

GIAO THOA KẾ HETERODYNE SỬA ĐỔI VỚI HAI TẦN SỐ TÁCH BIỆT TRONG KHÔNG GIAN CHO PHÉP ĐO DỊCH CHUYỂN NHỎ

HETERODYNE INTERFEROMETER WITH SEPARATED FREQUENCIES IN SPACE FOR SMALL DISPLACEMENT MEASUREMENT

Nguyễn Thành Đông*

Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một giao thoa kế Michelson sửa đổi để nâng cao độ phân giải trong phép đo. Trong hệ này, tia laze tới từ nguồn He-Ne được ổn định tần số theo nguyên lý Zeeman được tách riêng các tần số f_1 và f_2 trước khi gửi tới giao thoa kế để tránh hiện tượng lỗi phi tuyến theo chu kỳ trong phép đo. Phương pháp khuếch đại khóa tần (LIA) với tần số cắt phù hợp và độ nhạy cao xác định sự thay đổi pha liên quan đến dịch chuyển. So sánh hai phép đo từ giao thoa kế và cảm biến điện dung cho thấy các kết quả tương đồng. Sai số giữa hai kết quả đo là ~ 70 nm trên vùng đo $2 \mu\text{m}$. Kết quả từ LIA có thể lọc nhiễu tốt hơn so với cảm biến điện dung do dùng bộ lọc thông thấp phù hợp.

Từ khóa: Giao thoa kế heterodyne; Đo dịch chuyển nhỏ; Khuếch đại khóa tần; Độ phi tuyến theo chu kỳ.

ABSTRACT

This paper shows a modified Michelson interferometer for enhancing resolution in displacement measurement. In this system, the ingoing laser beam from a commercial He-Ne source, which is frequency-stabilized using the Zeeman effect, is spatially separated by frequencies f_1 and f_2 before sending to the interferometer. This approach reduces periodic nonlinearity during measurement. The phase variation related to displacement is determined by a lock-in amplifier (LIA) with an appropriate cutoff frequency and a high sensitivity. A comparison between measurements obtained from the interferometer and a capacitive sensor reveals that the results are in good agreement, with a deviation of approximately 70 nm over a measurement range of $2 \mu\text{m}$. The LIA results exhibit superior noise filtering compared to the capacitive sensor, owing to suitable low-pass filters.

Keywords: Heterodyne interferometry; Displacement measurement; Small displacement measurement; Lock-in amplifier; Periodic nonlinearity. 

1. GIỚI THIỆU

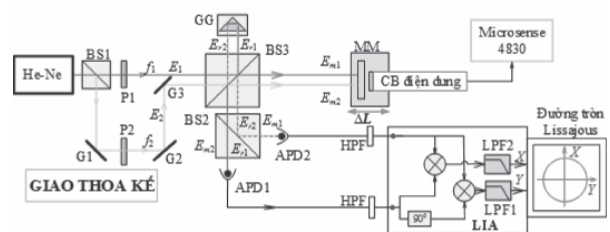
Đo lường dịch chuyển chính xác đóng vai trò rất quan trọng trong công nghệ nano, công nghệ sinh học, ngành công nghệ bán dẫn, chế tạo chính xác và đo lường chính xác, đặc biệt là trong việc tạo ra các vi mạch và bề mặt nhỏ hơn với hiệu suất năng lượng hoặc phản ứng vượt trội [1-4]. Việc chế tạo chính xác cao đòi hỏi các phép đo chính xác cao mà không có sự trễ, sai số hay các yếu tố giao thoa nào trong phép đo là điều cần thiết. Khi độ chính xác trong gia công và chế tạo tiệm cận với tỷ lệ na-nô-mét, các phép đo sử dụng các kỹ thuật đo quang học trở nên ngày càng phổ biến, do chúng là phương pháp đo không tiếp xúc và kết quả có thể được thu được nhanh chóng.

