УДК 621.396.96

ЦЕЛІЩЕВ І.Ю., старший науковий співробітник

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОЛОКАТОРІВ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ ПАТРУЛЬНИХ ЛІТАКІВ АВІАЦІЇ ВМС

В статті запропоновано структуру побудови багатоканального алгоритму обробки зображень морської поверхні, отриманих за допомогою авіаційних радіолокаторів з синтезованою апертурою патрульних літаків авіації ВМС, який може бути використаний для вирішення задачі виявлення підводних човнів, що рухаються в зануреному стані

Відповідно до керівних документів щодо розвитку озброєння та військової техніки ЗС України, одною з важливих задач є створення патрульного літака авіації ВМС для висвітлення обстановки, в тому числі і підводної, у визначених морських (прибережних) районах.

Аналіз сучасних світових тенденцій створення бортових комплексів спеціального обладнання літаків патрульної авіації свідчить про все більше зростання ролі видових засобів високого просторового розрізнення (РЛС з синтезованою апертурою (РСА), телевізійних систем тощо), що використовуються для пошуку морських рухомих об'єктів, в тому числі і підводних човнів (ПЧ). Проте, сучасні пошукові видові засоби спроможні виявляти ПЧ лише у надводному положенні, або такі, що знаходяться на невеликій глибині під перископом чи іншими висувними пристроями (ВП), та лише за умов відсутності інтенсивного хвилювання морської поверхні.

Виявлення ПЧ, що рухаються на більших глибинах, та в умовах значного хвилювання є складним завданням. Разом з тим існує принципова можливість побудови системи виявлення підводних човнів, що рухаються в зануреному стані, оскільки має місце демаскуюча ознака ПЧ, – це так звані супутні сліди [1], що спостерігаються при його русі. Але ці ознаки є слабкими і сильно маскуються хвилюванням морської поверхні.

Перспективним напрямком вирішення цієї задачі є використання алгоритмів обробки зображень морської поверхні, отриманих авіаційними РСА.

В зв'язку з цим автором розглянуто склад та структуру побудови комплексів бортового пошукового обладнання сучасних патрульних літаків авіації ВМС, проведено системний аналіз та класифікацію існуючих авіаційних засобів пошуку ПЧ.

Проведений аналіз показав, що одними з найбільш ефективних видових засобів є РЛС, зокрема РСА. Такі станції потенційно можуть використовуватись для виявлення ПЧ по їх поверхневим ознакам на фоні збуреної морської поверхні (ЗМП).

Також було узагальнено дані щодо характеристик супутніх слідів ПЧ, що рухається у підводному положенні на різних глибинах, та характеристики ЗМП при різній інтенсивності хвилювання.

Досвід використання РСА засвідчує, що виявлення ПЧ без спеціальної обробки зображень можливе лише при досить великому відношенні сигнал/шум, яке має місце лише при великій швидкості руху ПЧ на невеликій глибині та малій інтенсивності ЗМП.

З проведеного аналізу випливає, що виявлення ПЧ, які рухаються на глибинах більших за перископну та за умов присутності ЗМП, можливе лише за умов створення спеціальних алгоритмів обробки зображень, які дозволять підняти відношення сигнал/шум.

Шум та супутній слід у вирішуваній задачі розглядались як гаусівські випадкові ергодичні функції [1], що описуються кутовими одномірними спектральними щільностями потужності відповідно: $N(\theta)$ та $S(\theta)$, де θ – поточний кут та S(u, v), де u, v- просторові частоти.

Також була прийнята адитивна спектральна модель суміші сигналу та шуму:

$$S(u, v) = S_{\mathcal{U}}(u, v) + S_{e}(u, v) + N_{0},$$

$$S(\theta) = S_{\mathcal{U}}(\theta) + S_{e}(\theta) + N_{0},$$
(1)

де $S_{e}(u,v)$, $S_{e}(\theta)$, N_{0} – двомірні та одномірні кутові спектральні щільності потужності анізотропного хвилювання та капілярно-гравітаційної рябі ЗМП відповідно, а $S_{II}(u,v)$ та $S_{II}(\theta)$ – двомірні та одномірні кутові спектральні щільності потужності супутнього сліду.

