

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

*У статті розглянуто пристрої для контролю геометричних розмірів виробів шляхом відповідної обробки їх дифракційного зображення складною фотоелектричною вимірювальною системою, або оптичною системою просторової фільтрації. Дифракційні методи контролю якості виготовлення періодичних структур є найбільш перспективними. Вони покладені в основу численних лазерних дифракційних вимірювачів лінійних розмірів малих об'єктів.*

В останні роки спостерігається інтенсивний розвиток аерокосмічної та ракетної техніки, що в свою чергу ставить перед промисловістю задачу створення точних і надійних деталей та вузлів. Традиційні контактні методи контролю геометричних параметрів є назавжди продуктивні, автоматизація яких складна і неперспективна. Для метрологічного забезпечення створення високопродуктивних методів та засобів контролю геометричних параметрів, а саме статистичних розмірів елементів, їх просторової періодичної структури, є важливим завданням сьогодення і диктується реальними потребами виробництва.

Завдяки прогресу в області обчислювальної техніки та інформатики стає можливим створення автоматизованих вимірювальних систем контролю. Однією з пріоритетних задач при автоматизації вимірювань є зведення до мінімуму людського фактору.

Найбільш перспективним для автоматизації геометричного контролю є застосування фотоелектричних вимірювальних пристроїв, що виконані на основі лазерних дифрактометрів. Але широке використання лазерних дифрактометрів ускладнене через відсутність їх промислового виробництва [1].

В основу принципу дії такого вимірювального автомата покладено тіньової оптичний метод послідовного сканування всіх елементів виробу і порівняння їх з еталоном. Для досягнення високої точності вимірювань переміщення контрольованого виробу в полі зору оптичної системи здійснюється гідравлічними приводами.

Точність вимірювань приладу не залежить від швидкості переміщення виробу. Однак вібрації об'єкту контролю, а також деталей всього приладу неприпустимо і усувається застосуванням системи складних гідравлічних приладів. Крім того, необхідна також висока точність фокусування оптичної системи, порушення якої призводить до розмиття зображення. Так як існує ряд деталей які переміщуються один відносно одного, то необхідна механічна прецизійна система, що ускладнює конструкцію приладу і підвищує відповідно його вартість [2].

Припущення про можливість використання явища дифракції світлових хвиль для контролю розмірів об'єктів були вперше висловлені Роулендом в 1888 році [3, 4, 5]. Пізніше він використовував це для якісного контролю виготовлення періодичної структури дифракційних решіток. Суть методу полягала в тому, що, якщо дифракційну решітку опромінити монохроматичним пучком світла, то на певній відстані від неї формуються еквідистантно розташовані дифракційні максимуми світлового потоку. При наявності дефектів решітки, навколо цих основних максимумів виникають і додаткові максимуми, які отримали назву "духів". Проте теоретичне обґрунтування цього явища в той час так і не було сформульовано, що і не дозволило визначити аналітичні залежності, що описують функціональний взаємозв'язок розподілу світлового потоку "духів" з дефектами ґратки.

Дифракційні методи контролю якості виготовлення періодичних структур є найбільш перспективними. Вони покладені в основу численних лазерних дифракційних вимірювачів лінійних розмірів малих об'єктів.

Для контролю діаметра вузьких отворів в [6] запропоновано опромінювати контрольовані отвори монохроматичним пучком світла та вимірювати амплітуду парних і непарних максимумів дифракційної картини отвори. Для розширення діапазону діаметра вимірюваних отворів, необхідно змінювати довжину хвилі випромінювання до тих пір, поки амплітуда інтерференційного сигналу непарних гармонік досягне подвоєного значення амплітуди світлової хвилі у вільному просторі. Діаметр вимірюваного отвору визначають за формулою:

$$D = 2\sqrt{\lambda \cdot l},$$

де  $l$  - відстань між вимірюваним отвором і точкою виміру світлового поля дифракційної картини. Недоліком методу є необхідність застосування лазера зі змінною довжиною хвилі генерації.

Відомі також пристрої [6, 7] для допускового контролю геометричних розмірів виробів шляхом відповідної обробки їх дифракційного зображення складною фотоелектричною вимірювальною системою, або оптичною системою просторової фільтрації. Проте ці пристрої є вузько спеціалізованими і вимагають попереднього синтезу складних голографічних просторових фільтрів, що дозволяє їх використовувати лише для якісного допускового контролю виробів.

