

## **МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 621.384.3

### **СПОСІБ ВРАХУВАННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ПОВЕРХНІ ВОДИ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

*Михайленко М. В., Колобродов Н. С.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*Досліджується вплив стану поверхні води на якість зображення об'єкту під час роботи лазерної системи бачення через межу розділу «повітря – вода» у режимі стробіювання прийомного каналу. Оскільки поверхневий шар води має випадковий (стохастичний) рельєф, структура сформованого зображення може значно відрізнятися від структури об'єкта спостереження. Зображення підводного об'єкта під впливом поверхневого збурення може дробитися, в ньому можуть з'являтися тріщини, розриви. Як наслідок, інформація про структуру об'єкта втрачається, а ефективність роботи лазерної системи підводного бачення знижується. Детально описується метод визначення модуляційної передавальної функції збуреної морської поверхні, що базується на загальних положеннях теорії переносу зображення об'єкту через розсіююче середовище. За допомогою запропонованого методу в статті приведені розрахунки впливу швидкості надводного вітру на вигляд модуляційної передавальної функції збуреної морської поверхні.*

*Результати роботи можуть бути використані при проектуванні лазерної системи підводного бачення, а також для оцінювання можливості її технічної реалізації.*

**Ключові слова:** *лазерна система підводного бачення, збурена морська поверхня, модуляційна передавальна функція морського середовища.*

#### **Вступ**

Процес освоєння Світового океану визначив в останні роки бурхливий розвиток засобів спостереження за підводними об'єктами. Сфера застосування таких засобів надзвичайно широка. Тому велика увага приділяється дослідженням, спрямованим на оптимізацію таких систем і поліпшенню їх характеристик: збільшення їх дальності дії, якості зображення, продуктивності. Реальні засоби спостереження підводних об'єктів можуть встановлюватися і на підводних носіях, і на надводних. У другому випадку спостереження ведеться через поверхню води, майже завжди збурену. Так як поверхневий шар води має випадковий (стохастичний) рельєф, структура сформованого зображення може значно відрізнятися від структури об'єкта спостереження. Зображення підводного об'єкта під впливом поверхневого хвилювання може дробитися, в ньому можуть з'являтися тріщини, розриви. Як наслідок інформація про структуру об'єкта втрачається і ефективність роботи лазерної системи підводного бачення (ЛСПБ) знижується.

Останнім часом з'явилася низка робіт, в яких розглядаються різні теоретичні аспекти покращення зображень, спотворених поверхневим збуренням, в при-

пущенні, що відома повна або часткова інформація про стан поверхні води. Розрахунки за моделлю визначення граничної дальності дії оптико-електронної системи підводного бачення, запропонованої в [1], дозволяють визначити модуляційні передавальні функції (МПФ) розсіюючого морського середовища та турбулентного морського середовища. Тому дуже гостро постає питання щодо визначення МПФ збуреної морської поверхні.

### **Постановка задачі**

Специфічна особливість підводного бачення полягає в тому, що, навіть при порівняно невеликих відстанях спостереження, вирішальний вплив на якість зображення спричинюється середовищем та розсіянням (прямим і зворотнім). Цей вплив проявляється в ослабленні яскравості та зниженні контрасту зображення, спотворенні його просторової структури, відносному збільшенні шумової складової зображення і, врешті, обмеженні дальності бачення.

Збурена поверхня моря є джерелом додаткових шумів, що виникають через флуктуації випромінювання, які поступають на приймач, від спостережуваного підводного об'єкта, товщі води та самої поверхні.

Відомим є метод визначення МПФ збуреної морської поверхні, що базується на загальних положеннях теорії переносу зображення об'єкту через розсіююче середовище [2]. У пропонованій статті досліджується вплив збуреності води (швидкості надводного вітру) на загальний вигляд МПФ збуреної морської поверхні, що визначається на основі методу стробіювання по дальності.

