

SAI SỐ PHI TUYẾN CHU KỲ TRONG GIAO THOA KẾ HETERODYNE SỬA ĐỔI TRONG PHÉP ĐO DỊCH CHUYỂN NHỎ

PERIODIC NONLINEARITY IN A MODIFIED HETERODYNE INTERFEROMETER FOR SMALL DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Nguyễn Thành Đông

Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

Email: dong.nguyenthanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Gia công siêu chính xác, công nghệ nano và bán dẫn có nhu cầu rất lớn với phép đo dịch chuyển nhỏ chính xác cao với độ phân giải nm và dưới nm. Bài báo trình bày phương pháp đánh giá sai số phi tuyến chu kỳ tồn tại trong giao thoa kế hai tần số heterodyne đo dịch chuyển nhỏ. Một hàm gán tuyến tính được sử dụng để so sánh kết quả đo. Một cấu hình Michelson sửa đổi với hai nhánh tách biệt được đề xuất để giảm sai số phi tuyến nhằm nâng cao độ chính xác. Kết quả đo cho biết sai số phi tuyến là ~20 nm trên vùng đo 2 μm (1 %). Thành phần phi tuyến $\lambda/2$ và $\lambda/4$ là 9.91 và 4.05 nm/Hz^{1/2} tương ứng. Độ nhạy hệ đo đạt dưới mức 0.01 nm/Hz^{1/2} trên 10 Hz.

Từ khóa: Giao thoa kế heterodyne; Đo dịch chuyển nhỏ; Độ nhạy đo; Hàm gán tuyến tính; Độ phi tuyến theo chu kỳ.

ABSTRACT

Ultra-precision engineering, nanotechnology, and semiconductor applications require highly accurate displacement measurements with nanometer and sub-nanometer resolution. This paper evaluates periodic nonlinearity in heterodyne interferometers for nanometer-scale displacement measurements. A modified Michelson interferometer with spatially separated arms is proposed to reduce nonlinearity. A linear fitting method is used for error analysis. The results show a peak-to-peak nonlinearity of ~20 nm over a 2 μm range (1%), with $\lambda/2$ and $\lambda/4$ components of 9.91 and 4.05 nm/Hz^{1/2}, respectively. The system achieves a sensitivity below 0.01 nm/Hz^{1/2} above 10 Hz.

Keywords: Heterodyne interferometry; Displacement measurement; Measurement sensitivity; Linear fitting; Periodic nonlinearity.



1. GIỚI THIỆU

Giao thoa kế laser [1-3] là hệ thống đo quang học không tiếp xúc, có độ tin cậy và chính xác cao, dựa theo nguyên lý giao thoa để phát hiện dịch chuyển. Chúng rất phù hợp tới các phép đo dịch chuyển siêu nhỏ có độ phân giải nanomet hoặc dưới nanomet, nhờ khả năng đo tới định nghĩa chuẩn mét [4]. Do đó, giao thoa kế là công cụ quan trọng để đo dịch chuyển siêu nhỏ và ngày càng được tích hợp trong sản xuất công nghệ cao. Trong các giao thoa kế, giao thoa kế heterodyne hai tần số được lựa chọn trong nghiên cứu này nhờ hai ưu điểm chính: (1) Giao thoa kế heterodyne đo được dịch chuyển dưới nm, phạm vi đo rộng và chống nhiễu tốt [5]. (2) Hệ giao thoa này có cấu trúc gọn nhẹ, có thể tích hợp từ các máy CNC, CMM đến máy quang khắc [6] và kính hiển vi lực nguyên tử AFM [7].

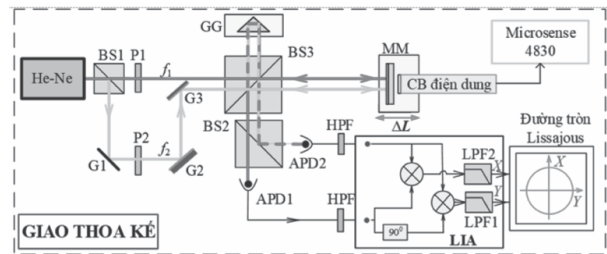
Lỗi phi tuyến chu kỳ trong giao thoa kế chủ yếu do nguồn laser không lý tưởng và phân cực không hoàn hảo của các thành phần quang [8, 9]. Những sai lệch này gây ra tín hiệu pha tuần hoàn, làm giảm độ chính xác trong đo dịch chuyển ở cấp nanomet. Khi giả định đã loại bỏ sai số hình học (cosin, Abbe), lỗi phi tuyến chu kỳ trở thành nguồn sai số chính. Ngoài ra, ảnh hưởng môi trường được xem là không đáng kể nhờ vận tốc dịch chuyển cao (~vài $\mu\text{m/s}$) hoặc trong chân không.

