

УДК.621.396

І. Зелінський, канд. фіз.-мат. наук; М. Яворська, канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СХЕМА ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ ПОВЕРХНІ ВІД ТЕОРЕТИЧНОЇ

Резюме. Розроблено схему оптичного пристрою для дослідження форми поверхні. Схема пристрою дозволяє проводити формування множини оптичних марок на поверхні та їхню фотореєстрацію в один і той же момент часу. Для утворення зображень марок та їх фотореєстрації застосовано двовимірну дифракційну решітку, екрани з отворами та ПЗС фотоматриці. Наведено математичне обґрунтування способу визначення координат поверхні.

Ключові слова: оптичний пристрій, дифракційна решітка, ПЗС матриці.

I. Zelinskiy, M. Yavorska

SCHEME OF THE OPTICAL DEVICE FOR DETERMINATION THE SURFACE FORM DEFLECTION FROM THEORETICAL

The summary. Optical device for the surface form investigation is designed. It allows the optical marks ensemble shaping on the surface and their registration simultaneously. Diffraction grating, opaque screens with holes and CCD matrixes were used for registration the optical marks. Mathematical prescription of surface coordinate determinations is given.

Key words: optical device, diffraction grating, CCD matrixes.

У таких галузях виробництва, як авіа-, судно-, антенобудування та інші необхідно проводити контроль за формою механічних поверхонь у процесі їхнього створення. Для цього існують контактні механічні методи [1], дистанційні оптичні та лазерні методи [2 - 4].

У контактних методах контроль проводять визначенням проміжку між еталонною та створюваною поверхнею за допомогою механічних щупів. Недоліком даних методів є труднощі виготовлення еталонної поверхні та її висока собівартість, особливо при великих розмірах контрольованої поверхні.

У разі оптичних та лазерних методів контроль здійснюють дистанційно, визначивши координати поверхні в різних точках та їхньому співставленні з теоретичною моделлю. За різницею координат оцінюють відповідність поверхні теоретичній. Недоліком відповідних установок є неможливість одночасного отримання координат у різних точках поверхні, що призводить до значних витрат часу на вимірювання.

У роботі запропоновано схему оптичного пристрою – рис.1, що дозволяє позбутися вказаних недоліків відомих установок за контролем поверхні.

Схема пристрою містить освітлювальну 1-4 та вимірвальну 6-9 частини. Освітлювальна частина формує на поверхні 5 множини оптичних марок у вигляді кружків малого діаметра. Для формування марок вузький лазерний пучок 1 фокусується оптичною системою 2,3 на розсіювальній поверхні 5. Дифракційний оптичний елемент 4 створює одно- або двовимірну множини марок, центри яких відповідають контрольним точкам поверхні, наприклад, точці S. Як оптичний елемент 4 можна використати дифракційні решітки або голограмні оптичні елементи [5].

Призначення вимірвальної частини – у побудові зображень множини оптичних марок, їхній цифровій фотореєстрації та визначенні координат зображень контрольних точок поверхні. Дана частина містить непрозорі екрани 6,7 з круглими

отворами a, b , розміщеними в одній площині на відстані r один від одного, та дві ПЗС фотоматриці 8,9, розміщені паралельно площині екранів на відстані p . Зображення марок у площині фотоматриць є картинами дифракції на отворі, на яких точки екстремумів головних максимумів вважаємо за зображення контрольних точок на поверхні 5.

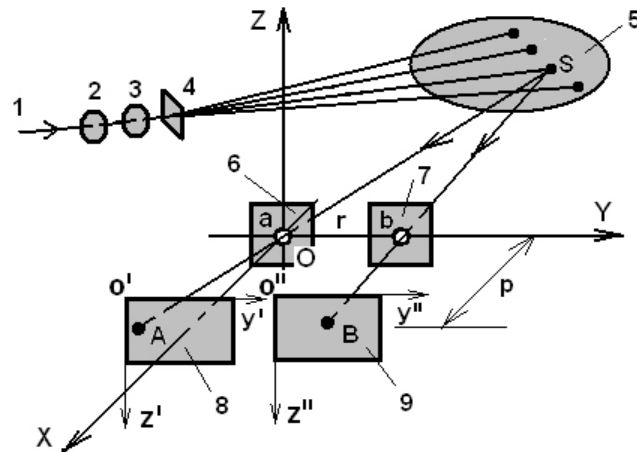


Рисунок 1 – Схема оптичного пристрою для визначення форми поверхні: $OXYZ$ – прямокутна система координат схеми пристрою; 1 – лазерний пучок; 2,3 – об’єктиви; 4 – дифракційний оптичний елемент; 5 – дослідна поверхня, що розсіює світло; S – точка поверхні; 6,7 – екрани з отворами a, b ; r – відстань між центрами отворів; 8,9 – ПЗС фотоматриці; A, B – місця перетину осями світлових пучків площини фотоматриць; p – відстань між екранами та фотоматрицями; $o'y'z'$ та $o''y''z''$ – власні прямокутні системи координат фотоматриць 8,9

