

Д.П. Сівцов, В.С. Хандецький, В.М. Григор'єв

ОЦІНКА ВИСОТИ ЕЛЕМЕНТІВ РЕЛЬЄФУ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО СКАНУВАННЯ

Анотація. Викладені теоретичні і практичні результати дослідження методу вимірювання висоти елементів рельєфу поверхонь металевих деталей сонячних батарей з використанням планшетного сканера. Проведена цифрова обробка отриманих зображень. Наведені експериментальні залежності, отримані на реальних зразках деталей.

Ключові слова: рельєф металевої поверхні, оптичне сканування, цифрова обробка зображень, просторова фільтрація.

Вступ. При виробництві деяких типів сонячних батарей виникає необхідність контролювати висоту елементів рельєфу деталей, які виготовляються з плоских тонких металевих листів товщиною 50 мкм. Рельєф поверхні утворюється витисканням рядків виступів висотою від 60 до 150 мкм. З урахуванням технічних умов виробництва було визнано доцільним здійснювати контроль висоти виступів оптичним методом. Він заснований на тому, що за умови розташування джерела і приймача світла під певним кутом відносно одне одного над площиною деталі, на площині приймача утворюється зображення, на якому кожен виступ буде відображатися двома суміжними ділянками – більш світлою і більш темною у порівнянні з яскравістю самого листа (тобто тла зображення). Перша формується за рахунок відбиття світла від тієї сторони виступу, що звернута в сторону джерела світла, а друга – за рахунок тіні, яку відкидає виступ на плоску поверхню деталі.

Таким чином, отримання проекції тривимірного об'єкта, яким є виступ, на площину спостереження однозначно визначається так званою геометрією сцени, а саме, формою і розміром джерела світла, а також взаємним розташуванням у просторі деталі, джерела і приймача світла [1]. Оскільки в даному застосуванні оптичного методу

кольори зображення не несуть корисної інформації, при отриманні зображень їх кольорові компоненти не зберігалися.

Постановка задачі. Головною задачею роботи було виявлення і визначення однозначної функціональної залежності між параметрами зображення виступу і його висотою. Для цього вирішувалися наступні окремі задачі:

- визначення фізико – математичної моделі процесу формування зображень та вибір технічних засобів їх отримання в цифровій формі;
- виготовлення додаткових технічних засобів для надійної фіксації геометрії сцени;
- експериментальне дослідження параметрів зображень, які однозначно пов'язані зі значенням висоти виступів;
- просторова фільтрація зображень, статистична обробка параметрів зображень та отриманих залежностей.

Обґрунтування методики. Для обґрунтування фізико – математичної моделі процесу формування зображень експериментально було визначено, що процес відбиття світла від матеріалу деталі має дифузний характер. Тому за основу була прийнята модель Ламберта [2], за якою інтенсивність I_A розсіяного світла в точці A простору сцени дорівнює $I - k_d \cdot \cos(\alpha_0)$, де I – інтенсивність джерела світла, k_d – коефіцієнт дифузного розсіювання, $0 \leq k_d \leq 1$; α – кут між променем світла і нормаллю до поверхні в точці падіння, $0 \leq \alpha \leq \pi/2$. Таким чином, носієм інформації на зображенні є інтенсивність I_A . Оскільки окремий виступ є трьохвимірним об'єктом, то для отримання зображення на множині точок ділянки певної площі треба переміщувати джерело світла так, щоб при цьому забезпечувався сталий кут між джерелом і приймачем світла. Але якщо використати джерело світла і приймач не точкові, а лінійні, то кожний ряд точок зображення буде формуватися одночасно. Переміщення такої пари вздовж деталі дозволяє сформувати повне зображення всієї деталі або обраних її ділянок. Це ілюструється на рис.1, де для наочності на поверхні $z = f(x,y)$ виступу показані умовні лінії її розрізу площинами $z = f(0,y)$ та $z = f(x,0)$, а також великою стрілкою – напрям переміщення пари "джерело світла – приймач відбитого світла". Теоретичне обґрунтування процесу формування зображення окремого виступу наведено в [3].

