

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.268>

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, м. Харків, 61085, Україна

E-mail: igor.mytsenko@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ ДО НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ З АНТЕНОЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ, ПРИ ПАСИВНІЙ РАДІОЛОКАЦІЇ

Предмет і мета роботи. Нещодавно авторами було запропоновано метод визначення відстані до цілі та її координат за наявності одного опорного приймального пункту при пасивній радіолокації над морською поверхнею. Разом із цим не було розглянуто випадок, коли ціль має РЛС з антеною, що обертається, наприклад, імпульсну РЛС кругового огляду. Мета досліджень полягає в розробці методу визначення відстані саме до таких надводних об'єктів при пасивній радіолокації.

Методи та методологія. Як і раніше, в основу запропонованого методу визначення відстані до цілі з антеною випромінювання, що обертається, покладено ідею використання надводного радіобуя, що дозволяє створити додаткову трасу поширення радіохвиль. Приймальний пристрій, розташований на березі, приймає сигнал від радіобуя з додаткової траси поширення та прямий сигнал від надводного об'єкту з основної траси. Обчислюється часова затримка приходу сигналів, а потім відстань до цілі згідно з розробленим алгоритмом. Проаналізовано та дано оцінку роботи системи.

Результати роботи. Запропонований раніше метод визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації над морською поверхнею, в якому використовується надводний радіобуй, оснащений передавачем і підсилювачем-ретранслятором, розвинуто до випадку наявності в цілі випромінювальної антени, що обертається. Як і раніше, додатковий шлях поширення радіохвиль виникає від цілі до підсилювача-ретранслятора, а потім до наземного приймача на березі. Але в цьому випадку на метод визначення часової затримки між сигналом радіомаяка та основним сигналом від цілі впливає рух антени цілі, що обертається. Наведено метод визначення часової затримки сигналів при поширенні вздовж основного та додаткового шляхів. Для практичної реалізації запропонований принцип роботи пасивного радара доповнено алгоритмом визначення дальності до надводної цілі.

Висновки. Розроблено метод побудови пасивної радіолокаційної системи, яка визначає дальність до цілі з антеною випромінювання, що обертається. Серед іншого, запропоновано використовувати підсилювач-ретранслятор, встановлений на радіобуї. Для реалізації розробленого методу запропоновано функціональну схему вимірювача дальності до надводних об'єктів.

Ключові слова: пасивна радіолокація, антена випромінювання, що обертається, радіобуй, підсилювач-ретранслятор.

Цитування: Миценко І.М., Роєнко О.М. Визначення відстані до надводних об'єктів з антеною випромінювання, що обертається, при пасивній радіолокації. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 4. С. 268–275. <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.268>

© 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>)

Вступ

Як відомо, пасивна радіолокація полягає в прийманні в тому числі власного випромінювання цілі, у нашому випадку — надводного об'єкту [1–7]. Насамперед це сигнали РЛС різного призначення з імпульсною модуляцією зондувального сигналу, встановлених на судах. У роботах [8, 9] описано метод і функціональну схему для його реалізації, де для визначення відстані до цілі при пасивній радіолокації надводних об'єктів використовується радіобуй, встановлений за межами радіогоризонту. На рис. 1 наведено спрощену функціональну схему такої пасивної РЛС. Береговий приймальний пункт А встановлено на березі. Він складається з антени 1, що обертається, з високим коефіцієнтом посилення та приймального пристрою 2. Активний ретранслятор 3 з приймальною 4 та передавальною 5 антенами встановлено на радіобуї В. Приймальна антена 4 має кругову діаграму направленості в горизонтальній площині та звужену у вертикальній. Основна ідея методу полягає в тому, що за допомогою активного ретранслятора, встановленого на радіобуї, створюється додаткова траса поширення радіохвиль від РЛС цілі до радіобуя R_2 . Далі сигнал від цілі посилюється активним ретранслятором і випромінюється вихідною антеною 5 у бік приймального пункту А, пройшовши відстань R_0 . Прямий сигнал від цілі Т проходить відстань R_1 і надходить безпосередньо на приймальний пункт А. У результаті, знайшовши різницю ходу ΔR (рис. 1, б)

$$\Delta R = (R_0 + R_2) - R_1 \quad (1)$$

і кут α між напрямками на цілі і радіобуй, можна визначити відстань R_1 , використовуючи співвідношення (1)

