

УДК 535.81

**ДО ПИТАННЯ ПРО ПЕРЕДАЧУ ПРОСТОРОВОГО ФАЗОМОДУЛЬОВАНОГО  
ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ КРИЗЬ СЕРЕДОВИЩА  
ІЗ НЕПЕРЕДБАЧУВАНИМИ ФАЗОВИМИ ЗБУРЕННЯМИ**

**Л.А. Держипольська, Н.В. Медвідь**

*Інститут Фізики НАН України*

**О.О. Ільїн**

*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій*

Робота присвячена розв'язанню задачі передачі інформації про зміни в просторовому розподілі хвильового фронту оптичного зображення за умов його проходження через шар простору, в якому відбуваються неконтрольовані збурення фази поля по перетину пучка. Пропонується новий підхід, що базується на голографічному принципі компенсації спотворень хвильового фронту на шляху оптичного зображення під час його голографічного запису.

*Ключові слова: голографія, хвильовий фронт, спотворення, інтерференція, збурення, фаза поля.*

В даній роботі ми розглянули новий підхід щодо розв'язання задачі передачі інформації про зміни в просторовому розподілі хвильового фронту оптичного зображення за умов його проходження через шар простору, в якому відбуваються неконтрольовані збурення фази поля по перетину пучка. Таке загальне формулювання включає великий клас практичних задач, пов'язаних із світлолокацією, передачею оптичних сигналів через турбулентні газ чи рідину, проходження зображення через світловодні волокна та джгути тощо.

На важливості розв'язання подібних задач було зроблено акцент ще в перших роботах по голографії і когерентній оптиці [1-5] тощо. Зокрема, суть робіт [1,2] полягає в тому, що на голограмі спочатку записується інформація про спотворююче середовище, із оберненим розподілом цих фазових спотворень по перетину пучка. Відповідно, після проходження зображення через спотворююче середовище і голограму, у результуючому зображенні відфільтровуються непотрібні деформації, і далі вже проходить тільки його інформативна складова. Однак у випадку зміни просторового розподілу спотворень, раніш записана голограма виявляється вже малоефективною.

В іншій схемі [3] і сигнальний і опорний промені під час запису голограми пропускаються крізь середовище із збуреннями одночасно, але під дещо різними кутами (для можливості подальшого розділення дифракційних порядків голографічного зображення). При цьому сигнальний і опорний пучки збурюються дещо по-різному і, в результаті, задача зводиться до попереднього випадку.

Наведені методи компенсації стаціонарних фазових збурень і їх різноманітні варіації, на нашу думку, можуть бути модифіковані на більш складний випадок нестаціонарних фазових збурень. Головна ідея полягає в тому, щоб зробити кінцевий результат відновлення голограми максимально незалежним від наявності цих збурень, начебто їх не існує взагалі. Пропонується під час запису голограми і сигнальний і опорний пучки спрямовувати строго в одному і тому ж напрямку. Тоді, як впливає із рівняння голограми, на отриманий результат не впливає наявність чи відсутність збурень на оптичному шляху, а отже не має значення їх зміна в часі. Розглянемо ці міркування більш докладно.

Нехай комплексна амплітуда поля в оптичному зображенні описується виразом:

$$S = a(x, y) \exp[-i\varphi(x, y)] \quad (1)$$

де  $a(x, y)$  і  $\varphi(x, y)$  – просторовий розподіл амплітуди і фази досліджуваного оптичного сигналу. Поле опорного пучка описується виразом:

$$R = b = \text{Const} \quad (2)$$

Вплив збурень в оптичному тракті сигналу представимо у вигляді просторового розподілу фази в еквівалентному кінцевому транспаранті:

$$D = \exp[-i\psi(x, y)] \quad (3)$$

За таких умов при запису рівняння голограми будуть використовуватись такі позначення:  $SD$  – поле предмета,  $RD$  – поле опорного пучка. Амплітудне пропускання голограми  $T$ , яке вважається пропорційним просторовому розподілу інтенсивності інтерференційного поля сигнального та опорного пучків, визначається виразом:

$$T \sim |SD + RD|^2 = |D|^2 \cdot |S + R|^2 = |S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^* \quad (4)$$

де позначка  $*$  відповідає операції комплексного спряження. Видно, що на отриманий вираз не впливають ніякі фазові спотворення  $D$ , що можуть виникнути на шляху поширення сигналу.

Експериментально розподіл поля (4) може бути реалізований тільки при запису голограми по схемі Габора [6,4], коли і сигнальний і опорний пучки розповсюджуються в одному напрямку. Тільки тоді є підстави вважати, що розподіл збурень  $D$  буде для цих пучків однаковим. Однак слід підкреслити, що при використанні схеми Габора у виразі (4) всі доданки будуть описувати поля, які поширюються в однаковому напрямку. Тому вони будуть певним чином впливати одне на інше, спотворюючи кінцевий результат. Власне, це й було головною перешкодою в застосуванні методу [3]. Тому для позитивного результату потрібно провести очищення кінцевого зображення від такого впливу. Ми пропонуємо робити це за допомогою використання електронно-обчислювальної машини (перший та другий доданки) та інтерферометричного визначення розподілу фази (третій та четвертий доданки).

