

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.295>

УДК621.396.669

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

## ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНА ЗАГОРИЗОНТНА РЛС МЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ОХОРОНИ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ВОД

**Предмет і мета роботи.** Незважаючи на успіхи, досягнуті у сфері моніторингу прикордонних ділянок територіальних утворень і навколишнього середовища, проблема охорони територіальних вод і контролю економічної зони, як і раніше, актуальна для багатьох держав, що мають протяжну морську межу. Метою досліджень є удосконалення методу екологічно безпечного виявлення надводних об'єктів за межами радіогоризонту й розробка екологічно безпечної радіолокаційної системи (РЛС) метрового діапазону для охорони територіальних вод із використанням активного плавучого радіобуя.

**Методи і методологія.** Враховуючи екологічні вимоги до радіотехнічного обладнання та особливості загоризонтного поширення радіохвиль, запропоновано бістатичну РЛС для виявлення надводних об'єктів за межами радіогоризонту. Однією з особливостей системи є використання випромінювального радіобуя, розташованого на значній відстані від берегової межі. Для оцінки роботи системи використано методи аналізу та числового моделювання.

**Результати.** За проведеним детальним аналізом основних механізмів поширення радіохвиль за межами радіогоризонту та існуючих експериментальних даних розраховано необхідний енергопотенціал запропонованої бістатичної РЛС метрового діапазону. Для практичної реалізації цієї системи детально наведено алгоритми знаходження відстані до надводного об'єкта та швидкості його руху. Розроблено функціональні схеми приймального пристрою, що встановлюється на радіобуї, та приймального пристрою, що встановлюється на березі. Надано детальний опис роботи пристроїв.

**Висновки.** Запропоновано екологічно безпечну імпульсно-когерентну радіолокаційну систему, в якій передавальний пристрій встановлено на радіобуї за межами радіогоризонту. Істинну когерентність РЛС досягнуто за рахунок використання безперервного сигналу задавального генератора передавача, який випромінюється в період між зондувальними імпульсами і після прийому й обробки в приймальному пристрої слугує опорним сигналом, інтервал когерентності значно перевищує період повторення імпульсів. Використання відмінності в швидкості руху надводних об'єктів, які необхідно виявити, і вітрових хвиль, що створюють завади, дозволить здійснювати радіолокаційне виявлення надводних об'єктів на тлі відбиттів від морської поверхні.

**Ключові слова:** загоризонтна радіолокація, радіобуй, бістатична РЛС, фазована антенна решітка.

Цит у в а н н я: Миценко І.М., Роєнко О.М. Екологічно безпечна загоризонтна РЛС метрового діапазону для охорони територіальних вод. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 4. С. 295–303. <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.295>

Citation: Mytsenko, I.M., Roenko, A.N., 2023. Ecologically safe over the horizon meter wavelength radar for territorial waters guard. *Radio Phys. Radio Astron.*, **28**(4), pp. 295–303. <https://doi.org/10.15407/rpra28.04.295>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Вступ

У наш час проблема охорони територіальних вод і контролю економічної зони держав, морські межі яких примикають до місць проживання населення, туристичних зон відпочинку і тому подібного, стоїть досить гостро (особливо для країн Південно-Східної Азії). Це пов'язано з тим, що застосування необхідних для охорони загоризонтних РЛС великої потужності в цих районах неможливе через випромінювання та їхню екологічну небезпеку. Відсутність таких загоризонтних РЛС призводить до того, що в територіальних водах здійснюються акти порушення чинного законодавства, тобто незаконне перевезення вантажів, контрабандний лов риби, відбір нафти та газу і так далі, що завдає великого збитку економіці цих країн. Тому актуальними є створення методу екологічно безпечного виявлення надводних об'єктів за межами радіогоризонту та розробка радіотехнічних систем для його реалізації.

Метою роботи є розробка екологічно безпечної РЛС метрового діапазону для охорони територіальних вод із використанням активного плавучого радіобуя.

### 1. Метод екологічно безпечного виявлення надводних об'єктів

Метод екологічно безпечного виявлення надводних об'єктів за межами радіогоризонту розглянуто авторами раніше й детально викладено в роботах [1, 2]. Суть методу полягає в тому, що екологічно небезпечний випромінювальний пристрій, передавач, виноситься за межі радіогоризонту і встановлюється на плавучому радіобуї. Для радіобуя обирається місце з невеликими глибинами, де є можливість установки його на якорі. Використання плавучих радіомаяків у радіонавігації, радіозв'язку, радіолокації відомо і наведено, наприклад, у роботі [3]. У [1, 2] запропоновано бістатичну РЛС трисантиметрового (3-см) діапазону з використанням активного плавучого радіобуя, встановленого на якорі за межами радіогоризонту. Приймальну систему з антенними блоками встановлено на березі, й вона не становить екологічної небезпеки для довкілля і населення. На рис. 1 наведено спрощену функціональну схему бістатичної РЛС із роботи [1].

На рис. 1 наведено наступні позначення: 1 — гостроспрямована антенна система, що обертається, для прийому відбитого сигналу; 2 — приймач відбитого сигналу; 3 — антена для прийому прямого сигналу; 4 — приймач прямого сигналу; 5 — блок обробки; 6 — передавальний пристрій 3-см діапазону, встановлений на буї 8; 7 — антена на щоглі буя, всеспрямована в горизонтальній площині (діаграма направленості передавальної антени звужена у вертикальній площині); 8 — радіобуй, встановлений на якорі за межами радіогоризонту.

