

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ФУНКЦІЇ ПЕРЕДАЧІ МОДУЛЯЦІЇ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

к.т.н. С.В. Чорний, О.А. Жевтюк
(представив д.т.н., проф. І.І. Зима)

Досліджуються функції передачі модуляції оптичних систем з додатковими дифракційними елементами. Представлені приклади розрахунків безабераційної функції передачі модуляції при довільних апертурах оптичної системи.

Постановка проблеми. Однією з сучасних задач вдосконалення систем спостереження, що використовуються в рамках „Відкритого неба” [1], є забезпечення однакового розрізнення на місцевості при різних висотах спостереження. Дана задача вирішується шляхом встановлення додаткових дифракційних світлофільтрів, які дозволяють керувати загальним розрізненням системи, та встановлювати необхідне значення. В даному випадку в якості таких світлофільтрів розглядаються додаткові непрозорі дифракційні елементи, що встановлюються у тракці оптичної системи (ОС).

Аналіз літератури. У [1] представлена правова основа щодо проведення польотів спостереження над країнами-учасниками даного договору. У [3] описується вивід функції передачі модуляції (ФПМ) дифракційної якості, на основі якого розроблений алгоритм розрахунку безабераційної функції передачі модуляції при довільній апертурі оптичної системи (ОС) [2]. У [4] представлений програмний пакет для проведення математичного моделювання, обчислень та побудови графіків.

Мета статті. Привести результати впливу додаткових дифракційних елементів на функції передачі модуляції оптичних систем.

Розділ основного матеріалу. Розглянемо приклади розрахунків апертур ОС дифракційної якості з додатковими дифракційними елементами (ДДЕ), які представлені на рис. 1.

1. *Додатковий дифракційний елемент у вигляді прямокутної смуги по осі X та Y* (рис. 1, а).

Співвідношення, яке характеризує вплив прямокутної смуги, має вигляд:

а) по осі Y –

$$m_1(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)] [r^2 - x^2]^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left[\frac{x+d}{2} - a \right] + 1 \right) + \left(\text{signum} \left[\frac{x-d}{2} - a \right] + 1 \right) \right]; \quad (1)$$

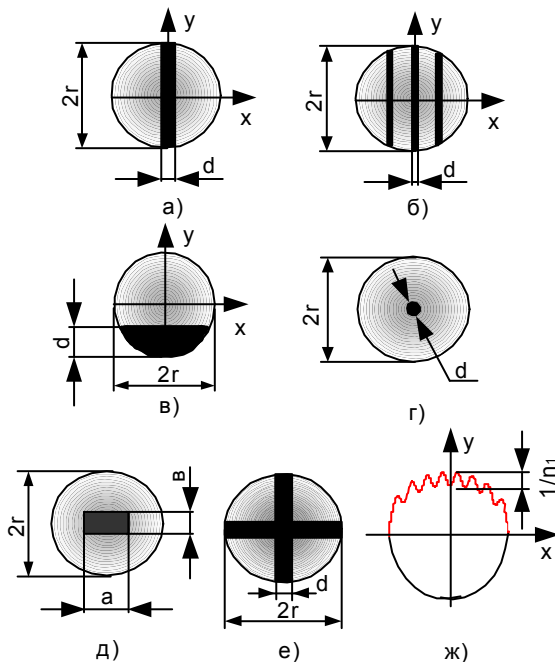


Рис. 1. Апертури з ДДЕ: а – з прямокутною смугою по осі X та Y; б – з трьома прямокутними смугами по осі X та Y; в – з несиметричним затемненням по осі X та Y; г – з затемненням параксiальної області у вигляді кола; д – у вигляді прямокутника; е – з хрестоподібним затемненням; ж – з косинусоїдальним затемненням

б) по осі X –

$$m_2(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)] [r^2 - x^2]^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{\frac{1}{2}} - d \right) + 1 \right) \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{\frac{1}{2}} - d \right) \right], \quad (2)$$

де r – радіус одиничної апертури; d – ширина прямокутної смуги; a, n – числові коефіцієнти; x – нормована просторова частота.

