

Ю.О. Подчашинський, к.т.н, доц.
Житомирський державний технологічний університет

ВІДНОВЛЕННЯ ДВОВИМІРНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО МЕХАНІЧНІ ВЕЛИЧИНИ, ЩО МІСТИТЬ ДИНАМІЧНІ ПОХИБКИ

В статті розглянуто методи відновлення двовимірної вимірювальної інформації про геометричні параметри об'єктів вимірювань. Високоточні результати цих вимірювань також необхідні для визначення інших механічних величин. Сформульовано критерії оцінки точності результатів відновлення двовимірної вимірювальної інформації, що містить динамічні похибки. Виконано експериментальні дослідження методів відновлення.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Одним з ефективних методів вимірювань механічних величин є формування та алгоритмічна обробка сигналів, які містять інформацію про об'єкт вимірювань. Носієм двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини можуть бути цифрові відеозображення об'єктів вимірювань [1, 2]. Для отримання двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини необхідно сформувати цифрове відеозображення, яке являє собою двовимірний образ об'єкта вимірювань, ввести це відеозображення в обчислювальний пристрій та виконати цифрову обробку [1, 3].

Такий підхід повинний забезпечити більш високу точність та швидкодію вимірювань у порівнянні з існуючими методами. Це особливо важливо для вимірювань механічних величин в реальному масштабі часу, наприклад в ході контролю за деяким технологічним процесом. Основою підвищення точності й швидкодії є прискіпливе врахування всіх похибок вимірювань з подальшою розробкою заходів щодо їх компенсації та зменшення.

Суттєвою складовою частиною похибок є динамічні похибки, що обумовлені динамічними властивостями вимірювального каналу. Тому актуальною задачею є розробка методів відновлення двовимірної вимірювальної інформації, що забезпечує зменшення динамічних похибок. Застосування цих методів дозволяє суттєво підвищити точність вимірювань механічних величин.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Динамічні властивості й динамічні похибки засобів інформаційно-вимірювальної техніки розглянуті в багатьох наукових працях та підручниках [4–9]. В даному випадку вимірювальний канал має ряд суттєвих особливостей, пов'язаних насамперед з обробкою двовимірної вимірювальної інформації та суміщенням різноманітних засобів формування та перетворення цієї інформації (оптична система пристрою формування відеозображень, аналогові та цифрові засоби обробки сигналів у вимірювальному каналі). Найбільший вплив на динамічні властивості вимірювального каналу і на виникнення динамічних похибок мають: оптична система [10–13]; напівпровідникові перетворювачі світло-сигнал [14, 15]; аналогові кола обробки відеосигналів [2, 14].

Також відомо багато наукових праць щодо методів відновлення відеозображень, наприклад [16–19]. Основним критерієм оцінки результатів відновлення є загальна якість відеозображення, призначеного для візуального сприйняття.

Однак для засобів вимірювань механічних величин потрібно враховувати те, що вимірювальний канал повинен забезпечити передачу двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини. Перш за все це пов'язано з найбільш точним відтворенням контурів об'єктів вимірювань та їх геометричних характеристик. А це відтворення, в свою чергу, істотно залежить від динамічних характеристик вимірювального каналу.

Тому необхідно проаналізувати існуючі методи відновлення з точки зору можливості їх використання для відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини. Також необхідно сформувати критерії оцінки результатів відновлення, що враховують особливості двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини.

Метою проведених досліджень є аналіз та обґрунтування доцільності використання методів відновлення двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень), що дозволяють ефективно видалити динамічні похибки та суттєво підвищити точність вимірювань геометричних параметрів об'єктів вимірювань та інших механічних величин. Також необхідно сформувати критерії оцінки ефективності методів відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини.

Викладення основного матеріалу досліджень. Цифрові відеозображення, що містять двовимірну вимірювальну інформацію про механічні величини, формуються, передаються, обробляються і накопичуються за допомогою певного набору алгоритмічних методів та технічних засобів. У ході вказаних операцій вимірювальна інформація, що міститься на відеозображеннях, піддається впливу ряду

негативних факторів, в тому числі пов'язаних з обмеженими динамічними властивостями вимірювального каналу передавати відеоінформацію, що швидко змінюється в часі та просторі.

Розглянемо загальну постановку задачі відновлення двовимірної вимірювальної інформації (рис. 1). Початкове відеозображення $f(x, y)$ містить двовимірну вимірювальну інформацію про деякий об'єкт вимірювань (x, y – просторові координати в площині відеозображення). У вимірювальному каналі засобів вимірювань механічних величин виконується формування та попередня обробка такого відеозображення. При цьому мають місце викривлення відеозображення та вимірювальної інформації. Це:

– розмиття контурів об'єктів на відеозображеннях через обмежену смугу частот вимірювального каналу (це розмиття виникає в оптичній системі та при проходженні відеосигналу через аналогові електронні схеми);

– розмиття відеозображень об'єктів, що рухаються протягом часу формування одного кадру у послідовності відеозображень;

– додавання шуму та похибок, обумовлених дискретизацією та квантуванням відеосигналу.