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

Рівень потужності сигналу P_{inptag} від РЛС цілі на вході приймача берегового приймального пункту, коли антену 1 наведено на цілі, а антену цілі наведено на приймальний пункт А (рис. 1, б), дорівнюватиме

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

де P_{rad} — потужність власного випромінювання цілі; G_1 — коефіцієнт посилення антени 1 берегового приймача; G_t — коефіцієнт посилення антени РЛС цілі; λ — довжина хвилі випромінювання; V_1 — величина множника ослаблення радіохвиль на трасі R_1 (цілі — береговий приймальний пункт).

Рівень потужності сигналу $P_{inpbuoy}$ від радіобуя В на вході приймача берегового приймального пункту, коли антену 1 і антену РЛС цілі наведено на радіобуй, буде дорівнювати (рис. 1, б)

$$P_{inpbuoy} = \frac{P_{inpb} k_a G_5 G_1 \lambda^2}{(4\pi R_0)^2} V_0, \quad (3)$$

де P_{inpb} — рівень потужності сигналу на вході підсилювача-ретранслятора; k_a — коефіцієнт посилення підсилювача-ретранслятора.

$$P_{inpb} = \frac{P_{rad} G_t G_4 \lambda^2}{(4\pi R_2)^2} V_2, \quad (4)$$

де G_4 і G_5 — коефіцієнти посилення вхідної та вихідної антен підсилювача-ретранслятора; R_2 — відстань між ціллю та буєм; V_2 — множник ослаблення радіохвиль на трасі цілі-радіобуй (R_2); V_0 — множник ослаблення радіохвиль на трасі радіобуй-приймач А. Підставивши співвідношення (4) у (3), отримаємо

$$\begin{aligned} P_{inptag} &= \frac{P_{rad} G_t G_4 \lambda^2 k_a G_5 G_1 \lambda^2}{(4\pi R_2)^2 (4\pi R_0)^2} V_2 V_0 = \\ &= \frac{P_{rad} G_t G_1 G_4 G_5 k_a \lambda^4}{(4\pi)^4 R_2^2 R_0^2} V_2 V_0. \end{aligned}$$

Однак різницю в часі Δt проходження сигналів випромінювання від цілі основною трасою «цілі — береговий приймальний пристрій» і додатковою «цілі — радіобуй — береговий приймальний пристрій» (рис. 1), можна визначити в тому випадку, коли сигнал випромінювання від цілі одночасно надходить на вхід берегового приймального пристрою за цими двома трасами поширення. Тоді визначаємо $\Delta R = \Delta t \cdot c$ і надалі, користуючись співвідношенням (2), знаходимо відстань до цілі. Це можливо, коли цілі випромінює сигнал всеспрямованої в горизонтальній площині антени або ширина діаграми направленості антени більше кута β (рис. 1, б). На прак-