### **Основна частина**

Наразі існує декілька найбільш характерних способів отримання зображення підводних об'єктів і пристроїв для їх реалізації, які базуються на підсвічуванні об'єкту лазерним випромінюванням.

Для простоти розуміння принципу роботи лазерної системи підводного бачення через межу розподілу «повітря – вода» (рис. 1) представлена її спрощена структурна схема. ЛСПБ, в загальному випадку, складається із чотирьох основних блоків: передавального каналу, приймального каналу, блоку керування і синхронізації та блоку формування та обробки сигналу. Передавальний канал зазвичай являє собою імпульсний лазер, блок його накачки та формуючу оптичну систему. Випромінювання лазера долає шлях крізь розділ «повітря – вода» та відбившись від об'єкту спостереження надходить до приймального каналу. Об'єктів приймального каналу в фокальній площині формує зображення підсвіченої області. Блок керування та синхронізації відповідає за синхронізацію роботи приймального та передавального блоків, що відсікає шкідливе випромінювання зворотного розсіювання від поверхні води, яке може потрапити на приймальний блок. Підводні об'єкти сканують попіксельно по двох координатах імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням. В якості фотодетектору загалом є ПЗЗ-матриця, яка перетворює двовимірний оптичний сигнал в одновимірний електричний сигнал. Залежно від типу системи, сигнал, після низки

перетворень у блоці формування та обробки, може потрапити на пристрій відображення (монітор), або зберігатися в пристрої збереження інформації (ПЗІ).

