

USE OF CORRELATION TECHNIQUES IN DIFFRACTION ON PERIODIC STRUCTURES

V. Gnatovskiy

Taras Shevchenko National University

N. Medvid'

National University of Food Technologies

Key words:

*Correlation of fields
Multiplication of beams
Periodic structures
Variable phase profile
Switching of optical channels*

Article history:

Received 01.09.2016

Received in revised form
15.09.2016

Accepted 07.10.2016

Corresponding author:

V. Gnatovskiy

E-mail:

vgnatovskyy@ukr.net

ABSTRACT

The correlation method of formation of laser beams was investigated. It consists of transforming the input beam sequentially through two or more phase modulators of a wavefront. The one-dimensional case is considered where modulators are light interference gratings illuminating one or two diffraction gratings having a sinusoidal phase profile. The proposed method increases the number of influence factors to control the formation of the output beam by means of shifts and variances of the relief depth. This method allows the transfer of energy from the left diffraction order to the right one and vice versa. Using the two phase gratings gives us the possibility to synthesize sawtooth or meander periodic wavefront profiles at the system output.

ЗАСТОСУВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МЕТОДИКИ ПРИ ДИФРАКЦІЇ НА ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУРАХ

В.О. Гнатовський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Н.В. Медвідь

Національний університет харчових технологій

У статті досліджено кореляційний метод формування лазерних пучків, що полягає в послідовному перетворенні початкового пучка за допомогою двох або більше фазових модуляторів його хвильового фронту. Розглянуто випадок одновимірної задачі, коли модулятори вибирались у вигляді світлової інтерференційної решітки, що освітлювала одну або дві дифракційні решітки із синусоїдальним фазовим профілем. Запропонований метод збільшує кількість факторів впливу на формування вихідного пучка завдяки можливості взаємних поперечних зсувів решіток і варіації їх глибини рельєфу, дозволяє здійснювати перекачку енергії з лівого дифракційного порядку в правий і навпаки. У випадку двох фазових решіток показано можливість синтезу на виході оптичної системи пилоподібного або ж меандрового періодичних профілів хвильового фронту.

Ключові слова: кореляційна взаємодія полів, мультиплікація пучків, періодичні структури, змінний фазовий профіль, просторове і часове переключення оптичних каналів.

Постановка проблеми. Періодичні дифракційні елементи вже давно використовуються для перетворення світлових пучків. Загальновідома роль дифракційної решітки, що розділяє світловий монохроматичний пучок на декілька вторинних. Залежно від структури окремого штриха решітки можна підсилувати, зменшувати або вирівнювати інтенсивності дифракційних порядків [1; 2].

Застосування об'ємних решіток розширило сфери їх застосування, насамперед для змін сформованих пучків у часі. Зокрема, можна згадати застосування акусто-оптичних дефлекторів (із застосуванням кореляційної техніки [3]). Згадані методи використовують схему з вхідною плоскою хвилею, а утворені пучки являють собою дифракційні порядки. Їх інтенсивність і розміщення визначаються розміром і фазовим профілем окремого штриха решітки.

Подальшим розвитком можна вважати задачі динамічної голографії, коли інтерференційне поле утворює світлову решітку в динамічному нелінійному середовищі [4; 5]. Решітка може зсуватися в поперечному напрямку відносно інтерференційного поля, що призводить до перекачування енергії між дифракційними порядками. В цьому методі корисний ефект визначається і обмежується суто властивостями нелінійного середовища і тому має певні обмеження.

У пропонованій статті досліджується підхід, що являє собою певний синтез класичної дифракції на періодичній структурі, і можливість вже цілеспрямованого поперечного зміщення двох (і більше) періодичних фазових структур. При цьому ми орієнтуємося на використання ЕОМ і керованих ними фазових транспарантів типу СЛМ. Підхід розвиває ідеї [6] щодо керування лазерним пучком на випадок періодичних структур, має практичні переваги як перед першим прототипом в частині збільшення маневру вхідним пучком, так і перед другим прототипом в частині передбачуваної керованості зсувом і профілем штрихів решіток. По суті, ідея полягає в заміні досить складного експериментального інструментарію динамічної голографії на прості та передбачувані оптичні елементи — плоскі періодичні фазові решітки.

Мета дослідження: збільшити кількість факторів для керування сформованим полем і спростити структури використаних решіток.

Виклад основних результатів дослідження. Дослідження ґрунтується на задачі, коли дифракційна фазова решітка освітлюється інтерференційним полем і може зсуватися відносно нього в поперечному напрямку [7]. Тобто є вхідне світлове поле і перетворюючий транспарант, які мають періодичну структуру.