Практично таку технологію отримання зображення деталі в лабораторних умовах можна реалізувати на планшетному сканері.

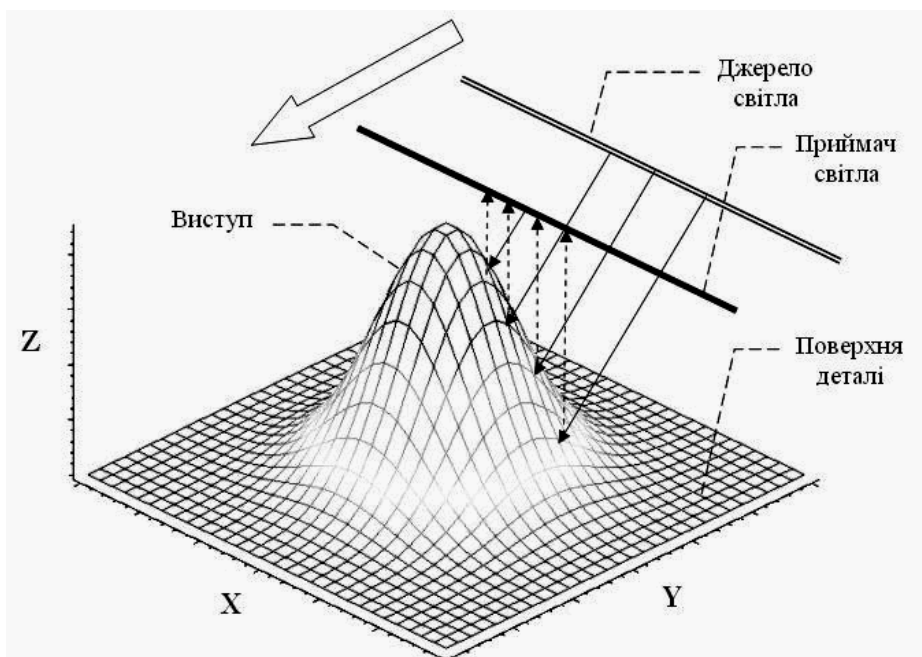


Рисунок 1 – Схема формування зображення виступу на поверхні деталі

Оскільки в планшетних сканерах джерело світла (тонка циліндрична лампа) і приймач світла, який являє собою лінійку фотоелементів – приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), розташовані під склом сканера, то деталь фіксувалася на склі виступами донизу, тобто схема на рис.1 фактично була повернута на 180° відносно осі "X". В планшетних сканерах лампа, об'єктив і лінійка ПЗЗ конструктивно розташовані на каретці, яка рухається вздовж координати "Y" в покроковому режимі. Об'єктиви сканерів, які фокусують поточну лінійку променів світла, відбитих деталлю від лампи на лінійку ПЗЗ, мають глибину різкості $\approx 15\text{...}20$ мм, що значно більше висоти виступів ($60\text{...}150$ мкм). Тому точність отриманого зображення, площина якого паралельна площині "XY", практично не залежить від його тривимірності, тобто від координати "Z".

В роботі використовувався сканер HP Scanjet 3770 з максимальною апаратною роздільною здатністю 1200×2400 dpi. Таким чином, одному пікселю зображення відповідає ділянка розміром $\approx 10 \times 20$ мкм. Зображення зберігалися в форматі BMP або TIFF у градаціях сірого глибиною 8 або 16 біт. Для надійної фіксації зразків деталей на склі сканера застосовувався спеціально розроблений три-

мач, який можна було встановлювати на склі під довільними кутами по відношенню до напрямку руху каретки.