Giao thoa kế hai tần số (heterodyne) phát hiện dịch chuyển từ việc lấy thông tin được mã hóa trong pha và/hoặc tần số của sóng ánh sáng hoặc hồng ngoại. Giao thoa kế heterodyne nhạy kém với các nhiễu tần số thấp (thường ảnh hưởng mạnh mẽ trong giao thoa kế homodyne truyền thống), đồng thời phát hiện hướng dịch chuyển của đối tượng đo. Các phép đo dịch chuyển độ phân giải dưới 1 nm sử dụng giao thoa kế heterodyne là giải pháp hữu hiệu phù hợp với nhu cầu ứng dụng trong công nghiệp. Sự phức tạp về cấu trúc và toán học của các hệ giao thoa heterodyne đòi hỏi việc sử dụng một yếu tố mô-đun điện tử, như laze với hiệu ứng Zeeman [5], bộ điều chế quang-điện (EOM) [6, 7] hoặc bộ điều chế quang âm (AOM) [8, 9] để kết hợp với một bộ khuếch đại khóa tần (LIA) và/hoặc chương trình cho phân tích tín hiệu.

Trong bài báo này, một giao thoa kế Michelson sửa đổi được đề xuất để nâng cao độ phân giải phép đo gấp đôi. Tia laze tới được tách riêng thành các tần số f_1 và f_2 với tính phân vuông góc với nhau từ nguồn laze He-Ne thương

mại trước khi tới giao thoa kế để ngăn lỗi phi tuyến theo chu kỳ xảy ra. Thuật toán khuếch đại khóa tần (lock-in amplifier, LIA) được sử dụng để thực hiện phát hiện dịch chuyển nhỏ. Một cảm biến điện dung thương mại được sử dụng để quan sát phép đo dịch chuyển giao thoa kế. Một thí nghiệm tạo dịch chuyển gương MM tuyến tính trong một khoảng 2 μm từ 0 đến 10 s. Giao thoa kế và cảm biến điện dung sẽ đo dịch chuyển này. Kết quả đo cho thấy cả hai phương pháp đo có kết quả tương đồng nhau. Với giao thoa kế, kết quả đo có ít nhiễu hơn với kết quả từ cảm biến điện dung. Đây là ưu điểm của giao thoa kế độ phân giải cao với khả năng miễn các nhiễu/lỗi thông thường cao nhưng vẫn đảm bảo khả năng đo chính xác. Phép đo LIA có khả năng lọc nhiễu ngẫu nhiên và nhiễu thông thường tốt giúp hệ đo cải thiện các phép đo dịch chuyển nhỏ tốt nhất. Để cải thiện việc này, khả năng điều chỉnh tần số cắt mềm dẻo trong các bộ lọc thông thấp tương tự trong thiết bị LIA là yếu tố then chốt nhưng vẫn đảm bảo bộ nhạy cao để xác định sự thay đổi pha/dịch chuyển nhỏ của giao thoa kế. Cơ sở lý thuyết giao thoa kế, thuật toán khuếch đại khóa tần LIA, thực nghiệm đo với các lựa chọn thông số của LIA và kết quả đo sẽ được thảo luận sau đây.

2. NGUYÊN LÝ GIAO THOA KẾ HAI TẦN SỐ



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý giao thoa kế sửa đổi hai tần số (heterodyne).