Розподіл фази в полі і в транспаранті можуть задаватися періодами, структурою фази в окремому штриху і взаємним зсувом елементів. Врахуємо також можливість замінювати розподіл вхідного поля на його фазовий аналог, що формує «еквівалентне» вхідне поле. Також врахуємо можливість синтезу складного фазового рельєфу у вихідному періодичному полі при використанні декількох послідовно розміщених решіток.

При цьому важлива відсутність детермінованого зв'язку у розподілі фазових профілів вхідного поля та дифракційної решітки. Це розширює діапазон алгоритмів для мультиплікації, сканування і комутації сформованих

пучків. Структури, розміщення і взаємний зсув транспарантів для окремих конкретних задач можуть бути знайдені в результаті розрахунків на ЕОМ.

Передумови досліджень для визначення змін у синтезованих дифракційних порядках. Розглядаються два алгоритми формування періодичних полів: 1) інтерференційне світлове поле \rightarrow решітка і 2) решітка (як еквівалент інтерференційного поля) \rightarrow решітка. Для обох алгоритмів загальна схема кореляційного методу формування пучків показана на рис.1.

За цією схемою дві вхідні плоскі хвилі I_1 та I_2 сходяться під кутом θ і формують в площині (x, y) інтерференційне світлове поле M_1 . (При другому алгоритмі M_1 являє собою періодичний транспарант). Поле, утворене M_1 , освітлює решітку M_2 . Періоди M_1 і M_2 можуть бути рівними або ж кратними один одному. Періодичний розподіл поля на вході системи перетворюється в набір дифракційних порядків на її виході в задній фокальній площині (ξ, η) об'єктива O . Позначки вздовж осі ξ для кожного із синтезованих таким чином дифракційних порядків вихідного поля показують, які, взяті окремо, поля пучків I_1 та I_2 після решітки M_2 інтерферують в площині (ξ, η) . Інтенсивність кожного вихідного порядку дифракції буде змінюватися при поперечному зсуві M_2 відносно M_1 за рахунок додаткового набігу фази в складових, що його утворюють. Результати контролюються і вимірюються за допомогою ТВ-камери і ЕОМ.

Головна ідея полягає в тому, щоб утворити «зв'язану» систему полів решіток M_1 та M_2 . У такій зв'язаній системі кожний порядок дифракції на виході утворюється внаслідок інтерференції парціальних хвиль кожної з решіток. Це надає можливість змінювати інтенсивність світла в кожному вихідному дифракційному порядку.

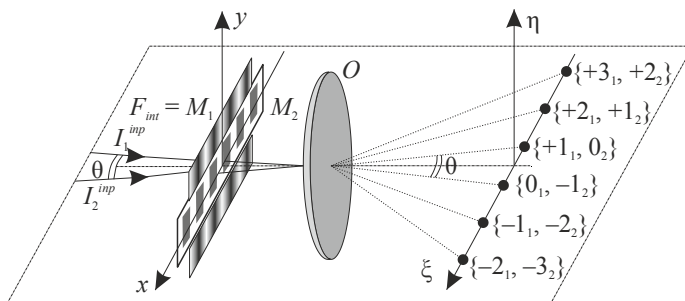


Рис. 1. Оптична схема у кореляційному методі формування пучків для двох періодичних структур

Для досліджень була створена комп'ютерна програма розрахунків і експериментальний стенд. У програмі була закладена можливість використання декількох решіток з довільними віддаленнями та поперечними зсувами одна від іншої. Формування порядків дифракції відбувалось за рахунок впливу поля модулятора M_1 на наступний M_2 . Передбачалися незалежні поперечні зсуви модуляторів і зміна глибини їх фазової модуляції.

Самі ж поля розраховуються за формулами [9] в рамках скалярної теорії дифракції, яка пов'язує розподіл світлового поля в певній площині з його зміною після проходження довільного шару середовища, що має певний розподіл показника заломлення в поперечному напрямку.

Математичний опис, задіяний у програмі. Інтерференційне поле утворюється двома пучками I_1^{inp} і I_2^{inp} :

$$\vec{E}_{1,2} = \vec{E} \exp\left[i\left(\vec{k}_{1,2}\vec{r} - \omega t + \varphi_{1,2}\right)\right], \quad \vec{E} = (0, E, 0), \quad (1)$$

де ω — частота випромінювання; $\vec{k}_{1,2}$ — хвильові вектори пучків; $\varphi_{1,2}$ — їх фази. Хвильові вектори пучків мають компоненти $\vec{k}_{1,2} = (\pm k \sin(\theta/2), 0, k \cos(\theta/2))$. Якщо $\varphi_1 = 0$, а $\varphi_2 = \pi$, тоді в площині (x, y) (при $z = 0$) одержимо поле з напруженістю:

$$\vec{E}_{int}(x) = 2\vec{E} \sin(k \sin(\theta/2)) \exp\left[-i(\omega t - \pi/2)\right]. \quad (2)$$

Кут сходження пучків вибираємо таким, щоб на апертурі L укладалось ціле число періодів поля N .

