, наведеною на рис. 6, де 1 — антена для приймання сигналів від цілі; 2 — малошумівний вхідний підсилювач; 3 — основний підсилювач сигналів із необхідною амплітудно-частотною характеристикою; 4 — вихідний підсилювач потужності; 5 — антена для випромінювання посиленого сигналу від цілі.

Однією з основних вимог до підсилювача-ретранслятора, крім необхідного коефіцієнта посилення, є його стійкість (відсутність самозбудження). Це досягається спеціальною амплітудно-частотною характеристикою підсилювача 3, розрахунок якого базується на загальній теорії зворотного зв'язку [11].

Висновки

Розроблений метод побудови загоризонтної пасивної РЛС із можливістю визначення відстані до цілі та використання підсилювача-ретранслятора, встановленого за межами радіогоризонту на буї, дозволяє оптимістично дивитися на вирішення поставленого завдання.

1. У запропонованому методі для визначення відстані до цілі за межами радіогоризонту на буї встановлюється підсилювач-ретранслятор і створюється додаткова траса поширення радіохвиль від цілі до підсилювача-ретранслятора й далі до приймального пристрою РЛС, встановленого на березі, де визначається часова затримка сигналу Δt по відношенню до основного сигналу від цілі, кут α між напрямками на ціль і радіобуй.

Крім цього, визначається різниця ходу сигналу за основною і додатковою трасами $\Delta R = \Delta t \cdot c$.

Відстань від приймального пристрою до радіобуя відома.

2. Знаючи ΔR , кут α та відстань до радіобуя R_0 , відстань до цілі R_1 визначають за допомогою розробленого алгоритму. Через неможливість зараз провести експериментальні дослідження верифікацію запропонованого алгоритму проведено за допомогою математичного моделювання радіолокаційних трас поширення та зіставленні їхніх віддалених відстаней до цілі з розрахованими за допомогою розробленого алгоритму. Зіставлення дало задовільний результат.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Skolnik M.I., ed. *Radar handbook*. 2nd ed. Publisher. McGraw-Hill Professional, 1990. ISBN 0-07-057913-X.
2. Howland P.E. A Passive Metric Radar Using the Transmitters of Opportunity. *1994 Int. Conf. on Radar*: proc. Paris, France, May 1994. P. 251–256.
3. Nordwall B.D. Silent Sentry A New Type of Radar. *Aviat. Week Space Technol.* 1998. No 30. P. 70–71.
4. Kulpa K., and Czekala Z. Long-Range Performance Increase in Passive PCL Radar. *2003 3rd Multinational Conference on Passive and Covert Radar (PCR-2003)*: proc. University of Washington Applied Physics Laboratory, Seattle, Washington, 21–23 Oct. 2003.
5. Meyer M.G., and Sahr J.D. 2003. Passive coherent scatter radar interferometer implementation, observations, and analysis. *Radio Sci.* 2003. Vol. 39, Iss. 3. DOI: 10.1029/2003RS002985
6. Willis N. *Bistatic Radar*. 2nd ed. SciTech Publ., Institution of Engineering and Technology, 2004. 329 p. ISBN 1-891121-45-6.
7. Willis N.J., Griffiths H.D., and Davis M.E. *Advances in Bistatic Radar*. Institution of Engineering and Technology, 2007. 494 p. ISBN 978-1-891121-48-7.
8. Миценко І.М., Роєнко О.М. Про можливість оцінювання відстані до цілі методами пасивної радіолокації при далекому тропосферному поширенні радіохвиль. *Радіофізика та електроніка*. 2021. Т. 26, № 4. С. 22–27. DOI: 10.15407/rej2021.04.022
9. Миценко І.М., Роєнко О.М., 2023. Екологічно безпечна загоризонтна РЛС метрового діапазону для охорони територіальних вод. *Радіофізика і радіоастрономія*. Т. 28, № 4. С. 287–295. DOI: 10.15407/rpra28.04.287
10. Дзюба В.П., Єремка В.Д., Зиков А.Ф., Міліневський Л.П., Миценко І.М., Прокопенко О.І., Роєнко О.М., Розкішний Д.В., 2012. *Фізичні основи та радіоелектронні засоби контролю надводної обстановки та судноплавства*. Москва—Київ—Мінськ—Севастополь: Вебер, 2012. 196 с.
11. Huijsing J. *Operational Amplifiers-Theory and Design*. Springer, April, 2011.