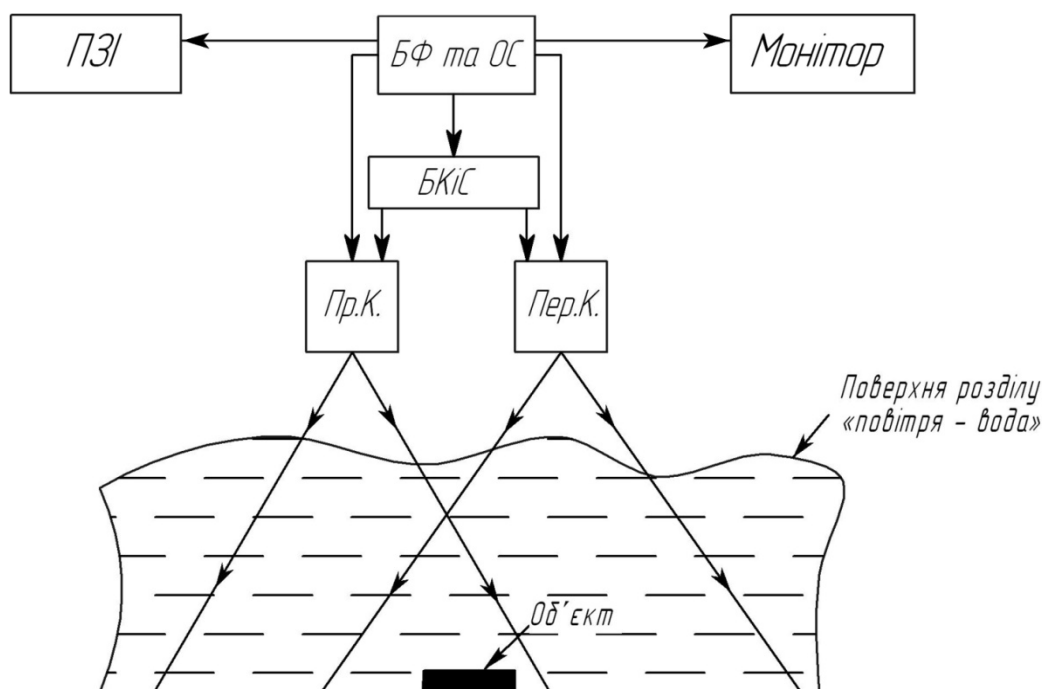


Рис. 1. Структурна схема ЛСПБ, що розташована над поверхнею моря

Як вже зазначалося раніше, як фотодетектор застосовано матричний фотоприймач, який сприймає інформацію підсвіченої предметної області. Межі такої області встановлює кут поля зору системи  $\omega$ , який визначається лінійними розмірами матричного фотоприймача та фокусною відстанню об'єктива приймального каналу. Як показано в [1], за способами розгортки і співвідношенню діаграм направленості джерела і приймача випромінювання схеми побудови ЛСПБ можуть бути різними по відношенню до характеру підсвіту (широкі/вузькі області підсвіту) та наявності чи відсутності сканування.

Будь-який випадок розрахунку ЛСПБ за моделлю визначення граничної дальності дії для спостереження підводних об'єктів описано в [1]. Він базується на визначенні контрасту об'єкту та мінімально роздільного контрасту, що сприймається системою. Порівнянням цих контрастів і визначається гранична дальність бачення об'єкту. Мінімально роздільний контраст залежить від МПФ ЛСПБ та порогового відношення сигнал/шум, яке сприймає зображення на моніторі - зоровий аналізатор (око). Контраст об'єкту залежить, насамперед, від істинного контрасту об'єкту, енергії сигналу, обумовленого лазерним променем, та МПФ середовища розповсюдження лазерного випромінювання.

Оскільки спостереження за підводним об'єктом відбувається над поверхнею води, в результатуючу МПФ середовища розповсюдження лазерного випромінювання будуть входити МПФ атмосфери, розсіювального і турбулентного морського середовища та збуреної морської поверхні. Припустимо, що спостережен-

ня ведеться не на великій висоті від рівня моря і МПФ атмосфери можна знехтувати. У [1] наведені формули для знаходження МПФ розсіювального та турбулентного морського середовища, які нагадують аналогічні формули для атмосфери.

Коли підводні об'єкти спостерігають через поверхневий шар моря, має місце додаткове спотворення зображення, викликане випадковим характером заломлення світла на межі збурення розділу «повітря – вода» (рис. 2).

