АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 519.713

ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАЙН-ФУНКЦІЙ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ КОНТРОЛІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

[1)]Порєв В. А., [1)]Божко К. М., [2)]Агінський Ю. А.
[1)]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна, [2)]Вища технічна школа Бремена, м. Бремен, Німеччина

Адаптивні методи обробки сигналів у реальному часі, зокрема, зображень, які отримують за допомогою телевізійних засобів вимірювання, дозволяють значно підвищити швидкість обробки без зниження інформативної складової сигналу. До адаптивних методів обробки належить застосування сплайн-функцій в алгоритмі обробки зображень. Метод реалізовано при контролі динамічних параметрів зонної плавки.

В основу метода покладено використання телевізійних засобів для вимірювання геометричних, енергетичних та динамічних параметрів різних об'єктів. Метод складається із трьох послідовних стадій: формування телевізійного зображення об'єкту; перетворення зображення об'єкту в цифровий код; адаптивної обробки, яка забезпечує необхідну точність при визначенні параметрів зображення. Застосування методу сплайн-функцій дозволило в 16 раз зменшити час вимірювання.

Ключові слова: *сплайн-функція, телевізійне зображення.*

Вступ

Контроль за розподілом температурного поля у реальному часі є критичною технологією при забезпеченні якості на виробництві напівпровідникових матеріалів методом зонної плавки (ЗП).

Загальний термін "зонна плавка" за В. Пфанном [1] означає сукупність методів, які дозволяють перерозподіляти розчинні домішки в кристалічних речовинах. Для всіх цих методів спільним є повільне переміщення вузької зони розплаву вздовж твердого зразка, в результатом чого є перерозподіл домішок.

На сьогодні отримано достатньо теоретичних та експериментальних матеріалів, з яких випливає висновок, що серед усіх технічних засобів, які можуть бути використані для контролю динамічних параметрів ЗП, зокрема, розподілу температурного поля, повністю адекватними задачі є тільки телевізійні засоби (Ратніков Д. Г. [2], Порєв В. А. [3], Приміський В. Ф. [4], Мільвідський М. Г. Картавих А. В., Раков В. В. [5]).

Дійсно, сучасні телевізійні засоби вимірювання (ТЗВ) в змозі одночасно забезпечити найвищі серед усіх інших засобів показники щодо просторового розрізнення, формату та часу формування вибірки, що надає їм суттєві переваги при вимірюванні параметрів ЗП, в тому числі з огляду на точність вимірювань.

Для зменшення впливу власних шумів зазвичай застосовується додавання послідовних кадрів з наступним обчисленням середнього значення відліку, що приводить до збільшення точності вимірювань та часу формування вибірки. В таких випадках при аналізі швидкозмінних процесів можуть виникнути про-

блеми з інтерпретацією результатів, оскільки за час формування вибірки розподіл температури на поверхні об’єкту може істотно змінитися.

Метою досліджень, матеріали яких наведені в цій роботі, є розробка та апробація методики телевізійних вимірювань, яка базується на застосування сплайн-функцій і при збереженні заданої точності дозволяє зменшити час формування вибірки.

Формування вхідного сигналу ТЗВ. Постановка задачі

Загальна методика використання телевізійних засобів для вимірювання геометричних, енергетичних та динамічних параметрів різних об’єктів полягає у формуванні телевізійного зображення об'єкту, перетворенні його в цифровий код та застосуванні алгоритмів обробки, які забезпечують необхідну точність визначення параметрів зображення.

Концепція використання телевізійних засобів для аналізу оптичних полів базується на уявленні про ПЗЗ-матрицю, як упорядковану сукупність елементів розкладу зображення, які незалежно один від одного формують рівні сигнали при однаковій освітленості [6].

Перетворення вхідного сигналу відбувається в такій послідовності. Спочатку здійснюється спектральна фільтрація потоку елементами оптичної схеми відповідно до співвідношення $\tau_\lambda = \tau_{\lambda\phi}\cdot\tau_{\lambda 0}$, де $\tau_{\lambda\phi}$, $\tau_{\lambda 0}$ – спектральні коефіцієнти пропускання фільтру та об'єктива. Одночасно потік обмежується вибором певного значення світлового діаметра об'єктива D_0. На цьому етапі досягається погодження динамічного діапазону електронного перетворювача з діапазоном змін яскравості об'єкту контролю.