Перші два викривлення – це динамічні похибки. Вони виникають при швидких змінах відеосигналу відносно просторових координат (перше викривлення) або відносно часових координат (друге викривлення). При відновленні відеозображень також потрібно враховувати наявність шуму $\xi(x, y)$, що утворюється тепловим шумом аналогових електронних схем та напівпровідникового перетворювача світло–сигнал (ПЗС-матриці).

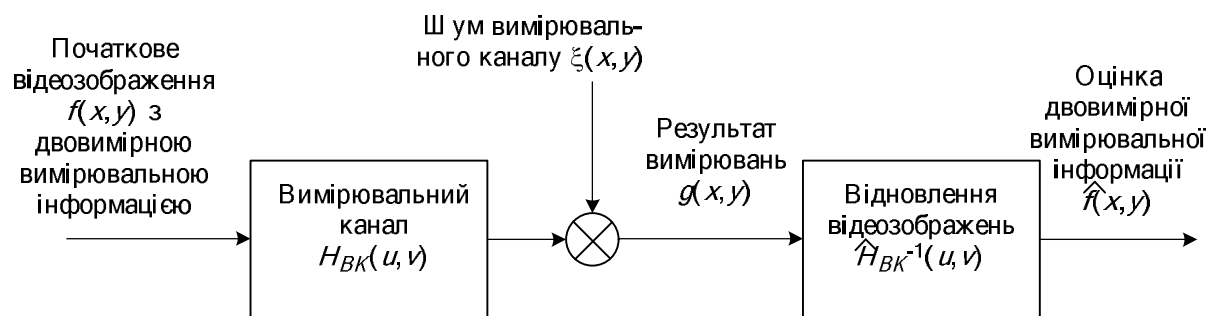


Рис. 1. Загальна схема відновлення двовимірної вимірювальної інформації

Узагальненою характеристикою вимірювального каналу є його передаточна функція $H_{BK}(u, v)$, що представлена в частотній області двовимірною амплітудно-частотною характеристикою (u, v – просторові частоти в спектрі відеозображення).

Таким чином, замість початкового відеозображення $f(x, y)$ на виході вимірювального каналу маємо відеозображення $g(x, y)$. Математична модель вимірювального каналу в частотній області має вигляд:

$$G(u, v) = \mathbf{F}_T(g(x, y)) = H_{BK}(u, v)F(u, v) + \xi(u, v),$$

де $\mathbf{F}_T(\cdot)$ – перетворення Фур'є двовимірного відеозображення,

$$F(u, v) = \mathbf{F}_T(f(x, y)), \quad \xi(u, v) = \mathbf{F}_T(\xi(x, y)).$$

Для відновлення також потрібна бути відома апіорна інформація про властивості початкового відеозображення $f(x, y)$, шуму $\xi(x, y)$ та оцінка $\hat{H}_{BK}(u, v)$ передаточної функції вимірювального каналу.

Потрібно на основі спостережень спотвореного відеозображення $g(x, y)$ та апіорної інформації знайти оцінку початкової двовимірної вимірювальної інформації $\hat{f}(x, y) = \mathbf{F}_T^{-1}(\hat{H}_{BK}^{-1}(u, v)G(u, v))$, що міститься на початковому відеозображенні $f(x, y)$. Ця оцінка далі використовується для визначення геометричних параметрів об'єктів вимірювань та інших механічних величин. В результаті відновлення двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень) забезпечує підвищення точності вимірювань механічних величин.

Розв'язання задачі відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини складається з ряду етапів:

- ідентифікація передаточної функції вимірювального каналу;
- накопичення та оцінка апіорної інформації про властивості двовимірної вимірювальної інформації і про властивості шумів у вимірювальному каналі;

– формування критеріїв оцінки результатів відновлення двовимірної вимірювальної інформації та обґрунтування можливості використання цих критеріїв у процесі відновлення;
 – аналіз і вибір методів відновлення;
 – моделювання та експериментальна оцінка точності результатів вимірювань механічних величин з відновленням двовимірної вимірювальної інформації.

У процесі розв'язання задачі відновлення двовимірної вимірювальної інформації використовувалися тестові відеозображення, що містять об'єкт вимірювань, а також відеозображення поверхні промислових виробів з природного каменю (рис. 2). У процесі контролю якості цих виробів потрібно вимірювати їх геометричні розміри та геометричні параметри структурних елементів, що утворюють текстуру поверхні природного каменю [20, 21, 22].

