

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 681.7.013.8

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ОПТИЦІ

Захарченко В.С., Колобродов В.Г., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

Досліджено можливість застосування математичного апарату вейвлет перетворення в оптиці та запропоновано нові автоматизовані методи вимірювання аберацій оптичних систем

Вступ

Астигматизм в оптичних системах призводить до зміни розподілу інтенсивності освітленості в площині зображень. Вимірювання даного параметру важливе не лише з огляду на аналіз якості зображення, але і для застосування у спеціальних оптичних системах, наприклад корекції астигматизму лазерного діода. На даний момент прилади для вимірювання астигматизму базуються на принципі обертання двох циліндричних призм [1]. Проте даний метод потребує великих затрат часу та характеризується похибками обертальної системи. Застосування вейвлет перетворення здатне зменшити час аналізу зображення, а виключення обертаючих елементів підвищує точність вимірювання.

Постановка задачі

Зважаючи на колосальний потенціал вейвлет перетворень необхідно дослідити математичний апарат даного процесу та на основі отриманих відомостей розробити алгоритми його застосування в галузях, пов'язаних з оптичними системами і обробкою сигналів, що ними створюються, а також дослідити можливості сучасних математичних пакетів та зробити висновки стосовно можливості покращення зображень низької якості та виявлення об'єктів при низькому контрасті.

Оптичні системи можна розділити на два загальних підкласи : системи, які створюють зображення та системи, які не створюють зображення. Для систем першого роду важливо отримати високу якість зображення (на дисплеї, чи в цифровому вигляді). Досягти цього можна двома методами – або покращувати параметри оптичної системи та приймача зображення, або, застосовуючи математичний апарат, виділяти необхідну інформацію із зображення низької якості. Перший метод неминуче веде до ускладнення системи, а як наслідок до збільшення її вартості. Крім того існують випадки, коли просто фізично неможливо виконати поставлені вимоги. Метод обробки зображень не потребує значних технологічних ресурсів, проте не може застосовуватися для вирішення всіх поставлених задач. В цьому випадку необхідне спеціальне програмне забезпечен-

ня, введення мікропроцесорних систем для обробки сигналу, а саме важливе – цей процес наразі неможливо проводити в реальному масштабі часу.

Системи, які наразі застосовуються для вимірювання астигматизму вимагають присутності людини, або займають довгий час на аналіз зображення [1] (рис.1).

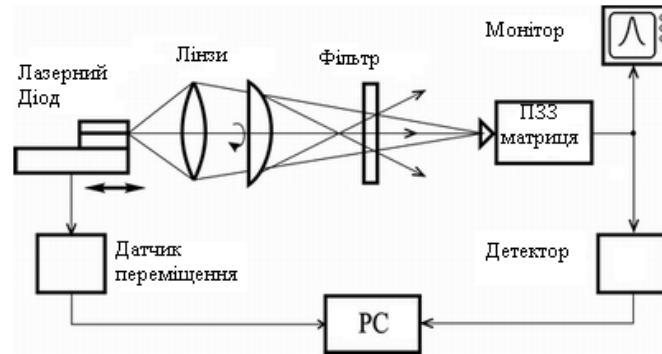


Рис.1. Схема вимірювання астигматизму

В цьому дослідженні пропонується методика застосування вейвлет перетворення для оцінки астигматизму в оптичній системі та підбір базисної функції, яка найкраще задовольнятиме поставленим вимогам.

Аналіз основ вейвлет перетворення

Саме термін вейвлет перетворення з'явився у 80-х роках минулого сторіччя та був введений у вживання Госсманом та Морле, які досліджували властивості сейсмічних та акустичних сигналів [2]. Наразі вейвлет перетворення широко використовуються для вирішення задач з розпізнавання образів; при обробці та синтезі різноманітних сигналів; для вивчення властивостей турбулентних потоків; для пакування великих обсягів інформації та в багатьох інших випадках [3].

