

## Методи і системи оптично-електронної та цифрової обробки сигналів

Результати розрахованих розподілів інтенсивності дають високу енергетичну ефективність та малу середню квадратичну похибку, що говорить про високу наближеність розподілів інтенсивності до зданих.

Розглянутий ітераційний алгоритм може бути використаний для проектування мультиспектральних спекл - картин. У подальшому планується використання характеристик створюваних ДОЕ для розрахунку більш складніших фокусаторів і виготовлення їх фотошаблонів.

### Література

1. Cerchberg R. W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures / R. W. Cerchberg, W. O. Saxton // *Optic.* – 1972. – V. 35. – P. 237 – 246.
2. Сойфер В. А. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, В. В. Котляр и др. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
3. Колобродов В. Г. Дифракційна теорія оптичних систем / Г. С. Тимчик, В. Г. Колобродов. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 140 с.
4. Петров Н. В. Восстановление волнового фронта при безопорной цифровой ПЗС – регистрации мультиспектральных спекл – картин / Н. В. Петров, В. Г. Беспалов, М. В. Волков // *Наносистемы: физика, химия, математика.* – 2011. – Т. 2. – № 1. – С. 82 – 90.

Надійшла до редакції  
29 травня 2013 року

© Власенко Ю. С., Балінський Є. Г., 2013

УДК 681.7.066.35

### ПРОЕКТУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНОГО ДЗЕРКАЛА СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ

*Голюк І. В., Колобродов В. Г.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*У роботі пропонується метод проектування дифракційних дзеркал сферичної форми, які за якістю зображення наближаються до асферичних дзеркал. Процес проектування оснований на використанні закону відбивання для визначення геометричних параметрів зон Френеля. Отримано вирази, що описують профіль дзеркала для різних типів канавок (плоскі, сферичні, параболічні), а також проаналізовано їх вплив на якість фокусування світла. Наведені приклади профілю дзеркал з різними типами канавок, розраховані на основі даного методу.*

*Використовуючи принципи побудови дифракційних дзеркал, запропоновані в даній статті, можна отримати вирази для знаходження геометричних параметрів дзеркального мікропрофілю нанесеного не тільки на сферичну, а і на поверхню довільної форми, що за своєю дією аналогічний асферичному дзеркалу.*

**Ключові слова:** дифракційне дзеркало, зони Френеля, мікропрофіль.

### Вступ

Сучасні об'єктиви, які використовуються в космічних оптично-електронних системах дистанційного зондування Землі, часто використовують позаосьові асферичні дзеркала великих розмірів [1]. Розрахунок, виготовлення і контроль таких дзеркал є складним і тривалим процесом. Однак такі дзеркала можна за-

мінити сферичною дзеркальною поверхнею, на якій нанесено мікроструктуру у вигляді зон Френеля [2]. Проектування таких дзеркал полягає у заміні асферичної поверхні концентричними зонами Френеля із заданими геометричними параметрами.

### Постановка задачі

Враховуючи актуальність таких дзеркал, постає необхідність створення методу проектування дифракційної мікроструктури на сферичній поверхні, яка має властивості асферичного дзеркала.

### Опис методу

В основу запропонованого методу покладено перетворення паралельного пучка променів у промені, які збігаються в заданому фокусі.

Внаслідок інтерполяції сферичної поверхні отримуємо зони Френеля із канавками постійної ширини та змінної глибини. Водночас, вони є неглибокими біля центру дзеркала та глибокими на периферії. Метод постійної ширини канавок дозволяє точно визначити положення вершини кожної канавки і спрощує математичні обчислення.

Проектування відбувається в наступному порядку. Розробник приладу задає фокусну відстань дзеркала, радіус сферичної поверхні, діаметр дзеркала. Спочатку, виходячи із технологічної необхідності, ширина канавок обирається достатньо великого розміру для зменшення впливу дифракційних ефектів.

Даний метод проектування розташовує вершину кожної канавки на сферичній поверхні. Ми повинні узгодити поверхню канавки так, щоб вона визначала задану фокусну відстань. За цих умов необхідно розрахувати кут нахилу поверхні кожної канавки, якщо відомим є положення вершини кожної канавки.