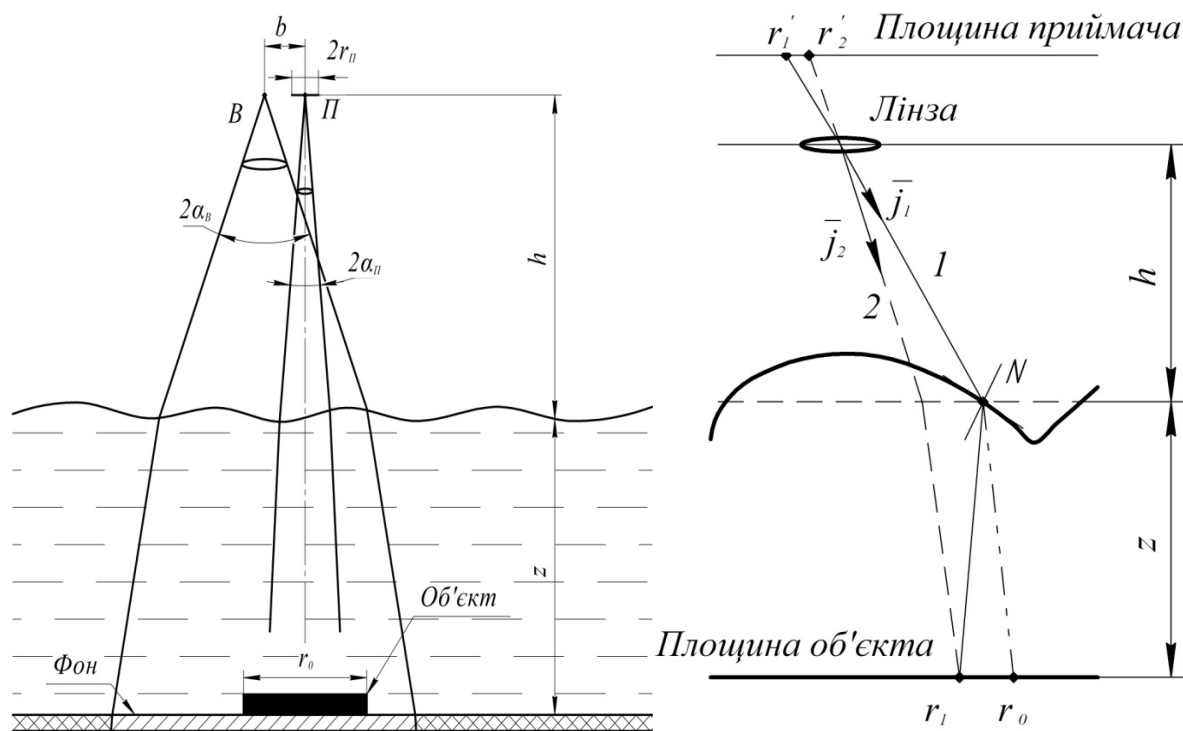


Рис. 2. Схема спостереження через збурену поверхню

Згідно [2], потужність корисного сигналу на вході фотоприймача, яка приходить на елемент зображення в системі спостереження через збурену поверхню моря, має вигляд (1):

$$\bar{P}_{\text{ен}}(r') = \frac{P_0 A_{\text{гд}} \Omega_{\text{гд}}}{\pi} \int \int_{-\infty}^{\infty} \rho(r) E_{\text{н}}(r) E_{\text{о}}(r) dr, \quad (1)$$

де  $P_0$  – потужність джерела випромінювання,  $A_{\text{гд}} = \pi r_{\text{г}}^2$  – площа вхідної зіниці об'єктива приймального пристрою,  $\Omega_{\text{гд}}$  – тілесний кут приймача випромінювання ( $2\alpha_{\text{г}}$  – миттєвий кут зору приймача),  $\rho(r)$  – розподіл коефіцієнта відбиття на об'єкті, функції  $E_{\text{н}}$  і  $E_{\text{о}}$  описують розподіл освітленості в предметній площині, які створюються відповідно справжнім джерелом одиничної потужності та фіктивним джерелом, що розташований в точці прийому і має такі ж, як приймач, апертуру і діаграму направленості,  $r$  – площина об'єкту спостереження.

Суттєво, що у даному випадку, функції  $E_c$  і  $E_o$  являються випадковими і залежать не тільки від характеристик випромінювача, приймача та від гідро-оптичних властивостей води, але й від стану збурення поверхні моря. Тому потужність  $P_{\text{ен}}(r')$  також являється випадковою величиною.

Найбільший інтерес, відповідно, представляє середня по ансамблю реалізація поверхні величина потужності корисного сигналу, що сприймається. Виразивши величину  $P_{\text{ен}}(r')$  через функцію розмиття точки (ФРТ)  $a(r, r')$ , можна виділити усереднену ФРТ системи  $\bar{a}(r, r') = \overline{a(r, r')}$  та середню статистичну потужність сигналу (2):

$$\bar{P}_{\text{ен}}(r_1) = P_0 \int \int_{-\infty}^{\infty} \rho(r) \bar{a}(r, r') dr. \quad (2)$$