На рис. 2,а показано зображення фрагмента деталі, отримане скануванням. На зображенні добре видно оптичний шум. На рис.2,б – ті ж зображення, але після застосування низькочастотної просторової фільтрації (див. нижче). На рис. 2,в,г показаний результат моделювання процесу формування зображення у відповідності зі схемою на рис.1. Для виконання моделювання була розроблено відповідне програмне забезпечення. Зіставлення зображень, представлених на рис. 2.а,б і на рис.2.в підтверджує обґрунтованість обраної моделі відбиття світла та процесу формування двовимірного зображення тривимірного об'єкту, яким є виступ.

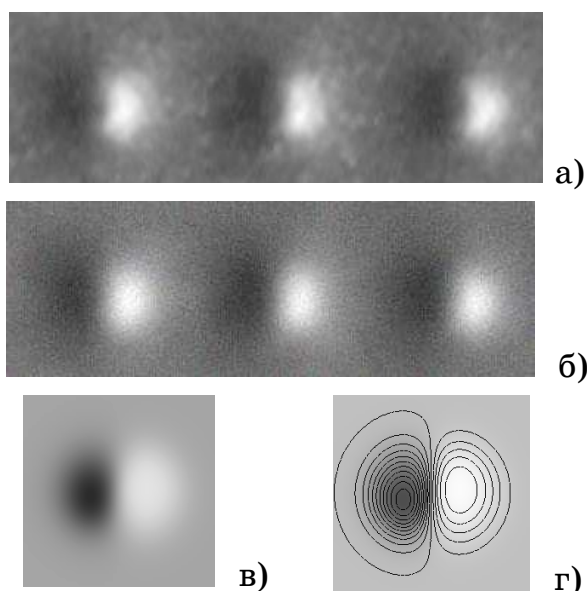


Рисунок 2 – Зображення виступів: а) фрагмент реальної деталі, отриманий скануванням; б) те саме зображення після низькочастотної фільтрації оптичного шуму; в) зображення, отримане програмним моделюванням; г) те саме зображення з лініями рівної інтенсивності

Аналіз результатів досліджень. У дослідженнях значну увагу було приділено вивченню параметрів тіні від виступів. Слід зазначити, що при проведенні досліджень з використанням сканера в якості вимірювального приладу немає можливості отримувати зображення при різних кутах променя світла від джерела (лампи) на площину деталі. Конструкція сканера така, що цей кут сталий і близький до 90° . При такому куті ділянка тіні від виступу має невелику площу (рис.2).

З'ясувалося, що розмір та інтенсивність тіні істотно залежать від кута встановлення тримача деталі на склі сканера. Це пояснюється тим, що витискування близько розташованих виступів призводить до утворення своєрідного "гребеня" за рахунок витягування металу між виступами вздовж їх рядка. В результаті на зображеннях з'являються додаткові тіньові ділянки. Тому дослідження проводилися при різних кутах встановлення тримача в діапазоні $0^{\circ} \dots 90^{\circ}$.

Для отримання масових числових результатів і їх статистичної обробки необхідно обробляти фрагменти зображень поблизу кожного виступу рядка, причому розмір цього фрагменту повинен бути сталим. З метою автоматизації розділення відсканованого зображення рядка виступів на фрагменти було розроблено спеціальну програму. Вона працює наступним чином. По-перше, якщо кут встановлення тримача був відмінний від 0° , то зображення програмним способом повертається на такий саме кут у протилежному напрямі. В результаті рядок виступів на зображенні орієнтується так, як це було б отримано при куті встановлення тримача = 0° . Далі отримуються числові дані щодо інтенсивності кожного стовпця пікселів зображення вздовж рядка виступів. Потім до отриманих даних застосовується низькочастотна фільтрація і статистична обробка, на підставі чого обчислюється мінімальне порогове значення інтенсивності, яке береться за критерій відокремлення потрібних фрагментів зображення.

В процесі досліджень виявилось, що найбільш суттєвим чинником, який впливає на точність чисельної оцінки висоти виступу є оптичний шум, обумовлений нерівностями і текстурою поверхні деталі. Це ілюструє рис.3, де наведено просторове відображення фрагменту зображення біля одного виступу, отриманого з реального зразку, причому по координаті "Z" відкладені значення інтенсивності відбитого світла. Для наочності співставлення висоти виступу з висотами нерівностей поверхні деталі було умисно обрано виступ найменшої висоти.