Підставляючи функції $m_1(x)$ та $m_2(x)$ до виразу (3) [2] отримаємо безабераційні ФПМ даних апертур, які представлені на рис. 2, а.

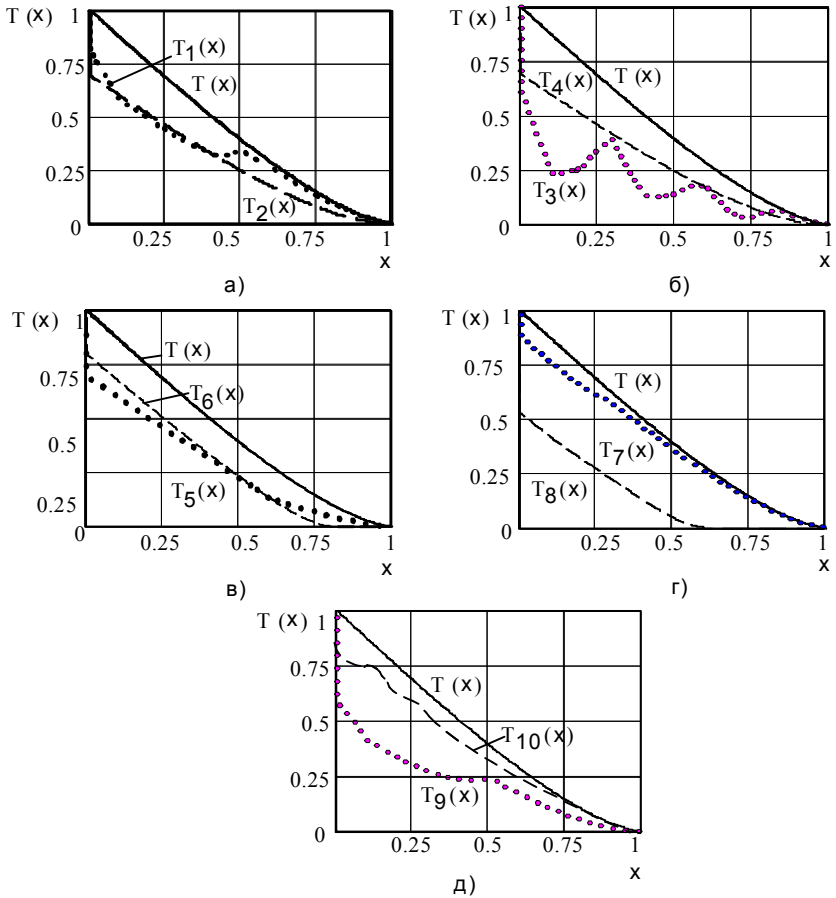


Рис. 2. Безабераційні ФПМ: а – з прямокутною смугою ($T(x)$ – ідеальна безабераційна ФПМ (суцільна крива) [3]): $T_1(x)$ – ДДЕ по осі Y, $d = 0,1$ (пунктирна крива), $T_2(x)$ – ДДЕ по осі X, $d = 0,1$ (штрихова крива); б – з трьома прямокутними смугами: $T_3(x)$ – ДДЕ по осі Y, $d = 0,05$ (пунктирна крива), $T_4(x)$ – ДДЕ по осі X, $d = 0,1$ (штрихова крива); в – з несиметричним затемненням апертури: $T_5(x)$ – ДДЕ по осі X, $d = 0,1$ (пунктирна крива), $T_6(x)$ – ДДЕ по осі Y, $d = 0,2$ (штрихова крива); г – з затемненням параксильної області ОС: $T_7(x)$ – ДДЕ у вигляді кола, $d = 0,2$ (пунктирна крива), $T_8(x)$ – ДДЕ у вигляді прямокутника, $a = 0,2$, $v = 0,1$ (штрихова крива); д – з хрестоподібним затемненням $T_9(x)$, $d = 0,1$ (пунктирна крива), з косинусоїдальним затемненням $T_{10}(x)$ $k = 50$, $n_1 = 15$ (штрихова крива)

$$T_N(x) = \frac{1}{\int_0^1 (m_N(x))^2 dx} \int_{-\tau}^0 \text{signum} [(m_N(x) - m_N(x - \tau)) + 1] m_N(x - \tau) + \text{signum} [(m_N(x - \tau) - m_N(x)) + 1] m_N(x) dx. \quad (3)$$