Вейвлет перетворення одномірного сигналу складається з його розкладу по базису, що сконструйовано з функції, яка має певні властивості, - вейвлета, за допомогою масштабних змін та переносів. Кожна з функцій цього базису одночасно характеризує як певну просторову (часову) частоту, так і її локалізацію у фізичному просторі (часі). Отже, на відміну від перетворення Фур'є, вейвлет перетворення забезпечує двовимірну розгортку одновимірного сигналу, що досліджується. При цьому частота та координата розглядаються як незалежні змінні. Внаслідок цього з'являється можливість аналізувати властивості сигналу одночасно у фізичному (час, координата) та в частотному просторі [4].

В основу математичного апарату вейвлет перетворення покладено перетворення Хаара [2], згідно якого сигнал можна охарактеризувати його середнім значенням та його змінами відносно цього значення – флуктуаціями. Послідовний аналіз дозволяє нам виявити закономірності зміни сигналу на певному масштабі. Припустимо, що досліджуваний сигнал містить 16 дискретних значень, представлених у вигляді гістограми.

$$f(x) = \sum_{k=0}^{15} s_{4,k} \varphi_{4,k}(x), \quad (1)$$

де $s_{4,k} = \frac{f(k/16)}$ та $\varphi_{4,k}$ визначається як сходинка з одиничною нормою (рис. 2).

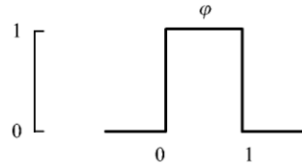


Рис. 2. Скейлінг-функція $\varphi(x) \equiv \varphi_{0,0}(x)$

На наступному рівні дослідження функції проводиться усереднення по сусіднім інтервалам, при цьому отримуємо нові значення сигналу, та таблицю доповнень, що відповідає відновлюваному сигналу. Отже, при довільному j запишемо нормувальні суми та доповнення у вигляді:

$$s_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [s_{j,2k} + s_{j,2k+1}], \quad d_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [s_{j,2k} - s_{j,2k+1}]. \quad (2)$$

А для зворотного перетворення:

$$s_{j,2k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [s_{j-1,k} + d_{j-1,2k}], \quad s_{j,2k+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [s_{j-1,k} - d_{j-1,2k}]. \quad (3)$$

Зважаючи на те, що дана формула не враховує напрям флуктуацій, вводиться спеціальна ψ функція, яка приймає значення 1 та -1 на інтервалі розкладу відповідного масштабу (рис. 3).

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \cdot \psi(2^j x - k). \quad (4)$$

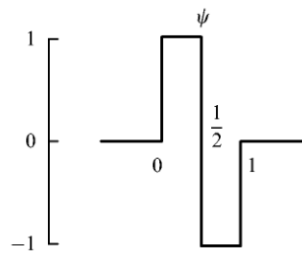


Рис. 3. "Материнський вейвлет" $\psi(x) \equiv \psi_{0,0}(x)$ Хаара

Отже на першому етапі розкладу функції у вейвлет-ряд отримаємо:

$$f(x) = \sum_{k=0}^7 s_{3,k} \varphi_{3,k}(x) + \sum_{k=0}^7 d_{3,k} \psi_{3,k}(x). \quad (5)$$

Тоді досліджувана функція після послідовних перетворень на масштабах: 1:8 ($j = 3$); 1:4 ($j = 2$); 1:2 ($j = 1$); 1:1 ($j = 0$), набуває наступного вигляду (рис. 4):

$$f(x) = s_{0,0} \varphi_{0,0}(x) + d_{0,0} \psi_{0,0}(x) + \quad (6)$$

$$+ \sum_{k=0}^1 d_{1,k} \psi_{1,k}(x) + \sum_{k=0}^3 d_{2,k} \psi_{2,k}(x) + \sum_{k=0}^7 d_{3,k} \psi_{3,k}(x).$$