Цей метод покладено в основу пропонованої в роботі екологічно безпечної загоризонтної РЛС метрового діапазону для охорони територіальних вод.

У роботах [1, 2] при створенні бістатичної РЛС із використанням радіобуя використовувався 3-см діапазон радіохвиль і на буї передбачалося встановлювати магнетронний передавач і всеспрямовану антену з автономним блоком живлення (акумулятором). Це технічне рішення досить складне й дороге в реалізації. Для живлення магнетрона використовується високовольтний блок живлення, і в морських умовах його експлуатація складна. Крім того, поширення радіохвиль 3-см діапазону залежить від стану приводного шару тропосфери, метеоумов, у тому числі за значним послабленням в опадах.

У роботах [4, 5] для загоризонтного виявлення надводних об'єктів використовувалися декаметрові РЛС, які хоча і є всепогодними, але їхня дальність дії залежить від іоносферних завад і часу доби. Окрім цього, антенні системи цих РЛС мають великі габарити та займають велику площу, що не дозволяє встановлювати декаметровий передавач на радіобуї й отримати необхідний енергопотенціал.

Із цих причин у пропонованій РЛС використано метровий діапазон радіохвиль ( $\lambda = 2$  м,  $f = 150$  МГц), поширення яких відбувається в тропосфері й не пов'язане з іоносферою, не схильне до сильного впливу метеоумов. Цей діапазон радіохвиль, як і декаметровий, дозволяє використовувати не лише «резонансні» явища при відбитті від надводних об'єктів, але й виявляти малопомітні цілі, виготовлені за технологією Stealth. Фазовані антенні решітки (ФАР), які передбачається використати в такій РЛС для при-

йому відбитих сигналів, мають істотно менші розміри та габарити, що дозволяє встановлювати їх на невеликих берегових ділянках місцевості. Крім того, в цьому діапазоні частот можна створити передавач необхідної потужності з габаритами, що дозволяють встановити його на радіобуї. Як антена на радіобуї застосовується антена, що випромінює електромагнітну хвилю з вертикальною поляризацією.

## 2. Визначення необхідного енергетичного потенціалу

Для визначення необхідного енергетичного потенціалу каналів прямого й відбитого сигналів пропонованої РЛС необхідно знати значення множника послаблення  $V_0$  на трасі прямого сигналу між передавачем і приймачем,  $V_1$  на трасі відбитого сигналу між ціллю й приймачем,  $V_2$  на трасі між ціллю й передавачем. Ці значення множників послаблення можна визначити, користуючись дистанційною залежністю  $V(R)$  для метрового діапазону радіохвиль ( $\lambda = 2$  м), зображеною на рис. 2.

Знаючи дистанційну залежність (рис. 2, крива 1) [1, 6], визначимо необхідний енергетичний потенціал  $C$  бістатичної РЛС із використанням радіобуя (рис. 1) для конкретної дальності дії  $R_{\text{пред}}$  і ефективної площі розсіяння цілі  $\sigma$ . Для охорони територіальних вод і прибережної частини економічної зони дальність дії РЛС має бути не менше ніж 100 км, а ефективна площа розсіяння цілей змінюється від 10 до 1000 м<sup>2</sup>. Для розрахунків візьмемо значення  $\sigma = 10$  м<sup>2</sup>, 100 і 1000 м<sup>2</sup>. Вважаємо, що плавучий радіомаяк встановлено на якорі на відстані  $R_0 = 70$  км (див. рис. 1, а).

Сигнал радіобуя, прийнятий береговим приймальним пристроєм (рис. 1), дорівнює

$$P_0 = \frac{P_B G_0 G_B \lambda^2}{(4\pi R_0)^2} V_0,$$

де  $P_B$  — потужність, випромінювана радіобуєм;  $G_0$  — коефіцієнт посилення приймальної антени 4 прямого сигналу (рис. 1, б);  $R_0$  — відстань між буєм і приймальним пристроєм;  $V_0$  — множник послаблення радіохвиль на трасі між радіобуєм і приймальним пристроєм (рис. 2);  $G_B$  — коефіцієнт посилення антени радіобуя.

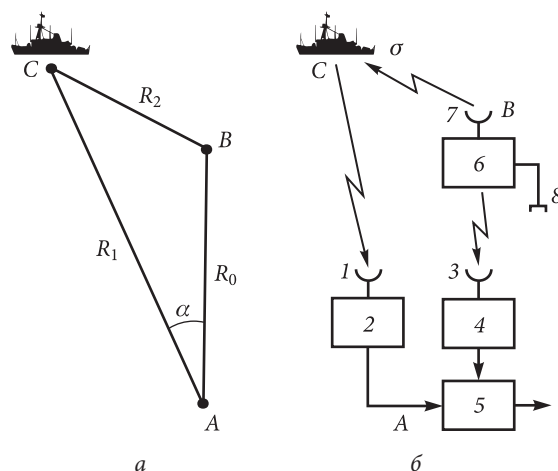


Рис. 1. Бістатична РЛС з використанням радіобуя

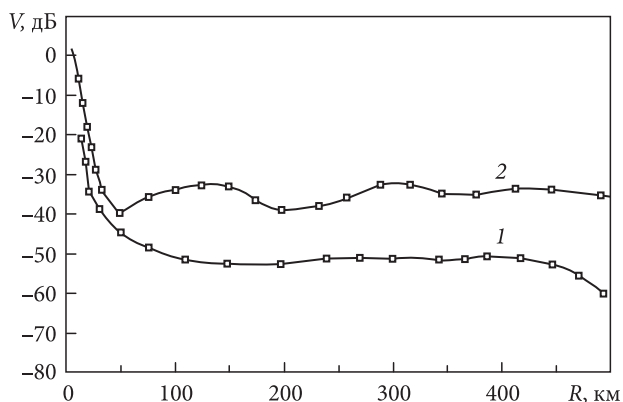


Рис. 2. Дистанційні залежності  $V(R)$

Випромінюваний у напрямку надводний об'єкт (ціль) сигнал радіобуя розсіюється ним (відбивається від нього) і приймається основною високопотенційною антеною 1 (ФАР) (рис. 1). Відбитий сигнал на вході приймача 2, коли антену 1 спрямовано на надводний об'єкт (ціль), буде дорівнювати [1]

