

УДК 681.758

М.С. Колобродов, аспірант

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ АБЕРАЦІЙ ФУР'Є-ОБ'ЄКТИВА НА ПРОСТОРОВУ СПЕКТРАЛЬНУ РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРА

Анотація. В даній статті досліджується вплив аберацій Фур'є-об'єктива на просторову спектральну роздільну здатність когерентного оптичного спектроаналізатора (КОС). Для визначення просторової роздільної здатності Фур'є-об'єктива запропоновано використовувати критерій, аналогічний критерію Релея, згідно з яким зображення двох прилеглих точок спостерігатися окремо, якщо контраст між ними дорівнює контрасту зображення, сформованого дифракційно обмеженим об'єктивом.

Ключові слова: когерентний оптичний спектроаналізатор, аберації Фур'є-об'єктива, просторова роздільна здатність.

ВСТУП

Потенційні можливості оптичних методів обробки інформації, в тому числі і зображень, значно перевершують сучасний стан її практичного застосування [1,2]. Більшість оптичних процесорів використовують в своєму складі когерентні оптичні спектроаналізатори (КОС), призначені для перетворення двовимірного розподілу амплітуди поля в просторовий спектр цього розподілу [3]. Обмеження ефективності оптичних систем обробки інформації обумовлено пристроями введення і виведення оброблюваних сигналів [1]. В сучасних КОС в якості пристрою введення оптичної інформації (зображення) використовують матричні просторово-часові модулятори світла (ПЧМС), пропускання або відбивання пікселів яких визначається досліджуванним сигналом [4,5]. Вихідний сигнал реєструється матричним приймачем випромінювання (МПВ) з подальшою комп'ютерною обробкою, що значно розширює функціональні можливості КОС [5,6].

Матричні структури пристроїв введення сигналу в КОС та реєстрації вихідного сигналу, а також аберації Фур'є-об'єктива призводять до значних спотворень вхідного сигналу і погіршення спектральної роздільної здатності КОС.

Таким чином дослідження впливу аберацій Фур'є-об'єктива на просторову спектральну роздільну здатність когерентного оптичного спектроаналізатора є актуальною науковою задачею.

УЗАГАЛЬНЕНА СХЕМА КОС

Узагальнена схема КОС складається з послідовно розташованих елементів: джерело когерентного випромінювання (лазер); модулятор, що характеризується амплітудним коефіцієнтом пропускання; об'єктив та МПВ. Об'єктив, що використовується для здійснення спектрального аналізу, називають *фур'є-об'єктивом*.

Принцип роботи КОС полягає в спектральному розкладанні просторового сигналу. Він дозволяє аналізувати одночасно амплітудні та фазові спектри як одновимірних, так і двовимірних просторових сигналів. Світлова хвиля від джерела випромінювання падає на модулятор, що має певний коефіцієнт пропускання, де відбувається дифракція світла. За допомогою фур'є-

об'єктива формується просторовий спектр вхідного сигналу. Далі фотоприймачем реєструється розподіл освітленості та проводиться аналіз параметрів спектру. Сигнал на виході оптичної системи з точністю до постійного множника співпадає із просторовим спектром вхідного сигналу.

Вважатимемо, що на шляху поширення випромінювання між площинами спостерігається дифракція Френеля [3]:

$$V(x_i, y_i) = \Phi_{i-1,i} \{V(x_{i-1}, y_{i-1})\} = A_F \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(x_{i-1}, y_{i-1}) \times \\ \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda l_{i-1,i}} [(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2] \right\} dx_{i-1} dy_{i-1}, \quad (1)$$

де $\Phi_{i-1,i}\{ \}$ – оператор, який описує дифракцію Френеля на ділянці вільного простору товщиною $l_{i-1,i}$; $V(x_i, y_i)$ і $V(x_{i-1}, y_{i-1})$ – розподіл комплексної амплітуди поля в i -й та $i-1$ -й площинах відповідно; A_F – комплексна стала.

Найбільш поширеною схемою побудови спектроаналізатора є схема, в якій модулятор розташований перед фур'є-об'єктивом (рис.1). Втакій системі вилучені квадратичні фазові спотворення спектра сигналу (при розташуванні вхідного транспаранта в передній фокальній площині фур'є-об'єктива), а юстуванням оптичної системи досягається мінімум спотворень його просторових і енергетичних параметрів.

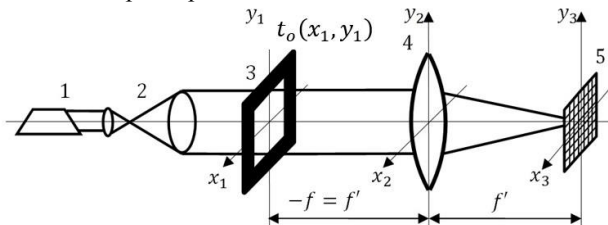


Рисунок 1. Схема КОС: 1 – лазер; 2 – оптична система, що формує паралельний пучок променів; 3 – вхідний модулятор прямокутної форми; 4 – фур'є-об'єктив; 5 – МПВ

ВПЛИВ АБЕРАЦІЙ ФУР'Є-ОБ'ЄКТИВА НА ПРОСТОРОВУ СПЕКТРАЛЬНУ РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ КОС

Просторова спектральна роздільна здатність приладу δv_c визначається як здатність приладу відображати окремо дві спектральні гармоніки однакової амплітуди, які мають близькі просторові частоти v_x і $v_x + \delta v_c$.