Bài báo đề xuất một giao thoa kế Michelson sửa đổi nhằm tăng gấp đôi độ phân giải và giảm sai số phi tuyến chu kỳ xuống cấp nanomet. Thuật toán khuếch đại khóa tần (LIA) được sử dụng để phát hiện dịch chuyển nhỏ, kết hợp với hàm fitting để khớp kết quả tuyến tính. Sai số được đánh giá trên cả miền thời gian và tần số để xác định thành phần lỗi phi tuyến. Kết quả cho thấy hệ thống có thể đo dịch chuyển

micromet với sai số phi tuyến chỉ vài nanomet.

2. GIAO THOA KẾ HAI TẦN SỐ SỬA ĐỔI VÀ PHÂN TÍCH SAI SỐ PHI TUYẾN CHU KỲ

Hình 1 mô tả nguyên lý hoạt động của giao thoa kế hai tần số heterodyne đo dịch chuyển nhỏ. Nguồn sáng là đầu laser He-Ne có hai thành phần sóng ánh sáng với f_1 và f_2 , và hiệu tần số $\Delta f = f_2 - f_1 \approx 2.7 \text{ MHz}$ với ($f_2 > f_1$). Hai thành phần này có phương phân cực vuông góc nhau.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý giao thoa hai tần số (heterodyne): BS - Bộ tách chùm; P - Tấm phân cực; G - Gương; GG - Gương góc; MM - Gương dịch chuyển; APD - Cảm biến; HPF - Bộ lọc thông cao; LPF - Bộ lọc thông thấp.

Tia laser từ nguồn được chia làm hai nhánh bởi bộ tách chùm BS1. Nhánh thứ nhất cho phép thành phần f_1 qua nhờ xoay tấm phân cực P1 theo phương phân cực dọc (giả sử tia f_1 phân cực dọc); nhánh thứ hai phản xạ qua gương G1 cho phép thành phần f_2 qua nhờ xoay tấm phân cực P2 theo phương phân cực ngang (f_2 phân cực ngang). Hai chùm sáng sau đó phản xạ qua G2 và G3 để đi vào giao thoa kế. Trong giao thoa kế, tia f_1 đến BS3 được chia thành hai nhánh: một đi tới gương cố định GG, một đến gương di chuyển MM, sau đó đều phản xạ về BS2. Tia f_2 cũng được tách tương tự. Tại BS3, hai vị trí giao thoa độc lập được tạo ra và thu nhận nhờ hai cảm biến quang APD1 và APD2. Qua các bộ lọc thông cao (HPF), các tín hiệu $I_1(t)$ và $I_2(t)$ lần lượt là [9]:

$$I_1(t) = A \cos(\Delta\omega t - \omega_2 \tau), \quad (1)$$

$$I_2(t) = B \cos(\Delta\omega t + \omega_1 \tau), \quad (2)$$

Trong đó DC, τ , A, $\Delta\omega$ ($= \omega_2 - \omega_1$) lần lượt là thành phần DC (offset), thời gian trễ do MM di chuyển quãng đường ΔL , biên độ tín hiệu, tần số góc chập do giao thoa của hai tia f_1 và f_2 . Ở đây, thời gian trễ là:

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

Trong đó, n và c lần lượt là chiết suất và vận tốc ánh sáng trong chân không. $I_1(t)$ và $I_2(t)$ được gửi đến máy đo pha LIA. $I_2(t)$ được tạo thêm thành phần vuông pha: $I_2'(t) = B \sin(\Delta\omega t + \omega_1 \tau)$ nhờ hàm Hilbert (dịch pha 90 độ). Nhân $I_1(t)$ với cả $I_2(t)$ và $I_2'(t)$ được các tích. Các tích qua các bộ lọc thông thấp (LPF). Tín hiệu ra là:

$$X = \frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2) \tau), \quad (5)$$

$$Y = \frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2) \tau). \quad (6)$$

Đường tròn Lissajous và thuật toán $\tan^{-1}(Y/X)$ sẽ được thực hiện trong PC ở tốc độ 1 kS/s để tìm $\Delta\Phi$.

$$\Delta\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sin((\omega_1 + \omega_2) \tau)}{\cos((\omega_1 + \omega_2) \tau)} \right] = (\omega_1 + \omega_2) \tau. \quad (7)$$

Thế (3) vào (7) sẽ được $\Delta\Phi$:

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

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.