З метою зменшення впливу шуму було розроблено методичку, засновану на використанні спектрального аналізу, тобто на дослідженні спектрів сигналу і шуму, на підставі якого підбиралися параметри просторового фільтра. Спочатку вивчався шум, обумовлений особливостями поверхні металевого листа. Для цього використовувалися зразки деталей без витиснутих рядків виступів. На зображенні

зразка довільно виділялися фрагменти розміром 128×128 пікселів або 256×256 пікселів.

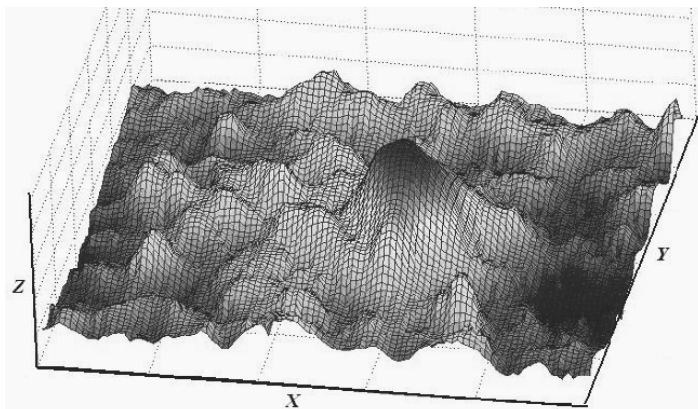


Рисунок 3 – Оптичний шум від нерівностей і текстури поверхні деталі

Для кожного фрагменту обчислювався спектр потужності шуму. Визначався спектр, усереднений по фрагментам. Після цього обчислювалися усереднене просторове зображення виступу і його спектр потужності, тобто спектр усередненого виступу.

Порівняння спектрів в їх центральних частинах, показало, спектр шуму значно ширше спектрів корисного сигналу і його повністю перекриває. Це ускладнює фільтрацію, так як частотні області шуму і сигналу не розділені. Однак, спектр сигналу має суттєво більшу інтенсивність, що є позитивним фактором.

Розглянемо тепер результати, отримані в частині досліджень щодо застосування різних методів просторової фільтрації. Експерименти проводилися з наступними фільтрами.

1. Фільтр типа Вінера. Передавальна функція фільтра в першому наближенні вибиралася як відношення спектра потужності усередненого виступу до усередненого спектру поточного виступу. Незважаючи на перше наближення, були отримані задовільні результати фільтрації.

2. Узгоджена фільтрація. Згідно базової концепції цього виду фільтрації імпульсна функція відгуку фільтра бралася у вигляді усередненого зображення виступів. Отримані в цілому задовільні результати. Недоліком є спотворення форми тривимірного відображення виступу, характерні для даного типу фільтрації.

3. Просторова низькочастотна фільтрація. Смуга пропускання фільтра нижніх частот обмежена двома просторовими частотами за координатами "X" та "Y", які вибиралися на підставі аналізу спектра

шуму. Для фрагменту зображення розміром 128×128 пікселів ці частоти приблизно рівні 3, а для фрагменту розміром 256×256 пікселів – відповідно 6. Результат застосування низькочастотної фільтрації виявився кращим, ніж інші. В наочній формі її дію показано на рис.4, де наведено просторове відображення одного виступу до і після обробки фільтром з ідеальною просторовою АЧХ. По координаті "Z" відкладені значення інтенсивності відбитого світла, яке визначається в термінах яскравості пікселів. На зображеннях, збережених в градаціях сірого при 8-бітному кодуванні значення яскравості становить від 0 (чорний) до 255 (білий). Випробувалися також просторові фільтри нижніх частот Гауса і Баттерворта які виявилися практично такими ж ефективними, як і НЧ - фільтр з ідеальною АЧХ.