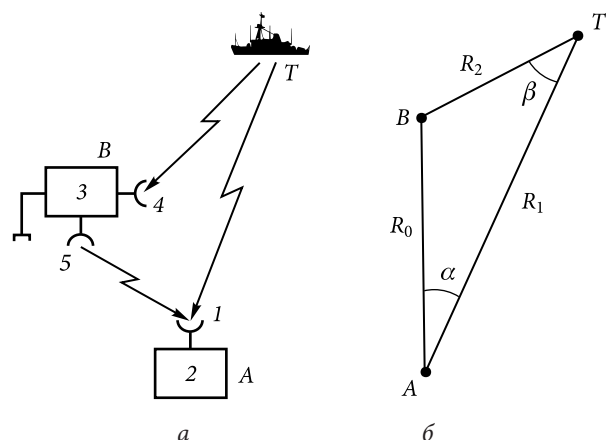


Рис. 1. Спрощена структурна схема пасивної РЛС із використанням радіобуя

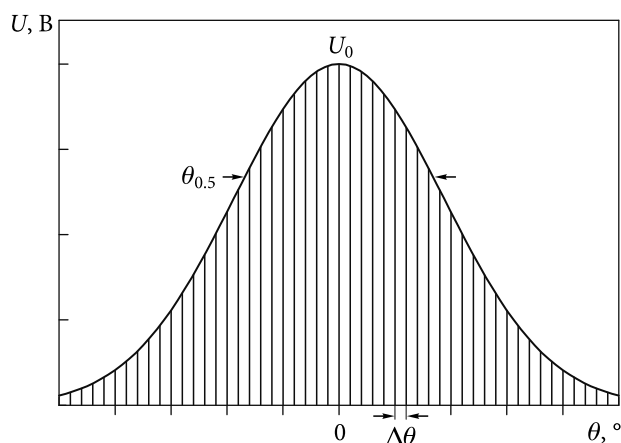


Рис. 2. Модуляція відеоімпульсів на виході берегового приймача через переміщення (обертання) діаграми направленості та випромінювальної антени цілі

тиці найчастіше РЛС, встановлені на надводних об'єктах-цілях, використовують антену випромінювання, що обертається, наприклад, імпульсні РЛС кругового огляду.

Анени таких РЛС мають вузьку діаграму направленості в горизонтальній площині ($\theta \approx 1...2^\circ$) і широкую у вертикальній ($\approx 20^\circ$). Таким чином, при обертанні антени випромінювання (звичайно швидкість обертання $120^\circ/\text{с}$) сигнали від цілі за основною та додатковою трасами поширення потрапляють на вхід приймального пристрою в різний час.

Із цієї причини визначити затримку в часі Δt за прийнятими сигналами неможливо.

Метою роботи є розробка методу та функціональної схеми для його реалізації, які дозволять визначити відстань до надводного об'єкта-цілі з

антеною випромінювання, що обертається, (наприклад, надводного об'єкта з імпульсною РЛС кругового огляду) при пасивній радіолокації.

1. Вплив обертання випромінювальної антени надводного об'єкта-цілі

Розглянемо, яким чином переміщення діаграми направленості випромінювальної антени надводного об'єкта-цілі в горизонтальній площині впливає на приймання сигналів береговим приймальним пунктом. Вплив діаграми направленості антени приймача берегового приймального пункту не враховуємо — передбачається наведення за максимумом сигналу надводного об'єкта-цілі. Очевидно, що прийняті сигнали додатково модулюються за амплітудою (рис. 2).

При апроксимації діаграми направленості антени цілі кривою Гауса ця залежність набуває вигляду

$$U_{\text{ant}} \approx U_{\text{ant0}} \exp \left[-2,8 \left(\frac{\theta}{\theta_{0.5}} \right)^2 \right],$$

де $\theta_{0.5}$ — ширина діаграми направленості за рівнем 0.5

Кутова відстань між сусідніми імпульсами

$$\Delta \theta = V_0 T_{\text{per}},$$

де V_0 — швидкість обертання антени (зазвичай $V_0 = 120^\circ/\text{с}$); T_{per} — період повторення імпульсів ($T_{\text{per}} = 1 / F_{\text{per}} = 1 \text{ мс}$ за частотою повторення імпульсів $F_{\text{per}} = 1000 \text{ Гц}$).

Тоді кількість імпульсів, що припадає на ширину діаграми направленості випромінювальної антени, дорівнює

$$n = \frac{\theta_{0.5}}{\Delta \theta} = \frac{\theta_{0.5}}{V_0 T_{\text{per}}}.$$

Якщо задано $\theta_{0.5} \approx 2^\circ$, $V_{0.5} \approx 120^\circ/\text{с}$, $T_{\text{per}} = 10^{-3} \text{ с}$, то $n \approx 17$ імпульсів.

Слід зазначити, що величина n відіграє істотну роль у досягненні необхідного співвідношення сигнал/шум і, отже, точності визначення тимчасової затримки Δt [1, 10].

