

AUTOMATION OF DIFFRACTION MEASUREMENTS OF SMALL DISPLACEMENTS BY THE MEANS OF SENSOR APERTURE MODULATION

N. Medvid

National University for Food Technologies

O. Gnatovskyi, I. Levchii, A. Sidorenko

Institute of Physics, NAS Ukraine

Key words:

Synthesized angular spectrum
Aperture modulation
Secondary diffraction maxima
Increased sensitivity

Article history:

Received 09.11.2023
Received in revised form 24.11.2023
Accepted 07.11.2023

Corresponding author:

N. Medvid

E-mail:

medvidnv17@gmail.com

Citation: Н. В. Медвідь, О. В. Гнатовський, І. Д. Левчій, А. В. Сидоренко (2023). Автоматизація дифракційних вимірювань малих переміщень при модуляції апертури сенсора. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 82—92.
DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-8

ABSTRACT

Wide implementation of various measurement processes is impossible without the use of automation processes of such measurements. In this work on the example of small movements using diffraction sensors, a new concept of automation of measurements was considered. In it, the main attention is paid to the purposeful creation of diffraction distributions of the field, from the very beginning oriented to the use of mass automated systems, regardless of the specification of the optical scheme of the sensor.

Cases were considered and studied when the angular spectrum of the diffraction grating — sensor, obtained under conditions of illumination by a conventional interference field, is replaced by illumination by a synthesized periodic field with a more complex amplitude. It is formed with the help of additional amplitude and phase spatial modulators with distinct periods and stroke structures. This leads to the enrichment of the angular spectrum of the sensor.

Possible combinations of additional modulators and their influence both on the general configuration of the formed angular spectrum and on the distribution and dynamics of changes in the intensity of the newly formed diffraction maxima during transverse movements of the sensor array within its period are described in the paper.

The conditions were investigated, when the changes in the integral intensity of the maxima within different sections of the spectrum are well correlated with the changes in the individual usual diffraction maxima of the sensor during its transverse movements.

At the same time, the expansion of the range for measurements makes it possible to apply a new algorithm for processing the received data, as well as to choose areas of the formed spectrum that are convenient for measurements. This allows increasing the sensitivity of measurements several times

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-8

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПРИ МОДУЛЯЦІЇ АПЕРТУРИ СЕНСОРА

Н. В. Медвідь

Національний університет харчових технологій

О. В. Гнатівський, І. Д. Левчій, А. В. Сидоренко

Інститут фізики НАНУ

Широке впровадження різноманітних процесів вимірювань неможливе без застосування процесів автоматизації таких вимірювань. У статті на прикладі надмалих переміщень з використанням дифракційних сенсорів розглянуто нову концепцію автоматизації вимірювань. Головна увага приділяється цілеспрямованому створенню дифракційних розподілів поля, із самого початку орієнтованих на використання масових автоматизованих систем безвідносно від конкретизації оптичної схеми сенсора.

Розглядалися і вивчалися випадки, коли кутовий спектр дифракційної решітки — сенсора, отриманого в умовах освітлення звичайним інтерференційним полем, замінюється на освітлення синтезованим періодичним полем із більшою складною комплексною амплітудою. Вона утворюється за допомогою додаткових амплітудних і фазових просторових модуляторів з відмінними періодами і структурами штриха. Це призводить до збагачення кутового спектра сенсора.

Вивчалися можливі комбінації додаткових модуляторів і їх вплив як на загальну конфігурацію утвореного кутового спектра, так і на розподіл та динаміку змін інтенсивності новоутворених дифракційних максимумів при поперечних переміщеннях сенсорної решітки в межах її періоду.

Досліджено умови, за яких зміни інтегральної інтенсивності максимумів у межах різних ділянок спектра добре корелюють зі змінами окремих звичних дифракційних максимумів сенсора при його поперечних переміщеннях. Водночас розширення діапазону для вимірювань надає можливість застосувати новий алгоритм обробки одержаних даних, а також вибирати зручні для вимірювань ділянки утвореного спектра. Це дає змогу підвищити чутливість вимірювань у декілька разів.

Ключові слова: синтезований кутовий спектр, аподизація апертури, вторинні дифракційні максимуми, підвищення чутливості.

Постановка проблеми. Широке впровадження різноманітних процесів вимірювань неможливе без застосування процесів автоматизації таких вимірювань.