Перехід до спектрів U(u, v) та $U(\theta)$ здійснюється за схемою [2]:

$$G(x,y) \xrightarrow{l} G_{wi}(x,y) \xrightarrow{2} S_i(u,v) \xrightarrow{3} S_i(K,\theta) \xrightarrow{4} S_i(\theta)$$

де G(x, y)- радіолокаційне зображення, отримане за допомогою РСА, $G_{wi}(u, v)$ підпростір розбиття зображення всередині *i* - го вікна обробки (рис. 1), $S_i(u,v)$, $S_i(K, \theta)$ - двомірний спектр зображення всередині *i* - го вікна обробки в прямокутних частотних та полярних координатах відповідно, $S_i(\theta)$ кутовий одномірний спектр зображення всередині *i* - го вікна.

Таким чином, спектр поля радіолокаційного зображення, що обробляється, має, в залежності від реалізованої гіпотези, наступний вигляд:



Рис. 1. Схема обробки зображення морської поверхні вікном кінцевого розміру

Перші два випадки відповідають гіпотезі H_o (відсутність аномального хвилювання, викликаного утворенням супутнього сліду), другі два випадки відповідають гіпотезі H_1 (на зображенні присутнє аномальне хвилювання). При цій гіпотезі аномальне хвилювання може сформуватися на фоні капілярногравітаційної рябі (штильова ситуація) та на фоні суми рябі та вітрового хвилювання, яке частіш за все має анізотропну (направлену) структуру.

Таким чином, задача виявлення супутнього сліду ПЧ на фоні ЗМП представляє собою задачу виявлення спектра супутнього сліду на фоні некорельованого поля капілярно-гравітаційної рябі, або адитивної суміші некорельованого поля рябі та корельованого поля вітрового хвилювання.

Виявлення ділянок аномального хвилювання доцільно здійснювати за таким алгоритмом:

$$S_{i}(u,v) = \lim_{G_{W} \to \infty} \frac{1}{G_{W}} E\left\{\widetilde{S}(u,v)\widetilde{S}^{*}(u,v)\right\}$$
$$\Delta S \leq \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (S_{I}(u,v) - S_{i}(u,v))^{2} du dv}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{I}^{2}(u,v) du dv}$$
(3),

де $E\{...\}$ – процедура обчислення математичного сподівання, $\tilde{S}(u,v)$ та $\tilde{S}^*(u,v)$ – локальні двомірні комплексний та комплексно сполучений спектри, обчислені на

інтервалах W(x, y), співрозмірних з інтервалами просторової кореляції ЗМП, всередині підпросторів розбиття G_w , ΔS – поріг, при перевищенні якого поле ЗМП всередині підпростору G_w вважається неоднорідним. В результаті цієї процедури весь простір зображення морської поверхні розділяється на дві групи підпросторів: G_{ra} – що містять аномалію хвильового рель'єфу, та G_{rb} – що містять тільки зображення ЗМП.

Після локалізації аномалій рель'єфу ЗМП в полі зображення, подальше вирішення задачі виявлення супутнього сліду зводиться до оцінки вектору параметрів Π_i одномірних кутових спектрів ЗМП та аномалії всередині підпросторів розбиття G_{wi} , обчислення відношення правдоподібності та порівнянню його з порогом, що дає змогу прийняти рішення про належність аномалії всередині даного підпростору до супутнього сліду.