BS – Bộ tách chùm; P – Tấm phân cực;
GG – Gương góc; MM – Gương dịch chuyển;
APD – Cảm biến quang điện; HPF – Bộ lọc thông cao; LPF – Bộ lọc thông thấp

Hình 1 mô tả nguyên lý hoạt động của giao thoa kế heterodyne sửa đổi đo dịch chuyển nhỏ. Tia sáng từ nguồn laser He-Ne có cặp tần số f_1 và f_2 chênh lệch rất nhỏ ($\Delta f = f_2 - f_1 \approx 3.6$ MHz với giả sử $f_2 > f_1$) và phương phân cực của chúng vuông góc với nhau. Bộ tách chùm BS1 tách tia laser tới thành hai phần. Phần 1 gửi tới tấm phân cực P1 để chặn tia phân cực f_2 và cho qua tia phân cực f_1 với cường độ điện trường E_1 . Phần 2 phản xạ qua gương G1, gửi tới tấm phân cực P₂ để chặn tia phân cực f_1 và cho qua tia phân cực f_2 với cường độ tia E_2 , phản xạ qua G₂ và G₃ để tới giao thoa kế. Trong giao thoa kế, tia f_1 tới BS3 tách thành hai phần. Phần 1 với cường độ điện trường E_{r1} tới gương góc GG, phản xạ quay trở lại BS3. Phần 2 với cường độ điện trường E_{m1} tới gương dịch chuyển MM, phản xạ quay trở lại BS3. Tia f_2 tới BS3 chia thành hai phần. Phần 1 với cường độ điện trường E_{r2} tới GG, phản xạ quay lại BS3. Phần 2 với cường độ điện trường E_{m2} tới MM, phản xạ quay lại BS3.

Cường độ điện trường các tia f_1 và f_2 tới GG có thể được biểu diễn như sau:

$$E_{r1}(t) = E_{r01} e^{i\omega_1 t}; E_{r2}(t) = E_{r02} e^{i\omega_2 t} \quad (1)$$

Trong đó: E_{r01} và E_{r02} lần lượt là biên độ cường độ điện trường của E_{r1} và E_{r2} . Ở đây, $\omega_1 = 2\pi f_1$ và $\omega_2 = 2\pi f_2$. Cường độ điện trường của các tia f_1 và f_2 tới gương MM có thể được biểu diễn như sau:

$$E_{m1}(t) = E_{m01} e^{i\omega_1(t-\tau)}; E_{m2}(t) = E_{m02} e^{i\omega_2(t-\tau)} \quad (2)$$

Trong đó, τ là thời gian trễ do MM chuyển động quãng đường ΔL và biểu diễn:

$$\tau = \frac{2n\Delta L}{c} \quad (3)$$

Trong đó, n và c lần lượt là chiết suất và vận tốc ánh sáng trong chân không. Tại BS3, tia f_1 với E_{r1} giao thoa với tia f_2 với E_{m2} và tia f_2 với E_{r2} giao thoa với tia f_1 với E_{m1} . Ở đây, hai vị trí giao thoa được tách riêng biệt trong không gian. Sau đó, các tia giao thoa qua BS2 tới các cảm biến quang điện APD1 và APD2. Tại APD1, tín hiệu giao thoa $I_1(t)$ là:

$$I_1(t) = |E_{r1} + E_{m2}|^2 = (E_{r01} e^{i\omega_1 t} + E_{m02} e^{i\omega_2(t-\tau)}) (E_{r01} e^{-i\omega_1 t} + E_{m02} e^{-i\omega_2(t-\tau)}) \quad (4)$$

$$\rightarrow I_1(t) = E_{r01}^2 + E_{m02}^2 + 2E_{r01}E_{m02} \cos\{\Delta\omega t - \omega_2\tau\}$$

Ở đây, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$. Tại APD2, tín hiệu giao thoa $I_2(t)$ là:

$$I_2(t) = |E_{m1} + E_{r2}|^2 = (E_{m01} e^{i\omega_1(t-\tau)} + E_{r02} e^{i\omega_2 t}) (E_{m01} e^{-i\omega_1(t-\tau)} + E_{r02} e^{-i\omega_2 t}) \quad (5)$$

$$\rightarrow I_2(t) = E_{m01}^2 + E_{r02}^2 + 2E_{m01}E_{r02} \cos\{\Delta\omega t + \omega_1\tau\}$$