$$P_{\text{отр}} = \frac{P_B G_0 G_1 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} V_1 V_2, \quad (1)$$

де  $G_1$  — коефіцієнт посилення основної антени 1;  $R_1$  — відстань між надводним об'єктом (ціллю) та приймальним центром;  $R_2$  — відстань між надводним об'єктом (ціллю) та радіобуєм;  $\sigma$  — ефективна площа розсіяння (ЕПР) надводного об'єкта (цілі);  $V_1$  і  $V_2$  — значення множника послаблення радіохвиль на відстанях  $R_1$  і  $R_2$  відповідно.

ЕПР надводного об'єкта (цілі)  $\sigma$  залежатиме ще й від кута  $\alpha$  (рис. 1, а) між напрямками на

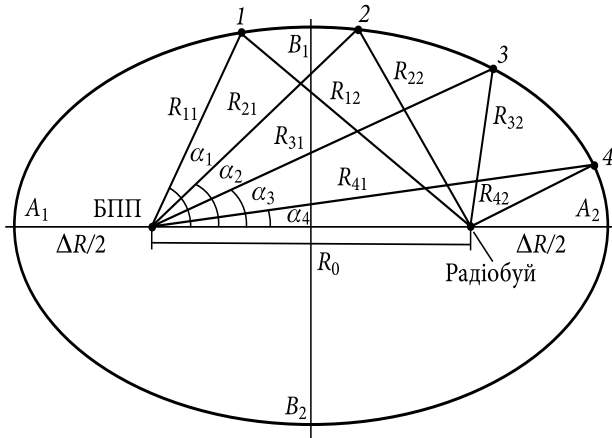


Рис. 3. Бістатичний еліпс дальностей при  $\Delta R = \text{const}$  і змінному  $\alpha$

радіобуй і надводний об'єкт. Якщо всі ракурси цілі рівномірні, то середнє значення ЕПР для однопозиційної та бістатичної РЛС однакові. Кут  $\alpha$  визначається за допомогою вузькоспрямованої ФАР по максимуму відбитого сигналу.

Таким чином, якщо врахувати рівень власних шумів  $P_{\text{ш}}$  як граничну чутливість приймального пристрою відбитого сигналу 2, то, використовуючи вираз (1), можна отримати граничні значення добутку  $R_1$  і  $R_2$ :

$$R_1 R_2 = \sqrt{\frac{P_B G_0 G_1 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}}} V_1 V_2. \quad (2)$$

Відповідно до виразу (2), енергопотенціал запропонованої РЛС буде дорівнювати

$$C = \frac{P_B G_0 G_1 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}}.$$

Величина  $C$  залежить тільки від параметрів апаратури й не залежить від умов поширення радіохвиль  $V_1$ ,  $V_2$  і параметрів цілі  $\sigma$ . У літературі зустрічаються також інші визначення енергопотенціалу, але тут для зручності обрано саме це. Вираз (2) не дозволяє визначити відстань до надводного об'єкта (дальність до цілі), оскільки в ньому задіяно і другу відстань  $R_2$  від маяка до цілі.

Відстань  $R_1$  до надводного об'єкта (рис. 1) можна визначити з трикутника  $ABC$ , де відомо  $R_0 = \text{const}$ , кут  $\alpha$  і сумарну відстань  $R_{\Sigma} = R_1 + R_2$ . Цю сумарну відстань  $R_{\Sigma}$  проходить сигнал від радіобуя до цілі та, відбившись

від неї, до приймального пристрою 2 [1]

$$R_1 = \frac{R_{\Sigma}^2 - R_0^2}{2(R_{\Sigma} - R_0 \cos \alpha)}. \quad (3)$$

Для практичної реалізації запропонованої РЛС зручніше визначати  $\Delta R = R_{\Sigma} - R_0$  і перетворити вираз (3) до вигляду

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

Тоді різниця в часі  $\Delta t$  приходу прямого й відбитого сигналів залежить від  $\Delta R$  і дорівнює  $\Delta t = \Delta R / c$ , де  $c$  — швидкість світла, і може бути визначена різними методами залежно від виду модуляції сигналу, що випромінюється радіобуєм, а  $\Delta R = \Delta t \cdot c$ .