Ці радіоімпульси випромінюються при обертанні антени як у бік приймального пункту А, так і в бік радіобуя, де посилюються підсилювачем-

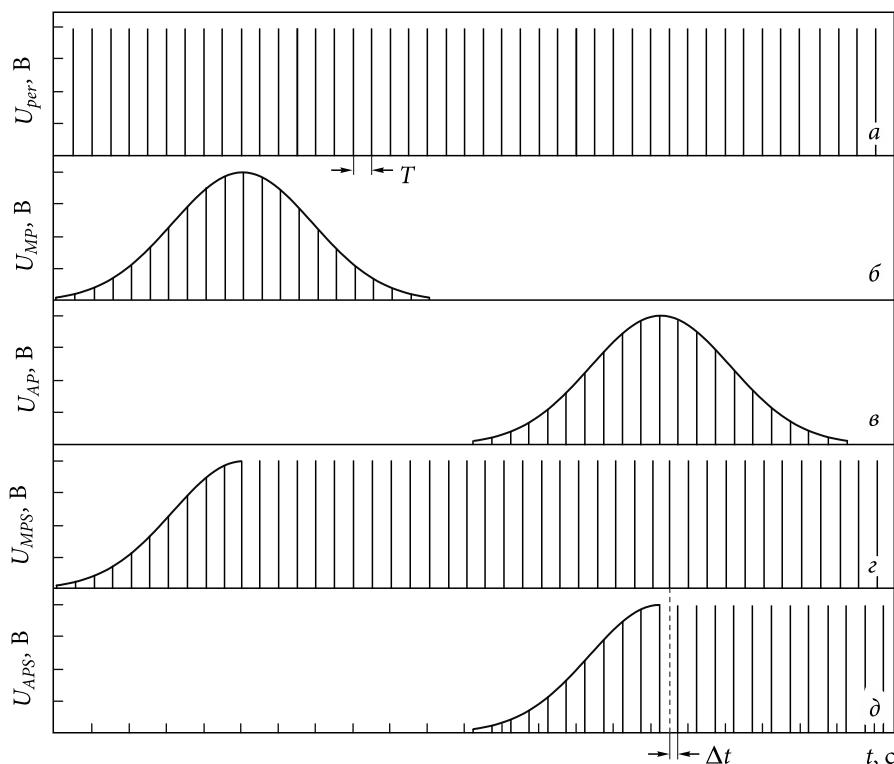


Рис. 3. Часові діаграми періодичних послідовностей радіоімпульсів, що випромінюються передавачем цілі, та відеоімпульсів на виході берегового приймального пристрою

ретранслятором і випромінюються в бік приймального пункту А, де і порівнюються з прямими сигналами від надводного об'єкта-цілі. Через обертання антени береговий приймач приймає їх у різний час, що дає можливість визначити Δt .

2. Метод обліку обертання випромінювальної антени надводного об'єкта-цілі

Для простоти подальшого викладу та розуміння позначимо трасу поширення радіохвиль «надводний об'єкт — приймальний пункт А» як основну, а трасу «надводний об'єкт — радіобуй — приймальний пункт А» як додаткову (рис. 1). Тоді імпульси, що пройшли основну та додаткову траси, можна визначити як основний і додатковий відповідно.

Суть запропонованого методу ось у чому. Передавач надводного об'єкта-цілі генерує послідовність радіоімпульсів U_{per} (рис. 3, а) з періодом повторення T_{per} тривалістю τ_{pulse} , які подаються на вхід антени, що обертається, та випромінюються в простір. У момент, коли антену РЛС на-

дводного об'єкта-цілі спрямовано на береговий приймальний пункт А, на виході приймального пристрою 2 (рис. 1, а) з'являться відеоімпульси, промодульовані по амплітуді U_{MP} (рис. 3, б), а антена продовжить обертальний рух. Коли антену РЛС цілі при подальшому кутовому переміщенні буде спрямовано на радіобуй В, прийняті ним імпульси буде посилено та ретрансльовано в напрямку берегового приймального пристрою А. Після цього на виході приймального пристрою 2 знову з'являться відеоімпульси, промодульовані амплітудою U_{AP} (рис. 3, в). Різниця в часі приймання послідовності відеоімпульсів за основною та додатковою трасами при обертанні антени РЛС цілі дорівнюватиме добутку швидкості обертання антени V_0 (≈ 120 рад/с) на величину кута β (рис. 1, б) між напрямками від цілі на береговий приймач і радіобуй. Часова затримка на ретрансляцію імпульсів радіобуєм незначна й майже постійна, відома апіорі та враховується при остаточній оцінці. У нашому випадку стоїть завдання визначити різницю в часі Δt між радіоімпульсами, що пройшли основну та додаткову траси.

