ОЦІНЮВАННЯ 3D ПРОФІЛЮ ПОВЕРХНІ ФІЛЬТРОМ КАЛМАНА ПО ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИМ КАРТИНАМ

Йосипок В. В.; Шпилька О. О., к.т.н.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна

Безконтактні методи дослідження поверхонь об'єктів, без безпосереднього впливу на них, користуються попитом в медицині, метрології, криміналістиці, матеріалознавстві та інших областях діяльності людини. Традиційно для подібних досліджень використовують інтерференційні методи, так як вони забезпечують найвищу точність та роздільну здатність.

Для фізичних вимірів в технічних пристроях широко використовують інтерферометр Майкельсона. В якому значення електричного поля опорної та вимірювальної інтерференційних хвиль у фіксованій точці спостереження *(x, y)* визначаються наступним чином:

$$E_{1i}(t) = \alpha_i(t)\exp(j2\pi\nu_i t + \phi_1);$$

$$E_{2i}(t) = r\alpha_i(t+\tau)\exp[j2\pi\nu_i(t+\tau)],$$

де індекс i позначає різні хвильові цуги з амплітудами $\alpha_i(t)$ і частотами ν_i в середині вузької спектральної зони $\Delta\nu$, ϕ_1 — початкова фаза, яку можна не враховувати без загальних втрат, $\tau = \Delta / c = 2z / c$ — час затримки випромінюваної хвилі, а c — швидкість світла. Потужність $\alpha_i(t)$ вважається некогерентною одна з одною, а інтенсивність світла на виході інтерферометра визначається усередненням по ансамблю хвилеподібних цугів, як

$$I(z) = \left\langle \left| E_{1i}(t) + E_{2i}(t) \right|^2 \right\rangle_i = I_0 \left[1 + V(z)\cos\left(2\pi\nu_0 \frac{2z}{c} + \varphi \right) \right], \qquad (1)$$

де I_0 – усереднене значення інтенсивності світла; $V(z) = \left\langle \alpha_i(\mathrm{t})\alpha_i\left(\mathrm{t} - \frac{2z}{c} \right) \right\rangle_i$ –

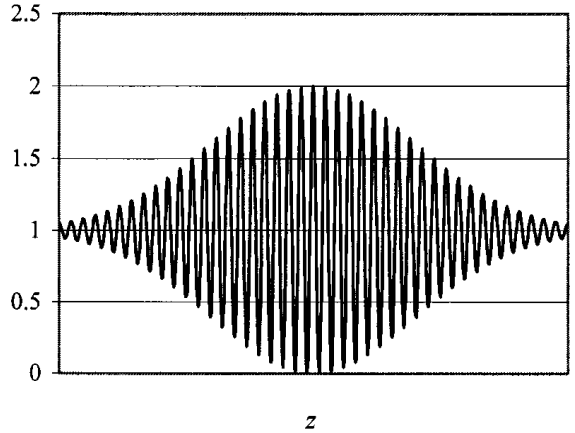


Рисунок 1. Інтерферометричний сигнал

функція когерентності; z — різниця оптичного ходу хвильових цугів по опорному та вимірювальному каналу.

Для відновлення профілю поверхні набирається фрейм таких інтерефернційних картин для різних значень z, де відповідна точка кожної картини утворює інтерферометричний сигнал (рис 1). Висота профілю поверхні h, що відповідає точці *(x, y)*

в фреймі картин, міститься в фазі φ цього сигналу. Таким чином актуальною являється задача оцінювання фази інтерферометричного сигналу в кожній точці *(x, y)* фрейму інтерференційних картин.

Для оцінювання параметрів інтерференційного сигналу (1), використаємо дискретний фільтр Калмана, з вектором стану $\theta = \left[I, V, \varphi\right]^T$. Дискретна лінійна фільтрація Калмана, зазвичай, визначена за допомогою векторного рівняння спостереження:

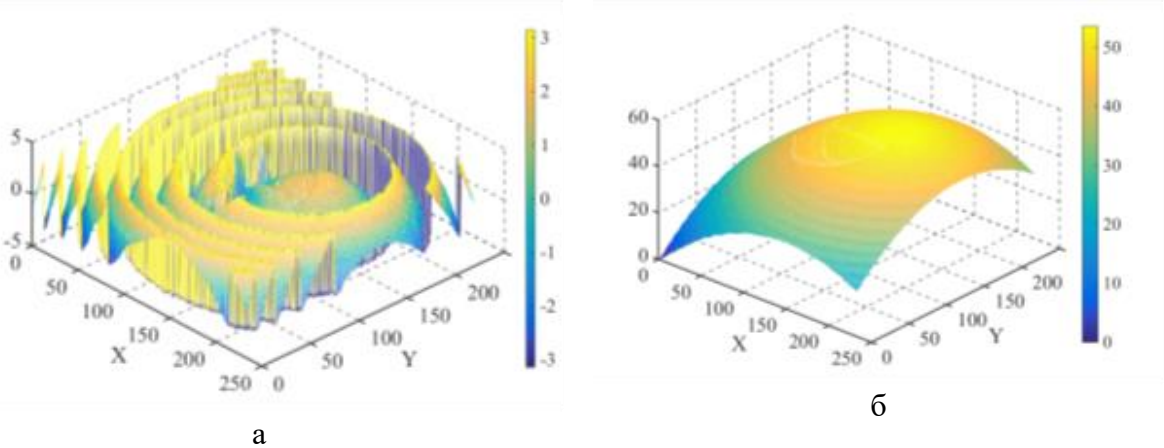
$$y_k = I_k + V_k \cos\left(2\pi v_0 \cdot \frac{2k \cdot \Delta z}{c} + \varphi_k\right) + n_k$$

і рівняння еволюції системи в просторі:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + w_k$$

де I_k — невідоме значення інтенсивності фонового освітлення; V_k — невідома амплітуда огинаючої інтерферометричного сигналу; φ_k — невідоме значення фази інтерферометричного сигналу; Δz — крок зміни довжини оптичного шляху вимірювального плеча інтерферометра; v_0 — частота світлового випромінювача; n_k — шум спостереження з нульовим математичним очікуванням і дисперсією σ_n^2; $w(k)$ — вектор шуму збудження моделі, який враховує зміну невідомих коефіцієнтів на інтервалі виміру, з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею $diag\left(\sigma_I^2, \sigma_V^2, \sigma_\varphi^2\right)$.

Результат оцінювання фази $\hat{\varphi}_k$ за допомогою фільтра Калмана по фрейму інтерференційних картин для зрізу оптоволоконної жили діаметром 125мкм зображена на рис. 2а. Як видно з результатів моделювання отриманий профіль поверхні являється згорнутим по модулю 2π, тому необхідно виконати двовимірне розгортання отриманого профілю.



а б

Рисунок 2

Розгортання фази являє собою реконструкцію функції $\Psi(x, y)$ для якої

виконується залежність $\varphi(x,y) = \Psi(x,y) \bmod 2\pi$. Метод розгортання, що використовується, побудований на оцінці дискретних часткових похідних функції $\Psi(x,y)$, які можуть бути оцінені з помилкою рівною цілому числу 2π. Це приводить до задачі мінімізації з цілими змінними: зважене відхилення між оціненими та невідомими дискретними похідними нерозгорнутої фази мінімізується з урахуванням обмеження на те, що дві функції не повинні відрізнятися на число кратне 2π. За допомогою цього обмеження обмежується розповсюдження помилок, і згортка по модулю 2π розгорнутої фази, ідентична оціненій за допомого фільтра Калмана. Результати розгортання фази $\varphi(x,y)$ зображені на рис. 2б

Перелік посилань

1. Васильев В. Н., Гуров И. П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1998 – 240с. ил.

2. M. Costantini “A Nowel Phase Unwrapping Method Baset on Network Programming”, IEEE Trans. Geosci. Remote sensing, vol. 36, pp. 813-821, May 1998.

3. Юдин Д. Б., Гольдштейн Е. Г. Линейное программирование. Теория, методы и приложения. - М.: Наука, 1969. - 424 с.

Анотація

Представлений динамічний метод вимірювання 3D профілю поверхні з використанням фільтру Калмана для оцінки фази інтерференційного сигналу. На основі методів лінійного програмування проводиться розгорнення отриманих значень фаз, що може бути промасштабовано до реальних значень розмірів профілю поверхні.

Ключові слова: Калманівська фільтрація, лінійне програмування, інтерференційний сигнал.

Аннотация

Представлен динамический метод измерения 3D профиля поверхности с использованием фильтра Калмана для оценки фазы интерференционного сигнала. На основе методов линейного программирования проводится разворачивание полученных значений фаз, что может быть промасштабировано к реальным значениям размеров профиля поверхности.

Ключевые слова: Калмановская фильтрация, линейное программирование, интерференционный сигнал.

Abstract

A dynamic method for measuring the 3D surface profile using a Kalman filter for estimating the phase of the interference signal is presented. On the basis of linear programming methods, the resulting values of phases are unwraped, which can be scaled to real values of the surface profile sizes.

Keywords: Kalman filtration, linear programming, interferential signal.