Таким чином лазерні дифрактометри є найбільш перспективними науковим напрямком розвитку автоматизованого метрологічного обладнання. Воно може бути також успішно використане і для розробки засобів автоматизації контролю статистичних характеристик квазіперіодичної структури. Це, у свою чергу, може бути виконано лише зі створенням спеціалізованих оптичних систем обробки зображень (СОСІ) на базі когерентних оптичних спектроаналізаторів (КОС) просторових сигналів, покладених в основу практично всіх відомих лазерних дифрактометрів.

Інтенсивний розвиток лазерних дифрактометрів цих систем почався на початку 80-х років. Побудова голографічних дифракційних оптичних систем для метрології ґрунтується на отриманні зображень Френеля, або Фур'є досліджуваного об'єкта з подальшим аналізом їх параметрів фотоелектричною вимірювальною системою [8].

Основною перевагою таких метрологічних систем є висока продуктивність, що дозволяє автоматизувати ряд метрологічних процесів у промисловості, де потрібна інтегральна комплексна оцінка якості виробу.

Для формування зображень Фур'є або Френеля досліджуваного об'єкта використовують когерентний оптичний спектроаналізатор просторових сигналів, схему побудови і геометричні параметри якого вибирають залежно від характеру розв'язуваної задачі.

В даний час вже стала класичною схема когерентного оптичного спектроаналізатора (КОС), наведена на мал.1.

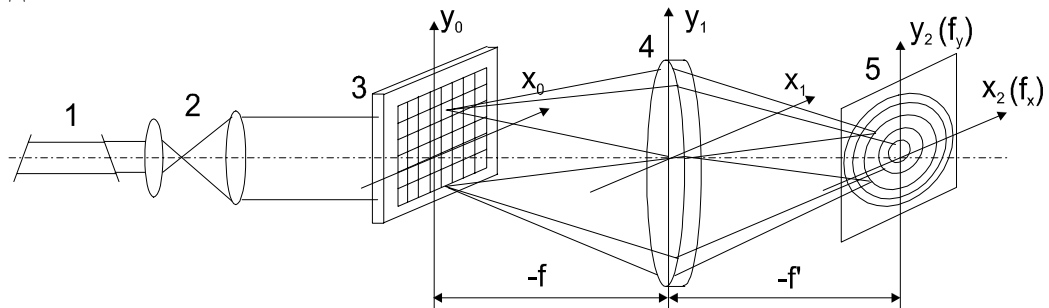


Рис.1. Принципова схема когерентного оптичного спектроаналізатора: 1 - лазер; 2 - телескопічна схема Кеплера; 3 - вхідний транспарант; 4 - Фур'є-об'єктив; 5 - дифракційне зображення.

КОС складається з розташованих послідовно на одній оптичній осі джерела когерентного випромінювання - лазера 1 і телескопічної системи Кеплера 2, що формує плоску когерентну світлову хвилю. Ця хвиля падає на вхідний транспарант 3 з фотографічним записом досліджуваного сигналу. Вхідний транспарант 3 розташований в

передній фокальній площині фур'є-об'єктиву 4 (об'єктиву вільного від аберації, дисторсії і поперечної сферичної) з фокусною відстанню  $f'$ . На вхідному транспаранті 3 світлова хвиля дифрагує, і фур'є-об'єктив 4 на задній площині 5 формує дифракційне зображення досліджуваного сигналу, яке є його фур'є-образом і описується виразом

$$U(f_x, f_y) = \frac{A_0}{j\lambda f'} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0) e^{-j2\pi(x_0 f_x + y_0 f_y)} dx_0 dy_0,$$

де  $A_0$ -амплітуда плоскої монохроматичної світлової хвилі в площині  $x_0 y_0$ ;  $\lambda$ - довжина хвилі;  $f_x, f_y$  - просторові частоти, рівні  $f_x = \frac{x_2}{\lambda f'}$  і  $f_y = \frac{y_2}{\lambda f'}$ , де  $x_2, y_2$  - просторові координати в площині 5.

Таким чином, розподіл комплексних амплітуд світлових полів у задній і передній площинах фур'є-об'єктиву 4 оптичної системи пов'язані між собою парою перетворень Фур'є. Поле в задній фокальній площині є просторовим амплітудно-фазовим спектром сигналу, поміщеного в його передній фокальній площині.

Описана вище оптична система виконує спектральне розкладання просторового сигналу і є когерентним оптичним спектроаналізатором [7,8]. Вона дозволяє аналізувати одночасно амплітудний і фазовий спектри як одновимірних, так і двовимірних просторових сигналів.

Існує два основні різновиди схем побудови лазерних дифрактометрів. Ці схеми представлені на рис .2 і рис. 3.

