УДК 681.785

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СУБПІКСЕЛНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ КРАЮ ОБ'ЄКТА

Й. Й. Білинський, О. С. Городецька

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21010, e-mail: horodecka.os@gmail.com

Запропоновано новий метод субпікселної локалізації краю об'єкта та виділення його контуру на основі низькочастотної фільтрації примежової кривої для знаходження межі світлотіні при вимірюванні показника заломлення. Отримано функцію перетворення координати межі краю примежової кривої в міжпіксельному просторі та проведено експериментальні дослідження.
Ключові слова: показник заломлення, виділення контуру, метод субпікселної локалізації краю об'єкта, примежова крива, низькочастотна фільтрація.

Предложен новый метод субпиксельной локализации края объекта и выделение его контура на основе низкочастотной фильтрации граничной кривой для нахождения границы светотени при измерении показателя преломления. Получено функцию преобразования координаты предела края пограничный кривой в межпиксельном пространстве и проведены экспериментальные исследования.
Ключевые слова: показатель преломления, выделения контура, метод субпиксельной локализации края объекта, пограничного кривая, низкочастотная фильтрация.

A new method for sub-pixel localization of the edge object and selection of a contour based on low-frequency filtration boundary curve for finding border of chiaroscuro in the measurement of the refractive index has been offered. Function of transformation coordinate of border edge of boundary curve in inter-pixel space has been received and experimental researches have been lead.
Keywords: refractive index, edge detection, the method of sub-pixel edge localization of the object, boundary curve, low-frequency filtration.

Вступ

Показник заломлення є однією з основних характеристик речовини, яка необхідна для визначення її фізико-хімічних параметрів, для проведення кількісного і структурного аналізу, а також для ідентифікації хімічних сполук. На сьогоднішній день чільне місце серед методів визначення показника заломлення посідає рефрактометричний метод, який зводиться до визначення кута відхилення світлових променів [1, 2]. Критичний кут можна визначати у двох випадках: у відбитому та заломленому світлі. В обох випадках спостерігається межа світлотіні, що відповідає граничному куту, реєстрація якої здійснюється багатоелементним фотоприймальним пристроєм з наступною передачею та зберіганням в ЕОМ, за допомогою якої визначається граничний кут, а отже, й показник заломлення [3, 4].

Постановка задачі

Зображення граничного кута являє собою досить розмиту не чітку межу, що ускладнює подальшу цифрову обробку та візуальне сприйняття. При застосуванні збільшувальної оптичної системи роздільна здатність сприйняття змінюється обернено пропорційно кратності збільшення, що не дозволяє підвищити точність вимірювання [5, 6]. Тому метою роботи є розробка методу визначення координат контуру межі світлотіні з субпікселною точністю, що дозволить підвищити точність визначення граничного кута і, відповідно, показника заломлення.

Основна частина

В роботі запропонований метод субпікселної локалізації краю об'єкта та виділення його контуру на основі знаходження спільних точок примежових кривих зображень об'єкта

вимірювання, отриманих у результаті гауссової низькочастотної фільтрації з різним ступенем згладження.

Примежова крива після низькочастотної фільтрації створює єдину спільну точку перетину вхідного і відфільтрованого зображення, яка є краєм зображення [7, 8]. Дана точка перетину, як правило, знаходиться в області між пікселами. Таким чином, знаходження координати границі примежової кривої зводиться до визначення координати точки перетину в області міжпікельного простору примежової кривої зображення та згладженої. Знаходження крайової точки розбивається на два кроки: перший – виділення фрагмента, де знаходиться примежова крива краю об'єкта вимірювання; другий – створення однонаправленого низькочастотного фільтра з гауссовим ядром певних параметрів, розмірністю вікна та направленістю. Після цього здійснюється повторна фільтрація в точках, що знаходяться в околі піксела з максимальним значенням градієнта та знаходження спільної точки примежових кривих [9]. Якщо контрастність невелика (складає декілька градацій інтенсивності) і перепад стає протяжним, тобто ступінь розмитості $\sigma \geq 2$, то будь-яку ділянку нахилу перепаду, в околі якої знаходиться край, можна апроксимувати прямою лінією. В такому випадку для знаходження крайової точки доцільно використати спрощений підхід на підставі застосування кусково-лінійної інтерполяції.