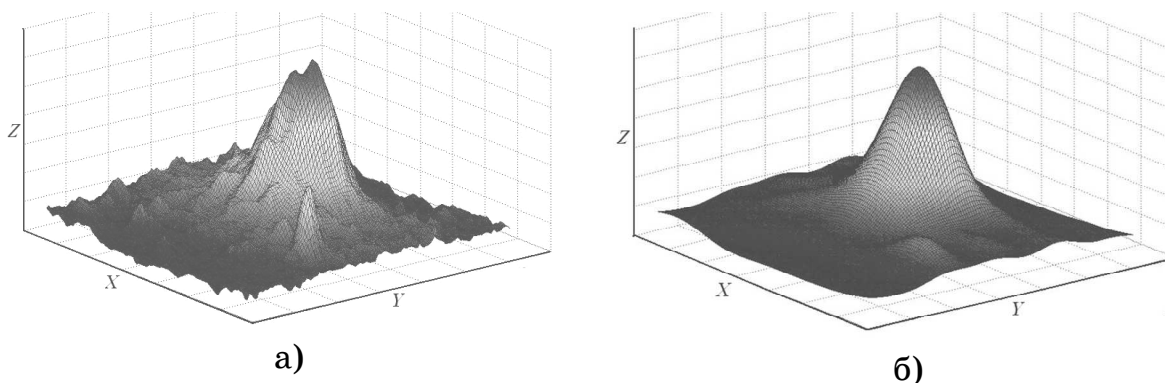


Рисунок 4 – Результат застосування низькочастотної фільтрації:
а) до застосування; б) після застосування

При подальшій обробці зображень перевага була віддана фільтру Баттерворта, так як він давав кращі результати по класифікації зображень і зберігав максимальну інтенсивність відфільтрованого зображення. У ході цього етапу досліджень з метою кількісної оцінки висоти виступів обчислювалися і використовувалися наступні параметри їх зображень:

1. Кількість пікселів з інтенсивністю більше ніж деякий поріг (площа світлої ділянки на схилі виступу внаслідок відбиття падаючого світла).

2. Кількість пікселів з інтенсивністю менше ніж поріг (площа темної ділянки, тобто тіні, яку відкидає виступ на площину деталі).

3. Мінімум інтенсивності світла (глибина тіні від виступу).

4. Максимум інтенсивності відбиття світла від виступу. Для 8 бітового кодування зображення обчислення здійснювалися тільки після фільтрації.

5. Відстань між максимумом і мінімумом (для 8 біт тільки після фільтрації).

Для реалізації даного етапу спочатку використовувався спеціально виготовлені зразки деталей з виступами різної висоти. Витискання виступів робилося спеціальним мікрометричним пристосуванням, яке дозволило витискати виступи різної висоти в діапазоні від 80...50 мкм із кроком 10 мкм. На рис.5 наведено зображення поверхні такої деталі, виступи розташовані в порядку зростання їх висоти (зліва – направо).

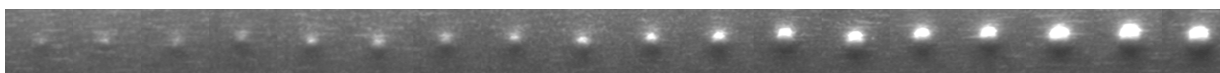


Рисунок 5 – Відскановане зображення поверхні деталі з виступами різної висоти

Експерименти з модельними зразками показали, що найкращим є параметр №3 – мінімум інтенсивності світла I , тобто глибина тіні від виступу висотою h мкм. Сканування виконувалося під різними кутами розташування деталі відносно напрямку руху каретки сканера. В табл. 1 наведена вибірка з отриманих результатів.