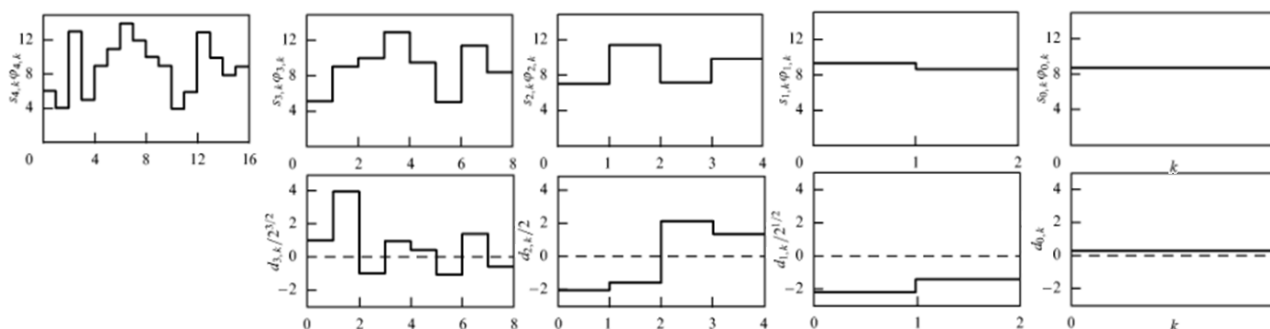


Рис. 4. Досліджувана функція ($j=4$) та розклад її у вейвлет ряд за допомогою вейвлета Хаара ($j = 0; 1; 2; 3$). Ліворуч - апроксимаційні коефіцієнти, праворуч – доповнення

Однією із характерних особливостей вейвлет перетворення є те, що результат, отриманий при розкладі в ряд, залежить від вигляду базису. А відтак розв’язання конкретної проблеми вимагає підбору вейвлету [4]. При вирішенні поставленої проблеми слід використовувати вейвлет приведений на рис. 10.

Результати досліджень

Метод автоматичного визначення астигматичної різниці оптичної системи.

В основу запропонованого методу автоматичного визначення астигматичної різниці покладено раніше відомий метод автоматичного фокусування мікроскопа [5]. Сутність даного методу полягає в тому, що при чіткому зображенні об’єкта в полі зору буде спостерігатися різка границя (різкий перехід в яскравості об’єкта), при чому чим чіткіше зображення, тим менше проміжних рівнів буде створюватися при розкладі сигналу у вейвлет ряд. Буквально це означає, що, чим меншою буде кількість деталей, а величина коефіцієнтів більша, тим вища якість зображення.

Двомірне вейвлет перетворення найчастіше здійснюється двома методами [4], при застосуванні одного змінні стискаються по різному (при заданні тензорними добутками). В даному випадку двомірний базис будується виходячи із одномірного ортонормального вейвлет базису (4) таким чином, щоб шляхом тензорного множення створити відповідні функції із двох одновимірних базисів.

$$\Psi_{j_1, k_1; j_2, k_2}(x_1, x_2) = \psi_{j_1, k_1}(x_1) \psi_{j_2, k_2}(x_2). \quad (7)$$

В іншому випадку змінні масштабуються однаково, тобто двовимірні вейвлети задаються наступним виразом:

$$2^j \Psi(2^j x - k, 2^j y - l), \quad j, k, l \in \mathbb{Z}. \quad (8)$$

В цьому випадку Ψ сформована з трьох елементарних вейвлетів, котрі записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} &2^j \varphi(2^j x - k) \psi(2^j y - l); \\ &2^j \psi(2^j x - k) \varphi(2^j y - l); \\ &2^j \psi(2^j x - k) \psi(2^j y - l), \end{aligned} \quad (9)$$

що відповідає аналізу на двовимірній площині по горизонталі, вертикалі та діагоналі з однаковим розподіленням у відповідності з вейвлетами (9).

Виходячи з цього запропоновано метод автоматичної атестації оптичних систем. Для того, щоб показати принцип дії системи, було синтезовано низку зображень, які імітують вплив аберацій на якість зображення. Вхідне зображення (512x512 пікселів) записано в *.bmp форматі, лише в цьому випадку зображення буде точно моделювати дискретний сигнал від матричного приймача (рис. 5).