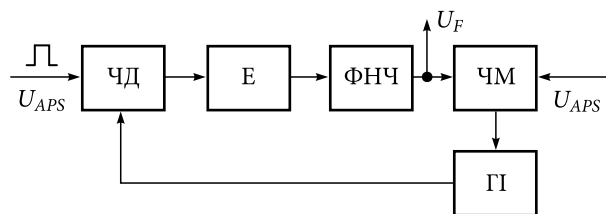


Рис. 4. Функціональна схема вимірювача дальності

Для цього звернемо увагу на послідовність радіоімпульсів, що генеруються передавачем надводного об'єкту-цілі, яка не залежить від обертання антени.

Як видно, та ж послідовність імпульсів при обертанні антени випромінюється в бік берегового приймача (основна траса) та радіобуя (додаткова траса). Очевидно, що час ходу радіоімпульсів, які пройшли основну та додаткову траси, відрізнятиметься на $\Delta t = \Delta R / c$.

3. Методика визначення тимчасової затримки Δt

Розглянемо, як можна визначити Δt . Для цього повернемося до рис. 3, б, де показано послідовність радіоімпульсів U_{MP} , яка являє собою послідовність U_{per} (рис. 3, а), промодульовану обертанням антени надводного об'єкту-цілі та прийняту береговим приймальним пристроєм А. У блоці реєстрації та обробки сигналів відбувається захоплення прийнятої послідовності основних імпульсів, визначаються період прямування T_{per} і їхня тривалість τ_{pulse} . За нинішнього рівня розвитку техніки це не є складним завданням [11]. Потім генерується аналогічна послідовність імпульсів U_{MPS} (рис. 3, з), але вже без модуляції антеною, що обертається, і синхронізується реально прийнятими радіоімпульсами (рис. 3, б). Довжина цієї згенерованої та засинхронізованої послідовності U_{MPS} перевищує час приходу радіоімпульсів, що пройшли додаткову трасу (рис. 3, з).

Аналогічна процедура виконується для послідовності додаткових імпульсів U_{AP} , у результаті чого отримуємо послідовність U_{APS} (рис. 3, д). Далі шляхом зіставлення отриманих послідовностей радіоімпульсів U_{MPS} і U_{APS} визначаємо $\Delta t = \Delta R / c$, як показано на рис. 3, д. Потім знаходимо $\Delta R = \Delta t \cdot c$, кут α і, використовуючи

вираз (2), визначаємо відстань до надводного об'єкту-цілі R_1 .

4. Функціональна схема вимірювача дальності

Якщо повернутися до рис. 1, можна помітити, що є певна схожість із випадком вимірювання дальності до надводного об'єкту-цілі активною РЛС. Відмінність у тому, що в цьому разі стоїть завдання прийняти власне випромінювання надводного об'єкту-цілі, а не відбитий від нього сигнал, випромінюваний передавачем активної РЛС. Тому для вирішення нашого завдання за основу можна взяти систему вимірювання дальності активної РЛС, призначену для вимірювання дальності до обраного надводного об'єкту-цілі. Принцип роботи далекоміра базується на вимірюванні зсуву між зондувальними імпульсами, що йдуть через інтервал часу T , та імпульсами, відбитими від надводного об'єкту-цілі. У нашому випадку, як вже зазначалося, необхідно визначити різницю в часі Δt між імпульсами, що пройшли основну та додаткову траси.

Функціональну схему вимірювача дальності можна показати в такому вигляді (рис. 4). Вона містить часовий дискримінатор (ЧД), екстраполятор (Е), фільтр нижніх частот (ФНЧ), часовий модулятор (ЧМ) і генератор імпульсів (ГІ).

У режимі вимірювання дальності основний імпульс U_{MPS} надходить до першого входу ЧМ, а додатковий імпульс U_{APS} надходить до першого входу ЧД. Для підвищення точності вимірювання в ГІ формуються слідкувальні імпульси, часове положення яких щодо основних імпульсів виявляється пропорційним дальності до надводного об'єкту-цілі. Два слідкувальні імпульси, що йдуть один за одним, надходять на другий вхід ЧД. У часовому дискримінаторі виробляється напруга, пропорційна неузгодженню тимчасового положення відображеного додаткового імпульсу щодо осі симетрії слідкувальних імпульсів:

$$u = k_D (t_R - t_I) = k_D \Delta t,$$

де Δt — неузгодженість за часом між додатковим і слідкувальними імпульсами; $k = 2\pi/\lambda$ — час затримки додаткового імпульсу щодо основного; r_n — час затримки слідкувальних імпульсів; R — вимірювана дальність; c — швидкість світла.