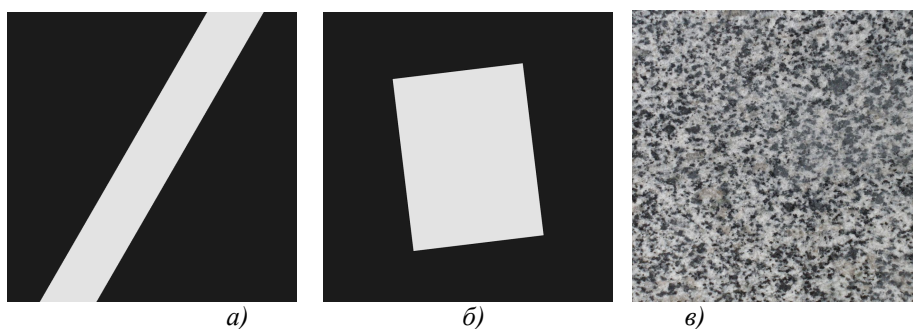


Рис. 2. Тестові та реальні відеозображення, що містять об'єкт вимірювань

Першим етапом розв'язання задачі відновлення двовимірної вимірювальної інформації є ідентифікація передаточної функції вимірювального каналу.

Ідентифікація динамічних характеристик вимірювального каналу виконувалася на основі дослідження тестових відеозображень та контурів об'єктів на цих відеозображеннях. Відомо багато методів ідентифікації динамічних об'єктів. Ці методи відрізняються математичними моделями об'єктів, критеріями і алгоритмами ідентифікації. Також суттєву роль при виборі метода відіграє тип динамічного об'єкта, що досліджується. Найбільш відомі методи ідентифікації: на основі перетворення Фур'є; за допомогою частотних характеристик; за допомогою перехідної та імпульсної характеристик; на основі кореляційних функцій; методи адаптивної ідентифікації [23–25].

Для ідентифікації динамічних характеристик вимірювального каналу засобів вимірювань механічних величин найбільш придатним слід вважати методи, що використовують перехідну характеристику. Це пов'язано з тим, що найбільший вплив на результати вимірювань геометричних параметрів об'єктів, що присутні на відеозображенні, має точність відтворення контурів цих об'єктів. А вона, в свою чергу, визначається динамічними характеристиками і може розглядатися як перехід від фону до об'єкта. Таким чином, контур об'єкта, що займає певний проміжок сигналу яскравості в рядку тестового відеозображення, може розглядатися як реакція вимірювального каналу на стрибкоподібну зміну яскравості. А це і є перехідна характеристика вимірювального каналу.

Пропонується така методика ідентифікації динамічних характеристик вимірювального каналу:

1. За допомогою пристрою формування відеозображень, що входить до складу вимірювального каналу та ідентифікується, виконується формування тестового відеозображення, що містить об'єкт вимірювань і фон (рис. 2, а). Межа між об'єктом і фоном має вигляд лінії з деяким кутом нахилу $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ до вертикалі. Зміна сигналу яскравості $f(x)$ у кожному рядку тестового відеозображення відповідає пограничній кривій $I_n(x)$, відомій з оптики. Це є перепад яскравості в рядку відеозображення, що визначає перехід від фону до об'єкта вимірювань. Вказаний перепад яскравості співпадає з контуром цього об'єкта.

2. Виконується усереднення всіх сигналів пограничної кривої в межах всіх строк для набору тестових відеозображень, отриманих в п. 1. Це дозволяє позбутися похибок, пов'язаних з дискретним характером цифрового відеозображення та з наявністю шумів на відеозображенні.

3. Обчислюється похідна від усередненого графіка пограничної кривої, що відповідає функції розсіювання лінії для даного пристрою формування відеозображень:

$$h_n(x) = \frac{dI_n(x)}{dx}.$$

4. Обчислення перетворення Фур'є від функції розсіювання лінії дозволяє визначити частотні характеристики вимірювального каналу:

$$H(u) = \int_{x_1}^{x_2} h_n(x) \exp(-j2\pi ux) dx ,$$

де модуль та аргумент $H(u)$ визначають відповідно амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики вимірювального каналу.

5. Далі одним з відомих методів виконується перехід до двовимірної частотної характеристики $H(u, v)$.

Інший шлях ідентифікації динамічних характеристик вимірювального каналу полягає у визначенні коефіцієнтів передаточної функції певного виду, записаної на основі перетворення Лапласа. Це може бути здійснено за допомогою одного з відомих чисельних методів (наприклад методу площ) на основі перехідної характеристики вимірювального каналу, визначеної по тестовим відеозображенням [26, 27].

Для графіків зміни сигналу яскравості в рядку відеозображення була виконана процедура ідентифікації і визначення передаточної функції вимірювального каналу, побудованого на основі аналогової відеокамери:

$$W(p) = \frac{17,64}{p(1 + 0,19p + 2,72p^2)(1 + 26,03p)}$$

та на основі цифрової відеокамери:

$$W(p) = \frac{16,41}{p(1 + 0,09p + 1,69p^2)(1 + 9,78p)} .$$

Іншим варіантом ідентифікації передаточної функції вимірювального каналу є апроксимація розмитого відеозображення симетричним ядром функції Гауса [28].