Модель визначення субпікселної координати краю на примежовій кривій, яка знаходиться в міжпікселному просторі в результаті лінеаризації ділянки примежової кривої, наведена на рис. 1.

Розглянемо вирішення даної задачі для одновимірного випадку. В області лінеаризації примежової кривої визначаються два сусідніх піксели, для яких виконується умова $I_N < I_N^1$, $I_{N+1} > I_{N+1}^1$, де I_N, I_{N+1} і I_N^1, I_{N+1}^1 – інтенсивності *N*-го та *N*+1 піксела до та після повторної фільтрації, відповідно. Зображений фрагмент примежової кривої в області перетину кривих дозволяє створити систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{I - I_N}{I_{N+1} - I} = \dfrac{\delta}{d - \delta}, \\ \dfrac{I - I_N^1}{I_{N+1}^1 - I} = \dfrac{\delta}{d - \delta}, \end{cases} \qquad (1)$$

розв'язком якої є значення субпікселного зміщення відносно центра піксела

$$\delta = \frac{\left(I_N^1 - I_N\right)}{\left(I_{N+1} - I_N\right) - \left(I_{N+1}^1 - I_N^1\right)}. \qquad (2)$$

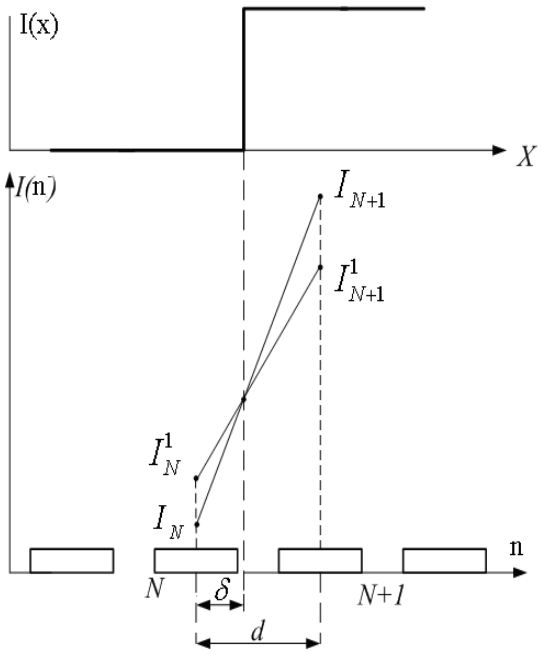


Рисунок 1 – Визначення субпікселної координати краю на примежовій кривій

Координата межі краю примежової кривої з урахуванням номера піксела визначається так:

$$X = (n + \delta)d, \qquad (3)$$

де *d* – відстань між центрами пікселів.

Проведено моделювання такої схеми знаходження крайової точки. При цьому дискретні координати нормованої примежової кривої розраховувалися для відомого ступеня згладжування σ, програмним шляхом формувалася згортка даної примежової кривої та, у результаті отримання згладженої примежової кривої, знаходилась їхня спільна точка на підставі формули (1).

На рис. 2 наведена осцилограма отриманих примежових кривих.

Результати моделювання знаходження крайової точки наведені на рис. 3.