3. PHƯƠNG PHÁP KHUẾCH ĐẠI KHÓA TẦN (LIA)

Hai tín hiệu $I_1(t)$ và $I_2(t)$ được gửi qua bộ lọc thông cao (HPF) để loại bỏ các thành phần tần số thấp, giữ lại thành phần $\Delta\omega$. Phương trình (4) và (5) có thể viết:

$$I_1(t) = A \cos(\Delta\omega t - \omega_2\tau), \quad (6)$$

$$I_2(t) = B \cos(\Delta\omega t + \omega_1\tau),$$

Trong đó, $A = 2E_{r01}E_{m02}$ và $B = 2E_{r02}E_{m01}$. Hai tín hiệu giao thoa sẽ được gửi đến máy đo pha LIA (NF Corporation, LI 5660 bằng thông DC – 11 MHz). $I_2(t)$ được chọn là tín hiệu tham chiếu và $I_1(t)$ là tín hiệu đo. $I_2(t)$ được chia thành hai phần, phần 1 giữ nguyên và phần 2 có pha được dịch 90 độ so với phần 1: $I_2'(t) = B \sin(\Delta\omega t + \omega_1\tau)$. Cho $I_1(t)$ nhân với $I_2(t)$ và $I_2'(t)$ được các tích:

$$I_1(t) \times I_2(t) = \frac{AB}{2} [\cos(2\Delta\omega t + (\omega_1 - \omega_2)\tau) + \cos((\omega_1 + \omega_2)\tau)], \quad (7)$$

$$I_1(t) \times I_2(t) = \frac{AB}{2} [\sin(2\Delta\omega t + (\omega_1 - \omega_2)\tau) + \sin((\omega_1 + \omega_2)\tau)] \quad (8)$$

Các tích sau đó qua các bộ lọc thông thấp (LPF) để loại bỏ các thành phần $2\Delta\omega$ và giữ lại thành phần $(\omega_1 + \omega_2)\tau$. Tín hiệu ra của các LPF là:

$$X = \frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2)\tau), \quad (9)$$

$$Y = \frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2)\tau). \quad (10)$$

Hai tín hiệu X và Y ra của LIA sẽ được ghi bởi bộ chuyển đổi tương tự sang số (ADC) ở tốc độ 1 kS/s vào máy tính (PC). Đường tròn Lissajous và thuật toán $\tan^{-1}$ sẽ được thực hiện trong PC ở tốc độ 100 kS/s để tìm $\Delta\Phi$.

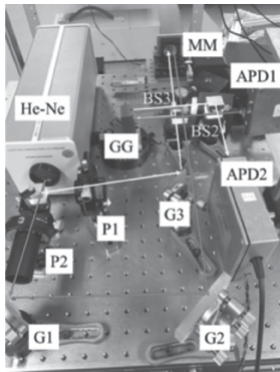
$$\Delta\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sin((\omega_1 + \omega_2)\tau)}{\cos((\omega_1 + \omega_2)\tau)} \right] = (\omega_1 + \omega_2)\tau. \quad (11)$$

Thế (3) vào (11) sẽ được:

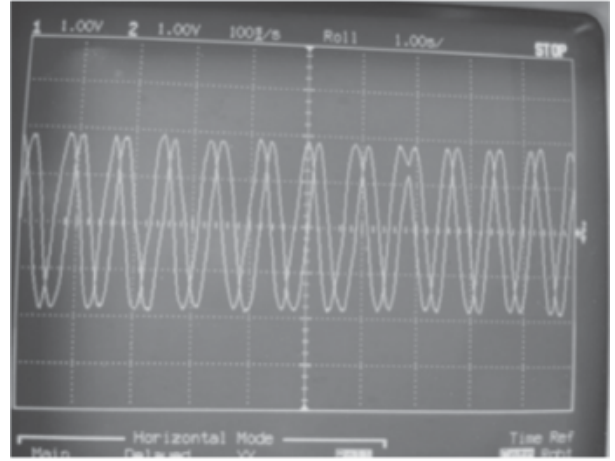
$$\Delta\Phi = (\omega_1 + \omega_2) \frac{2n\Delta L}{c} = 2\omega_0 \frac{2n\Delta L}{c} = 2\pi f \frac{2n\Delta L}{c} = \frac{8\pi n\Delta L}{\lambda} \quad (12)$$