2. ДДЕ у вигляді трьох прямокутних смуг по осі X та Y (рис. 1, б). Співвідношення, яке характеризує вплив трьох прямокутних смуг, має вигляд:

а) по осі Y –

$$m_3(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)] [r^2 - x^2]^{\frac{1}{2}} \times \\ \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left[\frac{x+d}{2} - a \right] + 1 \right) + \left(\text{signum} \left[\frac{x-d}{2} - a \right] + 1 \right) \right] \times \\ \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left[\frac{x+d}{2} - e \right] + 1 \right) + \left(\text{signum} \left[\frac{x-d}{2} - e \right] + 1 \right) \right] \times \\ \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left[\frac{x+d}{2} - c \right] + 1 \right) + \left(\text{signum} \left[\frac{x-d}{2} - c \right] + 1 \right) \right], \quad (4)$$

де a, c, e, n – числові коефіцієнти;

б) по осі X –

$$y(x) = [r^2 - (x)^2]^{\frac{1}{2}}; y_1(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)]; \\ z_1(x) = k (\text{signum}(y(x) - (n - d_1)) + 1) (y(x) - (n - d_1)) y_1(x); y_2(x) = y(x) - z_1(x); \\ z_2(x) = k (\text{signum}(y(x) - (n - d_2)) + 1) (y(x) - (n - d_2)) y_1(x); y_2'(x) = y_2(x) z'(x); \\ z_3(x) = k (\text{signum}(y(x) - (n - d_3)) + 1) (y(x) - (n - d_3)) y_1(x); y_4(x) = y(x) - z_2(x); \\ z_4(x) = k (\text{signum}(y(x) - (n - d_4)) + 1) (y(x) - (n - d_4)) y_1(x); y_5(x) = y(x) - z_3(x); \\ z_5(x) = k (\text{signum}(y(x) - (n - d_5)) + 1) (y(x) - (n - d_5)) y_1(x); y_5'(x) = z'(x) (y_5(x) - y_4(x)); \\ z_6(x) = \frac{1}{2} \left[\left(-\text{signum} \left(\frac{x+d_6}{2} - a \right) + 1 \right) + \left(\text{signum} \left(\frac{x-d_6}{2} - a \right) + 1 \right) \right]; \\ y_3(x) = y(x) - y_2(x); y_7(x) = y_3(x) - z_4(x); z_6'(x) = k'(1 - z_6(x)); \\ z'(x) = z_6'(x) + z_6(x); y_6(x) = y(x) - y_3(x); \\ m_4(x) = y_1(x) (y_7(x) + y_5'(x) + z_5(x) + y_2'(x)), \quad (5)$$

де d – ширина прямокутної смуги; k, d₁, d₂, d₃, d₄, d₅, d₆ – числові коефіцієнти.

Підставляючи функції m₃(x) та m₄(x) до виразу (3) отримаємо безабераційні ФПМ даних апертур, які представлені на рис. 2, б.

3. ДДЕ у вигляді несиметричного затемнення апертури ОС по осі Х та Y (рис. 1, в). Співвідношення, яке характеризує вплив несиметричного затемнення апертури ОС, має вигляд:

а) по осі Х –

$$m_5(x) = \left[(r^2 - x^2)^{1/2} - \frac{1}{2} \left(\text{signum} \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{1/2} - d \right) + 1 \right) \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{1/2} - d \right) \right] \times \\ \times \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)]; \quad (6)$$

б) по осі Y –

$$m_6(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)] [r^2 - x^2]^{1/2} \times \\ \times \frac{1}{2} [(-\text{signum}(x) + 1) + (-\text{signum}(x - d) + 1)], \quad (7)$$

де d – ширина затемнення.

Безабераційні ФПМ даних апертур представлені на рис. 2, в.