У пропонованій статті на прикладі використання дифракційних сенсорів для вимірювання надмалих переміщень ми пропонуємо і досліджуємо нову методику для вимірювань малих поперечних переміщень. У ній головна увага звертається на цілеспрямоване утворення складних розподілів дифракційного поля на апертурі сенсора переміщень, сприйнятливих для автоматизованої обробки одержаних даних.

При цьому відбувається певне усереднення спектральної густини дифракційного розподілу і, відповідно, урізноманітнення розподілів точок знімання інформації. Це дасть змогу задіяти нові варіанти знімання й обробки даних, на відміну від дещо прямолінійного способу вимірювання окремих дифракційних розподілів енергії сенсора, характерної для відомих схем. Ми досліджуємо можливий шлях до цього, який полягає в ускладненні комплексної амплітуди поля, що освітлює апертуру сенсора шляхом її штучної амплітудної та фазової модуляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка ефективних дифракційних модуляторів лазерного випромінювання залишається актуальним і складним технічним завданням, попри всі досягнення дифракційної оптики (Wei, Chenglong, & Maogin, 2013; Gao, Wang, & Zhuang, 2011; Maogin, Wei, & Kai 2017). До цієї проблеми дотична також кореляційна і голографічна методика (Ruane, 2016; Rosen, Bulbu, & Rai, 2019), яка приділяє увагу відносній простоті та доступності відповідних вимірювачів (Bugaychuk, Gnatovskyy, & Phyadko, 2016; Gnatovskyy, Bugauchuk, & Sidorenko, 2013).

Загалом, дифракція оптичних пучків на амплітудо-фазових дифракційних оптичних елементах (в т. ч. голографічних) вже багато часу вивчається в оптиці (Collier, 2013). Отримані результати знайшли впровадження в різноманітних галузях промисловості та науки. Наприклад, застосування ефекту Тальбота (Kim, 2011), інтерферометра Bonse-Hart (Han, Gonella, & Patel, 2013), муарового інтерферометра (Sarenas та ін., 2018) стали передосновю при створенні новітніх нейтронних інтерферометрів у дослідженнях структури і властивостей зразків, для проведення високоточних вимірювань прискорення вільного падіння тощо.

Однак у вищезгаданих та інших дослідженнях (Vijayakumar, & Bhattachar, 2015; Bouzid, Haddadi, & Forbes, 2017) функція дифракційної решітки обмежується роллю транспаранта з періодичним комплексним розподілом амплітуди на апертурі при освітлені її плоскою хвилею.

Мета статті: дослідити оптичну систему з декількох послідовно розміщених дифракційних решіток, в якій одна з них застосовується як сенсор при вимірюванні надмалих поперечних переміщень.

Матеріали і методи. Використовувались теоретичні й експериментальні методи Фур'є-оптики. Проводились математичне та комп'ютерне моделювання дифракційних полів.

Результати дослідження. Методи і схеми. Був досліджений алгоритм ускладнення розподілу комплексної амплітуди входної апертури сенсора за рахунок її попередньої амплітудної та фазової модуляції додатковими решітками.

Така модуляція змінює динамічні характеристики для дифракційних резонансів, які виникають в утворюваній системі при переміщенні сенсорної решітки. Кількісна оцінка зміни дифракційних резонансів системи дає змогу виявити їх вплив на чутливість сенсора до переміщень в умовах спрощення й автоматизації вимірювань.

В основу досліджень покладений принцип ускладнення пропускання апертури сенсора. У найпростішому випадку це може бути ситуація, коли сенсор освітлюється полем іншої решітки або ж інтерференційним полем двох плоских хвиль. В

обох випадках (при взаємному поперечному зсуві двох решіток чи при зсуві інтерференційного поля відносно сенсора) відбувається зміна розподілу поля на апертурі сенсора переміщень.

Згідно з теоремою про зміщення (Goodman, 1996), в кутовому спектрі сенсора проявляться додаткові зміни, які залежать від характеристик новоутвореного поля на апертурі сенсора. Це призводить до відмінностей спектрів сенсорної решітки за відсутності модуляції її апертури та за наявності такої модуляції. Ця відмінність буде залежати від змін поля на апертурі, зокрема при переміщенні сенсора, тобто може використовуватися для вимірювань переміщень.