### Розрахунок кута нахилу поверхні канавки

Припустимо, що дзеркало із фокусною відстанню  $f$ , діаметром  $D$  і радіусом кривизни поверхні  $R$  має  $N$  зон. Ширина канавки  $\Delta$  визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{D}{2N}. \quad (1)$$

Припустимо: вісь  $z$  співпадає з оптичною віссю дзеркала, а початок координат знаходиться у вершині сферичної поверхні (рис. 1). Тоді положення вершини деякої  $q$ -ї канавки однозначно визначається координатами  $(x'_q, z'_q)$ , водночас

$$x'_q = q \cdot \Delta, \quad (2)$$

$$z'_q = \sqrt{R^2 - x'^2_q} - R, \quad (3)$$

де  $q = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

З рис. 1, враховуючи закон відбивання [3], можна записати співвідношення:

$$\varepsilon_q = \varepsilon'_q; \delta_q = \varepsilon_q; \alpha = \varepsilon_q + \varepsilon'_q = 2\varepsilon_q; \alpha = \arctan\left(\frac{x'_q}{f + z'_q}\right) \Rightarrow \delta_q = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{x'_q}{f + z'_q}\right). \quad (4)$$

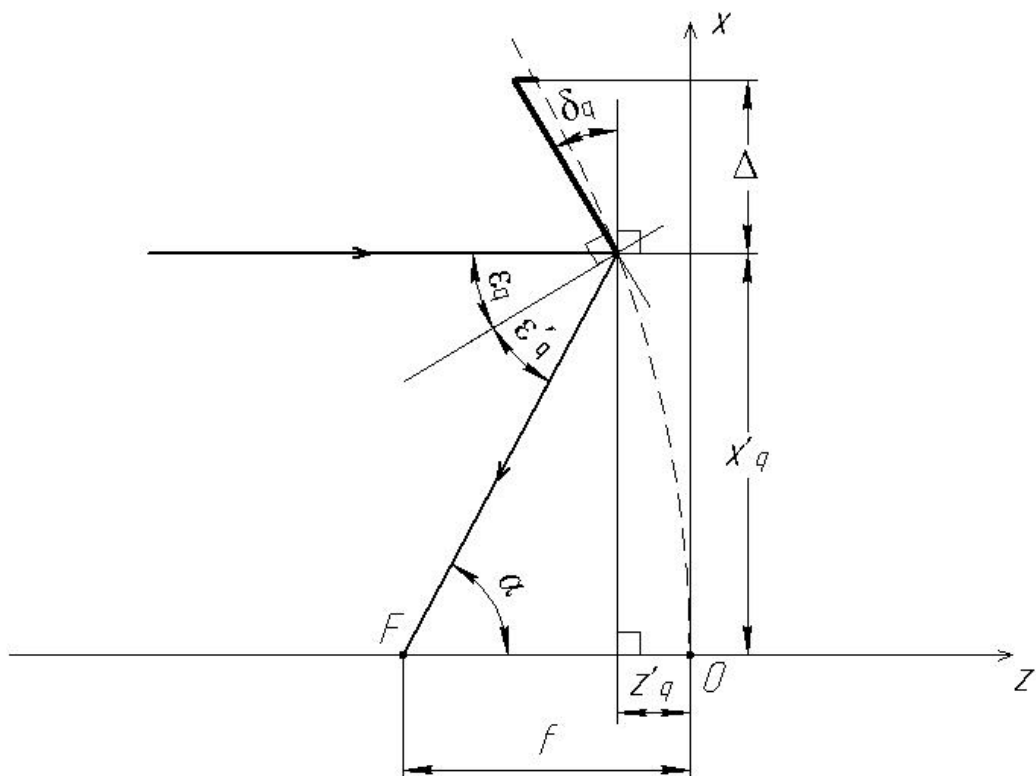


Рис. 1. Одна із зон Френеля дифракційного дзеркала сферичної форми

Отримана таким чином формула (4) дозволяє знайти кут нахилу  $\delta_q$  деякої  $q$ -ї канавки.

### Канавки зі сферичним дном

Не дивлячись на явні переваги такого методу (простота розрахунків і форми канавок, і як наслідок, технологічність виготовлення), він має суттєвий недолік. Умова збіжності паралельного пучка виконується лише для променів, що відбиваються на вершинах канавок, а самі канавки є лише плоскими дзеркалами, розміщеними під різними кутами. Дзеркала, побудовані за таким принципом, внаслідок великих аберацій не можуть задовольняти вимогам сучасної оптики, зокрема для візуальних приладів.