За наведених теоретичних передумов розглядався модельний експеримент, узагальнена оптична схема якого наводиться на рис.1.

На цій схемі плоска світлова хвиля  $P$  із рівномірним розподілом амплітуди по перетину пучка спрямовується на світлоподільний пристрій  $K$ , який утворює сигнальний  $S$  та опорний  $R$  пучки. Сигнальний пучок освітлює досліджуваний об'єкт у станах з відмінними розподілами фази  $S_1$  та  $S_2$  (поворот об'єкта на кут  $\alpha$ ). Опорний пучок відбивається плоским дзеркалом  $M$  і далі, після світлоподільного пристрою, разом із сигнальним пучком спрямовується на лінзу  $L$ . Ця лінза в площині  $H$  формує голограму Габора у вигляді деякого спекл поля.

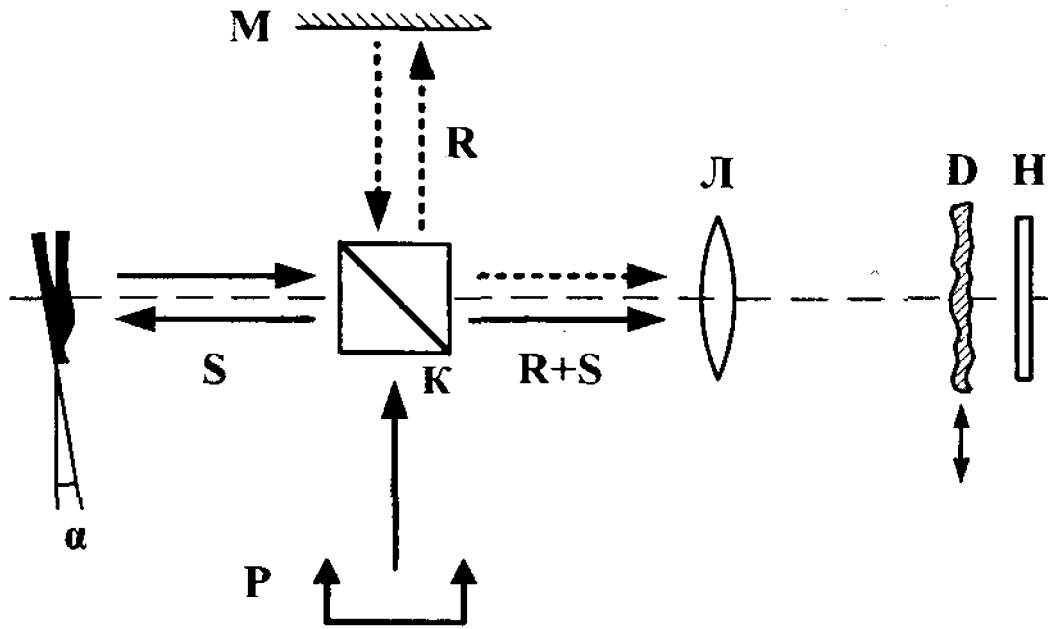


Рис.1. Схема запису голограми

Різні фазові спотворення оптичного тракту ( $D_1$  та  $D_2$ ) моделюються поперечним переміщенням дифузного розсіювача  $D$  з випадковими фазовими зсувами по його перетину. На стадії відтворення, яка схематично зображена на рис.2., плоска хвиля проходить скрізь голограму і утворює пучки пов'язані із станами  $S_1$  та  $S_2$ , що інтерферують між собою, і які не залежать від наявності і впливу розсіювачів  $D_1$  та  $D_2$ . Відтворене зображення реєструється фотодетектором ФД - цифровою телекамерою чи фотокамерою, потім оцифровується і обробляється на комп'ютері ПК.

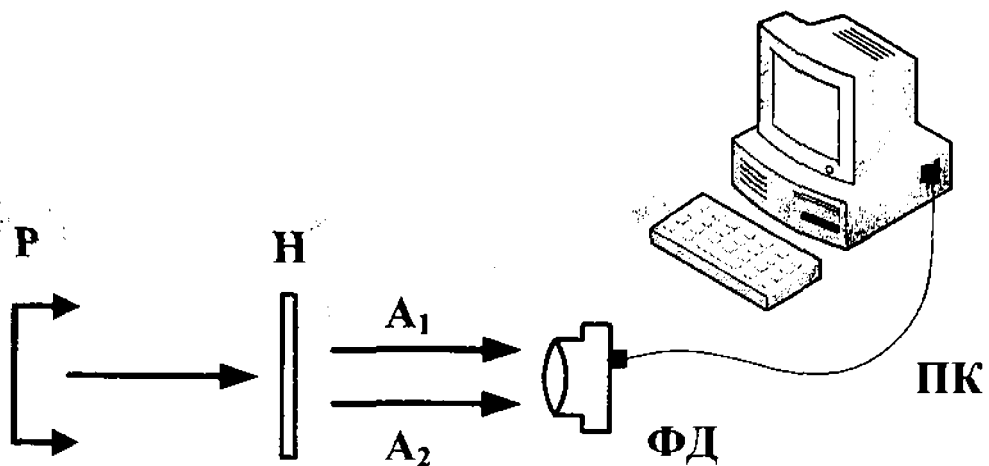


Рис.2. Схема відтворення голограми

При реєстрації на голограмі двох станів об'єкту  $S_1$  та  $S_2$  згідно виразу (4) одержимо, що при відновленні голограми будуть інтерферувати два поля зображень  $A_1$  та  $A_2$ :