Розглянемо дію схеми на прикладі визначення координат контрольної точки S . Для спрощення описання виберемо систему координат $OXYZ$ схеми пристрою так, щоб її центр містився посередині отвору a (див. рис.1) діафрагми 6, а вісь OY проходила через середину отвору b діафрагми 7. У такому разі координати центрів обох діафрагм будуть такими: $a\{0, 0, 0\}$, $b\{0, r, 0\}$. Нехай точки A, B – екстремуми головних максимумів дифракції пучків на отворах a, b , з координатами $A\{p, Y_A, Z_A\}$, $B\{p, Y_B, Z_B\}$ відповідно. Шукані координати контрольної точки S , як точки перетину прямих aA та bB , можна визначити, записавши рівняння цих прямих у вибраній системі координат

$$\frac{X}{p} = \frac{Y}{Y_A} = \frac{Z}{Z_A}, \quad (1)$$

$$\frac{X}{p} = \frac{Y - r}{Y_B - r} = \frac{Z}{Z_B}. \quad (2)$$

Тоді складові координати S_X, S_Y, S_Z контрольної точки S знайдемо як розв’язок системи рівнянь

$$\begin{pmatrix} Y_A & -p & 0 \\ Z_A & 0 & -p \\ Y_B - r & -p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -rp \end{pmatrix}, \quad (3)$$

з якої

$$\begin{aligned} S_X &= -\frac{pr}{Y_B - Y_A - r} \\ S_Y &= -\frac{rY_A}{Y_B - Y_A - r} \\ S_Z &= -\frac{rZ_A}{Y_B - Y_A - r} \end{aligned} \quad (4)$$

Згідно зі схемою пристрою дані із фотоматриць отримують у власних системах координат $o'y'z'$ та $o''y''z''$, початки яких співпадають з нульовим номером пікселя кожної фотоматриці, а осі направлено в напрямку зростання номерів чутливих елементів фотоматриць. Легко показати, що перехід від власних координат фотоматриць до системи координат $OXYZ$ пристрою здійснюється, для точок A, B , згідно із виразами

$$Y_A = c + y'_A, \quad (5) \quad Y_B = c + r + y'_B, \quad (8)$$

$$Z_A = d - z'_A, \quad (6) \quad Z_B = d - z'_B, \quad (9)$$

$$X_A = p, \quad (7) \quad X_B = p, \quad (10)$$

де c, d – початкові координати систем $o'y'z'$ та $o''y''z''$ у системі $OXYZ$ на осях OY та OZ відповідно; y'_A, z'_A , та y'_B, z'_B – лінійні координати точок A, B у системах $o'y'z'$ та $o''y''z''$ відповідно. Підставляючи значення виразів (5-10) у вирази (4) отримуємо значення координат точки S через значення координат точок A, B у власній системі координат фотоматриць.

$$\begin{aligned} S_X &= -\frac{pr}{y'_B - y'_A} \\ S_Y &= -\frac{r(c + y'_A)}{y'_B - y'_A} \\ S_Z &= -\frac{r(d - z'_A)}{y'_B - y'_A} \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогічно визначають координати інших контрольних точок поверхні.

Отримаємо вирази для визначення граничних похибок $\Delta S_X, \Delta S_Y, \Delta S_Z$ складових координат згідно з наступною методикою. Нехай α – гранична похибка вимірювання координат y'_A, y'_B, z'_A на фотоматрицях. Враховуючи, що похибки складових координат

$$|\Delta S_X| \leq \left[\left| \frac{\partial S_X}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_X}{\partial y'_B} \right| \right] \alpha, \quad (12)$$

$$|\Delta S_Y| \leq \left[\left| \frac{\partial S_Y}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_Y}{\partial y'_B} \right| \right] \alpha, \quad (13)$$

$$|\Delta S_Z| \leq \left[\left| \frac{\partial S_Z}{\partial y'_A} \right| + \left| \frac{\partial S_Z}{\partial y'_B} \right| + \left| \frac{\partial S_Z}{\partial z'_A} \right| \right] \alpha \quad (14)$$