Таблиця 1

Залежність мінімуму інтенсивності світла I від висоти виступу h

Кут сканування	Залежність $I = f(h)$	Коефіцієнт кореляції	Фільтрація
90°	$I = -0.1126 h + 50.396$	0.9260	–
90°	$I = -0.1131 h + 50.396$	0.9293	НЧ, частота зрізу = 3
55°	$I = -0.0762 h + 32.583$	0.9094	–
55°	$I = -0.0860 h + 39.240$	0.9280	НЧ, частота зрізу = 3
0°	$I = -0.0734 h + 33.540$	0.8829	–
0°	$I = -0.1019 h + 40.045$	0.9324	НЧ, частота зрізу = 3

Таким чином доведено, що залежність $I(h)$ має лінійний характер. Тут величина I приймає цілочислові значення з діапазону 0...255 при 8-бітному кодуванні глибини сірого, або 0...65535 при 16-бітному кодуванні; h – в мкм. Табл.1 також характеризує вплив фільтрації на достовірність лінійного наближення $I(h)$ при деяких кутах встановлення деталі при скануванні.

Рішення щодо вибору мінімуму інтенсивності в якості інформативного параметру було перевірено на реальних групах зразків деталей. Слід зауважити, що для зразків реальних деталей формування зображення при скануванні складніша, ніж у випадку штучно виготовлених тестових зразків. Це обумовлено тим, що виступи в рядках на реальних деталях розміщуються на відстані, значно меншій ніж та, яка має місце на штучних (рис.5). Внаслідок витягування металу між виступами на поверхні деталі утворюється не рядок окремих виступів, а своєрідний гребінь виступів з певною середньою сумарною висотою. Так, у нашому розпорядженні були 3 групи зразків: 63, 113 та 134 мкм. Однак, як показала статистична обробка зображень, використання критерію мінімуму інтенсивності дозволяє розрізнити такі деталі. Наведемо числові дані.

У разі зразків деталей груп 113 і 134 мкм виявлена чітка границя в 38 одиниць інтенсивності, тобто, значення мінімальної інтенсивності для деталей групи в 113 мкм лежать вище цієї межі, а значення мінімальної інтенсивності для деталей групи в 138 мкм – нижче цієї границі.

У разі ж зразків деталей груп 63 і 113 мкм мінімуми інтенсивності зображень для групи 113 мкм лежать в діапазоні одиниць інтенсивностей від 29 до 47, а мінімуми інтенсивності зображень деталей групи 63 мкм лежать в діапазоні від 59 до 84. Тобто, ці діапазони взагалі не перетинаються.

Висновки. Головним результатом досліджень є обґрунтування можливості реалізації контролю висоти виступів рельєфу поверхні деталей сонячних батарей з використанням планшетного сканера і з подальшою цифровою обробкою їх відсканованих зображень.

Проведено програмне дослідження процесу формування зображення поверхні деталі при використанні сканера, для чого розроблено відповідне програмне забезпечення.

Співставлення зображень, які формуються програмним способом на підставі моделі Ламберта з зображеннями, отриманими з використанням сканера, показали, що відбиття світла від поверхні окремого виступу є дифузним.

Експериментальні дослідження дозволили визначити інформативний параметр зображень, який дозволяє зв'язати його з контрольованим параметром – висотою окремого виступу. Таким параметром є мінімум інтенсивності (яскравості) зображення на ділянці тіні, відкинutoї виступом на площину деталі.

Встановлено, що мінімум інтенсивності монотонно убуває при збільшенні висоти окремого виступу.

Для підвищення надійності точності результатів оцінки висоти виступів ефективним засобом є просторова цифрова фільтрація зображень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Эйнджел Э. Интерактивная машинная графика. [Текст] / Э. Эйнджел – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 592 с.
2. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. [Текст] / Н. Голованов – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. — 472 с.
3. Хандецкий В.С., Сівцов Д.П. Застосування цифрової обробки зображень для контролю рельєфу металевих поверхонь деталей сонячних батарей \ \ Інформаційні технології в управлінні складними системами. Тези доповідей. Наукова конференція. – 19-20 червня 2013 р., Дніпропетровськ.