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right),$$

або у вигляді дискретної маски розміром $(2k + 1)(2k + 1)$ для дискретного відеозображення:

$$h(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{((i - k - 1)^2 + (j - k - 1)^2)}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

Це є простий наближений метод ідентифікації вимірювального каналу у вигляді маски фільтра в просторовій області, що перетворює відеозображення $f(x, y)$ у відеозображення $g(x, y)$ шляхом згортки з цією маскою (* – операція згортки в просторовій області):

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) .$$

Значення σ підбирається на основі дослідження тестових відеозображень. Встановлено, що для аналогових відеокамер з співвідношенням сигнал/шум $\psi = (40 \dots 43)$ дБ довжина перепаду яскравості в рядку відеозображення складає (10...12) дискретних точок, для цифрових відеокамер з $\psi = 55$ дБ – (5...6) дискретних точок. Відповідно $\sigma \approx 4$ дискретні точки та $\sigma \approx 2$ дискретні точки.

Важливою умовою ефективного відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини є наявність апріорної інформації про властивості цієї інформації [16–18]. Для різних методів відновлення може бути використана така апріорна інформація:

– спектральна щільність потужності шуму у вимірювальному каналі:

$$S_{\xi}(u, v) = |F_T(\xi(x, y))|^2; \quad (2)$$

– спектральна щільність потужності початкового відео зображення:

$$S_f(u, v) = |F_T(f(x, y))|^2; \quad (3)$$

– співвідношення спектральних щільностей:

$$k_S = \frac{\sum_{u,v} S_{\xi}(u, v)}{\sum_{u,v} S_f(u, v)} \text{ або } k_S = 1 / \psi^2; \quad (4)$$

– кореляційна функція шуму:

$$K_{\xi} = F_T^{-1}(S_{\xi}(u, v));$$

– кореляційна функція початкового відео зображення:

$$K_f = F_T^{-1}(S_f(u, v));$$

– співвідношення сигнал/шум пристрою формування відеозображень:

$$\psi = 20 \lg \frac{f_{\max}(x, y)}{\sigma_{\xi}}, \quad (5)$$

де σ_{ξ} – середньоквадратичне значення напруги шуму $\xi(x, y)$, $f_{\max}(x, y)$ – максимально можливе значення амплітуди відеосигналу на відеозображенні (наприклад для 8-розрядного цифрового коду яскравості $f_{\max}(x, y) = 255$ дискретних рівнів).

Отримання повних апріорних відомостей про двовимірну вимірювальну інформацію є складним та неоднозначним завданням, оскільки в загальному випадку початкове відеозображення $f(x, y)$ невідоме, а для вимірювань доступне тільки спотворене відеозображення $g(x, y)$ на виході вимірювального каналу. Тому для отримання апріорної інформації потрібно використовувати або тестові відеозображення, подібні до відеозображень реальних об'єктів вимірювань, або типові відеозображення реальних об'єктів вимірювань, сформовані за допомогою більш точних еталонних пристроїв формування відеозображень. Для таких відеозображень може бути обчислена спектральна щільність $S_f(u, v)$ та кореляційна функція K_f . Спектральна щільність шуму $S_{\xi}(u, v)$ та його кореляційна функція K_{ξ} може бути оцінена на основі досліджень ділянок тестових або реальних відеозображень з приблизно однаковою яскравістю або кольором.

Найпростішим варіантом задання апріорної інформації для методів відновлення є використання співвідношення сигнал/шум ψ , що є відомою характеристикою для кожного конкретного пристрою формування відеозображень.

Для оцінки ефективності застосування методів відновлення двовимірної вимірювальної інформації потрібно визначити критерії, за якими оцінюються результати відновлення. Типові критерії оцінки вірності передачі, відтворення та відновлення аналогових і цифрових відеозображень орієнтовані на оцінку амплітудних викривлень та візуальної якості відеозображень [16, 19].

Ці критерії включають обчислення середньоквадратичного значення похибки відтворення дискретних значень амплітуди відеосигналу на виході вимірювального каналу щодо початкового відеозображення.

Основними амплітудними критеріями, що дають узагальнену картину викривлень цифрового відеозображення, є [19, 29]:

– середньоквадратичне відхилення між початковим та відновленим відеозображеннями:

$$\sigma_{\hat{f}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x,y} (\hat{f}(x, y) - f(x, y))^2}, \quad (6)$$

де M та N – висота та ширина відеозображення в дискретних точках;

– співвідношення сигнал/шум;

$$\Psi_{\sigma} = -10 \lg \frac{\sum_{x,y} (\hat{f}(x, y) - f(x, y))^2}{\sum_{x,y} (f(x, y))^2}; \quad (7)$$

– пікове співвідношення сигнал/шум:

$$\Psi_{\text{пк}} = -10 \lg \frac{\frac{1}{MN} \sum_{x,y} (\hat{f}(x, y) - f(x, y))^2}{f_{\max}^2(x, y)}. \quad (8)$$