Ở đây, đặt $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0$ có ω_0 là tần số góc trung tâm, trong đó λ (≈ 633 nm) là bước sóng trung tâm của ánh sáng từ nguồn He – Ne trong chân không.

4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ ĐO

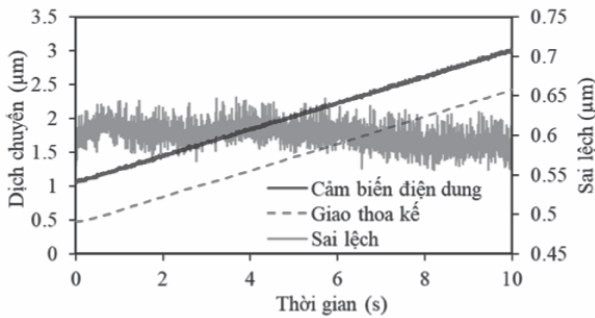


Hình 2. Ảnh thực nghiệm giao thoa kế.



Hình 3. Tín hiệu ra X và Y của LIA

Hình 2 đưa ra ảnh hệ thực nghiệm giao thoa kế heterodyne sửa đổi. Một đầu laze He-Ne (Agilent 5517C) được ổn định tần số theo hiệu ứng Zeeman có cặp tần số sai lệch nhỏ f_1 và f_2 được sử dụng như nguồn sáng. Gương MM được gắn chặt trên bàn dịch chuyển áp điện PZT (Chuo Precision Industrial, tần số cộng hưởng cơ ~ 100 Hz). Để tạo dịch chuyển của gương MM, bàn PZT được cấp với các tín hiệu điện áp tạo từ một máy phát sóng (FG) được khuếch đại nhờ bộ điều khiển có độ nhạy $1 \mu\text{m}/1 \text{ V}$. Trong thực nghiệm này, PZT được cấp với một tín hiệu tuyến tính với điện áp thay đổi từ 0 đến 2 V trong 10 s. Hai tín hiệu giao thoa trên APD1 và 2 sẽ gửi tới LIA: LI-5660 với độ nhạy 500 mV, hằng số thời gian 10 ms (tần số cắt của LPF = 100 Hz). Hình 3 cho thấy tín hiệu ra X và Y của LIA được hiển thị trên máy đo sóng. X và Y được ghi bởi ADC (NI, PCI 6122, 16 bit) ở tốc độ 1 kS/s. Một cảm biến điện dung (MicroSense, 4830) được sử dụng để xác định dịch chuyển gương MM đồng thời so với giao thoa kế. Nguyên lý cảm biến dựa trên sự thay đổi điện dung và khoảng cách giữa cảm biến và gương MM. Sự thay đổi điện dung do thay đổi điện áp đo sẽ xác định sự thay đổi khoảng cách này.



Hình 4. Kết quả đo dịch chuyển gương từ cảm biến điện dung và giao thoa kế. Gương dịch chuyển tuyến tính do PZT được cấp từ 0 đến 2 V trong 10 s.