Найбільша дальність, або  $R_{1\text{max}}$ , відповідно до виразу (4), спостерігатиметься при  $\alpha = 0$

$$R_{1\text{max}} = \frac{\Delta R^2 + 2\Delta R R_0}{2\Delta R} = \frac{\Delta R}{2} + R_0.$$

Для пояснення отриманого результату звернемося до рис. 3, на якому показано еліпс, сформований множиною точок, що зображують відстань  $R_1$  при  $\Delta R = \text{const}$  і зміні  $\alpha$  від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

В одному з фокусів еліпса встановлено береговий приймальний пристрій (БПП), а в іншому — передавальний пристрій на радіобуї на відстані  $R_0$ . Як відомо [7], сума фокальних радіусів еліпса, а в нашому випадку  $R_{\Sigma} = R_1 + R_2$ , при будь-яких кутах  $\alpha$  дорівнює довжині великої осі  $A_1 A_2$ , тобто  $A_1 A_2 = R_{\Sigma} = R_0 + \Delta R$ . Нас цікавить максимальна дальність  $R_{1\text{max}} = R_0 + \Delta R / 2 = 100$  км (див. рис. 3). Базову відстань  $R_0$  обираємо такою, що дорівнює 70 км. Тоді  $\Delta R / 2 = 30$  км, де  $\Delta R$ , відповідно, дорівнюватиме 60 км. Таким чином, при  $\alpha = 0$  сигнал від передавача, встановленого на радіобуї, проходить відстань  $\Delta R / 2 = 30$  км до цілі (точка  $A_2$ ), потім, відбившись від неї, проходить відстань  $R_0 + \Delta R / 2 = 100$  км до приймального пристрою ( $R_{\Sigma} = R_0 + \Delta R = 130$  км), а  $R_{1\text{max}} = R_0 + \Delta R / 2 = 100$  км,  $R_2 = \Delta R / 2 = 30$  км. При цьому слід мати на увазі, що при поширенні радіосигналу передавача й сигналу, відбитого від цілі, на відстанях  $R_1$  і  $R_2$  можуть працювати різні механізми поширення. На відстані  $R_1 = 100$  км сигнал поширюється за рахунок далекого тропосферного розсіяння і величину його

послаблення можна прийняти такою, що дорівнює  $V_1 \approx -50$  дБ (див рис. 2, крива 1), а на відстані  $R_2 = 30$  км сигнал поширюється поверхневою хвилею за рахунок дифракції та його послаблення складає  $V_2 \approx -20$  дБ [8]. Тепер, користуючись виразом (2), можна визначити необхідний енергетичний потенціал при  $\sigma = 10, 100$  і  $1000 \text{ м}^2$ ,  $\alpha = 0$ :

$$C = \frac{P_B G_0 G_1 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}} = \frac{R_1^2 R_2^2}{\sigma V_1 V_2} = \frac{(R_0 + \Delta R/2)^2 \Delta R^2}{4\sigma V_1 V_2}. \quad (5)$$

Результати розрахунку наведено в таблиці.

Розглянемо можливість реалізації необхідного енергетичного потенціалу функціональними вузлами з реально існуючими параметрами.

У запропонованій РЛС використовується імпульсна модуляція. Імпульсна потужність передавача, встановленого на радіобуї,  $P_{B \text{ імпл}} = 10$  кВт (шпаруватість  $Q = 1000$ , тривалість імпульсу  $\tau_{\text{імпл}} = 1$  мкс). Чутливість приймального обладнання  $P_{\text{ш}} = 10^{-14}$  Вт при смузі пропускання  $10^6$  Гц. Коефіцієнт підсилення антени передавача, встановленої на радіобуї,  $G_0 = 10$  дБ; коефіцієнт підсилення приймальної ФАР, встановленої на березі,  $G_1 = 50$  дБ. Користуючись виразом (5), визначимо отримуваний енергетичний потенціал

$$C = \frac{P_{B \text{ імпл}} G_0 G_1 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{ш}}} \approx 210 \text{ дБ}. \quad (6)$$

Як видно з зіставлення результатів розрахунків необхідного енергетичного потенціалу (таблиця) і такого, що реально реалізовується (6), отриманий енергетичний потенціал без обробки вихідного сигналу та придушення власних шумів приймального пристрою істотно менший. При розрахунках не враховувалося те, що пропонується РЛС є істинно когерентною системою й на її виході використовується синхронне детектування. Як відомо, синхронні детектори здатні витягати слабкі сигнали, що знаходяться істотно нижче рівня власних шумів приймача. Високі частотна стабільність і співвідношення сигнал/шум опорного сигналу й подальша фільтрація дозволяють збільшити чутливість приймального пристрою орієнтовно на  $\approx 20$  дБ і отримати енергетичний потенціал  $\approx 230$  дБ.

Таким чином, на відстані  $R_1 = 100$  км є можливість виявляти надводні об'єкти з  $\sigma = 1000 \text{ м}^2$ , а

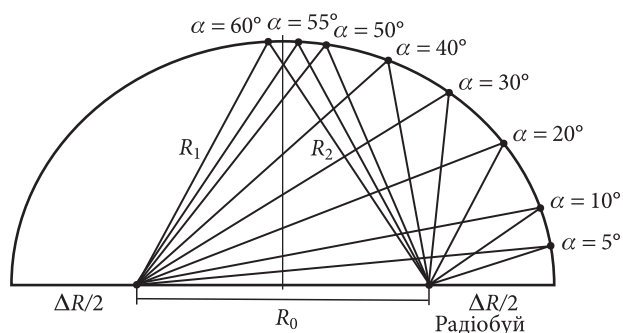


Рис. 4. Бістатичний еліпс дальностей при  $R_0 = 70$  км і  $\Delta R/2 = 30$  км

надводні об'єкти з меншими ЕПР виявлятимуться на менших відстанях. Визначимо, на яких відстанях можливе виявлення надводних об'єктів із  $\sigma = 10$  і  $100 \text{ м}^2$  при енергетичному потенціалі РЛС 210 дБ.