Спектр Фур'є  $\bar{a}(v)$ , відповідний до середньої ФРТ  $\bar{a}(r)$ , являється середньою статистичною ОПФ системи спостереження. У випадку сонячного освітлення поверхні моря [2] середня ОПФ має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{a}(v) = & \frac{A_{i\delta} \Omega_{i\delta} t_{\text{ад}}^2}{\pi n^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} \int \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{i\delta} \left( v, v h + \frac{v' z}{n} \right) D(v') \times \\ & \times \theta \left( (v - v') z \frac{n-1}{n}, v' z \frac{n-1}{n}, r_d \right) e^{-i(v-v')(r_d + \Delta r)} dr_d dv'. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут  $t_{\text{ад}}$  – коефіцієнт пропускання межі,  $z$  – глибина, на якій знаходиться об'єкт,  $h$  – висота приймача над поверхнею води,  $\phi_{i\delta}(v, p)$  – Фур'є спектр (по координаті та по куту) функції розподілу яскравості на виході фіктивного випромінювача,  $D(v')$  – ОПФ, що характеризує передачу структури предмету оптичною системою у вигляді збуреної морської поверхні,  $\theta$  – двохточкова характеристична функція нахилів морської поверхні,  $\Delta r = (j_{11} - j_{12})z/n$ , де  $j_{11}$ ,  $j_{12}$  – проекції одиничних векторів  $\vec{j}$  на вертикальну вісь,  $r_e$  – радіус кореляції нахилів поверхні води,  $r_d = r_1 - r_0$  – відстань між точками об'єкту спостереження.

ОПФ системи спостереження  $\bar{a}(v)$  та МПФ  $\bar{T}(v) = \bar{a}(v)/\bar{a}(v=0)$  суттєво залежать від співвідношення між величиною  $|\Delta r|$  та радіусом кореляції  $r_e$  нахилів поверхні води. Якщо  $|\Delta r| \gg r_e$ , то функції  $E_c(r)$  і  $E_o(r)$  статистично незалежні. У цьому випадку функцію  $\theta \left( (v - v') z \frac{n-1}{n}, v' z \frac{n-1}{n}, r_d \right)$  можна вважати не залежною від  $r_d$  і вираз для МПФ, враховуючи (3), набуде вигляду

$$\bar{T}(v) = \frac{\phi_{i\delta} \left( v, v \left( h + \frac{z}{h} \right) \right) S(v') \theta \left( 0, v z \frac{n-1}{n} \right)}{\phi_{i\delta}(0,0) S(0)}. \quad (4)$$

Функція  $\theta\left(0, v_z \frac{n-1}{n}\right)$  в (4) описує погіршення контрасту в наслідок хвилювання морської поверхні. Спираючись на статистичні дані [3] при нормальному законі розподілу нахилів поверхні з дисперсією  $\sigma_\theta^2$ , МПФ морської поверхні прийме вигляд:

$$T_{i.i}(v') = \exp\left[-0,5v'^2\sigma_\theta^2\left(\frac{n-1}{n}\right)^2\right], \quad (5)$$

$$\sigma_\theta^2 = 0,003 + 0,00512v_a,$$

де  $v' = z/l$  – кутова просторова частота, рад<sup>-1</sup>;  $z$  – глибина, на якій знаходиться об'єкт спостереження;  $l$  – лінійний розмір об'єкту;  $v_a$  – швидкість вітру, м/с;  $n$  – показник заломлення води.

На рис. 3 представлені графіки МПФ збуреної морської поверхні від кутової просторової частоти, побудовані за виразом (5), при різних швидкостях вітру та відомій глибині об'єкту.