Припустимо, що деяка  $q$ -та канавка має форму звичайного сферичного дзеркала (рис. 2).

Оскільки відомо, що промінь, який відбився на вершині канавки, точно потрапить у фокус цього дзеркала, то, не враховуючи сферичну аберацію, можна стверджувати, що плоска канавка є дотичною до сферичної поверхні дзеркала. Радіус  $r_q$  і центр  $C_q$  цієї поверхні однозначно визначається положенням вершини плоскої канавки і кутом її нахилу.

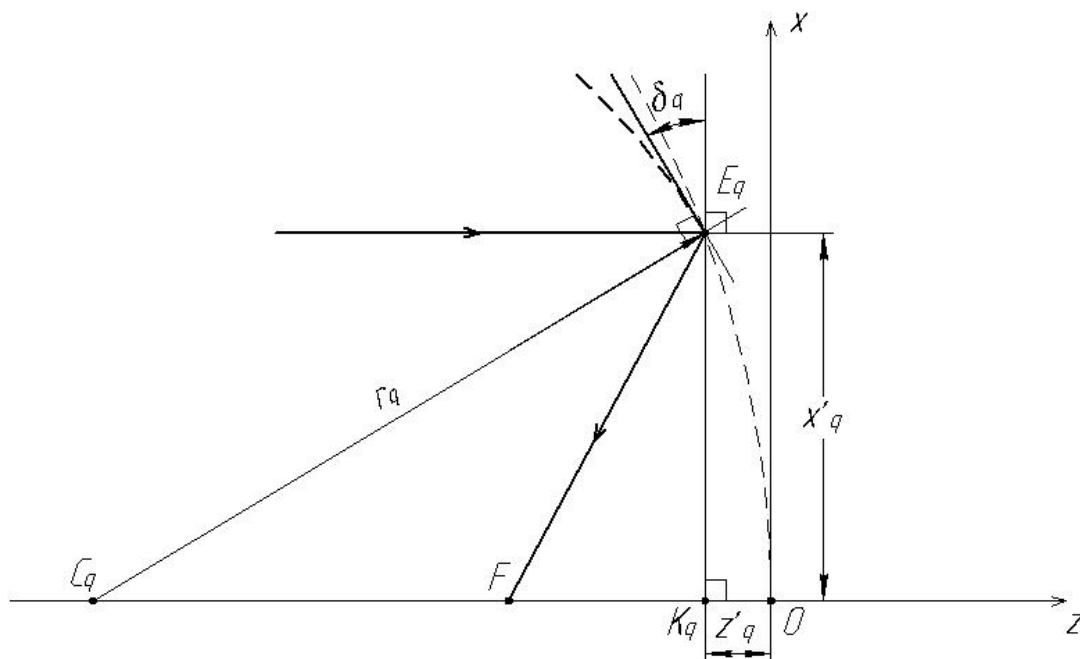


Рис. 2. До розрахунку радіусу дна канавки. Жирною пунктирною лінією показана сферична поверхня канавки радіусом  $r_q$ , центр  $C_q$  якої знаходиться на оптичній осі лінзи, а плоска поверхня, нахилена під кутом  $\delta_q$ , являється дотичною до неї

З  $\Delta C_q E_q K_q$  маємо

$$r_q = \frac{x'_q}{\sin \delta_q}. \quad (5)$$

Положення центру сферичної поверхні канавки визначається відстанню  $C_q O$ . З рис. 4 можна записати

$$C_q O = C_q K_q + K_q O = \sqrt{r_q^2 - x_q'^2} - z'_q. \quad (6)$$

З урахуванням вищезазначеної системи координат, рівняння поверхні дифракційного дзеркала сферичної форми матиме наступний вигляд

$$z_q(x) = \sqrt{r_q^2 - x^2} - C_q O = \sqrt{r_q^2 - x^2} - \sqrt{r_q^2 - x_q'^2} + z'_q. \quad (7)$$

Оскільки така сферична поверхня канавки утворює звичайне сферичне дзеркало, то точно збігатися у фокусі будуть не тільки промені, що відбилися на вершині канавки, а й всі промені, що падають на цю поверхню.