Теоретичні передумови. Зазвичай, дифракційна решітка застосовується у випадках її освітлення плоскою світловою хвилею, що має рівномірний розподіл C комплексної амплітуди по апертурі решітки. Тому утворений нею набір дифракційних максимумів в Фур'є-площині (кутовий спектр) описується як згортка Фур'є-образу плоскої хвилі δ з Фур'є-образом a комплексної амплітуди A пропускання самої решітки.

$$\{\hat{F}(CA)\} = \delta \otimes a = a \quad (1)$$

Цілеспрямоване ускладнення пропускання апертури решітки за допомогою додаткового просторового модулятора M (додаткових решіток) змінює цей алгоритм. У виразі згортки замість δ -функції виникає спектр модулятора m :

$$\{\hat{F}(MA)\} = m \otimes a \quad (2)$$

Формально це можна трактувати як заміну штриха початкової решітки на керований профіль штриха в новій решітці.

Моделювались різноманітні умови, що забезпечували просторову модуляцію M діючої апертури сенсорної дифракційної решітки.

Використані розрахунки базуються на відомих співвідношеннях хвильової оптики та скалярної теорії дифракції. Розглядались розподіли поля, утворювані фазовими решітками синусоїдального та прямокутного профілю:

$$\begin{aligned} M_{\sin i} &= \exp[i(m/2) \cdot (\sin(2\pi N_i x/A))]; \\ P_{\text{rect } j} &= \exp[i(\pi/2) \text{sgn}(\sin(2\pi N_j x/A))], \end{aligned}$$

де N визначає кількість періодів решітки на апертурі A в стартовій площині P_1 .

Зв'язок між розподілами полів (Goodman, 1996; Конончук, Прокопєць, & Стукаленко, 2010) в площинах P_1 та P_2 для двох послідовно розміщених на відстані z решіток $U(\xi, \eta, 0)$ та $U(x, y, z)$ визначався як

$$U(x, y, z) = \frac{kz}{2\pi i} \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{\exp[ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}]}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta. \quad (4)$$

Згідно з (4) рахувалося поле в площині P_2 , яка розміщувалась попереду чи позаду відносно початкової площини базової решітки P_1 з розподілами поля (3). Таку операцію можна повторювати декілька разів для послідовно розміщених площин, які включають площину P_n і відстань Z_n до наступної площини P_{n+1} .

Обчислювались розподіли енергії та її зміни для полів з різними комбінаціями площин та їх розміщень, які потім освітлювали апертуру сенсорної решітки.

Розрахункова база. Для чисельних моделювань були створені комп'ютерні програми для розрахунку проходження електромагнітних хвиль крізь амплітудні і фазові періодичні елементи або систему таких елементів (модуляторів) з можливістю зміни їх взаємного розташування, зміщення один відносно іншого, зміни періоду та профілю фазового штриха.

Функціональна оптична схема. Оптична схема дослідів показана на рис. 1, де позначені функціональні блоки-транспаранти *Int*, *Dg₂*, *ФМ*, *АМ*. Це полегшує окремо досліджувати їх внесок у результуючий розподіл кутового спектру вихідного пучка.

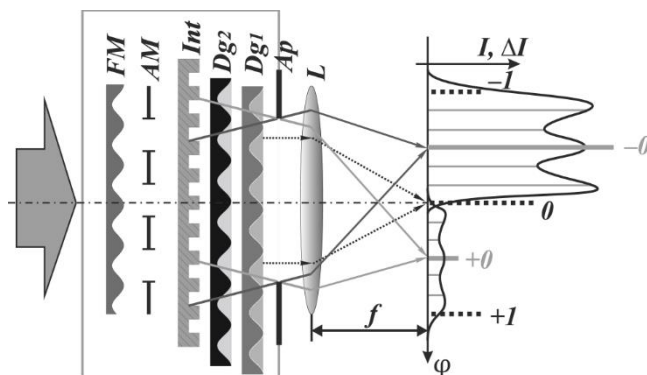


Рис. 1. Функціональна оптична схема дифракційного сенсора *Dg₁* при модуляції його апертури *Ap* додатковими модуляторами *Int*, *Dg₂*, *ФМ*, *АМ*. Лінза *L* виконує Фур'є-перетворення поля на апертурі *Dg₁*.