$$A_1 = |S_1|^2 + |R|^2 + S_1^*R + S_1R^* \quad \text{та} \quad A_2 = |S_2|^2 + |R|^2 + S_2^*R + S_2R^* \quad (5)$$

де  $S_1$  та  $S_2$  описуються відповідно виразами (6) та (7).

$$S_1 = a(x,y)\exp[-i\varphi(x,y)] \quad (6)$$

$$S_2 = a(x,y)\exp[-i\varphi(x,y) + \Delta] \quad (7)$$

Розподіл фази  $\Delta$  є доданком, що описує зміни хвильового фронту об'єкта, зокрема при його повороті. Отримані згідно виразів (5) зображення утворюють інтерференційні смуги, просторовий розподіл яких визначається розподілом  $\Delta$ :

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= |S_1|^2 + |R|^2 + S_1^*R + S_1R^* + |S_2|^2 + |R|^2 + S_2^*R + S_2R^* = \\ &= 2|S|^2 + 2|R|^2 + R\{a\exp(i\varphi) + a\exp(-i\varphi) + a\exp[i(\varphi + \Delta)] + a\exp[-i(\varphi + \Delta)]\} = \\ &= 2|S|^2 + 2|R|^2 + 2|SR|(\cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta)) \end{aligned} \quad (8)$$

*$4aR \cos(\varphi + \Delta/2) \cos(\Delta/2)$*

Зареєстроване та оцифроване зображення визначається просторовим розподілом інтенсивності для поля (8), тобто  $|A_1 + A_2|^2$ . Аналізуючи доданки цього виразу, ми бачимо в ньому три складові. Головна складається з просторового розподілу функції  $(\cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta))$ , друга пропорційна просторовому розподілу інтенсивності зображення і, нарешті, третя залежить від однорідного засвітлення зображення по його перетину. Друга і третя складові спотворюють просторовий розподіл інтерференційних смуг, який несе інформацію про просторову фазову модуляцію оптичного сигналу. Тому вони фільтруються при електронній обробці зображення.

На рис.3 подані ілюстрації різних етапів алгоритму обробки зображення.. До цифрових зображень об'єкта (шестерня годинникового механізму) рис.3а додавались спотворення хвильового фронту, обумовлені проходженням світлового сигналу від об'єкту через розсіювачі  $D_1$  та  $D_2$ , (де  $D_{1,2} = \exp[-i\psi_{1,2}(x,y)]$  а  $\psi_{1,2}(x,y)$  відмінні просторові функції) та поворотом в другому випадку об'єкту на деякий кут  $\alpha$ , тобто  $\Delta = \alpha x$ , відповідно рис.3б та рис.3в.

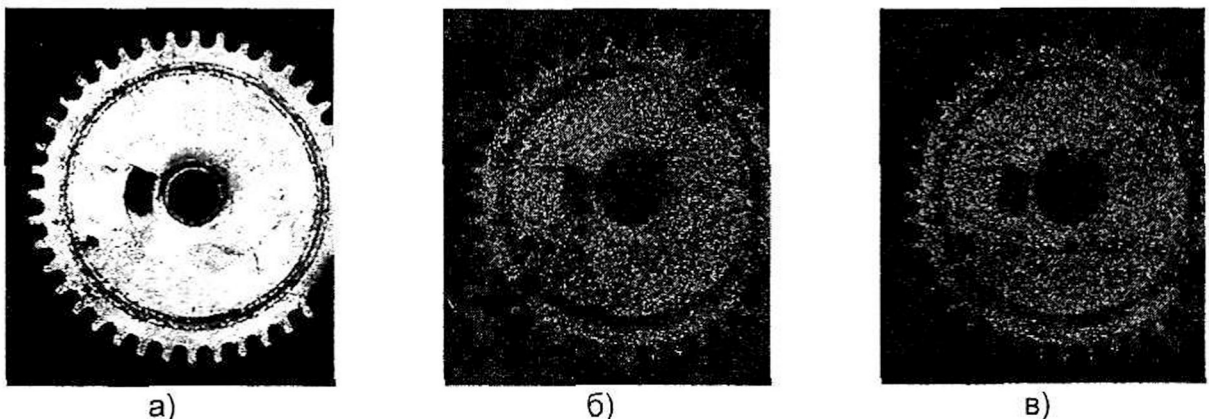


Рис.3. Зображення об'єкта: а – без спотворень, б – спотворене розсіювачем  $D_1$ , в – спотворене розсіювачем  $D_2$  та поворотом на кут  $\alpha$