4. ДДЕ у вигляді затемнення параксіальної області ОС (фільтруюча маска (ФМ) у вигляді кола та прямокутника) (рис. 1, г, д). Співвідношення, яке характеризує вплив затемнення параксіальної області ОС, має вигляд:

а) ФМ у вигляді кола:

$$m_7(x) = \left([r^2 - x^2]^{1/2} - \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - (x)^2 \right]^{1/2} \right) \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)], \quad (8)$$

де d – діаметр кола.

б) ФМ у вигляді прямокутника:

$$u(x, v) = [\Phi(x) - \Phi(x - v)]; \quad u'(x, v) = \text{if}[u(x, v) \geq 1, a, 0]; \\ m_8(x) = \left([r^2 - (x - a)^2]^{1/2} - u'(x, v) \right) \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)], \quad (9)$$

де a, v – сторони прямокутника; $\Phi(x)$ – функція Хевісайда, повертає 0 при $x < 0$ та 1 у іншому випадку; if («умова», x, y) – умовний вираз, який повертає вираз x, якщо «умова» > 0 , та вираз y в інших випадках.

Безабераційні ФПМ даних апертур представлені на рис. 2, г.

5. Хрестоподібний ДДЕ (рис. 1, е). Співвідношення, яке характеризує вплив апертури з хрестоподібним затемненням, має вигляд:

$$m_9(x) = \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)] [r^2 - x^2]^{1/2} \times \\ \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left[\frac{x + d}{2} - a \right] + 1 \right) + \left(\text{signum} \left[\frac{x - d}{2} - a \right] + 1 \right) \right] \times$$

$$\times \dots \times \frac{1}{2} \left[\left(\text{signum} \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{\frac{1}{2}} - d \right) + 1 \right) \left(\left[(r^2 - x^2) \right]^{\frac{1}{2}} - d \right) \right], \quad (10)$$

де d – ширина прямокутної смуги; a, n – числові коефіцієнти.

Безабераційна ФПМ даної апертури представлена на рис. 2, д.

б. *Косинусоїдальний ДДЕ* (рис.1, ж). Співвідношення, яке характеризує вплив апертури з косинусоїдальним затемненням, має вигляд:

$$m_{10}(x) = \left(\left[r^2 - (x)^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{n_1} \cos(kx) \right) \frac{1}{2} [\text{signum}(x) - \text{signum}(x - n)], \quad (11)$$

де k, n_1 – числові коефіцієнти.

Безабераційна ФПМ даної апертури представлена на рис. 2, д.

Висновки. У зв'язку з тим, що реальні ОС літальних апаратів мають неоднакове розрізнення уздовж та поперек польоту, найбільш доцільними є дифракційні елементи, що неоднаково впливають на уздовжнє та поперечне розрізнення. Тому найефективнішим є несиметричне затемнення апертури по осі Y та затемнення параксіальної області ОС у вигляді прямокутника. Дані конфігурації можуть бути використані як ФМ дифракційного світлофільтра для керування величиною детальності оптичного сигналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кирк У. Клар, Стівен Е. Блок. Договор "Открытое небо". – Агентство по уменьшению угрозы. Отдел истории 45045 Aviation Drive Dulles International Airport Dulles, VA 20166 – 7517, 1999. – 70 с.
2. Чорний С.В., Жевтюк О.А. Алгоритм розрахунку безабераційної функції передачі модуляції при довільній апертурі оптичної системи // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 5(21). – С. 238 – 242.
3. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 206 с.
4. Дьяконов В. Mathcad 2000: учебный курс.– С.-Пб.: Питер, 2001. – 586 с.

Надійшла 24.02.2003

ЧОРНИЙ Сергій Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, нач. кафедри Харківського інституту ВПС. Закінчив Київське ВВАІУ у 1977 році. Галузі наукових інтересів – теорія дифракції, оптико-електроніка, теорія вимірювань, навігація.

ЖЕВТЮК Олександр Анатолійович, ад'юнкт Харківського інституту ВПС. Закінчив Київський інститут Військово-Повітряних Сил у 1998 році. Галузі наукових інтересів – теорія дифракції, оптико-електронні системи.