Головним вимірювальним елементом дифракційної системи є сенсор у вигляді фазової решітки *Dg₁*, яка знаходиться в механічному контакті з досліджуванним об'єктом переміщення. Оскільки чутливість до поперечного переміщення визначається величиною періоду сенсорної решітки *Dg₁*, то для підвищення чутливості доцільно використовувати решітки з якнайменшими розмірами окремого штриха.

На новоутворений модуляторами розподіл поля діє Фур'є-перетворення лінзою *L*. Одержаний розподіл енергії *I* в дифракційних порядках та зміни енергії ΔI в них при зміщеннях *Dg₁* спостерігаються та фіксуються в її фокальній площині φ . Далі іде каскад вимірювання та цифрової обробки ПК.

Зміни поля сенсора при його переміщенні відбуваються відносно певних розподілів поля. Ці розподіли в найпростішому випадку створюються періодичними полями решітки *Dg₂*, та/або *Int*. Їх початкові позиції утворюють стартовий розподіл поля в спектрі сенсора *Dg₁*. Подальше ускладнення спектра відбувається за допомогою додаткової амплітудної *АМ* та фазової *ФМ* модуляції апертури *A* сенсора. Фазова модуляція забезпечує розмноження кожного з дифракційних порядків стартового розподілу спектра, а амплітудна — заповнює проміжки між новоутвореними порядками додатковими періодичними максимумами (рис. 2).

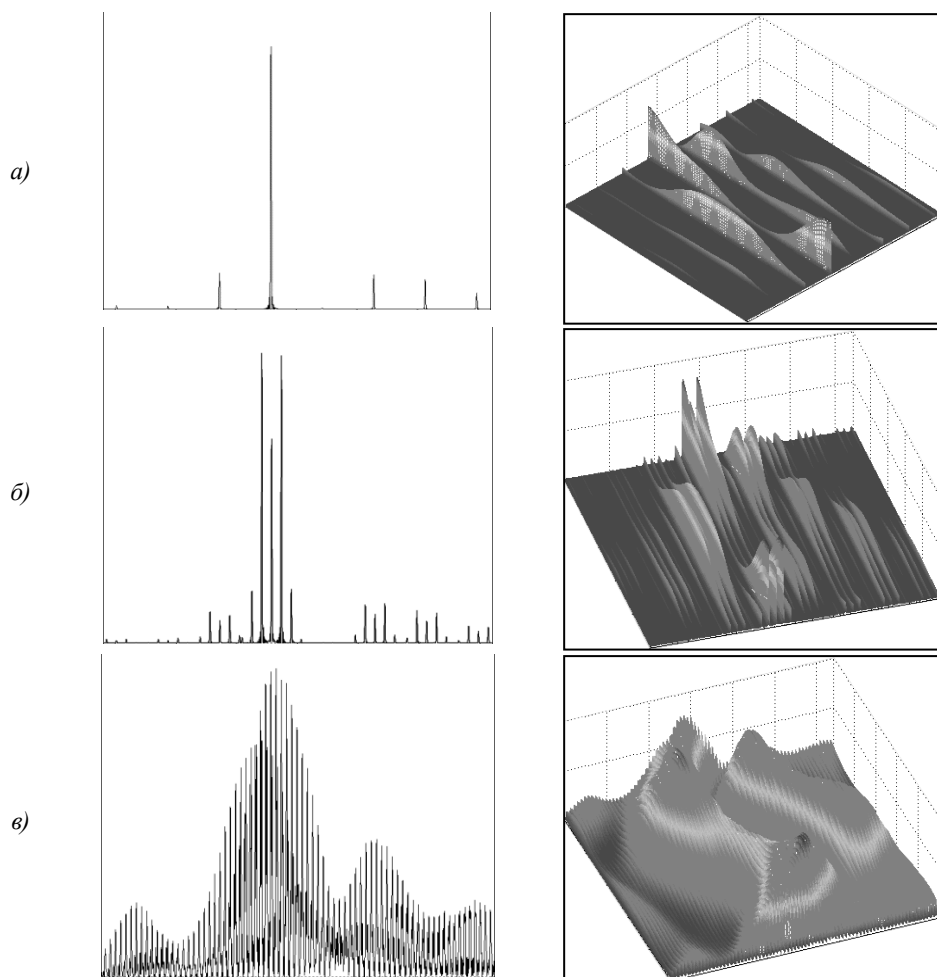


Рис. 2. Кутові спектри полів та їх динаміка при зміщенні сенсора Dg_1 :
а) Dg_1+Int ; б) Dg_1+FM ; в) $Dg_1+FM+AM$

Приклади результатів досліджень Досліджувався процес ускладнення розподілу поля на апертурі сенсора і відповідні зміни в утворюваних кутових спектрах. Початкове налаштування системи (рис. 2, а) відповідає випадку найбільшої концентрації енергії в «-1» дифракційному порядку (при зсуві Dg_1 на 0,35 ширини його штриха в полі Int). Цей варіант є лише одним з інших можливих.