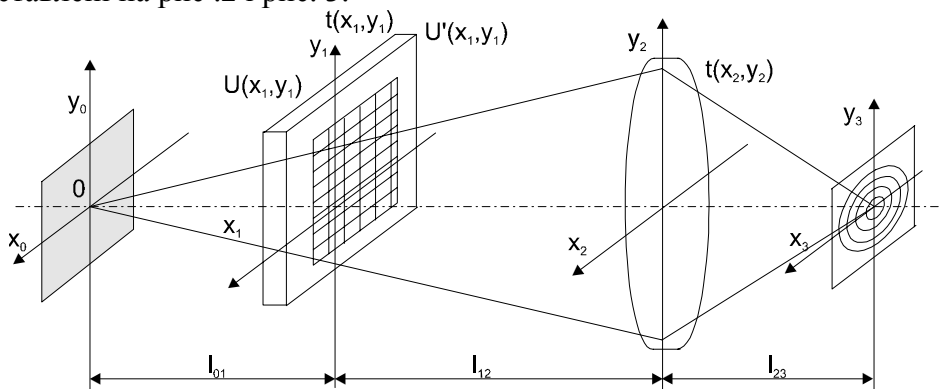


Рис.2. Схема КОС з вхідним транспарантом перед фур'є-об'єктивом.

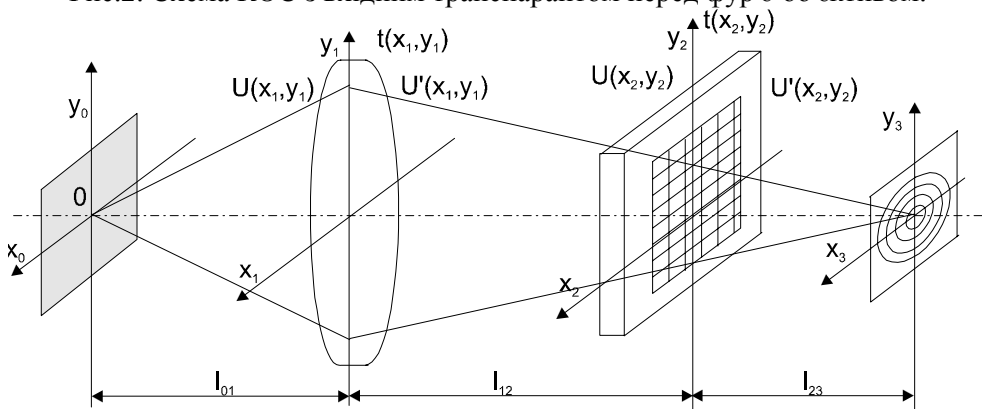


Рис.3. Схема КОС з вхідним транспарантом за фур'є-об'єктивом.

За умови фокусування оптичної системи, представленої на рис.2, в ній здійснюється спектральне перетворення Фур'є, що формується в площині  $x_3 y_3$ , над сигналом, що міститься у вхідній площині  $x_1 y_1$ . Однак, фур'є-образ сигналу у такій системі містить квадратичну модуляцію фази хвилі через наявність фазового співмножника, що стоїть перед інтегралом у виразі:

$$\begin{aligned}
U(x_3, y_3) = & -\frac{2\pi C_0}{jk\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)} \cdot \exp\left[ jk\left(\frac{1}{2l_{23}} - \frac{1}{2l_{23}^2\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}\right) \cdot (x_3^2 + y_3^2) \right] \times \\
& \times \iint_{s_1} t(x_1, y_1) \exp\left[ jk\left(\frac{1}{2\left(\frac{1}{l_{01}} + \frac{1}{l_{12}}\right)} - \frac{1}{2l_{12}^2\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}\right) \cdot (x_1^2 + y_1^2) \right] \times \\
& \times \exp\left[ -j\frac{k}{l_{12}l_{23}\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}(x_1x_3 + y_1y_3) \right] dx_1 dy_1. \tag{1}
\end{aligned}$$

Цей вираз описує просторовий розподіл комплексних амплітуд світлового поля в площині  $x_3y_3$  спектрального аналізу і містить ряд взаємозалежних квадратичних фазових співмножників.