Для оцінювання параметрів спектру шуму спектр одного з підпросторів G_{wi} з групи підпросторів G_{re} (рис. 1) подається на вхід багатоканальної схеми формування відношення правдоподібності, для якої умовне відношення правдоподібності в області θ буде мати вигляд [3]:

$$\Lambda_{\boldsymbol{g}}(\Pi_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{i}}) = \exp\left\{Re\frac{1}{2\pi}\int_{\boldsymbol{\theta}}^{\infty} \widetilde{U}_{\boldsymbol{G}_{\boldsymbol{W}\boldsymbol{i}}}^{*}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \frac{2}{N_{\boldsymbol{\theta}}} \cdot S_{\boldsymbol{g}}^{\frac{1}{2}}(\boldsymbol{\theta},\Pi_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{j}})d\boldsymbol{\theta} - \frac{1}{4\pi}\int_{\boldsymbol{\theta}}^{\infty} S_{\boldsymbol{g}}(\boldsymbol{\theta},\Pi_{\boldsymbol{g}\boldsymbol{j}}) \cdot \frac{2}{N_{\boldsymbol{\theta}}}d\boldsymbol{\theta}\right\},\qquad(4)$$

де $S_{g}(\theta, \Pi_{gj})$ – спектральна щільність потужності анізотропного корельованого хвилювання з вектором можливих значень параметрів хвилювання Π_{gj} , подана на вхід багатоканальної схеми в якості опорного сигналу, а $\widetilde{U}_{G_{wi}}^{*}$ - комплексно сполучений спектр підпростору G_{wi} .

Логарифм відношення правдоподібності у даному випадку прийме вигляд:

$$L_{\theta}(\Pi_{\theta i}) = \frac{1}{N_{\theta}} \left[Re \frac{1}{\pi} \int_{\theta} \widetilde{U}_{G_{wi}}^{*}(\theta) S_{\theta}^{\frac{1}{2}}(\theta, \Pi_{\theta j}) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_{\theta} S_{\theta}(\theta, \Pi_{\theta j}) d\theta \right].$$
(5)

Для випадку присутності аномалії хвильового рел'єфу на фоні некорельованого поля капілярно-гравітаційної рябі зі спектральною щільністю потужності N_0 умовне відношення правдоподібності в області θ прийме вигляд:

$$\Lambda_{\underline{\mathcal{U}}}(\Pi_{\underline{\mathcal{U}}i}) = \exp\{\operatorname{Re}\frac{1}{2\pi} \int_{\theta} \widetilde{U}_{G_{wi}}^{*}(\theta) \cdot \frac{2}{N_{0}} \cdot S_{\underline{\mathcal{U}}}^{\frac{1}{2}}(\theta, \Pi_{\underline{\mathcal{U}}j}) d\theta - \\
- \frac{1}{4\pi} \int_{\theta} S_{\underline{\mathcal{U}}}(\theta, \Pi_{\underline{\mathcal{U}}j}) \cdot \frac{2}{N_{0}} d\theta\},$$
(6)

де $S_{II}(\theta, \Pi_{IIj})$ - спектральна щільність потужності супутнього сліду ПЧ з вектором можливих значень параметрів Π_{IIj} , взята в якості опорного сигналу. В даному

випадку на вхід багатоканальної схеми формування відношення правдоподібності подається спектр одного з підпросторів G_{wi} з групи підпросторів G_{ra} (рис. 1). Логарифм відношення правдоподібності при цьому має вигляд:

$$L_{\mathcal{I}}(\Pi_{\mathcal{I}_{i}}) = \frac{1}{N_{0}} \left[Re \frac{1}{\pi} \int_{\theta} \widetilde{U}_{G_{wi}}^{*}(\theta) S_{\mathcal{I}_{i}}^{\frac{1}{2}}(\theta, \Pi_{\mathcal{I}_{j}}) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_{\theta} S_{\mathcal{I}_{i}}(\theta, \Pi_{\mathcal{I}_{j}}) d\theta \right].$$
(7)