### Визначення радіусу дна центральної канавки

Особливістю цього методу є також те, що за допомогою вищезазначених формул неможливо визначити радіус дна центральної (першої) канавки оскільки її вершина фактично знаходиться на оптичній осі дзеркала.

Однак відомо, що фокусна відстань сферичного дзеркала для параксіальної області дорівнює половині його радіусу [4], отже:

$$r_c = 2 \cdot f. \quad (8)$$

### Канавки параболічної форми

Сферичні канавки забезпечують набагато краще фокусування світла у порівнянні з плоскими, однак вони мають сферичну аберацію, яка значною мірою порушує гомоцентричність осьових пучків. Відомо, що параболічне дзеркало, на відміну від сферичного, відбиває без аберацій промені, що паралельні оптичній осі, в головний фокус, і навпаки [5].

Рівняння параболічної поверхні  $q$ -ї канавки в загальному вигляді записується як:

$$z_q(x) = a_q \cdot x^2 + b_q, \quad (9)$$

де  $a_q, b_q$  – коефіцієнти, що впливають на кривизну і положення центру параболі.

За аналогією зі сферичними канавками, вважаємо, що плоска канавка є дотичною до параболічної поверхні дзеркала.

Із геометричного визначення похідної запишемо

$$\frac{dz_q(x'_q)}{dx'_q} = 2 \cdot a_q \cdot x'_q = \tan(\pi - \delta_q) \Rightarrow a_q = \frac{\tan(\pi - \delta_q)}{2x'_q}. \quad (10)$$

Для знаходження коефіцієнта  $a_c$  центральної канавки скористаємося наступним записом параболічної поверхні:

$$z(x) = -\frac{1}{2R_0} \cdot x^2, \quad (11)$$

де  $R_0$  – радіус кривизни центральної зони.

Тоді

$$a_c = -\frac{1}{2r_c}. \quad (12)$$

Для знаходження коефіцієнта  $b_c$  скористаємось твердженням, що парабола проходить через вершину канавки, а саме:

$$z'_q = a_q \cdot x_q'^2 + b_q \Rightarrow b_q = z'_q - a_q \cdot x_q'^2 = z'_q - \frac{\tan(\pi - \delta_q)}{2} x_q'. \quad (13)$$

Підставивши коефіцієнти  $a_q$  і  $b_q$  в формулу (9), отримаємо функцію, що описує параболічну поверхню  $q$ -ї канавки. Такі канавки позбавлені аберацій осьових пучків, а отже забезпечується краще фокусування у порівнянні зі сферичними канавками.

### Реалізація методу

Метод проектування дифракційного дзеркала сферичної форми, розглянутий у даній роботі, було використано для проектування дзеркала із фокусною відстанню 1000 мм, радіусом 2000 мм і діаметром 2000 мм. Кількість зон було обрано з конструктивних міркувань і становить  $N=10$ . Геометричні параметри отриманого мікропрофілю представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. Геометричні параметри мікропрофілю розрахованого дзеркала

№ канавки $q$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Геометричний параметр										
Для плоских канавок										
Кут нахилу канавки $\delta_q$ , град.	0	2.862	5.711	8.532	11.314	14.049	16.73	19.354	21.921	24.433
Для сферичних канавок										
Радіус канавки $r_q$ , мм	-2000	-2002.4953	-2009.9256	-2022.1272	-2038.8381	-2059.7116	-2084.3335	-2112.2381	-2142.9226	-2175.8576
Положення центру канавки $S_qO$ , мм	-2000	-2002.498	-2009.975	-2022.378	-2039.623	-2061.61	-2088.229	-2119.375	-2154.963	-2194.942
Для параболічних канавок										
Параметр $a_q$ , мм	-0.00025	-0.00025	-0.00025001	-0.00025003	-0.0002501	-0.00025024	-0.00025049	-0.00025089	-0.00025151	-0.0002524
Параметр $b_q$ , мм	0	-0.002	-0.025	-0.125	-0.392	-0.949	-1.946	-3.563	-6.003	-9.501

Графіки на рис. 3, побудовані для лінзи із зазначеними вище параметрами, підтверджують те, що канавки параболічної форми забезпечують найкращу якість зображення, а плоскі – найнижчу, незалежно від розміру канавок.