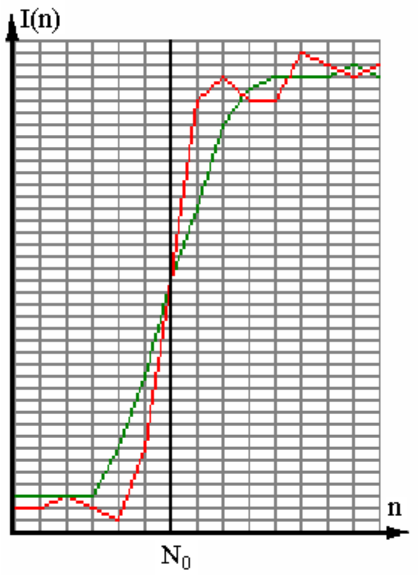


Рисунок 2 – Осцилограма примежових кривих внаслідок низькочастотної фільтрації

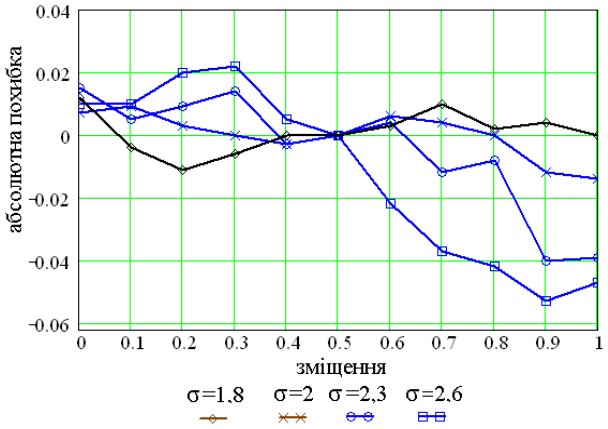


Рисунок 3 – Результати моделювання знаходження крайової точки

Дослідження показали, що відносна похибка моделі в межах ступеня розмитості $1,8 \le \sigma \le 2,6$ не перевищує 10%. Найменше відхилення значення координати крайової точки спостерігається при зміщенні примежової кривої на 0,5 міжпікселної ширини, що відповідає теоретичним висновкам. При цьому примежова крива стає асиметричною.

Таким чином, запропонований метод визначення границі здійснюється в такій послідовності:

- реєстрація зображення та відображення на екрані монітора;
- визначення зони на примежовій кривій, в якій знаходиться край на основі методів виділення контуру;
- виконання низькочастотної фільтрації згідно визначеного градієнта;
- визначення номерів пікселів, між якими знаходяться спільні точки примежової кривої до та після фільтрації;
- повторне виконання низькочастотної фільтрації у випадку наявності декількох точок перетину примежових кривих;
- визначення координати границі.