У лівій колонці наведені розподіли енергії для стартових позицій сенсора Dg_1 , коли відсутнє його поперечне переміщення ($\Delta X=0$). Праворуч, динаміка змін при послідовному пересуванні Dg_1 (з шагом дискретності $\Delta X=0,01$ періоду d решітки Dg_1 ($d=0,02Ap$)). Розподіли наведені для повного (± 3200 у.о.) кутового діапазону спектра.

Вплив на чутливість. Значне збільшення кількості новоутворених дифракційних порядків після модуляції апертури сенсора Dg_1 та різноманітні зміни їх інтенсивності при переміщенні сенсора Dg_1 звертають нашу увагу на доцільність

автоматичної обробки одержаних результатів. За відповідних умов це може сприяти підвищенню точності вимірювань.

Дві синусоїдальні фазові решітки Dg_1 та Dg_2 , в плоскій хвилі. Така найпростіша ситуація відповідає розміщенню сенсора Dg_1 в полі, сформованого такою ж решіткою Dg_1 . Обидві решітки мали 20 штрихів/Ар; глибину модуляції 1,56 рад.; віддаль між ними $z=1\text{Ар}$. Вимірювались зміни інтенсивності « ± 1 » та «0» дифракційних порядків спектра при переміщенні Dg_1 відносно синусоїдального поля Dg_2 порівняно з полем, утвореним додатковими ΦM і AM модуляторами. Інтенсивності « ± 1 » та «0» дифракційних порядків вимірювались в центральному кутовому діапазоні (± 500 у.о.) спектра.

Результати наведені на рис. 3, де по осі ОУ показані зміни інтенсивності цих трьох порядків при переміщенні сенсора на період його решітки. Графіки 1 та 2 відповідають змінам енергії у всіх трьох дифракційних порядках, тобто кожна n -а точка графіків обраховувалась за алгоритмом $I_n = \{\Sigma I(+) + \Sigma I(-)\} / I_0$. Тут (+) та (-), відповідно, позначають інтенсивність порядків, що формуються додатними і від'ємними амплітудами дифракційного поля. Порівняльні графіки 3 та 4 обраховувались за алгоритмом $I_n = \{\Sigma I(+) - \Sigma I(-)\} / I_0$. Він фактично відповідає традиційному алгоритму вимірювань для одного окремого дифракційного порядку — збільшенню чи зменшенню його інтенсивності.

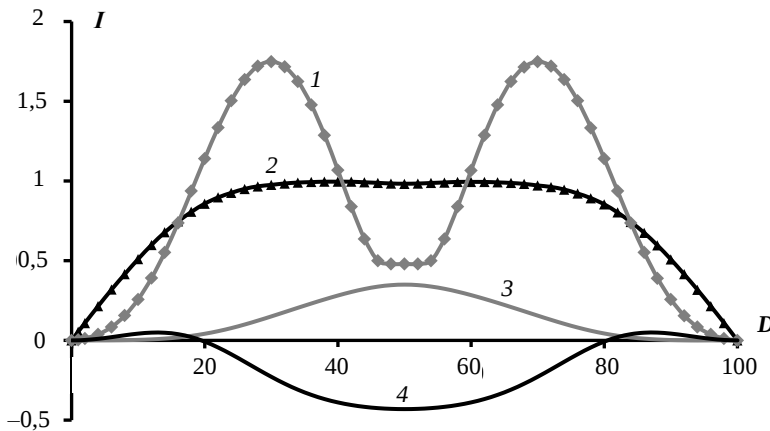


Рис. 3. Динаміка змін енергії $I_n = \{\Sigma I(+) + \Sigma I(-)\} / I_0$ дифракційних порядків при поперечному переміщенні сенсора Dg_1 відносно поля Dg_2 : 1 — без додаткової модуляції апертури Dg_1 ; 2 — після амплітудної AM та фазової FM модуляції апертури Dg_1 ; 3, 4 — при алгоритмі обрахування $I_n = \{\Sigma I(+) - \Sigma I(-)\} / I_0$