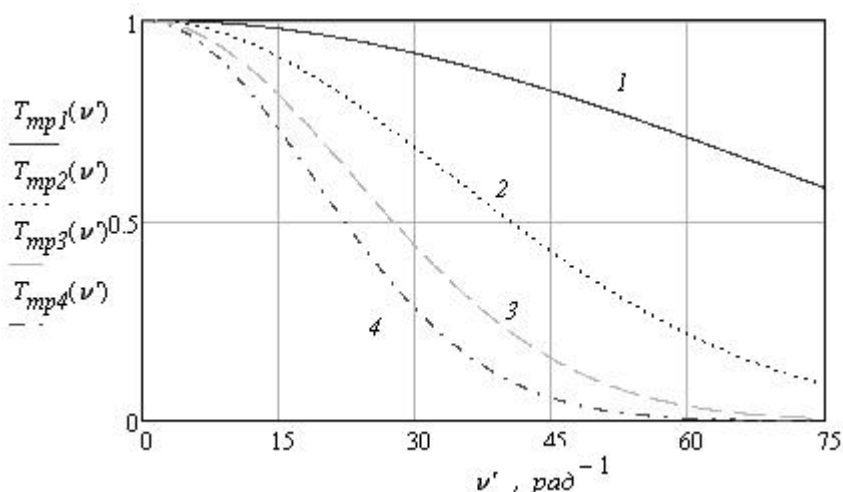


Рис. 3. МПФ збуреної морської поверхні при різних швидкостях вітру:  
1 – 0 м/с, 2 – 2 м/с, 3 – 5 м/с, 4 – 8 м/с

### Висновки

Розглянуто метод визначення МПФ збуреної морської поверхні за допомогою теорії переносу зображення об'єкту через розсіююче середовище. Як результат отримано достатньо простий аналітичний вираз (5). Аналізуючи графіки на рис. 3, видно, що при відносно не великих змінах значень швидкості вітру, ефективність роботи ЛСПБ через межу розподілу «повітря – вода» зменшується в рази, порівняно до випадку спокійної водної поверхні. Варто прийняти до уваги той факт, що при використанні ЛСПБ, побудованою за методикою описаною в [1], слід уникати поганих погодних умов для отримання якнайкращої якості зображення підводного об'єкту.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні лазерної системи підводного бачення, а також для оцінки можливості її технічного функціонування.

### **Література**

1. Карасик В. Е. Лазерные системы видения: Учебное пособие. / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
2. Зега Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде. / Э. П. Зега, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. - Минск: Наука и техника, 1985. – 327 с.
3. Мулламаа Ю.-А. Р. Влияние взволнованной поверхности моря на видимость подводных объектов // Изв. АН СССР. сер. ФАО. – 1975. – т. 11. – № 2. – С. 199 – 205.

*Надійшла до редакції  
04 червня 2013 року*

© Михайленко М. В., Колобродов Н. С., 2013

УДК 535.42

## **ІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД ПРОЕКТУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗАДАНИМ РОЗПОДІЛОМ ІНТЕНСИВНОСТІ**

*Власенко Ю.С., Балінський Є. Г.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
м. Київ, Україна*

*У роботі пропонується ітераційний метод розв'язання оберненої задачі на основі скалярної теорії дифракції до застосування в проектуванні фазових оптичних елементів. Детально описаний ітераційний алгоритм у полярних системах координат застосовується для розрахунку дифракційних оптичних елементів, що формують заданий розподіл інтенсивності в площині спостереження. Звернено увагу на виконання закону збереження енергії та на використання  $i$ -ї кількості вихідних площин для осьового розподілу інтенсивності. Наведені приклади розрахунку ДОЕ, що формують рівномірну освітленість у кільці, точці та в осьовому відрізьку.*

*Результати розрахованих розподілів інтенсивності дають високу енергетичну ефективність та малу середньоквадратичну похибку, що говорить про високу наближеність розподілів інтенсивності до заданих. Розглянутий ітераційний алгоритм може бути використаний для проектування мультиспектральних спекл - картин. У подальшому планується використання характеристик створюваних ДОЕ для розрахунку більш складніших фокусаторів та виготовлення їх фотошаблонів.*

**Ключові слова:** *дифракційний оптичний елемент, дифракція Френеля, фазова функція.*

### **Вступ**

З розвитком лазерної технології виникла низка проблем, пов'язаних із перетворенням оптичного випромінювання, котрі не можна розв'язати за допомогою традиційних оптичних елементів. Одною із таких задач є фокусування випромінювання в задану область простору із необхідним розподілом інтенсивності в ній. Для формування заданого розподілу інтенсивності використовують дифракційні оптичні елементи (ДОЕ). Розроблена наразі методика розрахунку ДОЕ, яка основана на наближенні геометричної оптики, не дозволяє оцінити