Напруженість результуючого поля вздовж осі x пропорційна

$$\vec{E}_{int}(x) \propto \sin(2\pi Nx/L), \quad (3)$$

а його інтенсивність пропорційна

$$F_{int} \propto \left[\sin(2\pi Nx/L)\right]^2. \quad (4)$$

Інтерференційне поле використовується для запису (і подальшого виготовлення) решітки із синусоїдальним фазовим рельєфом, що має комплексне пропускання:

$$t(x) = \exp\left[i\frac{m}{2}\sin(2\pi N_1 x/L)\right]. \quad (5)$$

Результати модельних експериментів. Нижче наведено сценарії мультиплікації та керування інтенсивністю вихідних пучків у випадку, коли перетворювалось поле (3) за допомогою дифракційних решіток (5). (Згідно з [8], інтерференційне поле (3) можна замінити його фазовим еквівалентом. Програма розрахунків дозволяє вираховувати це безпосередньо).

На рис. 2 для поля першого модулятора M_1 було вибране значення $N = 50$.

Для другого модулятора M_2 $N_1 = 100$, глибина модуляції $m = \frac{\pi}{1,8}$.

У лівій колонці (рис. 2) подані розподіли інтенсивності в дифракційних порядках вихідного поля. В правій колонці показані розподіли фази одразу після M_2 . Зверху (рис. 2) наводиться кутівий спектр модулятора M_2 .

При поперечному зсуві поля відносно решітки відбувається вирівнювання інтенсивності дифракційних порядків, а потім перекачування лівого в правий. Після зсуву інтерференційного поля праворуч на чверть періоду (на $\pi/2$), що відповідає півперіоду фазової решітки, відновлюється початкове співвідношення інтенсивності ($\approx 17\%$), але вже для правого максимуму.

Аналізуючи розподіл фази у вихідному пучку можна стверджувати, що утворити його за допомогою традиційної дифракційної решітки із складним профілем окремого штриха майже нереально, не кажучи вже про одночасну реалізацію всіх трьох сценаріїв при зсуві лише однієї решітки.

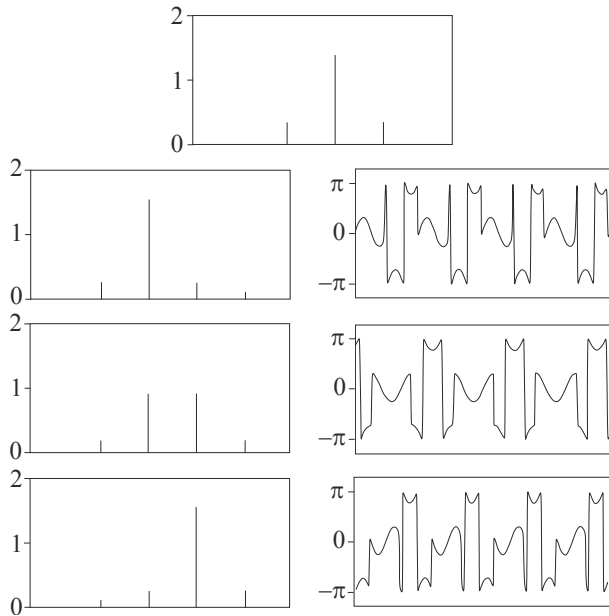


Рис. 2. Дифракція інтерференційного поля на ґратці з фазовим профілем $\Delta n \sim \sin^2(x)$

На рис. 3 наведені результати розрахунків для більш складного випадку, коли інтерференційне поле (3) освітлює дві ґратки (5), що розміщені із зсувом $\Delta z = L/7$ вздовж осі OZ . Параметри ґраток $m = \frac{\pi}{2}$, $N_{1,2} = 100$.

