

ОЦІНКА ДАЛЬНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ВЕКТОРНО-ФАЗОВИМИ СИСТЕМАМИ

А. В. Дорошенко^{1, а}, Г. С. Пуха^{1,2, б}, О. О. Кратко^{1,2}

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

² ОКБ «Шторм»

Анотація

У роботі представлено характеристики виявлення та дальності дії гідроакустичних станцій на основі прийому сигналів модулем комбінованого приймача для двох моделей сигналів. На основі отриманих даних можна сказати, що дальність виявлення несанкціонованого доступу до морських об'єктів векторно-фазовими методами у багато разів перевищує дальності виявлення традиційними способами виміру за допомогою приймачів тиску.

Ключові слова: морські охоронні системи, векторно-фазові системи, шумовипромінювання

Вступ

Захищеність більшості акваторій з боку суші знаходиться на прийнятному рівні, однак спостерігається загрозливий недолік сучасних засобів виявлення та протидії вторгненням з боку моря. В малих акваторіях та на невеликих відстанях охорона, на більшості об'єктів, забезпечується активними системами або системами, сприймаючими скалярні складові поля. Але при збільшенні периметра охорони виникає питання достовірності виявлення та класифікації типу порушника, як для надводних об'єктів, так і, особливо, для підводних об'єктів.

З метою поліпшення безпеки портових засобів великих акваторій пропонується використання векторно-фазових систем (ВФС).

1. Векторно-фазові системи

Розроблена система призначена для виявлення, спостереження та запобігання проникненню надводних та підводних об'єктів до узбережжя великої протяжності, в бухти, порти, протоки і морські акваторії загальною площею до 2000 км², а також для проведення досліджень шумових характеристик моря.

ВФС представляє собою ланцюг векторних приймачів (приймачі коливальної швидкості або прискорення), рознесених у просторі один від одного на відстань до 5 км, і віддалених від берегового посту на відстань до 25 км. В гідроакустиці векторні приймачі використовуються з приймачами тиску [1, 2]. Таке використання називається комбінованим приймачем, а з урахуванням конструкції — модулем комбінованого приймача (МКП).

МКП складається з трьохкомпонентного приймача коливальної швидкості та ненапрявленого приймача тиску. Гідроакустична інформація, прийнята МКП, підсилюється та передається на береговий пост обробки гідроакустичної інформації. Амплітудно-фазова інформація, отримана за допомогою МКП, дозволяє покращити ймовірність як визначення, так і класифікації порушників.

2. Оцінка і обґрунтування дальності виявлення

Виконаємо розрахунки характеристик виявлення і дальності дії гідроакустичних станцій на основі прийому сигналів МКП для умов однорідного плоскопаралельного хвильоводу.

Розподіл ймовірностей поля сигналу і перешкод приймемо Гаусовським [3], з однаковою для сигналу і перешкоди залежністю спектральної щільності потужності від частоти. Розглянемо дві моделі сигналу:

- сигнал у вигляді вузькосмугових дискретних складових;
- сигнал у вигляді широкосмугового шумоподібного процесу, із залежністю спектральної щільності потужності сигналу $G_c^2(f)$ від частоти у вигляді $G_c^2(f) = G_{c_0}^2(f)/f_{кГц}^2$, де $G_c^2(f)$ — спектральна щільність потужності сигналу на відстані 1 м від джерела.

Перешкода розглянута у вигляді адитивної суміші теплового Гаусовського стаціонарного шуму з дисперсією $G_T^2(f)$ і поверхневого стаціонарного шуму моря з дисперсією $G_{пов}^2 = G_{c_0пов}^2(f)/f_{кГц}^2$. Для досягнення прийнятної завадостійкості тракту виявлення, смугу аналізу Δf і час аналізу T необхідно вибирати з умови $\Delta f T \gg 1$. Остання умова є також умовою Гаусівської апроксимації закону розподілу ймовірності вихідного ефекту тракту виявлення.

