

УДК 532

Н.В. Медвідь,

канд. фіз.-мат. наук,
Національний університет
харчових технологій

В.О. Гнатовський,

канд. фіз.-мат. наук,
КНУ імені Тараса Шевченка

А.В. Сидоренко,

ДП «ПІ Укрметротунельпроект»

ФОРМУВАННЯ СКЛАДНИХ РОЗПОДІЛІВ ЛАЗЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ КРОС-КОРЕЛЯЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ ДИФРАКЦІЙНИХ ПОЛІВ

В роботі запропоновано і експериментально досліджено кореляційний метод формування складних розподілів енергії лазерного випромінювання в певній площині. Метод полягає у послідовному проходженні лазерного пучка крізь два модулятора з доволі простими фазовими рельєфами.

Ключові слова: поле дифракції, просторові кореляційні функції, формування лазерних пучків, корелятор.

Для перетворення розподілу енергії лазерного випромінювання в деяких практичних задачах — наприклад, при цілеспрямованому нагріванні біологічних зразків, при маніпулюванні малими частинками в оптичному пінцеті, зазвичай використовують складні дифракційні елементи [1]. Завдяки ним лазерне випромінювання змінює амплітуду і фазу поля по перерізу пучка і утворюється вже новий, потрібний розподіл енергії. Але при необхідності формування складних конфігурацій енергії, структура дифракційних елементів ускладнюється, і вони не завжди можуть бути реалізовані.

Зазначені труднощі спрощуються, якщо лазерний пучок піддається дії не одного, а послідовно двох перетворювачів — двох різних фазових елементів [2]. В роботі розглядається випадок, коли один з них являє собою фазову структуру, в просторовому розподілі якої закодований потрібний розподіл енергії. Другий фазовий елемент, ще більш простої структури, забезпечує декодування цього розподілу енергії.

Оптична схема, що реалізує запропонований метод, фактично являє собою схему корелятора полів від двох дифракційних елементів. При їх зіставленні корелятор сформує результуюче поле з наперед заданим двовимірним розподілом інтенсивності.

Як показано на Рис.1, лазерний пучок розширюється телескопом T і спрямовується на дифракційний елемент (фазовий модулятор) M_2 , в якому закодована складна двовимірною твірною результуючого поля $A(x, y)$. Цей модулятор розташований у передній фокальній площині (x, y) об'єктива O_1 .

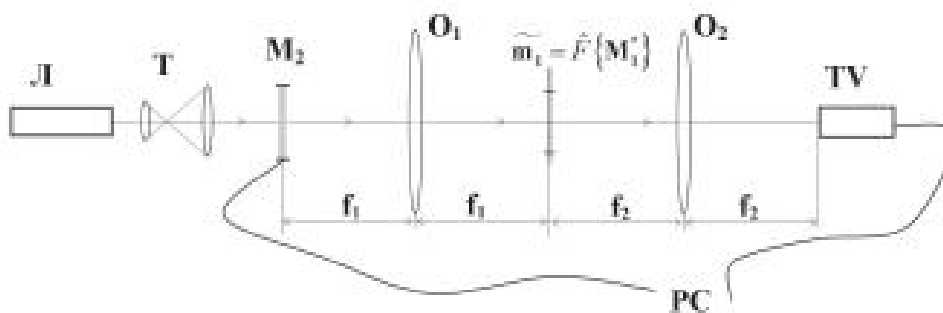


Рис.1. Оптична схема корелятора

У співпадаючих фокальних площинах (ξ, η) першого та другого об'єктивів поле кутового спектру модулятора $m_2 = \hat{F}\{M_2\}$ підлягає декодуванню за допомогою дифракційного елемента M_1 , що визначається кутовим спектром комплексно-спряженої функції пропускання модулятора $\bar{m}_1 = \hat{F}\{M_1^*\}$. В задній фокальній площині (\bar{x}, \bar{y}) другого об'єктива O_2 утворюється і спостерігається запрограмоване зображення $A(\bar{x}, \bar{y})$. Його розподіл енергії $|A(\bar{x}, \bar{y})|^2$ зчитується телекамерою TV і передається на комп'ютер PC для подальшої обробки. В динамічному режимі комп'ютер може керувати просторовим розподілом фазового рельєфу дифракційного елемента M_1 при використанні керованого фазового транспаранта.