Спочатку, користуючись формулою (4) і підставивши значення  $R_0 = 70$  км і  $\Delta R = 60$  км, визначимо відстані  $R_1$  при різних кутах  $\alpha = 10, 20, 30, 40, 50$  і  $60^\circ$ . Обмежимося значенням кута  $\alpha = 60^\circ$ , оскільки ФАР дозволяє визначати азимут цілі в діапазоні кутів  $\alpha = \pm 60^\circ$ . На рис. 4 показано частину бістатичного еліпса дальності при  $R_0 = 70$  км і  $\Delta R = 60$  км.

Як видно з рис. 4, сумарна дальність  $R_\Sigma = R_1 + R_2$  для всіх кутів  $\alpha$  однакова й дорівнює 130 км. Проте умови поширення на радіолокаційних трасах  $R_1 + R_2$  при різних кутах  $\alpha$  відрізняються: при малих кутах  $\alpha = 5, 10, 20, 30^\circ$  відстань  $R_2$  від передавача до цілі лежить в межах 30...45 км, де переважає дифракційний механізм поширення радіохвиль, а на відстанях  $R_1$  (85...100 км) переважає механізм далекого тропосферного поширення (ДТП) радіохвиль. При кутах  $\alpha$ , більших  $30^\circ$ , переважаючим механізмом на трасах поширення  $R_1 + R_2$  стає ДТП.

Таким чином, фізичні процеси в приводному шарі тропосфери на радіолокаційній трасі досить складні й не дозволяють простим шляхом визна-

#### Енергетичний потенціал при різних значеннях ЕПР об'єктів

$\alpha = 0, R_1 = 100 \text{ км}, V_1 = -50 \text{ дБ}, V_2 = -20 \text{ дБ}$	
ЕПР, $\text{м}^2$	Необхідний енергетичний потенціал С, дБ
10	249.5
100	239.5
1000	229.5

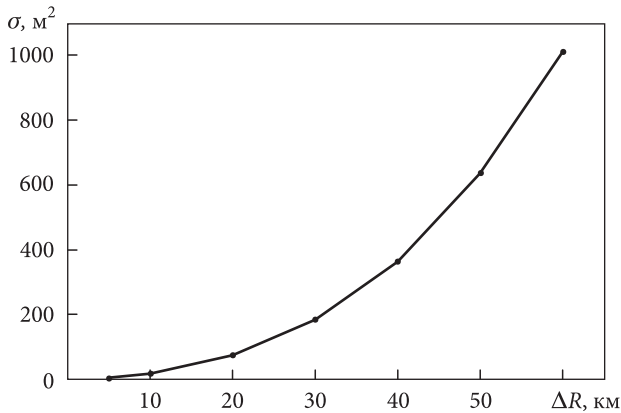


Рис. 5. Залежність  $\sigma = f(\Delta R)$  при  $\alpha = 0$ ,  $C = 229.5$  дБ

чити дальності виявлення надводних об'єктів із різними ЕПР при заданому енергопотенціалі РЛС. Skorистаємося виразом (5) і визначимо залежність  $\sigma = f(\Delta R)$  при  $C = \text{const}$  і  $\alpha = 0$ :

$$\sigma = \frac{\left(R_0 + \frac{\Delta R}{2}\right)^2 \Delta R^2}{4CV_1V_2}. \quad (7)$$

При цьому  $V_1$  і  $V_2$  залишимо без змін,  $V_1 \approx -50$  дБ,  $V_2 \approx -20$  дБ, при різних  $\Delta R = 5, 10, 20, 30, 40, 50$  і  $60$  км. Залежність  $\sigma = f(\Delta R)$  при  $C = 229.5$  дБ і  $\alpha = 0$  виходить за допомогою співвідношення (7). Її наведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, виявлення надводних об'єктів з малими ЕПР можливе на невеликих відстанях від радіобуя. Наприклад, надводний об'єкт з  $\sigma = 3 \dots 14$  м<sup>2</sup> може бути виявлено на відстанях від радіобуя  $R_2 = \Delta R = 2.5 \dots 5.0$  км і відстанях від приймального пристрою (дальностях)  $R_1 = R_0 + \Delta R / 2 = 72.5 \dots 75.0$  км. Надводні об'єкти з  $\sigma = 100$  м<sup>2</sup> можуть бути виявлені на відстанях від радіобуя  $R_2 = \Delta R / 2 = 12.5$  км і відстанях від приймального пристрою (дальностях)  $R_1 = 82.5$  км. При цьому слід узяти до уваги, що на невеликих відстанях ціль може потрапляти в зону прямої видимості й множник послаблення  $V_2 \approx 0$  дБ (без урахування інтерференції прямої і відбитої хвиль від радіобуя) або бути істотно менше  $-20$  дБ (як прийнято в [8]) в дифракційній зоні, тобто умови виявлення надводних об'єктів на малих відстанях ( $\leq 10$  км) на практиці можуть бути кращі й дальності їхнього виявлення значніші.

Одним із параметрів радіолокаційних систем є мінімальна дальність виявлення. В однопозиційних імпульсних РЛС мінімальну дальність пов'язано з тривалістю зондуючого імпульсу  $\tau_{\text{імп}}$ . Во-

на дорівнює  $R_{\text{мін}} = (\tau_{\text{імп}}/2)c$ . У нашому випадку мінімальну відстань між радіобуєм і ціллю  $R_2$ , на якій можливе виявлення надводного об'єкта, не пов'язано з тривалістю імпульсу, оскільки прийом сигналу здійснюється на відстані  $R_0 + \Delta R$ , а мінімальну дальність до надводного об'єкта з боку приймального пристрою також буде пов'язано з тривалістю імпульсу, і вона дорівнюватиме  $R_{\text{мін}} = \tau_{\text{імп}} \cdot c$ . При  $\tau_{\text{імп}} = 1$  мкс  $R_{\text{мін}} = 300$  м.