Експериментальні результати

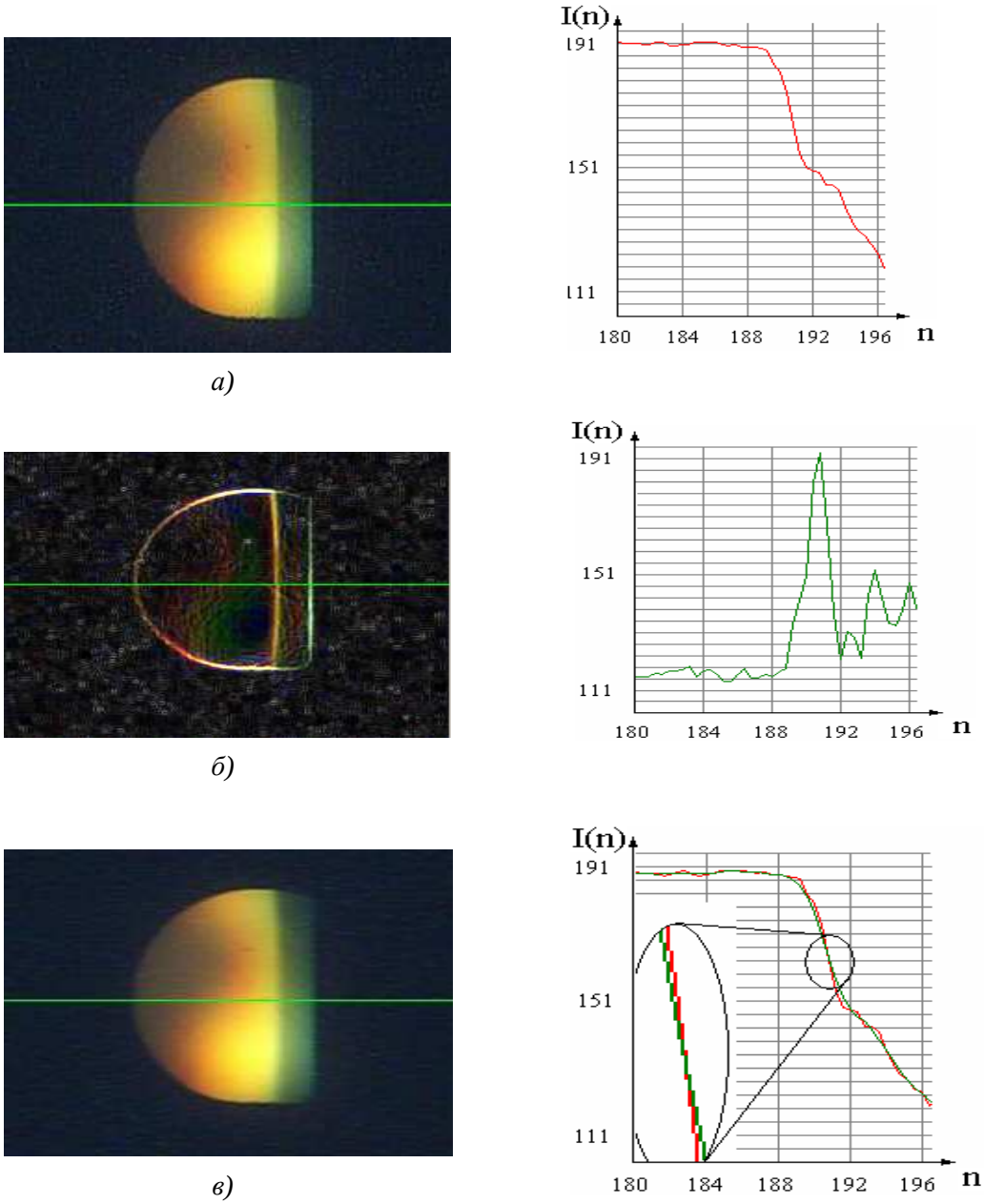
Для підтвердження роботи запропонованого методу проведено напівнатурний експеримент з використанням плоскопаралельних мір різної ширини з відомими розмірами. Проводився також і натурний експеримент з використанням промислового рефрактометра Аббе типу ИРФ-454, принцип дії якого оснований на явищі повного внутрішнього відбиття внаслідок проходження світлом межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення. На такому рефрактометрі можна досліджувати речовини з показником заломлення від 1,2 до 1,7 з мінімальною поділкою ціни шкали 10^{-3} та граничною похибкою показника заломлення $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. При цьому всі вимірювання проводять в білому світлі. Отримане зображення на виході зорової труби наведено на рис.4.

Положення світлотіні при цьому відповідає променю, який виходить із призми під критичним кутом, а показник заломлення визначається згідно з такою формулою:

$$n = \sin\alpha \sqrt{N^{-2} \sin^2 \beta} + \cos\alpha \cos\beta, \qquad (3)$$

де N – показник заломлення вимірювальної призми, β – кут виходу променів із вимірювальної призми, α – кут заломлення вимірювальної призми.

Для спостереження за межею світлотіні використовувалася відеокамера типу VGA 1/3 дюйма 640×480 з розміром піксела 8×8 мкм та міжпікселним простором 8 мкм, яка кріпилась на зоровій трубі та під'єднувалась до комп'ютера за допомогою стандартного інтерфейсу USB.



а)

б)

в)

а – зображення світлотіні та осцилограма примежової кривої; б – виділення зони границі світлотіні та її осцилограма на основі градієнтного оператора; в – зображення світлотіні внаслідок фільтрації та спільна точка на осцилограмі вхідного та відфільтрованого зображення

Рисунок 4 – Знаходження субпікселної координати межі світлотіні

Програмне забезпечення дозволило сформувати зображення світлотіні на екрані монітора, яке наведено на рис. 4, *а*, виділити фрагмент примежової кривої, в якій знаходиться край, а також визначити субпікселне положення згідно з (2). Виділення області, в якій знаходиться межа, наведено на рис. 4, *б*, виконувалося за допомогою градієнтного детектора. Координата світлотіні в міжпікселному просторі визначалася субпікселним методом на основі низькочастотної фільтрації, який наведений на рис. 4, *в*.