^аannie2.71828@gmail.com

^бph8htos@gmail.com

При оптимальному виявленні просторово кореляційного сигналу рівняння характеристики виявлення визначається залежністю ймовірності правильного виявлення $D(\Delta\omega, r, F)$ від відстані, при фіксованому частотному діапазоні, і ймовірності помилкової тривоги F , та має вигляд

$$D(\Delta\omega, r, F) = \Phi \frac{\sqrt{\frac{T}{2\pi}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d^2(\omega)}{1+d\omega} d\omega}{\sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} d^2(\omega) d\omega}} - \Phi^{-1}(1-F) \frac{\sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d^2(\omega)}{[1+d\omega]^2} d\omega}}{\sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} d^2(\omega) d\omega}}$$

де $d(\omega)$ – просторовий параметр виявлення, спадаючий, в даному випадку, з відношенням сигнал/перешкода на виході приймального тракту;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

де $\Phi(x)$ – інтервал ймовірності; Φ^{-1} – функція, обернена до функції Φ .

Просторовий параметр виявлення обчислюється за формулою:

$$d(\omega) = \sum_{m=1}^N \sum_{l=0}^n \frac{|S_l(\omega, \bar{R}_m)|^2}{k_u(\omega, \bar{R}_m, \bar{R}_m)}$$

де N – число приймачів; $k_{ll}(\omega, \bar{R}_m, \bar{R}_m) = G_{\text{ом}}^2(f)$;

$$S_0(\omega, \bar{R}_m) = \frac{2\pi i G_c(f)}{H} \sum_{k=1}^N \sin \frac{\zeta_k Z_m}{H} \sin \frac{\zeta_l Z_u}{H} H_0^{(1)} \frac{r_m \zeta_k}{A_k}$$

де $A_k = 1 - (kH_\nu/m\zeta_k)^2 \tan \zeta_k \sin^2 \zeta_k$, ζ_k – корені рівняння для дисперсії; H – товщина хвильоводу; Z_m – глибина розташування m -го приймача; Z_u – глибина занурення джерела; $H_0^{(1)}$ – функція Ханкеля; $m = \rho_1/\rho$ – відношення щільностей середовища дна та хвильоводу; $\nu^2 = 1 - n^2$, $n = c/c_1$ – відношення швидкостей в хвильоводі та в дні; r_m – відстань у горизонтальній площині між джерелом та m -им приймачем; k – хвильове число.

При виконанні розрахунків дальностей виявлення, використаємо дві моделі сигналів:

- сигнал у вигляді трьох дискретних спектральних компонент у смузі частот 19–21 Гц з кроком $\Delta f = 1$ Гц;
- сигнал моделюючий суцільну частину спектра в діапазоні частот 50 – 70 Гц, що складається з п'яти вибірок за частотою, з кроком $\Delta f = 5$ Гц.

Перевищення сигналу над перешкодою на відстані 1 м від джерела складає: для 1-ої моделі $q_0 \approx 1.4 \cdot 10^5$; для 2-ої моделі $q_0 \approx 1.4 \cdot 10^3$, при значенні дисперсії завади $\approx 36 \cdot 10^{-6}$, що відповідає поверхневій перешкоді при хвилюванні моря 2 бали. Приймемо початкові умови. Нехай глибина хвильоводу складає $H = 300$ м, глибина занурення джерела $Z_0 = 150$ м, приймача $Z_n = 300$ м. Дно передбачається акустично жорстким, тобто $c_{\text{гр}} = 2000 - i4$ [м/с].

Результати розрахунків вибірових значень дальностей виявлення $r(m)$ для одиночного гідрофону, що відповідають значенням ймовірностей правильного виявлення $D > 0.9$, для ймовірності помилкової тривоги $F = 10^{-3}$ становлять: для першої моделі сигналу 2000 – 3500 м; для другої моделі сигналу дальність виявлення не перевищує 100 – 200 м.