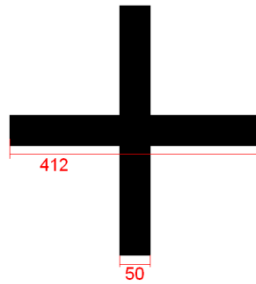


Рис. 5. Тест об'єкт, що відповідає зображенню, вільному від аберацій

Аберація астигматизму має наступний вигляд:

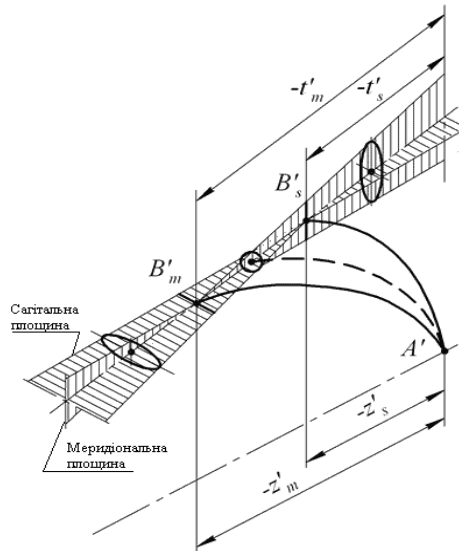


Рис. 6. Спотворення, що спричинені аберацією астигматизму

Імітація аберації астигматизму для сагітального фокусу може бути отримана, якщо обробити вихідне зображення тест-об'єкту за допомогою матричного фільтра.

$$\Delta F_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 100 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10); \quad \Delta F_m = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Внаслідок отримаємо розподілення інтенсивності, представлене на рис.7.



Рис. 7. Синтез зображення тест-об'єкту, що створюється оптичною системою, в якій присутній астигматизм: а - зображення розглядається в сагітальному фокусі; б - в меридіональному

Розглянемо випадки, коли зображення знаходиться в площині сагітального фокусу, меридіонального фокусу, та зображення, що розташоване в площині сагітального фокусу, яке вражене сферичною аберациєю.

У випадку, коли розглядається вейвлет розклад зображення тестового об'єкту, створеного об'єктивом, вільним від абераций, або ж таким, в якому присутня лише сферична аберация, можна помітити, що горизонтальні деталі не відрізняються від вертикальних. Отже, якщо, наприклад, відняти із значень, що відповідають горизонтальним деталям, значення, що відповідають вертикальним – різниця буде створена лише шумовим сигналом, тобто буде мінімальною. В інших випадках, коли в оптичній системі присутній астигматизм, буде спостерігатися певна різниця між деталями. Послідовно переміщуючи оптичну систему таким чином можна буде знайти положення астигматичних фокусів у сагітальній та меридіональній площинах, виміряти астигматичну різницю та знайти положення, в якому вплив астигматичної аберации буде мінімальним (буде виконуватися умова рівності астигматичних відрізків).

Розглянемо тест-об'єкт, який імітує зображення, спотворене лише астигматизмом (рис 8). При цьому зображення розташоване в сагітальному фокусі. Зображення, синтезоване в середовищі MatLAB, представлено на рис. 9.



Рис. 8. Зображення тест-об'єкту, спотворене астигматизмом

Рис. 9. Зображення в середовищі MatLAB.

На рис. 10. представлено вейвлет-базис Coiflet 1, який використано при обробці зображення.

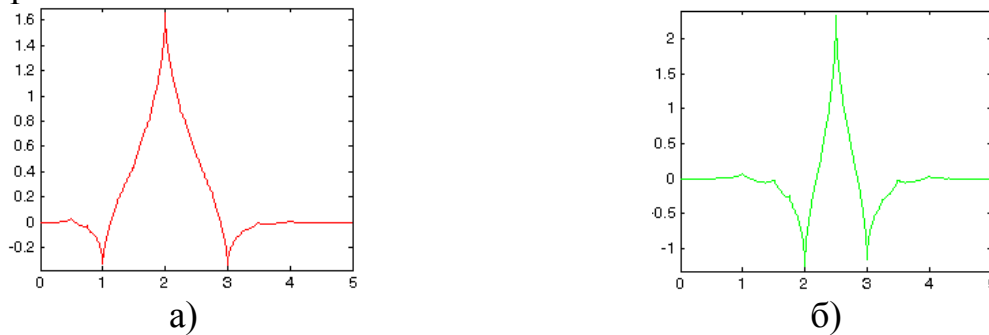


Рис. 10. Графічне представлення вейвлет-базису Coiflet 1:
а - $\varphi(x)$ -скейлінг-функція, б - $\psi(x)$ - "материнський вейвлет"