Матриця ПЗЗ фізично є сукупністю окремих чутливих елементів розміром $\Delta x\times\Delta y$. Отже первинний відеосигнал на виході ПЗЗ буде представлений матрицею $N\times M$ дискретних відліків. Далі формується функція розподілу освітленості $E'(x',y')$ в чутливій площині, яка в загальному випадку є також функцією часу t [7].

Якщо ТЗВ нерухомий, а зміни яскравості (або положення об’єкта внаслідок руху) несуттєві за час формування кадру, то в межах інтервалу формування кадру $E'(x',y')=const$, що і використовується далі.

На наступному етапі відбувається перетворення функції $E'(x', y')$ у сигнал розгортки – відеосигнал U(t), у відповідності із законом розгортки $x'=x'(t)$; $y'=y'(t)$. Значення відеосигналу в момент t пропорційні значенню освітленості в точці з координатами x'(t), y'(t), тобто $U\left[x'(t).y'(t)\right]=kE'(x',y')$. При розгортці зарядового рельєфу відбувається його дискретизація – наближене завдання функції $E'(x',y')$ сукупністю її значень з утворенням матриці $U_д[E'(x',y')]$.

Перетворення сигналу в цифрову форму відбувається внаслідок застосування оператора квантування $U_к$ до кожного із значень матриці $U_д[E'(x',y')]$. У результаті перетворення отримуємо функцію вихідного сигналу ПЗЗ-матриці $A(x_i,y_j)$.

За умови, що зображення об'єкту займає тільки частину растру, можна скоротити область визначення функції E'(x',y') відповідно до зображення об'єкту, і провести вибірку тільки в цій обмеженій області.

Застосування сплайну для дослідження температурного поля

Сплайн має забезпечити відтворення гладкості вимірюваної функції, якою для ТЗВ є розподіл освітленості і яка зазнає дискретизації в процесі формування сигналу. Головною відмінністю сплайнів від інших відомих класів інтерполюючих функцій є можливість надавати їм потрібні властивості гладкості [9, 10].

Якщо відліки формувати з кроком $h_Г$ по горизонталі та з кроком h_B по вертикалі, то кадр буде мати формат $P \times Q/(h_Г h_B)$, що при збереженні тривалості відліку зменшить час формування кадру в $1/(h_Г h_B)$ разів.

Побудова сплайну з кроком, значно більшим за крок розкладу (з врахуванням вимог до точності) дозволить зменшити тривалість циклу. Застосування сплайнів також дозволяє розв'язати задачу стиснення даних з наперед заданою точністю.

В [10] показано, що оптимальна інтерполяція двовимірних функцій може бути виконана за допомогою двовимірних сплайнів третього порядку. Необхідною умовою цього є існування похідних функції до другого порядку включно. В загальному випадку температурні поля описуються диференційними рівняннями в частинних похідних другого порядку [11]. Скориставшись зробленим вище застереженням щодо константного характеру функції яскравості (температури), а отже, і освітленості в межах інтервалу часу формування одного або кількох послідовних кадрів розглянемо функцію E(x,y), задану на прямокутнику $\Omega=[a,b]\times[c,d]$. Зауважимо, що прямокутник Ω може співпадати із сформованим растром або займати його певну частину. На цьому прямокутнику задамо сітку значень відліку Δ.

Якщо у вузлах сітки Δ отримані відліки, тобто значення функції $A(x_i,y_j)$, а сама функція E(x,y) має похідні до другого порядку включно, то на прямокутнику $\Omega_{i,j} = [x_i,x_{i+1}]\cdot[y_j,y_{j+1}]$ можна побудувати ермітів кубічний сплайн двох змінних $Se_{3,3}(x,y)$, що задовольняє умовам [10]:

$$Se_{3,3}^{r,s}(x_i, y_j) = A_{i,j}^{r,s} \qquad (1)$$

де $A^{1,0}(x_i,y_i) = \partial A(x,y)/\partial x$, $A^{0,1}(x_i,y_i) = \partial A(x,y)/\partial y$, $A^{1,1}(x_i,y_i) = \partial^2 A(x,y)/\partial x^2$,

r,s = 0,1; i = 0,1, … , N; j = 0,1, … , M;

В теорії сплайн-функцій оптимальний крок сітки визначається відповідно до величини максимально прийнятної похибки [10]:

$$\left|Se_{3,3} - A(x,y)\right| \le \frac{5}{16} h_x^2 \left.\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right|_{x_0,y_0} \qquad (2)$$