Для кольорового відеозображення в формулах (6)–(8) потрібно враховувати наявність декількох каналів відеозображення. Наприклад в цьому випадку формула (6) набуває вигляду:

$$\sigma_{\hat{f}} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x,y} \sum_r \alpha_r (\hat{f}(x, y, r) - f(x, y, r))^2},$$

де r – номер каналу кольорового відеозображення (відповідно до кольорової схеми, що використовується для цього відеозображення, зазвичай $r = 1, 2, 3$);

α_r – ваговий коефіцієнт, що враховує роль кожного каналу кольорового відеозображення у передачі вимірювальної інформації, $\sum_r \alpha_r = 1$, у найпростішому випадку $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$;

Це є загальна оцінка викривлень всього відеозображення. При цьому похибка відтворення кожного дискретного значення амплітуди відеосигналу розглядається незалежно від похибок відтворення сусідніх дискретних значень.

Такий підхід дозволяє з високою точністю оцінити викривлення вимірювальної інформації про яскравість та колір об'єктів, що наявні на відеозображенні, відновленому після стиснення.

Однак при оцінці викривлень вимірювальної інформації про геометричні характеристики об'єктів необхідно також враховувати викривлення форми перепадів амплітуди відеосигналу, що відповідають контурам об'єктів. Оскільки в амплітудних критеріях вказані викривлення не враховуються безпосередньо, то оцінка викривлень вимірювальної інформації про геометричні характеристики об'єктів на основі амплітудних критеріїв має низьку точність та об'єктивність.

Окрім того, кількісну оцінку викривлень вимірювальної інформації про геометричні характеристики об'єктів доцільніше виражати в одиницях координат відеозображення, а не в одиницях амплітуди відеосигналу.

Таким чином, суттєвим недоліком амплітудних критеріїв є низька точність оцінки викривлень вимірювальної інформації про геометричні характеристики об'єктів, що наявні на відеозображенні.

Тому для оцінки точності вимірювань механічних величин пропонуються критерії, що характеризують похибки відновлення двовимірної вимірювальної інформації:

– похибки визначення площі об'єкта вимірювань:

$$\Delta S = S_{\hat{f}} - S_f; \tag{9}$$

– похибки визначення координат центра мас об'єкта вимірювань $\Delta x_c, \Delta y_c$;

– похибки геометричних розмірів об'єкта вимірювань $\Delta h, \Delta l$;

– неспівпадіння множин точок Ω_f і $\Omega_{\hat{f}}$, що належать відповідно об'єкту вимірювань на

початковому $f_{сегм}(x, y)$ і відновленому $\hat{f}_{сегм}(x, y)$ відеозображенні після сегментації на об'єкт вимірювань і фон:

$$\Delta_{конт} = \frac{\hat{f}_{сегм}(x, y) \oplus f_{сегм}(x, y)}{I_{конт}}, \tag{10}$$

де

$$f_{сегм}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & f(x_i, y_j) \in \Omega_f \\ 0, & f(x_i, y_j) \notin \Omega_f \end{cases}, \quad \hat{f}_{сегм}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & \hat{f}(x_i, y_j) \in \Omega_f \\ 0, & \hat{f}(x_i, y_j) \notin \Omega_f \end{cases},$$

\oplus – логічна операція визначення суми за модулем 2;

$I_{конт}$ – сумарна довжина контуру об'єкта вимірювань.

Останній показник характеризує середнє зміщення контуру об'єкта вимірювань і є важливим показником для оцінки точності визначення координат контуру та геометричних розмірів цього об'єкта на спотвореному $g(x, y)$ та відновленому $\hat{f}(x, y)$ відеозображеннях.

Застосування вказаних критеріїв можливе за умови наявності тестового початкового відеозображення або типових відеозображень реальних об'єктів вимірювань, сформованих за допомогою більш точних еталонних пристроїв формування відеозображень.

Основним етапом відновлення двовимірної вимірювальної інформації є вибір методу відновлення, що забезпечує найбільш точну передачу вимірювальної інформації про геометричні параметри об'єктів вимірювань.

Відомо багато методів відновлення відеозображень [16–18, 30]. Це можуть бути лінійні методи, що базуються на застосуванні до спотвореного відеозображення $g(x, y)$ оператора $\hat{H}_{BK}^{-1}(u, v)$, оберненого до передаточної функції вимірювального каналу. Перевагою цих методів є обчислювальна простота процедури відновлення, основний недолік – обмежена точність відновлення амплітуди відеозображення в цілому.

Відомі також нелінійні методи, чисельна реалізація яких вимагає виконання ітераційних процедур з відеозображенням. Перевагою цих методів є більш точне відновлення амплітуди відеозображення в цілому, основний недолік – складність обчислювальних процедур та низька швидкодія. В результаті ці методи не можуть бути застосовані для відновлення вимірювальної інформації в реальному масштабі часу, наприклад в ході контролю різних технологічних операцій й виготовлення об'єктів вимірювань.