та проводячи диференціювання виразів (11), отримаємо такі формули для визначення похибок:

$$|\Delta S_X| = \frac{2pr\alpha}{(y'_B - y'_A)^2}, \quad (15)$$

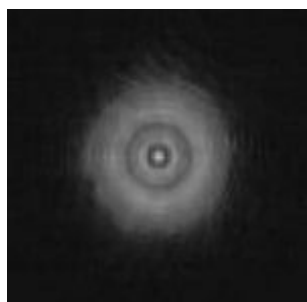
$$|\Delta S_y| = r \frac{2c + y'_B + y'_A}{(y'_B - y'_A)^2} \alpha, \quad (16)$$

$$|\Delta S_z| = r \frac{2|d - z'_A| + |y'_B - y'_A|}{(y'_B - y'_A)^2} \alpha. \quad (17)$$

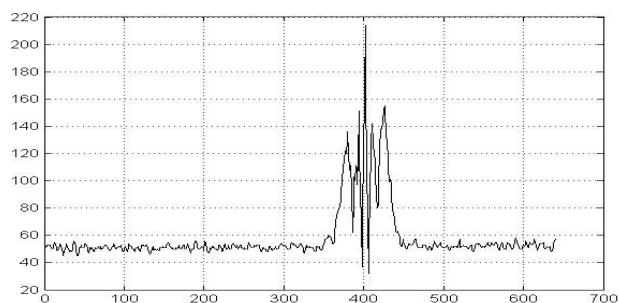
Таким чином, користуючись експериментальними даними y'_A, y'_B, z'_A стосовно координат зображень контрольної точки поверхні та конструктивними параметрами r, p, α пристрою визначають похибки вимірювань. Окрім цього, задаючи допустимі значення похибок, можливо підібрати відповідні параметри r, p, α пристрою.

На етапі експериментального моделювання поверхню 5 опромінювали множиною сфокусованих лазерних пучків. Кількість пучків та їх розподіл на поверхні визначали характеристиками оптичного дифракційного елемента 4, а саме – частотою штрихів та формою їхнього профілю. У даному випадку застосовано двовимірну дифракційну решітку з частотою штрихів 50мм^{-1} , що формувала в горизонтальній та вертикальній площинах поверхні 49 оптичних марок. Діаметр кружків марок на поверхні $\sim 1\text{мм}$.

Побудова зображень множини марок та їхню реєстрацію проводили в один момент часу за допомогою непрозорих екранів 6,7 з отворами $\sim 1\text{мм}$ кожний та двох ПЗС фотоматриць 8,9. Відстань r між отворами екранів складала 5см , а кожна з фотоматриць містила по 640×480 фоточутливих елементів (пікселів) при розмірах пікселя $\sim 8 \times 8$ мікрон. Величину відстані p від екранів до фотоматриць вибирали із умов формування множини зображень марок з чітко вираженими екстремумами центральних максимумів дифракції на фотоматрицях – рис.2а,б та необхідної точності вимірювань. Через схожість зображень наведено лише одну із картин.



а



б

Рисунок 2 – Зображення світлової марки в площині фотоматриці: а) графік розподілу освітленості в горизонтальному січєнні головного максимуму; б) по горизонтальній вісі графіка відкладені порядкові номери пікселів фотоматриці, а по вертикальній – значення інтенсивності зображення у межах від 0 до 255

На етапі цифрового опрацювання зображень слід враховувати, що координати екстремумів інтенсивності отримують у вигляді порядкових номерів пікселів у горизонтальному і вертикальному напрямках відносно верхнього краю фотоматриць – зліва. Тому попередньо варто калібрувати фотоматриці та кожному номеру пікселя поставити у відповідність координати у лінійній мірі (дану задачу в статті не розглядаємо).

Після експериментального визначення координат екстремумів відповідних пар картин та обчислення координат точок поверхні згідно з формулами (11) необхідно перевести їх у систему координат контрольованої поверхні (теоретичного рівняння поверхні). Нехай це буде прямокутна система $O'X'Y'Z'$ – рис.3.