Заміна алгоритму обробки результатів дає змогу підвищити чутливість вимірювань до поперечних переміщень сенсора Dg_1 , навіть без модуляції його апертури. Додаткова ж амплітудна та фазова модуляції апертури Dg_1 , призводить до ще більших змін розподілів. На рис. 3 графік 2, пов'язаний з додатковою модуляцією апертури Dg_1 , показує 5—10-кратне підвищення чутливості в діапазоні 0—0,1 його періоду (щодо графіка 3, який відповідає випадку без додаткової FM AM модуляції апертури).

Інваріантність чутливості щодо змін розміщення вимірювальної ділянки спектра сенсора. Додатковий процес модуляції апертури Dg_1 дає змогу створювати нові дифракційні порядки в спектрі. Виникає питання, в якій мірі вони можуть бути «конкурентоспроможними» в процесі вимірювань, тому далі наведені результати зміни інтенсивності для випадку довільної ділянки спектра решітки Dg_1 за умов ускладнення розподілу поля при фазовій та амплітудній модуляції.

Як сенсор розглядається решітка із синусоїдальним фазовим профілем, що розміщена в періодичному полі Int , яке утворюється прямокутною фазовою решіткою з глибиною модуляції штриха в π радіан. Така початкова конфігурація була вибрана з міркувань, що вона забезпечує фактично повну перекачку енергії для « ± 1 » інтенсивних дифракційних порядків для Dg_1 при поперечному зсуві в межах ширини її періоду.

Крім прямокутної фазової решітки, апертура сенсора піддавалась ще додатковій фазовій модуляції системою із синусоїдальної та прямокутної решіток, або ж системою з двох синусоїдальних решіток. Їхні поперечні масштаби мали в 4 рази меншу кількість штрихів на одиницю апертури сенсора Dg_1 . На рис. 4 наведені приклади ускладнення спектра сенсора Dg_1

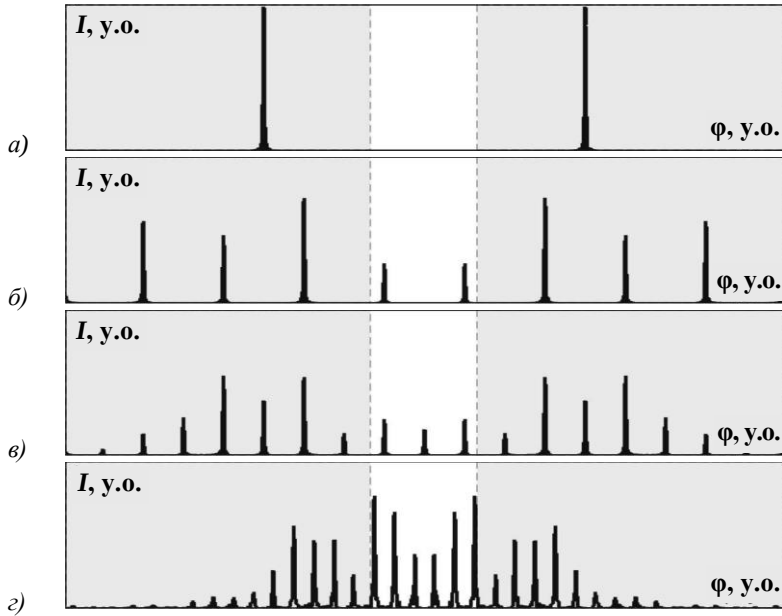


Рис. 4. Спектри сенсорних синусоїдальних решіток в інтерференційному полі при різних варіантах фазової модуляції їх апертури. Поява в діапазоні $(\pm 500 \text{ у.о.})$: б) двох; в) трьох; г) шістьох додаткових дифракційних максимумів при різних варіантах фазової модуляції

Особлива увага зверталась на ділянку спектра $(\pm 500 \text{ у.о.})$, яка була обрана для вимірювань й обробки результатів, оскільки без модуляції в цьому діапазоні взагалі немає дифракційних порядків для Dg_1 .