Для досліджень були обрані найбільш апробовані методи відновлення відеозображень. Це – лінійні методи, в яких як оператор $\hat{H}_{BK}^{-1}(u, v)$ використовується одна з передаточних функцій відновлюючого фільтра $H_{1\phi}(u, v), H_{2\phi}(u, v), H_{3\phi}(u, v)$:

1. Метод на основі використання фільтра Вінера:

$$H_{1\phi}(u, v) = \frac{1}{\hat{H}_{BK}(u, v)} \cdot \frac{|\hat{H}_{BK}(u, v)|^2}{|\hat{H}_{BK}(u, v)|^2 + S_{\xi}(u, v) / S_f(u, v)}. \tag{11}$$

2. Метод на основі використання параметричного фільтра Вінера:

$$H_{2\phi}(u, v) = \frac{1}{\widehat{H}_{BK}(u, v)} \cdot \frac{|\widehat{H}_{BK}(u, v)|^2}{|\widehat{H}_{BK}(u, v)|^2 + k_s} \quad (12)$$

3. Метод на основі регуляризації Тихонова (метод найменших квадратів зі зв'язком, де рівняння зв'язку $\|g(x, y) - H_{BK} \widehat{f}(x, y)\|^2 = \|\xi(x, y)\|^2$ відображає процес формування спотвореного відеозображення на виході вимірювального каналу):

$$H_{3\phi}(u, v) = \frac{\widehat{H}_{BK}^*(u, v)}{|\widehat{H}_{BK}(u, v)|^2 + \gamma|P(u, v)|^2} \quad (13)$$

де $P(u, v) = F_T(p(x, y))$, $p(x, y)$ – оператор Лапласа.

Також використовувались нелінійні ітераційні методи відновлення:

4. Метод на основі алгоритму Люси-Ричардсона:

$$\widehat{f}_{k+1}(x, y) = \widehat{f}_k(x, y) \left[\widehat{h}(-x, -y) * \frac{g(x, y)}{\widehat{h}(x, y) * \widehat{f}_k(x, y)} \right], \quad (14)$$

де k – номер ітерації алгоритму;

$\widehat{h}(x, y) = F_T^{-1}(\widehat{H}_{BK}(x, y))$ – оцінка імпульсної характеристики вимірювального каналу.

5. Метод відновлення на основі наближення оцінки $\widehat{f}(x, y)$ до початкового відеозображення $f(x, y)$ на основі методу максимальної правдоподібності. Цей метод відновлення не вимагає наявності апріорної інформації про $\widehat{H}_{BK}(u, v)$.

Вказані методи були застосовані для відновлення тестових та реальних відеозображень об'єктів вимірювань (рис. 2).

На рис. 3 наведено приклад застосування методів відновлення відеозображень до тестового відеозображення (рис. 2, а). Перепад яскравості в рядку тестового відеозображення був спотворений дією передаточної функції вимірювального каналу $\widehat{H}_{BK}(u, v)$ та шумами цього каналу з співвідношенням сигнал/шум 55 дБ (типове значення для цифрової відеокамери), а потім відновлений за допомогою параметричного фільтра Вінера. Координати контурів об'єктів вимірювань визначалися на основі порогового методу сегментації відеозображення. Для реальних умов вимірювань цілком можливе відхилення порогу сегментації від середнього значення між яскравістю об'єкта вимірювань та фону через нерівномірність освітлення в межах відеозображення, нестабільність освітлення протягом часу проведення вимірювань, змін інших умов вимірювань протягом робочої зміни тощо. В цьому випадку маємо значну перевагу у точності вимірювань координату контуру завдяки застосуванню методів відновлення відеозображень з динамічними похибками. На рис. 3 це проявляється у наближенні відновленого перепаду яскравості (штрихова лінія) до початкового перепаду яскравості (суцільна лінія) на рівні амплітуди, що відповідає порогу сегментації (лінія з точок).

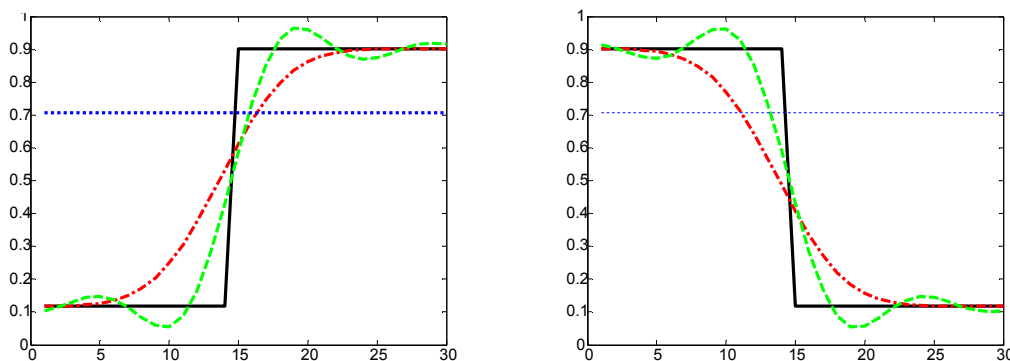


Рис. 3. Приклад відновлення перепаду яскравості в рядку відеозображення: а) – перехід від фону до об'єкта; б) – перехід від об'єкта до фону; по горизонталі – координата x , дискретних точок; по вертикалі – нормоване значення яскравості відеозображення