Запропонована бістатична РЛС є когерентно-імпульсною: імпульсна модуляція з високою шпаруватістю потрібна для отримання великої імпульсної потужності при малій середній, а когерентність дає можливість за доплерівським зсувом частоти визначати швидкість руху надводного об'єкта. Крім того, відмінність швидкостей руху надводного об'єкта й вітрового хвилювання дозволяє при обробці зменшити вплив відбиттів від морської поверхні.

В когерентно-імпульсних РЛС у паузі між зондувальними імпульсами опорний сигнал утворюється в задавальному генераторі, працюючому в безперервному режимі, або потрібна фазова синхронізація коливань імпульсного генератора з коливаннями спеціального когерентного генератора. У першому випадку такі РЛС називають істинно когерентними, у другому — псевдокогерентними. Запропонована РЛС є істинно когерентною. Отримати істинну когерентність дозволяє запропонований метод і спеціально розроблені функціональні схеми передавального пристрою (радіобуй) і приймального, встановленого на березі.

### 3. Функціональні схеми передавального й приймального пристроїв

На рис. 6 і 7 показано функціональні схеми передавального й приймального пристроїв. Розглянемо функціональну схему передавального пристрою (радіобуй), яка працює наступним чином (рис. 6). Основою передавального пристрою є високостабільний задавальний генератор з частотою  $150$  МГц і довготривалою стабільністю частоти  $\Delta f = 10^{-6}$ , який працює безперервно й має два розв'язані між собою виходи. Середня вихідна потужність генератора  $P_{\text{зг}} = 10$  Вт, а імпульсна  $10$  кВт.

Вихідний сигнал з одного з виходів задавального генератора надходить на вхід імпульсного підсилювача потужності, де він посилюється до імпульсної потужності  $P_{\text{імп}} = 10$  кВт. Підсилювач потужності працює тоді, коли на нього подається запускний імпульс від модулятора з тривалістю  $\tau_{\text{імп}} = 1$  мкс. У період між зондувальними імпульсами підсилювач потужності вимкнений і не працює. Вихід підсилювача потужності підключено до одного із входів антенного перемикача, на інший вхід якого надходить вихідний сигнал задавального генератора. Перемикання антенного перемикача виконується за допомогою синхронізатора. У момент приходу синхроімпульсу антенний перемикач підключає вихідний сигнал підсилювача потужності до антени й відбувається випромінювання зондувального радіоімпульсу. Після закінчення дії синхронізатора антенний перемикач відключає антену від виходу підсилювача потужності й підключає її до виходу безперервно діючого задавального генератора, і відбувається випромінювання радіосигналу. Таким чином, радіомаяк випромінює послідовність зондувальних радіоімпульсів і опорний безперервний сигнал задавального генератора, який приймається приймачем прямого сигналу й дає можливість створити істинну когерентність у запропонованій РЛС.

Розглянемо функціональну схему приймального пристрою, встановленого на березі (рис. 7), який складається з приймача прямого (опорного) сигналу й приймача відбитого сигналу. Основним елементом приймача відбитого сигналу є ФАР, яка повинна мати великий коефіцієнт посилення й спрямованість. Антену з огляду на великі габарити необхідно створювати у вигляді фазованої решітки, яка складається з багатьох антенних елементів або груп елементів і пристроїв, що формують діаграму направленості. Для форму-

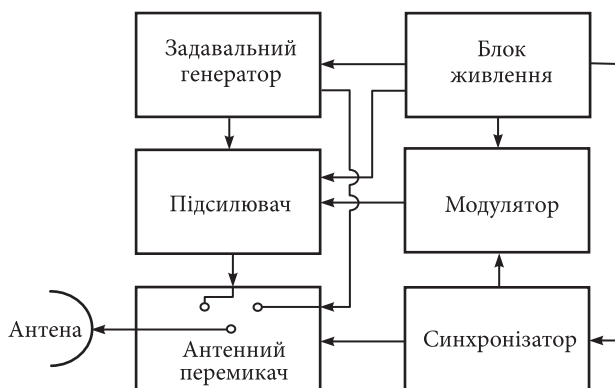


Рис. 6. Функціональна схема передавального пристрою, що встановлюється на радіобуї

вання діаграми направленості в азимутальній площині з урахуванням амплітудного розподілу та зниження бічних пелюсток при довжині хвилі радіолокатора  $\lambda = 2$  м розкриття антени може досягати більше 1000 м. У вертикальній площині потрібно декілька ярусів вібраторів на кожній щоглі, що призводить до збільшення висоти щогл [8]. З метою зменшення габаритів ФАР доцільно використати останні досягнення при проектуванні та створенні таких антен, наприклад, фрактальні структури.