При обробці сигналу за допомогою методу, що описується формулою (9), нами було отримано серію зображень, які відповідають першому рівню вейвлет-розкладу ($j = 1$) (рис. 11). Далі (рис. 12) будемо аналізувати лише гістограми горизонтальних та вертикальних деталей (описуються першим та другим рівняннями у (9)), які в певній мірі можна поставити у відповідність до сагітальної та меридіональної площин відповідно.

Примітка: при обробці сигналу в середовищі MatLAB з метою показати перехід інтенсивності використовувався кольоровий фільтр PRISM, при застосуванні якого відбувається кольорове кодування перпадів інтенсивності.

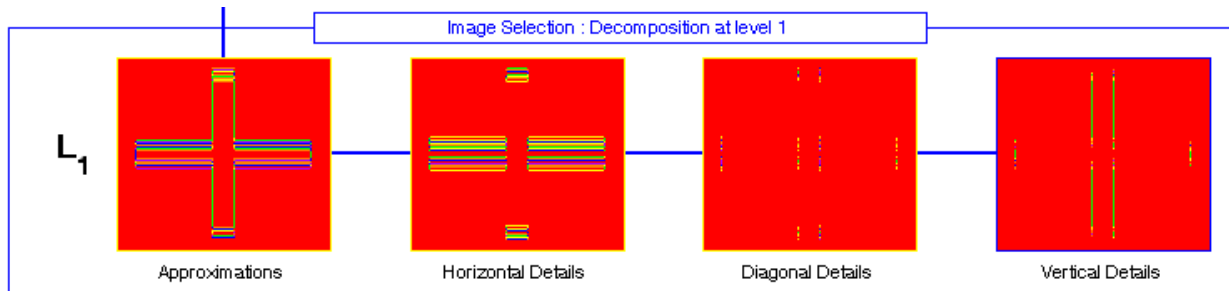


Рис. 11. Розклад першого рівня. По порядку: апроксимація сигналу; коефіцієнти, що відповідають доповненням (деталю) для відновлення сигналу у горизонтальному, діагональному та вертикальному розкладах

Розглядаючи гістограми деталей видно (рис. 12), що перепадів у горизонтальних деталях більше, ніж у вертикальних. Отже приймач зображення розташовано у сагітальному фокусі. При розташуванні зображення у меридіональному фокусі (рис. 14) картина зміниться на протилежну (рис. 13).

Розклад зображення у вейвлет ряд представлено на рис. 15, а гістограми деталей зміняться на протилежні (рис. 16).

Для дослідження реальних зображень додатково внесемо до зображення, що містить астигматизм в сагітальній площині, спотворення, які спричинені сферичною аберсацією (рис. 17 і 18).

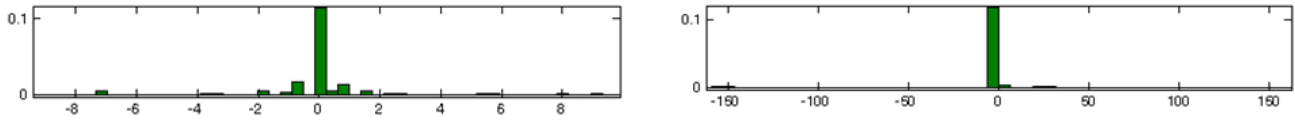


Рис. 12. Гістограми горизонтальних та вертикальних деталей (зліва на право). Зображення знаходиться у сагітальному фокусі