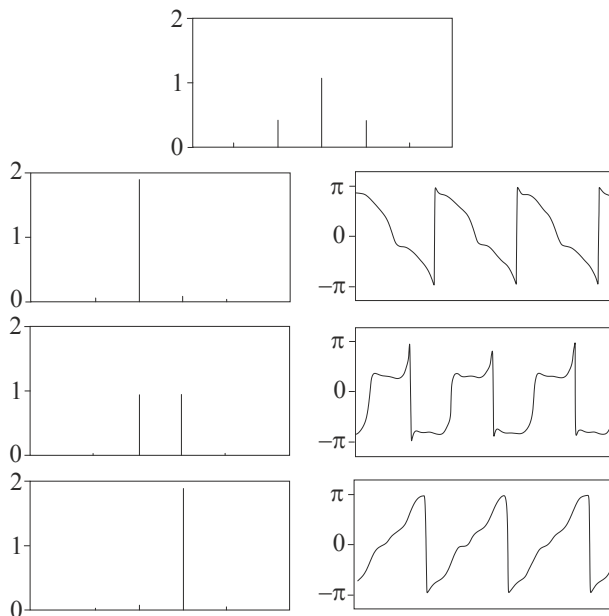


Рис. 3. Дифракція інтерференційного поля на фазовому «сандвічі» з двох однакових ґраток із синусоїдальним фазовим профілем

Зверху (рис. 3) наводиться кутовий спектр поля «сандвіча» $M_2 + M_3$ (тобто при відтворенні його плоскою хвилею). Поле (3) зсувалося від нуля до чверті періоду праворуч, тобто на $\pi/2$. При цьому лівий інтенсивний максимум зменшувався, сусідні піки вирівнювалися, потім зростав правий пік. Співвідношення інтенсивності піків сягало $\sim 96\%$.

Розрахунок рельєфу хвильового фронту на виході системи поданий у правій колонці (рис. 3). При поперечному зсуві розподіли фази набувають пилоподібного або ж меандрового профілів. Зауважимо, що заміна «сандвіча» на одну решітку, але з подвоєною глибиною рельєфу, дає перекачку енергії з гіршими співвідношеннями інтенсивності.

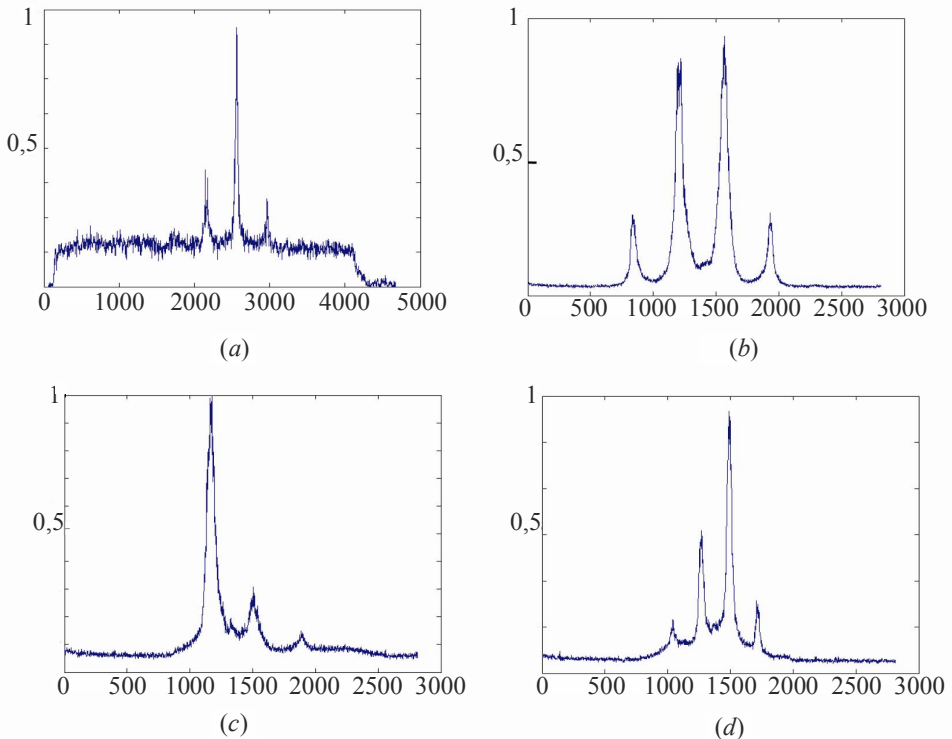


Рис. 4. Експериментальні вимірювання кутових спектрів синусоїдальної фазової решітки при кореляційному формуванні пучків: (a) — кутовий спектр самої решітки; (b) — дифракція інтерференційного поля на ній без зсуву; (c) — підсилення лівого головного дифракційного порядку; (d) — підсилення правого порядку