Антену каналу прямого сигналу істотно простіша та є хвильовим каналом, коефіцієнт посилення якого достатній для стійкого прийому безперервного сигналу задавального генератора, що випромінюється радіобуєм ( $G_2 \approx 20$  дБ). Вона ж приймає й зондувальний радіоімпульс, який після амплітудного детектування надходить у блок обробки для визначення дальності до цілі. Далі відбитий і прямий (опорний) сигнали з виходів відповідних антен надходять на входи приймачів, де вони посилюються малошумівними підсилювачами МШП-1 і МШП-2 і подаються на змішувачі ЗМ-1 і ЗМ-2, які працюють від одного гетеродина, що дозволяє не порушувати ко-

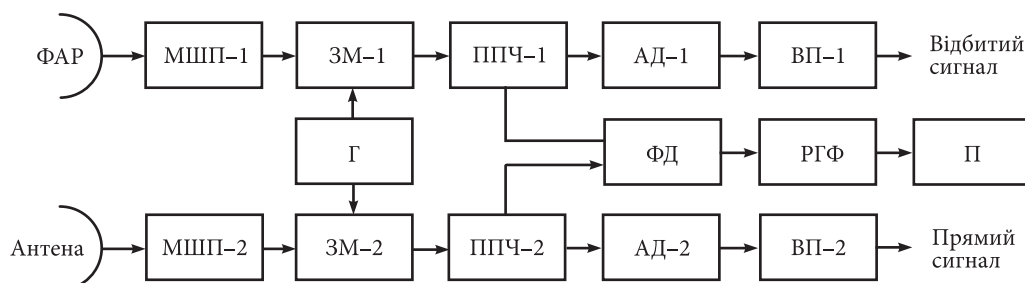


Рис. 7. Функціональна схема приймального пристрою, що встановлюється на березі

герентність між сигналами проміжної частоти. Підсилювачі проміжної частоти ППЧ-1 і ППЧ-2 формують необхідну смугу пропускання й посилюють прийнятий і перетворений сигнали до величини, потрібної блоку обробки. Підсилювачі проміжної частоти ( $f_{\text{пч}} \approx 30$  МГц) мають два виходи: амплітудний і фазовий. Амплітудний вихід підключено до працюючої в лінійному режимі частини ППЧ, а фазовий вихід до кінцевої частини ППЧ, що працює в режимі посилення–обмеження. Далі сигнали з амплітудного виходу ППЧ подаються на амплітудні детектори АД-1 і АД-2, детектуються й посилюються відеопідсилювачами ВП-1 і ВП-2 для подальшої обробки та визначення часу затримки відбитого сигналу і дальності до надводного об'єкта. Сигнали з фазових виходів, посилені та обмежені в підсилювачах проміжної частоти ППЧ-1 і ППЧ-2, подаються на фазовий детектор ФД, де опорним коливанням є сигнал з виходу приймача прямого (опорного) сигналу. На детекторі відбувається порівняння відбитого від надводного об'єкта сигналу з опорним. Сигнал биття подається на режекторний гребінчастий фільтр РГФ, який і здійснює селекцію сигналів надводних об'єктів, що рухаються. Після підсилення сигнали рухомих цілей надходять у блок обробки для визначення швидкості руху та адаптації запропонованої РЛС до відбиттів від морської поверхні [9].

Зупинимося детальніше на роботі каналу прямого сигналу, оскільки він формує основу РЛС — опорний сигнал. Для реалізації істинної когерентності необхідно, щоб співвідношення сигнал/шум на фазовому виході ППЧ-2 опорного сигналу було якомога більше й не менше  $\geq 20$  дБ (рис. 7). Тому побудова ППЧ-2 прямого сигналу відрізняється від побудови ППЧ-1 відбитого сигналу. Смуга пропускання ППЧ-1, як в амплітудному, так і у фазовому трактах, пов'язана з тривалістю імпульсу  $\tau_{\text{імп}} = 1$  мкс і дорівнює  $f_{\text{пч}} \approx 1/\tau_{\text{імп}} = 1$  МГц. При цьому чутливість приймального каналу відбитого сигналу  $P_{\text{мін}} \approx 10^{-14}$  Вт. У каналі прямого сигналу амплітудна частина ППЧ-2 також має смугу  $f_{\text{пч}} \approx 1/\tau_{\text{імп}} = 1$  МГц, а ось у фазовій частині

ППЧ-2, оскільки вона призначена для прийому високостабільного безперервного опорного сигналу, необхідно істотно звужити смугу та поліпшити співвідношення сигнал/шум опорного прямого сигналу (для прикладу приймемо  $\Delta f_{\text{пч}} = 0.1$  МГц). При цьому чутливість приймального пристрою прямого сигналу по фазовому виходу зростає до  $P_{\text{мін}} \approx 10^{-15}$  Вт. Тепер визначимо рівень безперервного опорного сигналу на вході приймального пристрою, скориставшись співвідношенням (2) з урахуванням параметрів  $P_0 = 10$  Вт,  $G_B = 10$  дБ,  $G_0 = 20$  дБ,  $V_0 = -50$  дБ,  $\lambda = 2$  м,  $R_0 = 70$  км. Після обчислення отримаємо  $P_{\text{вх}} \approx -123$  дБ/Вт. Таким чином, співвідношення сигнал/шум для фазової частини приймача прямого сигналу дорівнює  $\approx 27$  дБ, що цілком відповідає вимогам, які висуваються до таких пристроїв.

## Висновки

Запропоновано екологічно безпечну імпульсно-когерентну радіолокаційну систему, в якій передавальний пристрій встановлено на радіобуї за межами радіогоризонту й густина потоку випромінюваної потужності на узбережжі не перевищує допустимі санітарні норми та не становить небезпеки для населення, що мешкає там, і довкілля.

У запропонованому методі використовується безперервний сигнал задавального генератора передавача, який випромінюється в період між зондувальними імпульсами й після прийому та обробки в приймальному пристрої служить опорним сигналом. Це дозволяє створити істинно когерентну РЛС, яка працює когерентними радіоімпульсами й має інтервал когерентності, що значно перевершує період повторення.