Якщо часове неузгодження Δt не дорівнює нулю, то в часовому дискримінаторі виробляють два імпульси, тривалість яких визначається

$$\tau_1 = \frac{\tau_{MPS}}{2} - \Delta t, \tau_2 = \frac{\tau_{MPS}}{2} + \Delta t.$$

На кожному періоді вимірювання дальності напруга з виходу часового дискримінатора фіксується екстраполятором і скидається до нуля перед приходом наступної пари імпульсів. Напруга з Е через ФНЧ подається на часовий модулятор, який основним імпульсом (U_{MPS}), затриманим на час, пропорційний сигналу з ФНЧ, запускає ГІ, який формує два слідкувальних імпульси. Таким чином утворюється замкнений контур, у якому неузгодженість зводиться до мінімального значення, що визначає помилку вимірювання дальності. Для підвищення точності роботи у ФНЧ далекоміра включають інтегратор, при цьому неузгодженість Δt при вимірюванні постійного значення дальності зводиться до нуля, а напруга на виході ФНЧ у режимі, що встановився, пропорційна вимірюваній дальності:

$$U_F = \frac{1}{k_{TM}} t_R = \frac{1}{k_{TM}} \frac{R}{c},$$

де k_{TM} — коефіцієнт передачі часового модулятора.

На закінчення слід зазначити, що розглянута система, як і аналогічні їй за призначенням, має кінцеву точність відстеження зовнішнього впливу. Ця точність залежить від багатьох чинників, перш за все від співвідношення сигнал/шум приймального пристрою А. Рівень шуму, своєю чергою, залежить від ширини смуги пропускання приймального тракту. Крутизна фронту та спаду імпульсу, що пройшов цей тракт, також залежить від цієї ширини. Крім того, ширина смуги пропускання є істотним фактором, що впливає на роздільну здатність по дальності. Відповідно до [12], щоб помилка вимірювання дальності була значно кращою, ніж роздільна здатність по даль-

ності, необхідно забезпечити співвідношення сигнал/шум значно більше одиниці ($\approx 10 \dots 20$ дБ). Ще одним фактором, що впливає на точність вимірювань дальності, є помилки при вимірюванні кутів приходу. Крім параметрів приймальної антени, на точність вимірювання кутів впливають як внутрішні методи обробки сигналу, так і зовнішні умови. Аномальні умови поширення, які часто виникають через зміни погодних умов, можуть впливати на вимірювання азимуту, викликаючи випадкову помилку вимірювання. Проте найчастіші джерела виникнення систематичних помилок визначаються внутрішніми чинниками та залежать від методу вимірювання кута приходу. Систематичні помилки вимірювання, на відміну від випадкових, можуть бути враховані або зменшені, якщо вдається визначити причини їхнього виникнення.

Висновки

1. Запропоновано та розроблено метод визначення відстані до надводних об'єктів, обладнаних імпульсною РЛС з антеною випромінювання, що обертається, наприклад, РЛС кругового огляду, при пасивній радіолокації. Відмінною особливістю методу є використання надводного радіобуя з активним підсилювачем-ретранслятором.

2. Для реалізації розробленого методу запропоновано функціональну схему вимірювача дальності до надводних об'єктів. Відмінність від далекоміра звичайної активної РЛС полягає у використанні часового зсуву між імпульсами з основної та додаткової трас поширення радіохвиль. Вказано, що на точність визначення різниці в часі Δt проходження радіосигналів від надводного об'єкта-цілі основною та додатковою трасами і, отже, відстані до цілі, впливають як зовнішні, так і внутрішні фактори. Перш за все необхідно забезпечити співвідношення сигнал/шум приймального пристрою значно більше одиниці ($\approx 10 \dots 20$ дБ).