На рис. 4 наведено результати експериментального дослідження похибок вимірювань геометричних параметрів для тестових та реальних відеозображень (рис. 2). Для викривлень тестових відеозображень використовувалася формула (1) та додавання шуму з відповідним значенням співвідношення сигнал/шум. Для відновлення використовувалися методи 1–5 згідно з формулами (11)–(14). Оцінка похибок виконувалася на основі критеріїв згідно з формулами (6)–(10).

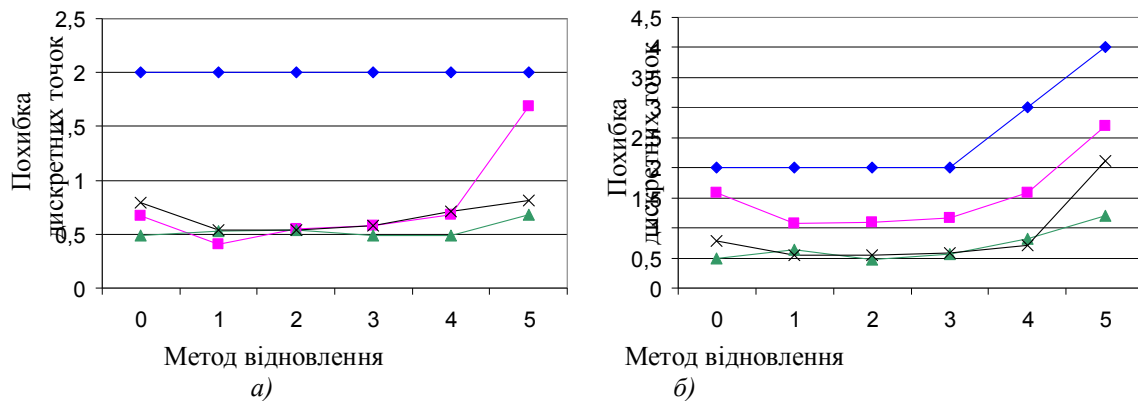


Рис. 4. Похибки вимірювань геометричних параметрів на відеозображенні від цифрової відеокамери: а) – похибки визначення координат контуру; б) – похибка визначення відстані; ◇ – максимальне значення похибки; ■ – систематична похибка; ▲ – середньоквадратичне відхилення випадкової складової похибки; x – неспівпадіння контурів згідно з формулою (10)

Загальні умови проведення вимірювань:

- використовується аналогова відеокамера із співвідношенням сигнал/шум 40 дБ та довжиною перепаду яскравості в рядку 12 дискретних точок і цифрова відеокамера з співвідношенням сигнал/шум 55 дБ та довжиною перепаду яскравості в рядку 6 дискретних точок;
- розмір відеозображення 1024x1024 дискретні точки;
- використовуються методи відновлення у відповідності до формул (11)–(14), нумерація згідно з текстом роботи, 0 – без відновлення;
- відеозображення об'єкта вимірювань має яскравість 227 дискретних рівнів, мітки – 27 дискретних рівнів, поріг яскравості для сегментації – 127 дискретних рівнів;
- довірна ймовірність 0,95.

Висновки:

1. Застосування методів відновлення двовимірної вимірювальної інформації дозволяє суттєво зменшити динамічні похибки та підвищити точність вимірювань механічних величин.

2. Найбільш придатним для відновлення відеозображень з двовимірною вимірювальною інформацією про механічні величини є: метод на основі фільтра Вінера за умови, коли відомі спектральні щільності або кореляційні функції відеозображення та шуму вимірювального каналу; метод на основі параметричного фільтра Вінера за умови, коли відоме тільки співвідношення сигнал/шум пристрою формування відеозображень.

Ці методи забезпечують ефективне відновлення форми контурів об'єктів вимірювань та мають помірну обчислювальну складність. Останній фактор найбільш важливий для вимірювань механічних величин в реальному масштабі часу при контролі різних технологічних процесів.

3. Інші лінійні та нелінійні ітераційні методи відновлення забезпечують якісніше відновлення амплітуди відеосигналу в межах ділянок постійної яскравості або кольору. Але це не є суттєвим у випадку, коли виконуються вимірювання механічних величин шляхом визначення контурів об'єктів вимірювань на основі сегментації відеозображення. В цьому випадку важливе точне відновлення перепадів яскравості або кольору, що відповідають контурам об'єктів вимірювань. Вказані методи також досить складні у обчислювальному плані та мають низьку швидкодію. Тому їх використання для вимірювань механічних величин є недоцільним.