Дифракційні максимуми на рис. 4, а визначають положення « ± 1 » порядків сенсорної решітки Dg_1 (168 штрихів/мм) в полі прямокутної фазової решітки Int

(84 штрихів/мм глибиною π радіан). Видно, що вони далеко виходять за межі обраного діапазону вимірювань, тому використовувати Dg_1 як сенсор в цьому випадку неможливо.

Спектри на рис. 4 ілюструють ідею дослідження. Це можливість замість прямого вимірювання зміни інтенсивності « ± 1 » порядку Dg_1 в кутових точках (± 1400 у.о.) при його поперечному зсуві (рис. 4, а) робити це в довільних ділянках спектра. В конкретному випадку, в кутовому діапазоні (± 500 у.о.).

Рис. 4, б показує ускладнення спектра сенсора Dg_1 в інтерференційному полі Int при додатковій фазовій модуляції його апертури двома решітками з відмінними синусоїдальним і прямокутним профілями штрихів. Рис. 4, в відповідає випадку модуляції апертури Dg_1 сенсора також двома решітками, але обидві мають синусоїдальний фазовий профіль.

Порівняльний приклад рис. 4, г одержано при масштабуванні розмірів штрихів сенсора Dg_1 які мали в 4 рази більші розміри. Відповідно, в 4 рази більші розміри штрихів для інших фазових модуляторів. Ідея полягала в тому, щоб « ± 1 » порядки сенсора зі збільшеними штрихами (42 штр/мм замість 168 штр/мм) також формувалися у вимірювальному діапазоні кутів (± 500 у.о.).

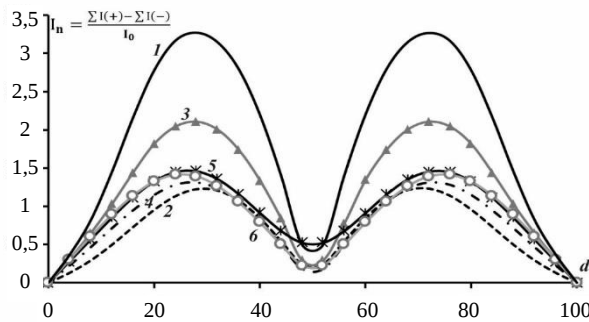


Рис. 5. Зміни інтегральної інтенсивності дифракційних порядків сенсора в діапазоні вимірювань (± 500 у. о.). Розподіли при шести різних варіантах амплітудо-фазової модуляції апертури сенсора

На рис. 5 наведені результати у випадку додаткової амплітудної AM модуляції апертури сенсора Dg_1 в інтерференційному полі Int для шести випадків фазової модуляції. Позначки графіків на рис. 5 відповідають таким параметрам модуляторів Dg_1 :

- 1) (Рект.; 84; 1,56. + Син. 168; 1,2.) + (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + AM ;
- 2) (Рект.; 84; 1,56. + Син. 168; 1,2.) + (Син.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + AM ;
- 3) (Рект.; 42; 1,56. + Син.; 84; 1,2.) + (Рект.; 10,5; 1,56 + Син.; 21; 1,2.) + AM ;
- 4) (Рект.; 42; 1,56. + Син.; 84; 1,2.) + (Син. 10,5; 1,56. + Син.; 21; 1,2.) + AM ;
- 5) (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + (Рект. ;5,2; 1,56. + Син.; 10,5; 1,2.) + AM ;
- 6) (Рект.; 21; 1,56. + Син.; 42; 1,2.) + (Син.; 5,2; 1,56. + Син.; 10,5; 1,2.) + AM .

Позначки для використаних решіток відповідають: профілю рельєфу; кількості штрихів на апертурі Ar ; глибині фазової модуляції в радіанах. Амплітудна

модуляція AM в усіх випадках відбувалася шляхом перекриття центральної частини апертури Ar на дві третини від її повної ширини.

У фазових модуляторів з відповідними періодами змінювався прямокутний фазовий розподіл на синусоїдальний (випадки 2, 4, 6), якщо порівняти з випадками (1, 3, 5). В усіх випадках характер змін інтенсивності у діапазоні вимірювань (± 500 у.о.) майже однаковий.

Висновки

У статті наведено результати дослідів щодо змін кутових спектрів дифракційних сенсорів поперечного переміщення за умови ускладнення комплексного пропускання його апертури фазовими та амплітудними модуляторами. При цьому поле кожного модулятора є збуджуючим для інших дифракційних модуляторів і таким чином забезпечує багатопучкову інтерференцію в напрямках наперед вибраних дифракційних порядків.