Згідно такої схеми, формування потрібного просторового розподілу поля $A(\bar{x}, \bar{y})$ відбувається при перетворенні Фур'є дифракційного поля $d_2(\xi, \eta)$ за допомогою об'єктива O_2 . В свою чергу, дифракційне поле $d_2(\xi, \eta)$, визначається добутком двох розподілів

$$d_2(\xi, \eta) = \bar{m}_1(\xi, \eta) \cdot m_2(\xi, \eta). \quad (1)$$

Структуру модулятора M_1 треба вибирати так, щоб його просторова автокореляційна функція $M_1 * M_1^*$ відповідала фізичному розподілу інтенсивності поля у вигляді різкого дельта-подібного максимуму (точки на рівномірному слабкому фоні). Тому, якщо ми забезпечимо виконання умови

$$m_2(\xi, \eta) = m_1(\xi, \eta) \cdot a(\xi, \eta), \quad a(\xi, \eta) = \hat{F}^{-1}\{A(x, y)\}$$

то одержимо:

$$\hat{F}^{-1}\{d_2(\xi, \eta)\} = (M_1 * M_1^*) \otimes A \approx \delta(x - \bar{x}, y - \bar{y}) \otimes A(x, y) = A(\bar{x}, \bar{y}) \quad (2)$$

У виразі (2) символами $\otimes, *, *$ позначено відповідно операції згортки, кореляції та комплексного спряження.

При створенні результуючого дифракційного поля за допомогою описаної схеми з'являється можливість використовувати для його формування різні пари дифракційних елементів $M_{1,2}$. Дійсно, якщо поле дифракції $m_2(\xi, \eta)$ являє собою кутовий спектр модулятора $M_2 = T \otimes A$, а дифракційний елемент, що декодує поле дифракції має пропускання $\bar{m}_1(\xi, \eta) = \hat{F}\{T^*(x, y)\}$, то, згідно виразу (2), сформований розподіл енергії втратить зв'язок з конкретною структурою модулятора $T(x, y)$. Це дозволяє в повній мірі використовувати функціональні можливості сучасних керованих фазових транспарантів. В такій кореляційній схемі їм достатньо відтворювати нескладні розподіли фази.

Зауважимо також, що пропонується схема є стійкою щодо можливих змін фази поля в її оптичному тракті. Тому що такі зміни еквівалентні заміні просторової автокореляційної функції $T * T^*$ для розподілу $T(x, y)$ на крос-кореляційну функцію $T * \tilde{T}^*$ розподілів $T(x, y)$ і $\tilde{T}(x, y)$, де в $\tilde{T}(x, y)$ враховані можливі спотворення фази. При незначних спотвореннях фази така крос-кореляційна функція все ще буде мати дельта-подібний максимум, але з меншою інтенсивністю. Тому це, хоча і призведе до погіршення співвідношення сигнал-шум, але збереже бажану просторову конфігурацію енергії $|A|^2$.

Оскільки, згідно (1), співмножник $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$ визначається комплексно спряженим розподілом відносно поля M_1 , утворюючись при перетворенні Фур'є поля модулятора M_1 за допомогою об'єктива O_1 , то виникає питання виготовлення транспаранта з пропусканням $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$. В даній роботі ми скористалися тією обставиною, що попередньо записана Фур'є голограма модулятора M_1 , згідно рівняння голограми [3], має в напрямку опорного пучка пропускання саме $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$. Тому в цьому ж напрямку легко здійснити перетворення (1), якщо освітлювати записану голограму полем кутового спектра модулятора M_2 . Але для подальших практичних застосувань методу доцільним буде використовувати або ж штучну голограму поля $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$, в якій забезпечена висока дифракційна ефективність, або ж створити штучний дифракційний елемент з фазовим рельєфом, що відповідає цьому розподілу. При цьому зазначена вище багатоваріантність вибору модуляторів M_1 та M_2 дозволяє вибирати їх за критерієм простоти розподілу рельєфу $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$.

Далі наведено фотографії, які пояснюють кореляційний процес формування потрібних розподілів енергії з використанням голограм.

На Рис.2 (зліва) показані фотошаблони модуляторів M_1 та M_2 , які забезпечують формування двох близько розташованих ліній. В центрі рисунка показані кутові спектри розподілів енергії для цих модуляторів в площині розташування голограми (в задній фокальній площині об'єктива O_1). Справа на Рис.2 зображено утворений розподіл енергії в площині спостереження.

Варто звернути увагу на той факт, що ширина утворених прямолінійних відрізків відповідає дифракційній межі, тобто мінімально можливій. Відстань між відрізками (роздільна здатність) в цьому випадку не перевершує трьох одиниць ширини лінії.