Теоретичні розрахунки перевірялись експериментально. Неперервне випромінювання гелій-неонового лазера ($\lambda = 633$ нм), або ж одномодового двочастотного напівпровідникового лазера ($\lambda = 532$ нм) розширювалося телескопічною системою і фільтрувалося за допомогою системи діафрагм. Сформований пучок з рівномірним розподілом енергії по перетину і плоским хвильовим фронтом спрямовувався на світло-подільний устрій, який утворював два пучки і забезпечував точне регулювання кута сходження між ними. Ці пучки формували інтерференційне поле, яке використовувалось для запису дифракційної решітки

або для освітлення попередньо виготовлених решіток. Потрібні зміни періоду інтерференційного поля і решітки досягались зміною кута сходження. Так, результати, наведені на рис. 4, були одержані при куті сходження в декілька кутових хвилин, що відповідає періоду інтерференційних смуг близько 100 мкм.

Висновки

Застосування кореляційної методики до перетворення лазерних пучків періодичними структурами розширює діапазон можливостей при мультиплікації і переорієнтації окремих пучків. У практичному плані це надає можливість реалізовувати різноманітні сценарії переміщення і переключення світлових каналів у часі. При цьому можлива цілком передбачувана градація інтенсивностей окремих сформованих пучків. З точки зору теорії кореляційний підхід надає можливість моделювати складні просторові розподіли показника заломлення в об'ємних середовищах з метою порівняння розподілу фази на виході зразка при теоретичних розрахунках і експериментальних спостереженнях. Перевагою є також можливість утворювати досить складні розподіли фази у вихідному пучку за допомогою небагатьох простих фазових структур. Корисною є можливість використовувати одні й ті ж самі фазові елементи для утворення різної конфігурації вихідних пучків.

Література

1. *Soifer V.A.* Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation / V.A. Soifer, V. Kotlar, L. Doskolovich. — London: Taylor Francis Ltd, 1997. — 250 p.
2. *Микляев Ю.В.* Методика расчетов ДОО / Ю.В. Микляев, В. Имгрунт, В.С. Павельев, В.А. Сойфер, В.Г. Качалов, В.А. Ерополов, Л. Ашке, М.В. Большаков, В.Н. Лисоченко // Компьютерная оптика. — 2011. — Т. 35. — С. 42.
3. *Гнатовский А.В.* Голографическая коррекция искажений акустооптического модулятора в фоторефрактивных кристаллах / А.В. Гнатовский, В.П. Вербицкий, Н.В. Кухтарев, В.И. Маглеваний, А.С. Пигида // УФЖ. — 1993. — Т. 38. — № 3. — С. 71.
4. *Винецкий В.Л.* Динамическая голография / В.Л. Винецкий, Н.В. Кухтарев. — Киев: Наукова думка, 1983. — 125 с.
5. *Odoulov S.* Oscillators with Degenerate Four-Wave Mixing / S. Odoulov, M. Soskin, A. Khyzhnyak. — London: Harwood Academic Publishers, Chur, 1991. — 247 p.
6. *Gnatovskyy V.O.* Angular spectra of phase diffraction gratings illuminated by interference field / V.O. Gnatovskyy S.A. Bugaychuk, A.M. Negriyko, I.I. Pryadko, A.V. Sidorenko // International Conference on Advanced optoelectronics and Lasers, CAOL 2013. In IEEE Catalog Number CFP 13814 — CDR. — 2013. — P 378—380.
7. *Bugaychuk S.A.* Multiplication and communication of laser beams under crosscorrelation interaction of periodic fields / S.A. Bugaychuk, V.O. Gnatovskyy, A.M. Negriyko, I.I. Pryadko // Ukr. J. Phys. — 2016. — V. 61, # 4. — P. 311—317.

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МЕТОДИКИ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

В.А. Гнатовский

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка

Н.В. Медведь

Национальный университет пищевых технологий

В статье исследован корреляционный метод формирования лазерных пучков, который состоит в последовательном преобразовании начального пучка при

помощи двух или более фазовых модуляторов волнового фронта. Рассматривается случай одномерной задачи, когда модуляторы выбирались в виде световой интерференционной решётки, которая освещала одну или две дифракционные решётки с синусоидальным фазовым профилем. Предложенный метод увеличивает число факторов воздействия на формирование выходного пучка за счёт их поперечных смещений и вариаций глубиной рельефа, позволяет осуществлять перекачку энергии из левого дифракционного порядка в правый и наоборот. Для двух фазовых решёток показана возможность синтеза на выходе оптической системы пилообразного или же меандрового периодических профилей волнового фронта.

Ключевые слова: корреляционное взаимодействие полей, мультипликация пучков, периодические структуры, изменяемый фазовый профиль, пространственное и временное переключение оптических каналов.