Процедура вимірювання такого

рефрактометра полягає у наведенні за допомогою маховика перехрестя оптичної системи на межу світлотіні і за шкалою показника заломлення визначається результат вимірювання. При цьому індексом для відліку служить нерухомий вертикальний штрих призми АР-900.

На практиці рефрактометр використовує концентрації розчинів не нижче 3%. Таким чином, програма експерименту передбачала створення розчинів, які мали концентрації меншу 3%. При цьому результати вимірювання таких концентрацій за шкалою показника заломлення рефрактометра залишаються в межах однієї поділки.

Розраховані значення показників заломлення приготовлених проб були відомими, оскільки для більшості водяних розчинів, у яких міститься одна розчинена речовина, залежність показника заломлення від величини концентрації виражається формулою [1] $C = (n - n_0)/F$, де n – показник заломлення розчину; n_0 – показник заломлення розчинника; F – фактор показника заломлення, що показує величину приросту показника заломлення при збільшенні концентрації розчину на 1%.

Для проведення досліджень використовувалася дистильована вода та розчини етилового спирту. При цьому бралося більше десяти проб в межах 1% зміни концентрації. Отримані зображення межі світлотіні оброблялися субпікселним методом крайового детектування та визначалася субпіксельна координата положення, яка дозволяла обчислити критичний кут, а, отже, й показник заломлення.

ВИСНОВКИ

Запропонований метод субпіксельної локалізації краю об'єкта та виділення його контуру на основі знаходження спільних точок примежових кривих зображень об'єкта вимірювання. Застосування низькочастотної фільтрації дозволяє визначити координати точки перетину примежових кривих до та після фільтрації, яка відповідає краю зображення з похибкою меншою, ніж 0,2 піксела.

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що зсув відліку на тисячну частку показника заломлення відповідає зміщенню межі світлотіні на 0,2 піксела, що дозволяє отримати роздільну здатність 10^{-5} показника заломлення. Результати досліджень показали, що застосування даного методу дає змогу підвищити роздільну здатність і точність вимірювання показника заломлення стандартних рефрактометрів.

1. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методи в химии 3-е изд., перераб. / Б.В. Иоффе – Л.: Химия, 1983. – 352с. 2. Лейкин М.В. Отражательная рефрактометрия / М.В. Лейкин, Б.И. Молочников, В.Н. Морозов, Э.С. Шакарян. – Л.: Машиностроение. – 1983. – 285 с. 3. Білинський Й. Й. Рефрактометричний вимірювач прозорих і поглинаючих середовищ / Й. Й. Білинський, О. С. Городецька // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2003. – №12(5-6) – С.147-153. 4. Білинський Й. Й. Спосіб визначення границі світлотіні рефрактометричних вимірювачів / Й. Й. Білинський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2. – С.62-66. 5. Муравський Л. І. Вплив шумів оптико-цифрової системи на точність вимірювання геометричних параметрів бінарних тіньових зображень / Л. І. Муравський // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2000. – Вип. 35. – С. 113-118. 6. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки зображений / Сойфер В.А. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с. 7. Yang C. C. Analysis of errors in dimensional inspection based on active vision / Yang C. C., Marefat M. M., Ciarallo F. W. // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2354. – P. 96–104. 8. Білинський Й. Й. Метод субпікселного визначення краю об'єкта на зображенні на основі низькочастотної фільтрації / Білинський Й.Й., Мотигін В. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту.– 2008. – №3. – С.5-8. 9. Bilynskyi J.J. Subpixel and Image Processing / Bilynskyi J.J. // Advanced Computer Systems and Network: Design and Application: Of the 3-rd Internetional Conferens, 20-22 sept. – 2007: proceedings – Lviv, 2007. – P. 155–158.

Поступила в редакцію 11.06.2013р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Філинюк М. А.