В даному випадку кожний канал представляє собою узгоджений для спектра супутнього сліду з відповідними параметрами приймач з передаточною функцією:

$$K(\theta, \Pi_{IIj}) = S_{II}^{\frac{1}{2}}(\theta, \Pi_{IIj}) \cdot N_0^{-1}.$$
(8)

У випадку наявності аномалії хвильового рел'єфу на фоні ЗМП, що представляє суміш некорельованого поля капілярно-гравітаційної рябі та корельованого поля анізотропного хвилювання на вхід багатоканальної схеми формування відношення правдоподібності подається спектр одного з підпросторів G_{wi} з групи підпросторів G_{ra} . Кожний канал при цьому представляє собою узгоджений для спектра супутнього сліду з відповідними параметрами приймач з адаптованою під параметри спектру корельованого хвилювання ЗМП передаточною функцією типу:

$$\left|K_{a\partial anmj}(j\theta,\Pi_{uj})\right|^{2} = \frac{1}{\left[S_{u}(\theta,\Pi_{uj}) + S_{e}(\theta,\widetilde{\Pi}_{ek}) + N_{0}\right]} \cdot \left[\frac{S_{u}(\theta,\Pi_{uj})}{\left[S_{u}(\theta,\Pi_{uj}) + S_{e}(\theta,\widetilde{\Pi}_{ek}) + N_{0}\right]}\right], \quad (9)$$

де $S_{e}(\theta, \widetilde{\Pi}_{ek})$ - енергетичний спектр анізотропного хвилювання з вектором параметрів $\widetilde{\Pi}_{ek}$, оціненим при обробці (1).

Умовне відношення правдоподібності в області *θ* в такому випадку прийме вигляд:

$$\Lambda_{\underline{\mathcal{U}}}(\Pi_{\underline{\mathcal{U}}i}) = \exp\{Re\frac{1}{2\pi} \int_{\theta} \widetilde{U}_{G_{wi}}^{*}(\theta) \cdot \frac{2}{N_{\theta}} \cdot K_{a\partial anm \, j}(j\theta, \Pi_{uj}) d\theta \\
- \frac{1}{4\pi} \int_{\theta} S_{\underline{\mathcal{U}}}(\theta, \Pi_{\underline{\mathcal{U}}j}) \cdot \frac{2}{N_{\theta}} d\theta\} ,$$
(10)

а логарифм відношення правдоподібності буде таким:

$$L_{\mathcal{U}}(\Pi_{\mathcal{U}_{i}}) = \left[Re \frac{1}{\pi} \int_{\theta} \widetilde{U}_{wi}^{*}(\theta) K_{a\partial anm j}(j\theta, \Pi_{\mathcal{U}_{j}}) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_{\theta} S_{\mathcal{U}}(\theta, \Pi_{\mathcal{U}_{j}}) d\theta \right].$$
(11)

Результатом такої попередньої обробки буде збільшення відношення сигнал/шум на вході стандартного блоку обробки сигналів РСА, що значно поширює її можливості при виявленні ПЧ, що рухаються в зануреному стані.

Експериментальні дані, отримані шляхом імітаційного моделювання з використанням запропонованого алгоритму, підтверджують покращення відношення сигнал/шум при обробці реальних зображень ЗМП з присутніми на них супутніми слідами.

Розроблений багатоканальній адаптивний алгоритм обробки зображень морської поверхні, отриманих за допомогою РСА, може бути використано при побудові програмно-алгоритмічного забезпечення бортового пошуково-прицільного комплексу патрульного літака ВМС ЗС України.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Загородников А.А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 240 с.
- 2. Целіщев І.Ю. Пропозиції щодо побудови пошуково-прицільних систем патрульних літаків авіації ВМС// Зб. наукових праць Державного науководослідного інституту авіації. - К.: ДНДІА, Вип. № 1(10). 2009.–С.
- 3. Ван Трис Г.Л. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.III: Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех / Пер. с англ.; Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Сов. радио, 1977. 662 с.

Надійшла до редакції 29.10.2010