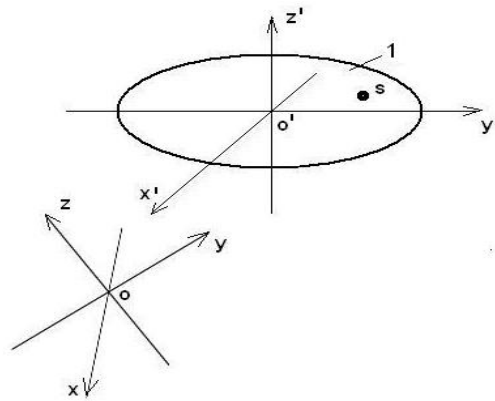


Рисунок 3 – Розміщення системи координат $OXYZ$ вимірювального пристрою та системи координат $O'X'Y'Z'$ контрольованої поверхні 1; S – точка поверхні 1

Формули перетворення координат для точки S поверхні із системи $OXYZ$ у систему $O'X'Y'Z'$ записуємо таким чином [6]:

$$X_S' = a + X_S \cos \alpha_1 + Y_S \cos \alpha_2 + Z_S \cos \alpha_3, \quad (18)$$

$$Y_S' = b + X_S \cos \beta_1 + Y_S \cos \beta_2 + Z_S \cos \beta_3, \quad (19)$$

$$Z_S' = c + X_S \cos \gamma_1 + Y_S \cos \gamma_2 + Z_S \cos \gamma_3, \quad (20)$$

де X_S' , Y_S' , Z_S' – координати точки S у системі $O'X'Y'Z'$; a , b , c – координати початку координат системи $OXYZ$ у координатній системі $O'X'Y'Z'$; X_S , Y_S , Z_S – визначені в системі $OXYZ$ координати точки S ; α_1 , α_2 , α_3 – кути між віссю $O'X'$ та осями OX , OY , OZ відповідно; β_1 , β_2 , β_3 – кути між віссю $O'Y'$ та осями OX , OY , OZ відповідно; γ_1 , γ_2 , γ_3 – кути між віссю $O'Z'$ та осями OX , OY , OZ відповідно.

Щоб визначити коефіцієнти a , b , c , та α_1 , α_2 , α_3 , β_1 , β_2 , β_3 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , допускаємо, що існують чотири точки поверхні, координати яких у системі $O'X'Y'Z'$ заздалегідь відомі. Технології виготовлення поверхонь дають таку можливість. Тоді, експериментально визначивши координати даних точок у системі пристрою та користуючись виразами (18–20), легко скласти систему із 12 незалежних рівнянь та отримати значення коефіцієнтів a , b , c , α_1 , α_2 , α_3 , β_1 , β_2 , β_3 , γ_1 , γ_2 , γ_3 .

Підставивши значення коефіцієнтів та експериментальні значення координат X_S , Y_S , Z_S у систему рівнянь (11), отримаємо координати точки S у координатній системі контрольованої поверхні (теоретичного рівняння поверхні). Аналогічно перераховуємо координати інших точок поверхні.

Апроксимацію експериментальних значень координат марок контрольованої поверхні, визначення її форми та порівняння з теоретичною розглянемо в наступній публікації.

Висновки

1. Застосування двовимірної дифракційної решітки для утворення на підконтрольній поверхні множини оптичних марок та їхня фотореєстрація за допомогою ПЗС фотоматриць дозволяє звести визначення координат точок поверхні до одного моменту часу, зменшити витрати часу та собівартість вимірювань.

2. Експериментальне моделювання показало можливість застосування діафрагм з отворами для формування у площині фотоматриць множини дифракційних зображень оптичних марок, придатних для цифрового опрацювання та визначення координат екстремумів інтенсивності.

Література

1. Поляк В.С. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов: Опыт создания, проблемы анализа и синтеза / В.С. Поляк, С.Я. Бервалдс. – Рига: Зинатне, 1990. – 526 с.

2. Белянский П.В. Методы измерения профиля отражающей поверхности больших наземных и космических антенн / П.В. Белянский, Г.А. Терехова // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – №2. – С. 68 – 84.
3. А.с. 1682766 СССР, МКИ G 01 B 11/02. Способ бесконтактного измерения расстояний / А.Г. Рудник (СССР). Заявл.05.09.1988.
4. Зелінський І.М. Схема оптичної системи для дослідження форми дзеркала антени / І.М. Зелінський, А.Г. Рудник // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Т. 11, №2. – С. 126 – 130.
5. Зелинский И.Н. Способ получения многочастотного голограммного элемента и его применение в голографической интерферометрии трехмерных фазовых объектов / И.Н. Зелинский, В.Т. Черных // Оптика и спектроскопия. – 1979. – Т. 46, №4. – С.795 – 799.
6. Натансон И.П. Краткий курс высшей математики / Натансон И.П. – М.: Наука, 1968. – 727 с.

Одержано 15.01.2010 р.