Радіолокаційне виявлення надводних об'єктів на тлі відбиттів від морської поверхні здійснюється шляхом використання відмінності в швидкості руху надводного об'єкта, який необхідно виявити, і вітрових хвиль, що створюють завади. У перспективі передбачається розробка адаптивної радіосистеми з просторово-поляризаційною обробкою відбитих сигналів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дзюба В.П., Еремка В.Д., Зыков А.Ф., Милиневский Л.П., Мыценко И.М., Прокопенко О.И., Роєнко А.Н., Роскошный Д.В. *Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства*. Под ред. В.М. Яковенко. Севастополь: Вебер, 2012. 196 с.



2. Мыценко И.М., Роенко А.Н. Экологически безопасная РЛС для охраны территориальных вод. 20-я Международ. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo'2010): материалы конф. (Севастополь, Крым, Украина, 13–17 сентября 2010 г.). Севастополь, 2010. Т. 2. С. 1243–1244.
3. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Т. 4. Радиолокационные станции и системы. Москва: Сов. радио, 1978. 375 с.
4. Аграновский К.Ю., Златогурский Д.Н., Киселев В.Г. Радиотехнические системы. Москва: Вышш. школа, 1979. 335 с.
5. Вопросы перспективной радиолокации. Под ред. А.В. Соколова. Москва: Радиотехника, 2003. 512 с.
6. Hitney N.V., Richter J.H. Integrated Refractive Effects Prediction System (IREPS). *Nav. Eng. J.* 1976. Vol. 88, Iss. 2. P. 257–262. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1976.tb03831.x>
7. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. Москва: Сов. радио, 1970. 560 с.
8. Давыденко Ю.И. Дальняя тропосферная связь. Москва: Воениздат, 1969. 212 с.
9. Бакулев П.А. Радиолокация движущихся целей. Москва: Сов. радио, 1964. 336 с.

Стаття надійшла 11.07.2023

## REFERENCES

1. Dzyuba, V.P., Eremka, V.D., Zykov, A.F., Milinevsky, L.P., Mytsenko, I.M., Prokopenko, O.I., Roenko, A.N., Roskoshny, D.V., 2012. *Physical principles and radio-electronic control devices of a surface situation and navigation*. Ed. V.M. Yakovenko. Sevastopol: Veber Publ. (in Russian).
2. Mytsenko, I.M., Roenko, A.N., 2010. Environmentally safe radar for territorial coast waters guarding. In: *20th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2010)*: Proc. Vol. II. Sevastopol, Ukraine, 13–17 Sept. 2010, pp. 1243–1244 (in Russian).
3. Skolnik, M. ed., 1978. *Radar handbook*. Vol. 4. Radar systems and stations. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
4. Agranovsky, K.Yu., Zlatogursky, D.N., Kiselev, V.G., 1979. *Radiotechnical systems*. Moscow: Vysh. Shkola Publ. (in Russian).
5. Sokolov, A.V. ed., 2003. *Questions of perspective radar*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
6. Hitney, N.V., Richter, J.H., 1976. Integrated Refractive Effects Prediction System (IREPS). *Nav. Eng. J.*, **88**(2), pp. 257–262. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1976.tb03831.x>
7. Shirman, Ya.D., 1970. *Theoretical principles of radar*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
8. Davydenko, Yu.I., 1969. *Long range troposphere communication*. Moscow: Voenizdat (in Russian).
9. Bakulev, P.A., 1964. *Moving targets radiolocation*, Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).

Received 11.07.2023

I.M. Mytsenko, A.N. Roenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine  
E-mail: igor.mytsenko@gmail.com

## ECOLOGICALLY SAFE OVER THE HORIZON METER WAVELENGTH RADAR FOR TERRITORIAL WATERS GUARD

**Subject and Purpose.** Without regard to successes attained in the field of monitoring of territorial formations frontier areas and environment the problem of territorial waters guard and control of economic zone is as well as before actual for many states, that have the prolonged marine boundary. The aim of researches is an improvement of method of ecologically safe exposure of surface objects beyond the radiohorizon and development of ecologically safe meter wavelength radar for the guard of territorial waters with the use of active floating radio buoy.

**Methods and Methodology.** Taking into account ecological requirements to the radiotechnical equipment and feature of beyond the horizon radio wave propagation the bistatic radar for surface objects exposure beyond the radiohorizon was proposed. One of the system features is the use of active radio buoy located on considerable distance from a shoreline. To estimate the system operation the methods of analysis and numerical modelling are used.

**Results.** Having conducted the analysis of basic mechanisms of radio wave propagation beyond the radiohorizon and existed experimental data, the necessary power features of proposed meter wavelength radar is calculated. For practical realization of this system the algorithms for finding the distance to the surface object and its speed are brought in details. The functional diagrams for both coastal and radio buoy receivers are worked out. Detailed description of their operation is given.

**Conclusions.** The ecologically safe impulsively-coherent radar system is proposed, its transmission device is set on radio buoy beyond the radiohorizon, The radar true coherence is obtained due to the use of continuous signal of driving generator transmitter, that is irradiated in a period between sounding impulses and after a reception and treatment in the receiver serves as a reference signal, the coherence interval exceeds the period of pulse-repetition considerably. The use of speed difference of surface objects to be located and wind waves that create radar clutter will allow to carry out the radar exposure of surface objects on a background of marine surface clutter.

**Keywords:** beyond the horizon radar, radiobuoy, bistatic radar, phase array.