### Висновок

У даному дослідженні було запропоновано метод проектування дифракційного дзеркала сферичної форми, оптична сила якого дорівнює оптичній силі асферичного дзеркала. Отримано вирази, що описують профіль такого дзеркала для різних типів канавок (плоскі, сферичні, параболічні). Встановлено, що ка-

навки параболічної форми забезпечують якість зображення, найближчу до асферичної поверхні, яку було замінено.

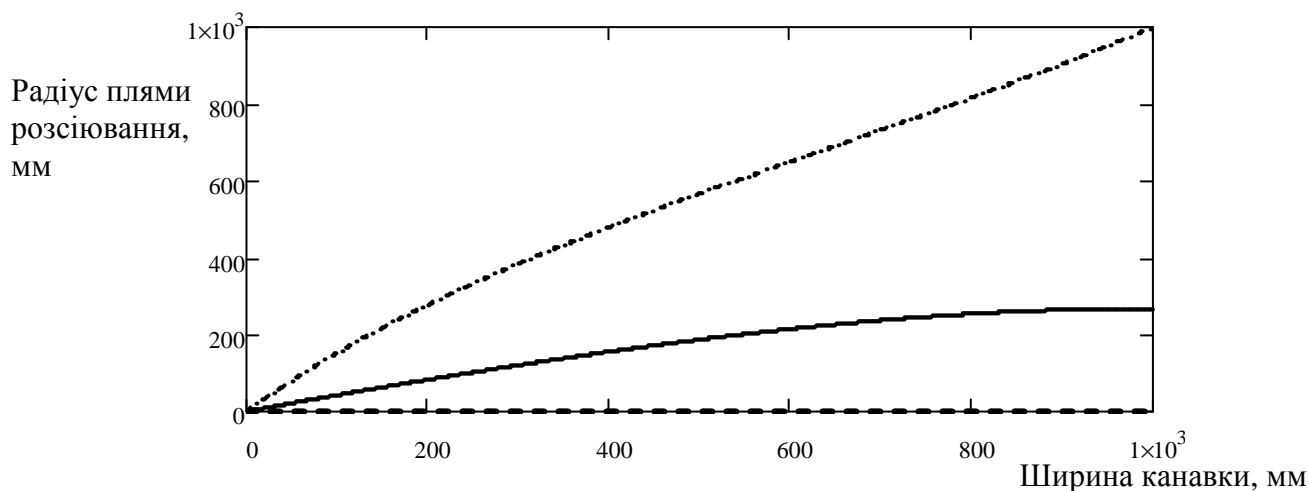


Рис. 3. Графіки залежності радіусу плями розсіювання (геометричне наближення) від ширини канавки плоского (штрих-пунктирна лінія), сферичного (суцільна лінія) та параболічного (пунктирна лінія) типу.

Для підвищення точності розрахунків можна використати початкові координати не вершини канавки, а центру дна канавок. У той же час дзеркало має канавки різної глибини, що викликає певні труднощі знаходження цього центру.

Використовуючи запропоновані принципи побудови дифракційних дзеркал, можна отримати вирази для знаходження геометричних параметрів дзеркального мікропрофілю, нанесеного не тільки на сферичну, а і на поверхню довільної форми, що за своєю дією є аналогічним асферичному дзеркалу.

### Література

1. Колобродов В. Г. Оптичні системи космічних багато спектральних сканерів / В. Г. Колобродов, В. М. Тягур, М. І. Лихоліт // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – №6. – С. 125 – 132.
2. Zheng Zhenrong. Design of objective lens with reflective spherical Fresnel zone plate / Zhenrong Zheng, Xütao Sun, Peifu Gu, Xü Liu // Frontiers of Optoelectronics in China. – 2008. – Vol. 1, № 1-2. – P. 178-182.
3. Заказнов Н. П. и др. Теория оптических систем / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. Н. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.: ил.
4. Панов В. А. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов, М. Я. Кругер, В. В. Кулагин и др. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 742 с.
5. Цуканова Г. И. Прикладная оптика. Часть 1. Учебно-методическое пособие / Г. И. Цуканова, Г. В. Карпова, В. Г. Карпов, О. В. Багдасарова и др. - СПб.: СПб ГУИТМО, 2003. – 75 с.:ил.

Надійшла до редакції  
27 травня 2013 року

© Голюк І. В., Колобродов В. Г., 2013