Наявність фазової модуляції фур'є-образу призводить до того, що при реєстрації його методами голографії в результуючій інтерферограм виникають додаткові аберації, що значно впливають на його якість. Ця фазова модуляція також має важливе значення і повинна бути врахована в разі подальших перетворень оптичної системи фур'є-образу сигналу. Але ця модуляція може бути усунена при відповідному виборі геометричних параметрів оптичної системи, тобто

$$e^{j\frac{k}{2}\left[\frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{l_{23}^2\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}\right](x_3^2 + y_3^2)} = 1, \text{ при } 1 - \frac{1}{l_{23}\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)} = 0. \tag{2}$$

Таким чином, квадратична фазова модуляція фур'є-образу усунена лише в двох випадках:

- при розміщенні сигнального транспаранта в передній фокальній площині фур'є-об'єктива, що повністю збігається з отриманими раніше результатами досліджень, але лише для КОС з плоскою хвилею у вхідній площині, тобто при  $l_{12} = f'$ ;

- при  $l_{23} = 0$ , тобто площину  $x_3y_3$  спектрального аналізу повинна збігатися з площиною  $x_2y_2$  розміщення фур'є-об'єктива, що фізично не реалізовано в оптичній системі, згідно з умовою Гауса.

Враховуючи вирази

$$e^{jk\left[\frac{1}{2\left(\frac{1}{l_{01}} + \frac{1}{l_{12}}\right)} - \frac{1}{2l_{12}^2\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}\right](x_1^2 + y_1^2)} = 1 \text{ і (2) можемо перетворити (1) до вигляду:}$$

$$U(x_3, y_3) = -\frac{2\pi C_0}{jk\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)} \cdot \iint_{s_1} t(x_1, y_1) \cdot e^{-j\frac{k}{l_{12}l_{23}\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f'}\right)}(x_1x_3 + y_1y_3)} dx_1 dy_1, \tag{3}$$

звідки видно, що квадратичні фазові спотворення фур'є-образу сигналу переборні не тільки при освітленні вхідного транспаранта плоскою, але і сферичної хвилею.

За умови фокусування оптичної системи, показаної на мал.3, в ній здійснюється спектральне перетворення Фур'є, сформоване в площині  $x_3u_3$ , над просторовим сигналом, вміщеному в площині  $x_2u_2$ . Однак, фур'є-образ сигналу у такій системі містить квадратичну модуляцію фази хвилі через наявність фазового множника. Наявність фазової модуляції фур'є-образу сигналу призводить до додаткової аберації інтерферограм при реєстрації методами голографії. Ця модуляція має також важливе значення і не може бути опущена. Модуляція може бути усунена на оптичній осі системи при фокусуванні оптичної системи на нескінченність. Але в цьому випадку оптична система не буде здійснювати спектральне перетворення Фур'є.

Для оптичної системи КОС, представленої на рис.3, квадратичні фазові спотворення, що призводять до абераційних спотворень фур'є-образу сигналу, не можуть бути усунені лише шляхом відповідного вибору геометричних параметрів оптичної системи. Для усунення цих недоліків необхідно оптичну систему доповнити коригуючим фільтром з фазовою характеристикою [8].

### Висновки

Отже, квадратичні фазові спотворення фур'є-образу сигналу можливо усунути шляхом відповідного вибору геометричних розмірів оптичної системи. Розподіл комплексних амплітуд світлових полів у задній і передній площинах фур'є-об'єктиву оптичної системи пов'язані між собою парою перетворень Фур'є. Поле в задній фокальній площині є просторовим амплітудно-фазовим спектром сигналу, поміщеного в його передній фокальній площині.

Практичне застосування фотоелектричних вимірювальних пристроїв, що виконані на основі лазерних дифрактометрів повинно забезпечувати:

- скорочення часу вимірювання геометричних розмірів, а також часу на їх статистичну обробку;
- усунення впливу рівня підготовки метрологів на надійність процесу контролю;
- підвищення достовірності вимірювання геометричних розмірів шляхом їх вимірювання в декількох перерізах;
- зниження втомлюваності зору оператора.

### Список літератури

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Муравський Л.І. Вплив розмиття різкого краю на похибку дискретизації зображень в оптико-цифровій системі /Л.І. Муравський // Комп'ютерні технології друкарства. – 2000. – №4. – С. 373–377.
3. Родинов С.А. Оптика негомоцентрических световых пучков / Родинов С.А., Вон Дон Чжу, Ми Сук Чжун // Оптический журнал . – 1997. –Т. 64, № 8. – С. 28-31.
4. Fisher R.B. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection/ Fisher R. B., Naidu D. K. // Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision. – Heidelberg: Springer-Verlag. – 1996. – P. 205 – 229.
5. Компьютерное зрение. Современный подход / [ Форсайт, Дэвид А, Понс, Жан].: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
6. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М: Физматлит, 2003. – 784 с.
7. Фукс-Рабинович Л. Й. Оптико-электронные приборы./ Фукс-Рабинович Л. Й., Епифанов М. В. - Л.: Машиностроение, 1979. - 362 с.
8. Федоров Б. Ф. Лазеры и их применение / Федоров Б. Ф. - М.: ДОСААФ, 1973.