Досліджувались оптимальні умови розміщення і структури модуляторів, що забезпечують утворення складних конфігурацій розподілів вторинних дифракційних максимумів і відповідні зміни енергії в діапазоні низькочастотних напрямків кутового спектра системи (симетрично відносно її оптичної осі, а також в напрямку самої оптичної осі).

Оптимальний розподіл пропускання апертури сенсорної дифракційної решітки еквівалентний дії нової, «синтезованої» решітки, в якій кожній її поперечній позиції відповідає унікальний (свого роду штрих-код) «синтезований» профіль штриха сенсора решітки і, відповідно, кутовий спектр.

Складний розподіл поля змін інтенсивності кутових порядків залежить від переміщення сенсорної решітки і може становити 10^{-3} — $5 \cdot 10^{-4}$ величини її штриха за умови відповідної обробки результатів вимірювання.

Підхід, пов'язаний з ускладненням пропускання апертури сенсора, відкриває можливості перспективних рішень при створенні нового класу дифракційних сенсорів різноманітних переміщень і їх використання в чутливих приладах, зокрема в області нанодіапазону.

Література

- Конончук, Г. Л. Прокопєць, В. М., & Стукаленко, В. В. (2010). *Вступ до Фур'є-оптики* Київ: ВПЦ КДУ.
- Bouza, O., Haddadi, S., Fromager, M., Cagniot, E., Ferria, K., Forbes, A. (2017). Focusing anomalies with binary diffractive optical elements. *Appl. Opt.*, 56, 9735—9741.
- Bugaychuk, S. A., Gnatovskyy, V. O., Negriyko, A. M., Phiadko, I. I. (2016). Multiplication and commutation of laser beams under cross-correlation interaction of periodic fields. *Ukr. J. Phys.*, 61, 301—308.
- Collier, R. (2013). *Optical holography*. New-York: Academic Press.
- Gao, X., Wang, Q., Yun, M., & Guo, H., Wang, J., Zhuang, S. (2011). Focal shift of cylindrical vector ax symmetric Bessel-modulated Gaussian beam with radial variance phase wave front. *Optic*, 122, 2124—2128.
- Gnatovskyy, V. O., Bugaychuk, S. A., Negriyko, A. M., Phiadko, I. I., Sidorenko, A. V. (2013). Angular spectra of phase diffraction gratings illuminated by interference field. *IEEE Catalog Number CFP13814-CDR*, ISBN: 978-1-4799-0016-9. 378—380.
- Goodman, J. W. (1996). *Introduction of Fourier Optics*. New-York: McGraw-Hill.

Han, Wen, Gomella, A. A., Patel, A. (2013). Boosting phase contrast with a grating Bonse-Hart interferometer of 200 nanometer grating period. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 372, 2013—2028.

Kim, M. K. (2011). *Digital holographic microscopy, principles, techniques, and applications*. New York: Springer.

Maojin, Yun., Wei, Lv., Weijin, Kong., Chao, Liu., Xingxing, Wu., Kai, Li. (2016). Generation of optical bubbles by vector beams and pure phase filter. *Optic*, 127(4), 1770—1773. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.037>.

Rosen, J., Bulbul, A., Hai, N., Rai, M. R. (2019). Coded aperture correlation holography — a research journey from 3d incoherent optical imaging to quantitative phase imaging. *Opt. Photonics.*, 11, 518—537.

Ruane, G. (2016). Optimal phase masks for high contrast imaging applications. *Ph.D. thesis, Rochester Institute of Technology*.

Sarenac, D., Pushin, D. A., Huber, M. G. et. al. (2018). Three phase-grating moiré neutron interferometer for large interferometer area applications. *Phys. Rev. Lett.*, 120, 113—116.

Vijayakumar Anand, Shanti Bhattacharya. (2015). Design of multifunctional diffractive optical elements. *Opt. Eng.* 54(2). 024104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.2.024104>

Wei, Lv., Chenglong, You., Mei Wang, Maojin Yun. (2013). Optical tweezers formed by pure phase pupil filter. *Proc. SPIE*. (8843 Laser Beam Shaping XIV), <https://doi.org/10.1117/12.2028636>.