Hình 4 cho biết kết quả đo của cảm biến điện dung và giao thoa kế. Hai phương pháp đều đo dịch chuyển gương và có kết quả tương đồng. Sự sai lệch của hai kết quả đo khoảng 70 nm trên vùng đo 2 μm , tương ứng sai số tương đối 3.5 %. Kết quả đo của cảm biến điện dung (nét liền) có vẻ chứa nhiều nhiễu hơn so với của giao thoa kế (nét gạch). Các nhiễu ngẫu nhiên trong đồ thị sai lệch có thể do nhiễu từ cảm biến điện dung mang lại. Sai lệch trên không ổn định nằm ngang mà thay đổi lên xuống từ 0.55 μm tới 0.65 μm . Đây có thể là hai phương đo của cảm biến điện dung và giao thoa kế không song song mà lệch với nhau một góc nhỏ.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một giao thoa kế Michelson với cấu hình sửa đổi để nâng cao độ phân giải được đề xuất. Các tia sáng phân cực vuông góc với nhau với tần số f_1 và f_2 được tách riêng ra khỏi tia laze ban đầu phát ra từ nguồn laze He-Ne thương mại trước khi vào giao thoa kế để tránh xảy ra hiện tượng lẫn gây ra lỗi phi tuyến theo chu kỳ. Sự kết hợp giao thoa kế và phương pháp xác định pha dựa vào kỹ thuật khuếch đại khóa tần có thể thực hiện phép đo dịch chuyển nhỏ với độ phân giải cao. So sánh kết quả đo của giao thoa kế với kết quả đo từ cảm biến điện dung thương mại cho thấy sai lệch là ~ 70 nm trên vùng đo tuyến tính

2 μm . Lỗi tương đối 3.5 % có thể chấp nhận được đối với phép đo này. Giao thoa kế với cấu hình tách riêng hai tần số trong không gian có ưu điểm giúp hệ đo tránh lỗi phi tuyến theo chu kỳ. Trong tương lai, lỗi chu kỳ sẽ được khảo sát để nâng cao độ chính xác của phép đo áp dụng trong các ứng dụng công nghệ cao hiện đại.

Kinh phí (Funding):

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) dưới đề tài mã số T2022-TT-003.❖

Ngày nhận bài: 06/4/2024

Ngày phản biện: 07/5/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., & Delbressine, F. (2008). *Geometric error measurement and compensation of machines-An update*. CIRP Ann. - Manuf. Techn. 57(2), 660-675.
- [2]. Rahim Soomro, T., & Sarwar, M. (2013). *Impact of Smartphone's on Society*. In Eur. J. Sci. Res (Vol. 98, Issue 2).
- [3]. He, Z., Fu, J., Zhang, L., & Yao, X. (2015). *A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool*. Int. J. Mach. Tool. Manu. 88, 1-8.
- [4]. Pandikumar, S., and Sumathi, M. (2015). *Investigation on the Revolution and Need of Energy Efficient Smartphone Development*. Int. J. Comput. Appl (Vol. 117, Issue 11).
- [5]. Nguyen, T. D., and Dinh, G. N. (2023). *Stability and Resolution of a Conventional Displacement Measuring Heterodyne Interferometer Using a Single Phase-Locked Loop*. Exp. Mech. 63(6), 1015-1032.
- [6]. Yim, S. H., Lee, S.-B., Kwon, T. Y., Shim, K. M., & Park, S. E. (2019). *Optical phase-locking of two extended-cavity diode lasers by serrodyne modulation*. Applied Optics, 58(10), 2481.
- [7]. Hsieh, M. C., Liao, C. H., & Lin, J. Y. (2020). *Optical relative humidity sensor based on a polyvinyl alcohol film and a phase-enhancement total-internal-reflection heterodyne interferometer*. Sens Actuators A. 316.
- [8]. Chiu, M.-H., Tan, C.-T., Wang, C., & He, J.-N. (2021). *Phase sensitive optical rotation measurement using the common-path heterodyne interferometry and a half-wave plate at a specific azimuth angle*. OSA Contin. 4(1), 239.
- [9]. Straube, G., Fischer Calderón, J. S., Ortlepp, I., Füll, R., & Manske, E. (2021). *A Heterodyne Interferometer with Separated Beam Paths for High-Precision Displacement and Angular Measurements*. Nanomanufacturing and Metrol. 4(3), 200-207.