4. Амплітудні критерії точності відновлення двовимірної вимірювальної інформації не є об'єктивними показниками точності вимірювань механічних величин. Тому їх використання обмежується тільки оцінкою загальної якості відеозображення з двовимірною вимірювальною відеоінформацією. Рекомендується використовувати критерії, що запропоновані в даній роботі та характеризують похибки вимірювань геометричних параметрів об'єктів вимірювань.

5. Отримані результати є основою для підвищення точності засобів вимірювань механічних величин, що базуються на двовимірній вимірювальній інформації. Ці результати можуть бути застосовані при розробці автоматизованих засобів вимірювань та інформаційно-вимірювальних систем, які використовують алгоритмічні методи обробки відеозображень і вимірювальної інформації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Катыс Г.П.* Обработка визуальной информации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. *Грязин Г.Н.* Системы прикладного телевидения: Учебное пособие для вузов. – С-Пб.: Политехника, 2000. – 277 с.
3. *Шлихт Г.Ю.* Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
4. *Орнатский П.П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Выща школа, 1983. – 455 с.
5. *Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю.* Технологические измерения и приборы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.
6. *Таланчук П.М., Рущенко В.Т.* Основы теории и проектирования измерительных приборов: Учебное пособие. – К.: Выща школа, 1989. – 454 с.
7. *Рудзит Я.А., Плуталов В.Н.* Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.
8. *Шульман М.Я.* Измерение передаточных функций оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
9. *Грановский В.А.* Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
10. *Апенко М.И., Дубовик А.С.* Прикладная оптика. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
11. *Родионов С.А.* Автоматизация проектирования оптических систем: Учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 270 с.
12. Оптические измерения: Учебник для вузов / Под общей ред. Д.Т. Пуряева. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
13. *Порфирьев Л.Ф.* Теория оптико-электронных приборов и систем: Учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 272 с.
14. *Пресс Ф.П.* Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
15. *Шарыгин М.Е.* Сканеры и цифровые камеры. – С-Пб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2000. – 384 с.
16. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
17. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений в среде Matlab. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
18. *Василенко Г.И., Тараторин А.М.* Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
19. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 792 с.
20. *Михайленко В.В., Гніліцький В.В., Купкін Є.С., Подчашинський Ю.О.* Дослідження можливості визначення інформаційних показників якості декоративного та облицовального каменю на підставі комп'ютерної обробки їхнього зображення: Звіт про НДР (закл.) // УкрІНТЕІ: – Інв. № 0204U000748. – К., 2004. – 120 с.
21. Спосіб контролю зовнішнього вигляду поверхні виробів з облицовального каменю: Патент України на винахід 71412 А МПК7 G01 В7/00 / Є.С. Купкін, Ю.О. Подчашинський (Україна); Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20031212802; Заявл. 28.12.03; Опубл. 15.11.04. Бюл. № 11. – 3 с.
22. *Криворучко А.О., Купкін Є.С., Подчашинський Ю.О., Ремезова О.О.* Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеоінформації в гірничо-геологічній галузі // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2005. – № 1 (32). – С. 107–116.
23. *Гроп Д.* Методы идентификации систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976.
24. *Дейч А.М.* Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979.
25. *Цыпкин Я.З.* Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984.
26. *Белова Д.А., Кузин Р.Е.* Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления. – М.: Энергия, 1979. – 264 с.
27. *Болнокин В.Е., Чинаев П.И.* Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
28. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 928 с.
29. *Уэлстид С.* Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. – М.: Триумф, 2003. – 320 с.
30. *Ярославский Л.П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович — кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичного управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка відеозображень.

Подано 05.01.2009

Подчашинський Ю.О. Відновлення двовимірної виміральної інформації про механічні величини, що містить динамічні похибки

Подчашинский Ю.А. Восстановление двумерной измерительной информации о механических величинах, содержащей динамические погрешности

Podchashinsky Yu.A. Reconstruction of two-dimensional measuring information on mechanical values with dynamic errors

УДК 531.7:004.932

Восстановление двумерной измерительной информации о механических величинах, содержащей динамические погрешности / Ю.А. Подчашинский

В статье рассмотрены методы восстановления двумерной измерительной информации о геометрических параметрах объектов измерений. Высокоточные результаты этих измерений также необходимы для определения других механических величин. Сформулированы критерии оценки точности результатов восстановления двумерной измерительной информации, содержащей динамические погрешности. Выполнены экспериментальные исследования методов восстановления.

УДК 531.7:004.932

Reconstruction of two-dimensional measuring information on mechanical values with dynamic errors / Yu.A. Podchashinsky

The methods of reconstruction of two-dimensional measuring information on geometrical parameters of objects of measurements are considered in article. The precision results of these measurements also are necessary for definition of other mechanical values. The criteria of an estimation of accuracy of results of restoration of two-dimensional measuring information containing dynamic errors are formulated. The experimental researches of methods of restoration are executed.