На Рис.3 показано аналогічні фотографії при формуванні більш складної фігури — хреста, накладеного на коло. Вони ілюструють придатність методу для зображення перетину ліній.

Зауважимо, що в обох експериментах, які проілюстровані на Рис. 2 та Рис. 3, використовувався один і той самий модулятор M_1 і, відповідно, голографічний дифракційний елемент $\tilde{m}_1(\xi, \eta)$. Відмінність сформованих розподілів енергії лазерного випромінювання пов'язана тільки з різними просторовими фазовими структурами фотошаблонів M_2 .

Висновки. В роботі експериментально доведена можливість створення хвильових фронтів з заданим розподілом енергії за допомогою дифракційних елементів відносно

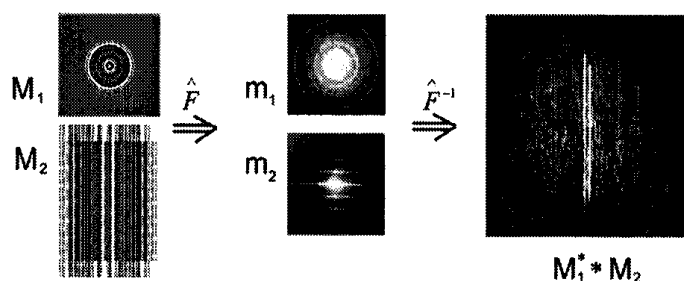


Рис.2.

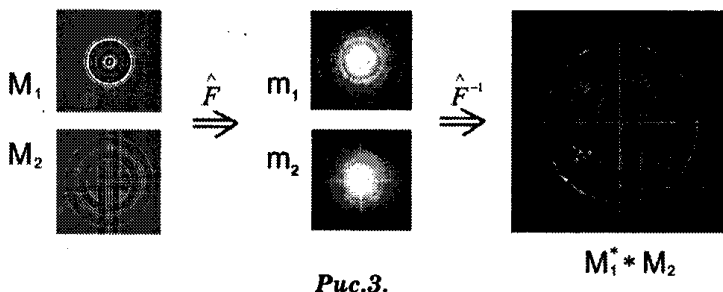


Рис.3.

простої (навіть бінарної) фазової структури. Практично однакові розподіли енергії можна отримати за допомогою багатьох істотно різних модуляторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Методы компьютерной оптики* (под ред. В.А. Сойфера). — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 688с.
2. *Гнатовский А.В., Медведь Н.В., Яровой Л.К.* Кросскорреляционная голография с кодированным опорным пучком (перспективы развития и применения) // *Техника специального назначения*. — 2001. — №1. — С.3 — 6.
3. *Строук Дж.* Введение в когерентную оптику и голографию: Пер. с англ. — М.:МИР,1967. — 347 с.

*Н.В. Медвидь, В.О. Гнатовский,
А.В. Сидоренко*

Формирование сложных разделений лазерной энергии при кросс-корреляционном взаимодействии двух дифракционных полей

В работе предложен и экспериментально исследован корреляционный метод формирования сложных распределений энергии лазерного излучения в некоторой плоскости. Метод заключается в последовательном прохождении лазерного пучка сквозь два модулятора с достаточно простыми фазовыми рельефами.

Ключевые слова: поле дифракции, пространственные корреляционные функции, формирование лазерных пучков, коррелятор.

*N. Medvid, V. Gnatovskyy,
A. Sydorenko.*

Forming of complex laser energy distributions under cross-correlation interaction of two diffraction fields

The article offers the correlation method for forming of complex laser energy distribution in some plane. The method lies in forming of the necessary final configuration of laser beam by means of two stage diffraction — a simple first-stage diffraction field is then diffracted on another simple diffraction element. Thus the resulting field can be described as a product of two functions. The Fourier transform of this field is defined by spatial cross-correlation function of phase structures of modulators used for forming the two diffraction fields.

Proposed method gives an opportunity to use relatively simple diffraction elements in optical scheme. In this work a transparency with coded dot in it acts as a first modulator. It looks similar to Fresnel-zone plate. Another transparency corresponds to generator of energy distribution on a target. Correlation interaction of diffraction fields formed by such modulators results in field with required complex energy distribution.

Practically useful feature of described method is a possibility to use computer-controlled phase transparencies in optical scheme and to perform dynamic transformation of obtained laser field.

Key words: diffraction field, spatial correlation function, laser beam forming, correlator.

e-mail: jimp@ukr.net

Надійшла до редколегії 12.04.2012 р.