Рис. 13. Зображення тест-об'єкту

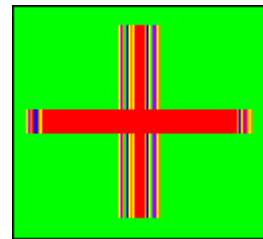


Рис. 14. Зображення в середовищі MatLAB

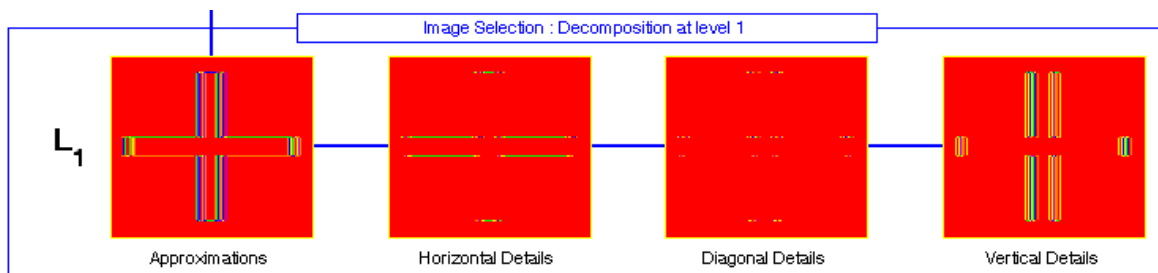


Рис. 15. Розклад першого рівня. По порядку: апроксимація сигналу; горизонтальні деталі; діагональні деталі; вертикальні деталі

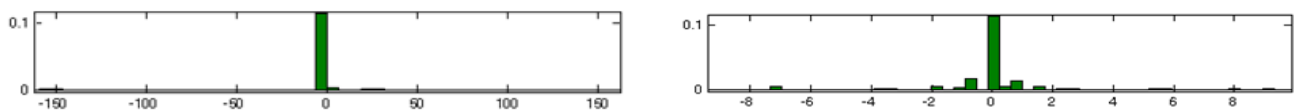


Рис. 16. Гістограми горизонтальних та вертикальних деталей (зліва на право). Зображення знаходиться у меридіональному фокусі



Рис. 17. Зображення тест об'єкту

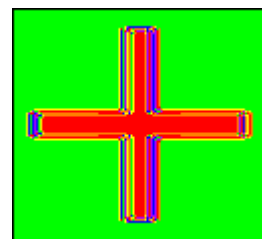


Рис. 18. Зображення в середовищі MatLAB

Аналізуючи синтезоване зображення, вражене астигматизмом та сферичною аберацією, на першому рівні розкладу в вейвлет ряд були отримані коефіцієнти розкладу, що наведені на рис. 19.

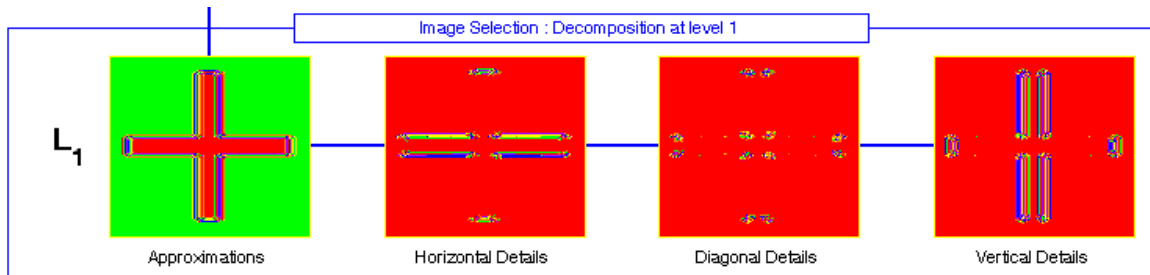


Рис. 19. Розклад першого рівня. По порядку: апроксимація сигналу; горизонтальні деталі; діагональні деталі; вертикальні деталі

В цьому випадку положення астигматичного фокусу буде визначатися за мінімальною сумою коефіцієнтів горизонтальних, чи вертикальних деталей.