З (2) визначається крок сітки, при якому похибка не перевищить заданого значення різниці $\left|Se_{3,3} - A(x,y)\right|$:

$$h = \sqrt{3.2 \frac{\left| Se_{3,3} - A(x, y) \right|}{\left. \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right|_{x_0, y_0}}} . \qquad (3)$$

Розглянемо зразок із циліндричною поверхнею. Як видно із рис. 1 при розгортці кола в лінію крок горизонтальної дискретизації $h_г$ нерівномірний і може бути визначений наближеною формулою:

$$h_{гi} = \frac{h_0}{R} \sqrt{R^2 - (ih_0)^2} \quad , \qquad (4)$$

де h_0 – крок рівномірної виборки по дузі (довжина хорди),

R – радіус кола,

i = 0, ±1, ±2, ...

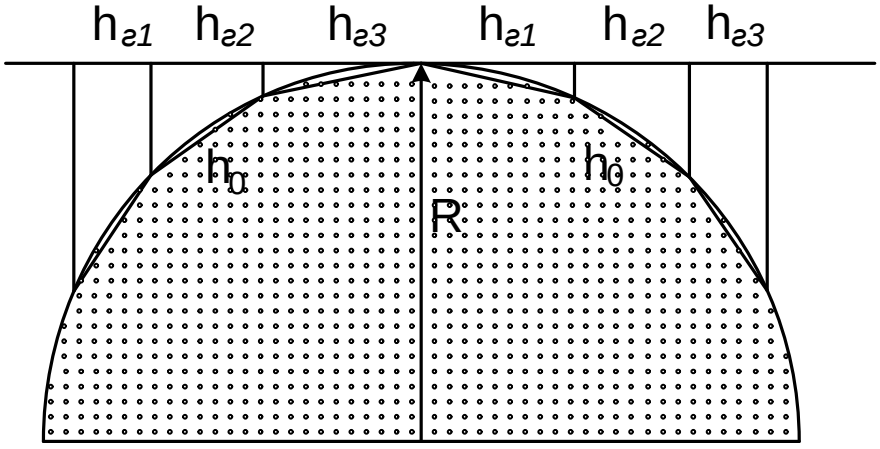

Рис. 1. До визначення кроку виборки на поверхні зразка циліндричної форми

Врахувавши, що $h_0 = \frac{\pi R}{2(n+1)}$, отримаємо:

$$h_{гi} = \frac{\pi R}{2(n+1)} \sqrt{1 - \left(\frac{i\pi}{2(n+1)} \right)^2} . \qquad (5)$$

Таким чином вибірка за формулою (5) дає відліки в рівновіддалених точках дуги.

Сплайн, побудований в розглянутий вище спосіб, був використаний при експериментальних дослідженнях розподілу температурного поля по зоні плавки, які провадились в НТУУ "КПІ" та в ІЕЗ ім. Є. О. Патона.

Для зменшення впливу власних шумів застосовувалось додавання *n* послідовних кадрів з наступним обчисленням середнього значення відліку. Попередньо було встановлено, що доцільно вибирати n=10. Розміри кадру при цьому становили 256x256 піксел.

Повний час одного вимірювання складав 2,5 с.

В результаті розрахунку встановлено h≈4 піксел. В подальших експериментах відлік формували з кроком 4 піксел, що дозволило в 16 раз скоротити загальний час вибірки, довівши його до масштабів реального часу.

На рис. 2 показано вигляд зони нагріву на поверхні кристалу в твердій фазі, а на рис. 3 – розподіл температурного поля за результатами сплайн-обробки сигналу.