Враховуючи, що достовірних вихідних даних по полях коливальної швидкості і потокам потужності шумовипромінювання морських об'єктів немає, оцінимо дальності виявлення підводних об'єктів за даними обробки магнітних записів натурних випробувань по дослідженню гідроакустичних полів, що були проведені в ОКБ «Шторм» в 80-ті роки у Балтійському морі. Характерні дані опрацювання шумовипромінювання представлені в таблиці 1.

Табл. 1. Характеристики шумовипромінювання

Частота, Гц	5	10	25	50
Рівень, дБ/см ²	0.3	0.1	0.6	0.35
Частота, Гц	100	120	160	400
Рівень, дБ/см ²	0.37	0.8	0.25	0.2

Відношення сигнал/перешкода, для більш ніж 3 годин обробки запису плівок натурних експериментів, складало не нижче 24 дБ, що було отримано на відстані $r = 2 - 4$ км. Тоді, враховуючи, що з відстаней $r = 2 - 4$ км, в інфразвукових і низькому звуковому діапазонах частот, сигнал із збільшенням відстані спадає згідно зі сферичним законом, тому дальність виявлення буде не менше 20 – 25 км.

Особливу увагу слід приділити ідентифікації сигналів. За отриманими експериментальними обробками ідентифікацію можна здійснювати з перекидання різниці фаз на 180° (для компонент тиску та вертикальної складової коливальної швидкості), при переході з позитивних пелюсток горизонтальної діаграми спрямованості приймача коливальної швидкості, в негативну і навпаки. Прохідні характеристики на першій дискретній складовій $f = 18.7$ Гц представлені на рис. 1, 2.

Розглянутий відрізок часу, де підводним об'єктом виконувалося занурення (рис. 1, дані оброблені з 1305 с від початку запису плівки № 2 досліджень в Балтійському морі) і спливання (рис. 2, дані оброблені з 1460 с від початку запису плівки № 2 досліджень в Балтійському морі), на швидкості 7 вузлів і глибині 150 м. На рисунках позначено PV_X , PV_Y – взаємний спектр горизонтальних компонент коливальної швидкості та тиску, PV_Z – зміна вертикального потоку потужності.

Зміна вертикального потоку потужності PV_Z на рис. 1, 2 показують, що в даному випадку дальність виявлення буде не менше 20 – 25 км (тому що на відстані 1.5 км відношення сигнал/перешкода більше 30 дБ). За допомогою обробки даних досліджень шумовипромінювання підводних об'єктів можна сказати, що дальність виявлення занурених підводних