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. 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

5. Willis N. *Bistatic Radar*. 2nd ed. SciTech Publ., Institution of Engineering and Technology, 2004. 329 p. ISBN 1-891121-45-6.
6. 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.
7. Беседін О.М., Зеленський О.О., Кулемін Г.П., Лукін В.В. *Обробка випадкових сигналів та процесів*. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 2005. 469 с.
8. Миценко І.М., Роєнко О.М. Екологічно безпечна загоризонтна РЛС метрового діапазону для охорони територіальних вод. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28, № 4. С. 287–295. DOI: 10.15407/rpra28.04.287
9. 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. DOI: 10.15407/rpra30.02.101
10. Van Trees H.L. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*. Copyright 2001 John Wiley & Sons, Inc., 2001. ISBNs: 0-471-09517-6 (Paperback); 0-471-22108-2 (Electronic).
11. *Spectrum and Signal Analyzers / Selection Guide*. Keysight Technologies, 2014. Published in USA, September 30, 2014, 5968-3413RURU. URL: https://www.testunlimited.com/pdf/an/keysight_N9010A_selection%20guide.pdf
12. Curry G.R. *Radar System Performance Modeling*. 2005. ISBN 978-1-58053-816-9, S.168.

Стаття надійшла 02.06.2025

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. 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
5. Willis, N., 2004. *Bistatic Radar*. 2nd ed. SciTech Publishing, Institution of Engineering and Technology. 329 p. ISBN 1-891121-45-6
6. 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.
7. Besedin, O.M., Zelenskiy, O.O., Kulemin, G.P., Lukin, V.V., 2005. *Processing of random signals and processes*. National aerospace university "KhAI", Kharkiv, 2005. 469 p.
8. 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
9. Mytsenko I.M., Roenko O.M., 2025. Determining the distance to the target during passive radar detection of surface objects. *Radio Phys. Radio Astron.*, **30**(2), pp. 101–108. DOI: 10.15407/rpra30.02.101
10. Van Trees, H.L., 2001. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*. Copyright 2001 John Wiley & Sons, Inc., ISBNs: 0-471-09517-6 (Paperback); 0-471-22108-2 (Electronic).
11. *Spectrum and Signal Analyzers / Selection Guide*. Keysight Technologies, 2014. Published in USA, September 30, 2014, 5968-3413RURU. Available from: https://www.testunlimited.com/pdf/an/keysight_N9010A_selection%20guide.pdf
12. Curry, G.R., 2005. *Radar System Performance Modeling*, ISBN 978-1-58053-816-9, S.168.

Received 02.06.2025

I.M. Mytsenko, O.M. Roenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine

12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

PASSIVE RADAR LOCATION OF A SURFACE TARGET CARRYING A ROTATING RADIATION ANTENNA

Subject and Purpose. The authors recently proposed a passive radar method for determining ranges and coordinates of surface targets using a single reference receiving point. The work is directed at further developing this method with a focus on scenarios where the surface target incorporates a radar with a rotating radiation antenna, such as a pulse omnidirectional radar.

Methods and Methodology. The previously proposed passive radar method for determining the distance to a target is extended to the case where a surface object can have a rotating radiation antenna. Still, the method is based on using a radio buoy, which creates a supplementary radio wave propagation path. The receiving device is installed on the shore and detects two signals. One is the radio buoy signal travelling the supplementary propagation path. The other is the target direct signal travelling the primary path. The time delay between the two signal arrivals is measured, and the distance to the target is calculated using a specially developed algorithm. The system operation is analyzed and evaluated.

Results. The previously proposed passive radar method for determining the target distance employs a radio buoy equipped with a transmitter and an amplifier-repeater. The method has been refined enough to range targets carrying rotating radiation antennas. As before, an additional radio wave propagation path from the target to the amplifier-repeater arises and is caught by the ground-based receiver on the shore. The task of determining the time delay between the radio beacon signal and the main signal from the target faces challenges associated with the movement of the target's rotating antenna. The challenges can be effectively managed through a technique that is presented in the paper and expertly addresses the time delay between signals traveling along the primary and supplementary paths, as detailed in the paper. For practical implementation, the proposed principle of passive radar operation is supported by a surface target ranging algorithm.

Conclusions. A method has been proposed for constructing a passive radar system that can measure the distance to a target carrying a rotating radiation antenna. Among other innovations, it was suggested to equip the radio buoy with an amplifier-repeater. To implement the method developed, a functional diagram of a rangefinder for surface objects was introduced.

Keywords: *passive radar, rotating radiation antenna, radio buoy, amplifier-repeater.*