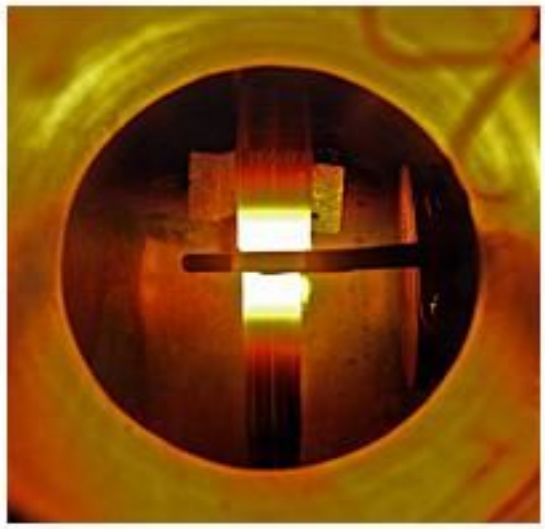

Рис. 2. Вигляд зони нагріву на поверхні кристалу в твердій фазі

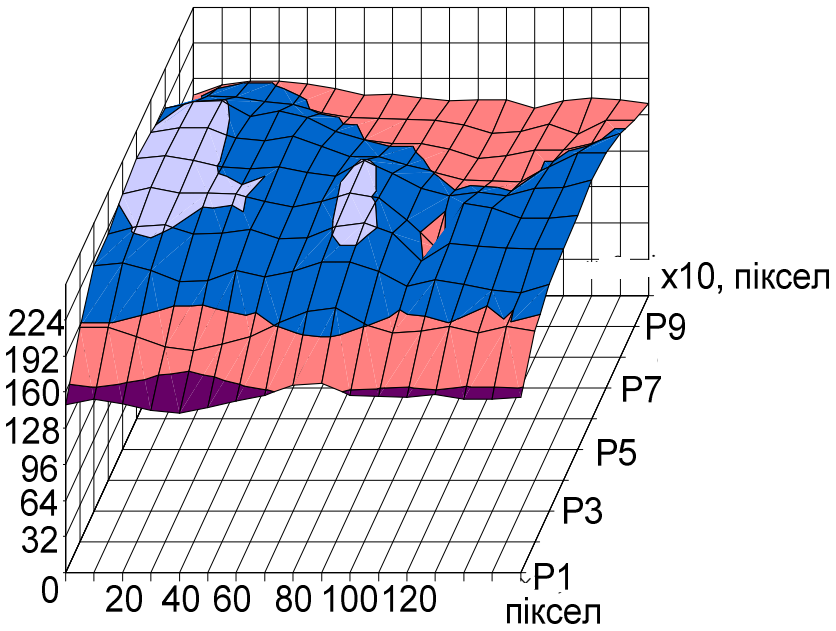

Рис. 3. Розподіл сигналу по поверхні зони нагріву після сплайн-обробки

Висновки

Ефект від адаптації масштабу різних областей зображення відповідно до їх інформативної ємності надає можливість значно прискорити швидкість обробки зображення в цілому. При цьому вся інформація, яку несе зображення, повністю зберігається.

Застосування сплайн-функції дозволяє зменшити виборку в 16 раз при збереженні тієї ж точності, яка забезпечується формуванням повної виборки.

Метод обробки зображень при використанні телевізійних засобів вимірювання значно підвищує швидкість контролю у реальному часі динамічних процесів, зокрема, зонної плавки. Реалізація методу не потребує використання апаратних засобів із підвищеними характеристиками, перш за все телевізійних камер.

В перспективі метод сплайн-функцій можна застосувати при дослідженні динамічних параметрів інших об'єктів, зокрема, з'єднань оптичних деталей.

Література

1. Пфанн В. Зонная плавка. – М.: Мир, 1970. – 366 с.
2. Ратников Д. Г. Бестигельная зонная плавка. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
3. Порев В. А. Контроль процесса зонной очистки с использованием телевизионных приборов // Дефектоскопия. – 1997. – № 6. – С. 50 – 51.
4. Примисский В. Ф. Анализ адекватности телевизионных средств требованиям контроля параметров зонной плавки. / В. Ф. Примисский, И. В. Бойко // Тезисы доклада конференции «Современные методы и средства НК и ТД». – Ялта: УИЦ. – 2003. – С. 178 – 179.
5. Мильвидский М. Г. Выращивание монокристаллов из расплавов в условиях космического полёта / М. Г. Мильвидский, А. В. Картавых, В. В. Раков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. – № 9. – С. 17 – 35.
6. Порєв В. А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів / В. А. Порєв, Г. В. Порєв // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 1. – С. 56 – 61.
7. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 696 с.
8. Смирнов А. Я. Математические модели теории передачи изображений. – М.: Связь, 1979. – 96 с.
9. Алберг Дж. Теория сплайнов и её приложения: Пер. с англ. / Дж. Алберг, Е. Нильсон, Дж. Уолш. – М.: Мир, 1972. – 316 с.
10. Денисюк В. П. Сплайны и их приложения в задачах моделирования и обработки сигналов. / В. П. Денисюк, Б. Г. Марченко – К.: 1995. – 246 с.
11. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. Учебное пособие для университетов. / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский – М.: Наука, 1972. – 736 с.

Надійшла до редакції
12 липня 2012 року

© Порєв В. А., Божко К. М., Агінський Ю. А., 2012