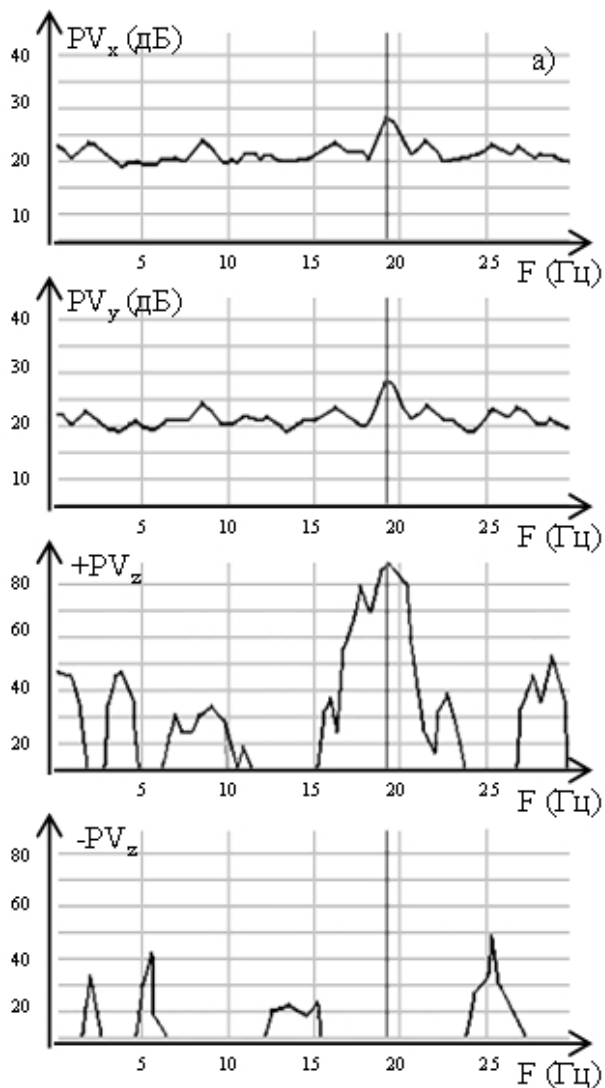


Рис. 1. Прохідні характеристики на першій дискретній складовій $f = 18.7$ Гц при зануренні об'єкта об'єктів, шумовипромінювання яких характеризується тиском $0.02 - 0.05$ Па буде не менше 25 км.

Висновки

За допомогою обробки даних досліджень шумовипромінювання підводних об'єктів можна сказати, що дальність виявлення підводних об'єктів при глибині занурення не менше 50 метрів, шумовипромінювання яких характеризується тиском $0.02 - 0.05$ Па, буде не менше 25 км. На основі цього, можна сказати, що дальність виявлення векторно-фазовими трактами у багато разів перевищують дальності виявлення трактами традиційних способів виміру за допомогою приймачів тиску.

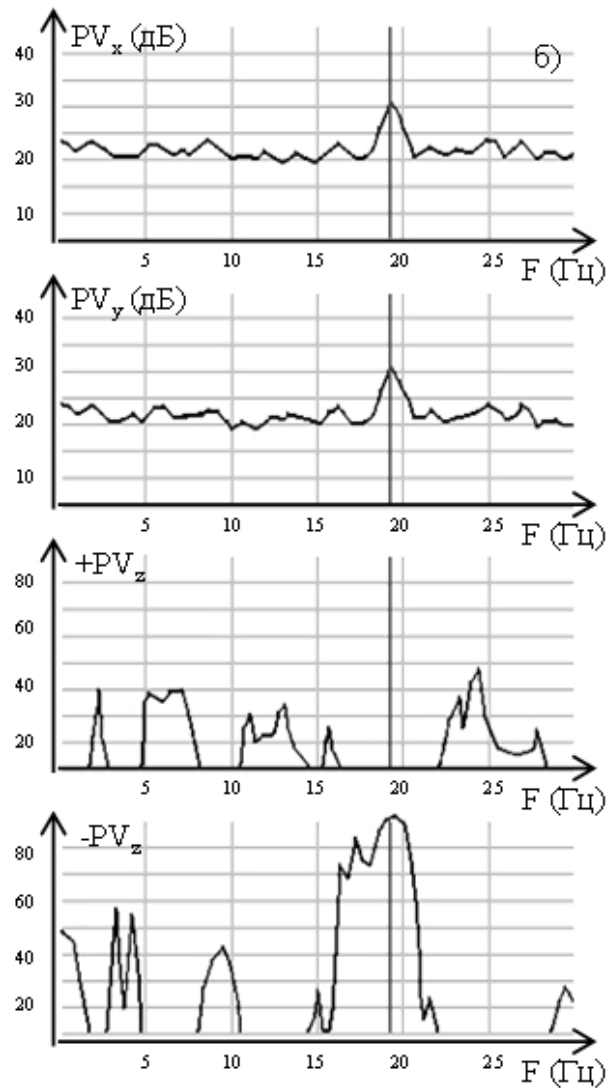


Рис. 2. Прохідні характеристики на першій дискретній складовій $f = 18.7$ Гц при спливанні об'єкта

Перелік використаних джерел

1. Щуров В. А., Кулешов В. П., Черкасов А. В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море. — 57 т. — 2011. — С. 837–843.
2. Nejevenko E. S., Sotnikov A. A. Adaptive modeling for hydroacoustic signal processing. — 16 vol. — 2006. — С. 5–8.
3. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. — К. — 16 vol. — 1982. — С. 264.