Для знаходження параметра δv_c розглянемо рівняння (2), яке визначає сигнал на виході МПВ[7]

$$u_D(x_3) = \frac{I_p}{\lambda^2 f^2} \left\{ \left[F \{ t_{m0}(x_1) t_s(x_1) \} * h_0(x_3) \right]^2 * R_D(x_3) \right\}, \quad (2)$$

де $I_p = |V_p|^2$ – інтенсивність лазерного пучка, який освітлює модулятор; λ –

довжина хвилі лазерного випромінювання; f – фокусна відстань фур'є-об'єктива; $F\{\}$ – оператор одновимірного перетворення Фур'є; $\{\ast\}$ – оператор одновимірної згортки.

В області просторових частот v_x в задній фокальній площині фур'є-об'єктива це рівняння має вигляд

$$u_D(v_x) \cong \frac{I_p}{\lambda^2 f^2} M_m(v_x) M_o(v_x) M_D(v_x), \quad (3)$$

де $M_m(v_x)$, $M_o(v_x)$, $M_D(v_x)$ – модуляційні передавальні функції (МПФ) модулятора, фур'є-об'єктива і МПВ відповідно.

Для багатокомпонентної системи нормовану функцію (3), що представляє собою МПФ спектроаналізатора, будемо апроксимувати функцією Гауса [7]

$$M_c(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_c^2 v_x^2), \quad (4)$$

де r_c – радіус функції розсіювання точки КОС, при якому вона зменшується до рівня 0,606 від максимального значення.

Якщо МПФ модулятора, фур'є-об'єктива і МПВ апроксимувати функціями Гауса (4), а положення їх функцій розсіювання точок в фокальній площині фур'є-об'єктива є незалежними, то радіус кружка розсіювання КОС визначається як

$$r_c = \sqrt{r_m^2 + r_o^2 + r_d^2}, \quad (5)$$

r_m, r_o, r_d – радіуси кружків розсіювання модулятора, фур'є-об'єктива і МПВ відповідно.

Тоді спектральну роздільну здатність КОС визначимо аналогічно критерію Релея як відстань δx_3 між максимумами амплітуд гармонік з частотами v_x і $v_x + \delta v_c$, при якому дифракційний максимум однієї гармоніки збігається з першим мінімумом іншої гармоніки, тобто (рис. 2).

Тоді згідно $v_x = \frac{x_3}{\lambda f}$ маємо

$$\delta v_c = \frac{r_c}{\lambda f} \quad (6)$$

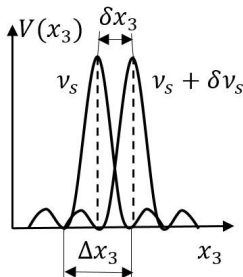


Рисунок 2. Критерій Релея

ВИСНОВКИ

1. Відомо ряд монографій і статей, присвячених фізичним основам роботи когерентних (лазерних) спектроаналізаторів. В той же час практично відсутня науково-технічна література, що присвячена методам проектування оптичних систем, покладених в основу таких спектроаналізаторів.

2. Для визначення просторової роздільної здатності КОС запропоновано використовувати критерій, аналогічний критерію Релея, згідно з яким зображення двох прилеглих точок спостерігатися окремо, якщо контраст між ними дорівнює контрасту зображення, сформованого дифракційно обмеженим об'єктивом. Отримані формули (5) і (6) дозволяють дослідити вплив аберацій Фур'є-об'єктива на просторову спектральну роздільність КОС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кейсесент Д. Оптическая обработка информации / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 350 с.
2. Okan K.E. Diffraction, fourier optics and imaging. New Jersey, USA: Wiley & Sons, 2007. 428 p.
3. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
4. Curatu G., Harvey J.E. Analysis and design of wide-angle foveated optical system based on transmissive liquid crystal spatial modulators. Optical Engineering. 2009. Vol. 48(4). P. 043001-1 – 043001-10.
5. Kuz'min M.S., Rogov M.S. Optical Fourier processor with a liquid-crystal information-input device. Journal of Optical Technology. 2015. Vol. 83(3). P. 147–152.
6. Driggers R.G., Friedman M.H., Nichols J. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. London: Artech House, 2012. 534 p.
7. Kolobrodov V.G., Tymchik G. S., Kolobrodov M. S. Mathematical model of digital optoelectronic spectrum analyzer. Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, Iss. 67. 2016. P. 71–76.