Стаття надійшла 15.01.2025

REFERENCES

1. Skolnik, M.I. ed., 1990. *Radar handbook*. 2nd ed. Publisher. McGraw-Hill Professional. ISBN 0-07-057913-X.
2. Howland, P.E., 1994. A Passive Metric Radar Using the Transmitters of Opportunity. In: *1994 Int. Conf. on Radar*: proc. Paris, France, May 1994, pp. 251–256.
3. Nordwall, B.D., 1998. Silent Sentry A New Type of Radar. *Aviat. Week Space Technol.*, **30**, pp. 70–71.
4. Kulpa, K., and Czekala, Z., 2003. Long-Range Performance Increase in Passive PCL Radar. In: *2003 3rd Multinational Conference on Passive and Covert Radar (PCR-2003)*: proc. University of Washington Applied Physics Laboratory, Seattle, Washington, 21–23 Oct. 2003.
5. Meyer, M.G., and Sahr, J.D., 2003. Passive coherent scatter radar interferometer implementation, observations, and analysis. *Radio Sci.*, **39**(3). DOI: 10.1029/2003RS002985
6. Willis, N., 2004. *Bistatic Radar*. 2nd ed. SciTech Publishing, Institution of Engineering and Technology. 329 p. ISBN 1-891121-45-6.
7. Willis, N.J., Griffiths, H.D., and Davis, M.E., 2007. *Advances in Bistatic Radar*. Institution of Engineering and Technology. 494 p. ISBN 978-1-891121-48-7.

8. Mytsenko, I.M., Roenko, O.M., 2021. On the possibility of estimating the distance to the target by passive radar methods in the case of distant tropospheric propagation of radio waves. *Radiophys. Electron.*, **26**(4), pp. 22–27. DOI: 10.15407/rej2021.04.022
9. Mytsenko, I.M., Roenko, O.M., 2023. Environmentally safe over-the-horizon radar of the meter range for the protection of territorial waters. *Radio Phys. Radio Astron.*, **28**(4), pp. 287–295. DOI: 10.15407/rpra28.04.287
10. Dzyuba, V.P., Eremka, V.D., Zykov, A.F., Milinevskyi, L.P., Mytsenko, I.M., Prokopenko, O.I., Roenko, O.M., Rozkishnyi, D.V., 2012. *Physical foundations and radio-electronic means of control of the surface situation and navigation*. Moscow–Kyiv–Minsk–Sevastopol: Weber Publ.
11. Huijsing, J., 2011. *Operational Amplifiers-Theory and Design*. Springer.

Received 15.01.2025

I.M. Mytsenko, O.M. Roenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine.

DETERMINING THE DISTANCE TO THE TARGET IN PASSIVE RADAR OF SURFACE OBJECTS

Subject and Purpose. While outperforming active radar methods for range, stealth, and energy consumption, passive radar has a significant disadvantage: it cannot determine the target distance and coordinates when only one reference receiving point is available. We seek to develop a passive radar method and technical means for its implementation to establish the target distance over the sea surface with a single reference receiving point.

Methods and Methodology. The idea behind the proposed passive radar method for determining target distance is to use a floating radio-beacon buoy beyond the radio horizon. The buoy is equipped with a transmitter that poses no radiation hazard to coastal areas. A ground-based receiver is installed on the shore to catch both the direct signal from the buoy and the signal reflected from the waterborne target. The performance of the system is evaluated through numerical modelling and analysis.

Results. The mechanisms of radio wave propagation beyond the radio horizon have been thoroughly analyzed. Based on this analysis, a functional diagram of the proposed passive radar, which employs a surface radio buoy equipped with a transmitter and an amplifier-repeater, has been developed. In this scheme, an additional radio wave propagation path emerges from the target to the amplifier-repeater and then to the ground-based receiver on the shore. The time delay between the radio beacon signal and the main signal from the target has been determined, as well as the angle between the target and radio-beacon directions. The difference in signal path lengths along the main and additional paths has been established. For the practical implementation of the proposed scheme, the operation principle of passive radar has been supplemented with algorithms for determining the surface target distance. The operation of the devices has been described in detail.

Conclusion. A method has been developed to construct an over-the-horizon passive radar system that determines the target distance using, among others, an amplifier-repeater mounted on a radio beacon buoy beyond the radio horizon. The algorithm for finding the surface target distance has been validated through mathematical modeling of radar propagation paths.

Keywords: *passive radar, radio-beacon buoy, amplifier-repeater, target distance.*