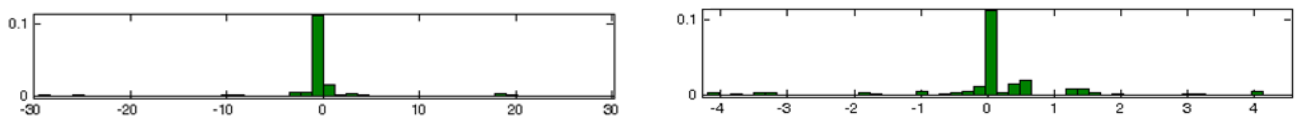


Рис. 20. Гістограми горизонтальних та вертикальних деталей (зліва на право) для зображення, спотвореного сферичною аберацією, яке знаходиться у меридіональному фокусі

Висновки

1. Запропоновано метод автоматичного визначення астигматизму в оптичних системах, який базується на вейвлет перетворенні. Проведено моделювання методу в середовищі MatLAB.

2. Визначено, що оптимальним вейвлет базисом для даного процесу буде Coiflet 1, приведений на рис. 10. Ця функція найбільш чутлива до зміни амплітуди сигналу.

3. В процесі моделювання знайдено форму тест-об'єкту, яка дозволяє ефективно оцінити астигматизм оптичних систем.

4. В подальшому доцільно дослідити можливість застосування вейвлет перетворення для визначення інших аберацій оптичних систем.

Література

1. Чернышов А.К., Чернышева Г.Н. Перестроечные спектральные характеристики астигматичны х лазерных диодов с внешним резонатором // Известия СНЦ РАН – 2001. – Т.3, №1 – С.38-43.
2. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования, ВУС, С.-Петербург: 1999. – 204с.

3. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – том 166. – № 11 – С.1145-1170.
4. Вычислительные методы и программирование, 2001, Т. 2: Переберин А. В. О систематизации вейвлет-преобразований.
5. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – том 171. – № 5 – С.465-501.

Захарченко В.С., Колобродов В.Г. **Применение вейвлет преобразования в оптике**
Исследована возможность применения математического аппарата вейвлет преобразования в оптике и предложены новые автоматизированные методы измерения аберраций оптических систем.

Zakharchenko V.S., Kolobrodov V.G. **Application of wavelet transform in optics**
The possibility of application of wavelet transform in optics had been investigated. The new computer assisted methods of measurement of aberrations of optical systems had been developed.

*Надійшла до редакції
25 липня 2007 року*

УДК 681.3

ДИСТАНЦІЙНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ В ТУМАНІ З ДОПОМОГОЮ ПАСИВНИХ ДВОКАНАЛЬНИХ ІКОНІЧНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

*Микитенко В.І., Котовський В.Й., Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

На основі спрощеної математичної моделі досліджені особливості візуального спостереження дистанційно віддалених об'єктів з допомогою оптико-електронної системи з тепловізійним і тепловізійний каналами. Наведені результати комп'ютерного моделювання та експериментальних вимірювань

Вступ

Серед систем цілодобового візуального спостереження найбільш поширеними є пасивні двоканальні іконічні оптико-електронні системи (ІОЕС). Вони працюють здебільшого в видимому і середньому ($\Delta\lambda=8 - 14$ мкм) інфрачервоному (ІЧ) діапазонах спектру [1, 2] і дозволяють проводити цілодобові спостереження: вдень – за допомогою видимого каналу, вночі – ІЧ каналу. Вибір робочого каналу як правило здійснюється при зменшенні освітленості простору предметів ввечері, або його збільшенні вранці. Проте навіть вдень можливі різкі зміни розподілення освітленості в просторі предметів і контрасту на вході ІОЕС. Наприклад, при спостереженнях в тумані об'єктів, які розміщені на різних відстанях від ІОЕС. За таких умов ефективність візуального спостереження видимих або ІЧ зображень змінюватиметься і може виникнути доцільність використання не тільки видимого, але й ІЧ каналу. На практиці використовуються