Trong thực tế, tia f_1 và f_2 không phân cực hoàn toàn và các chi tiết quang không thể tách f_1 và f_2 riêng biệt trong không gian, dẫn đến các tia phân cực bị lẫn với nhau. Lỗi phi tuyến chu kỳ sẽ tồn tại trong phép đo dịch chuyển và có mặt trong tín hiệu giao thoa. Hai tín hiệu $I_1(t)$ và $I_2(t)$ với lỗi phi tuyến được mô tả [10]:

$$\begin{aligned} I_1(t) &= A \cos(\Delta\omega t - \omega_2 \tau) + a \cos(\Delta\omega t - \xi), \\ I_2(t) &= B \cos(\Delta\omega t + \omega_1 \tau), \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó, a và ξ lần lượt là biên độ và độ lệch pha giữa hai tín hiệu do lỗi chu kỳ phi tuyến sinh ra. Khi đó, tín hiệu ra của các LPF được viết lại là:

$$X = \frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \cos(\omega_1 \tau + \xi), \quad (10)$$

$$Y = \frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \sin(\omega_1 \tau + \xi). \quad (11)$$

Nhờ thuật toán tính $\tan^{-1}(Y/X)$, pha $\Delta\Phi_1$ được tính:

$$\Delta\Phi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \cos(\omega_1 \tau + \xi)}{\frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \sin(\omega_1 \tau + \xi)} \right]. \quad (12)$$

Lỗi pha α có thể được tính:

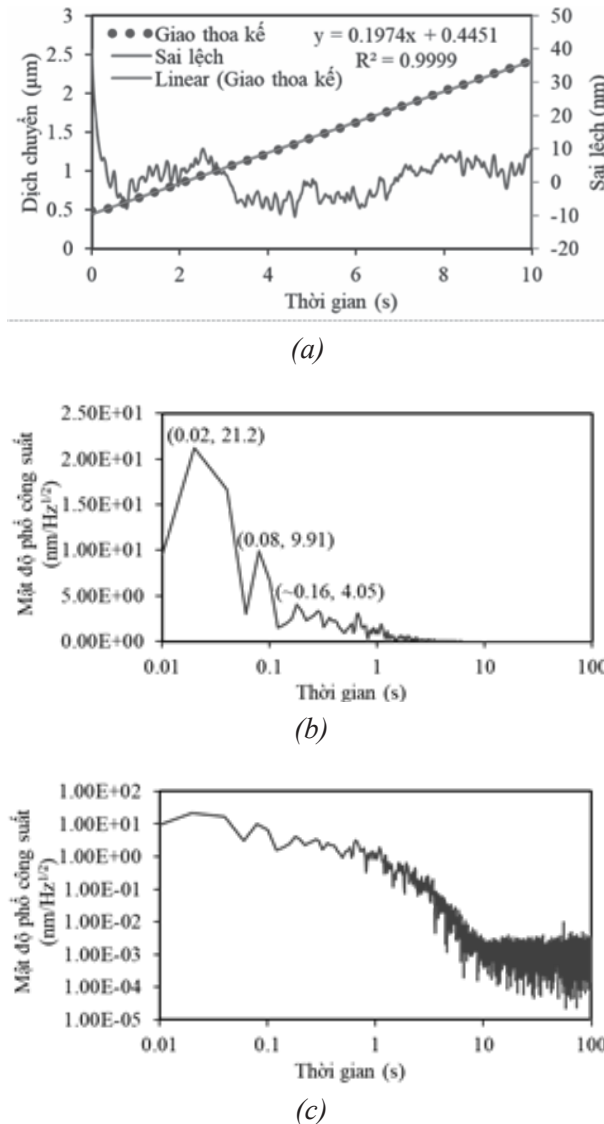
$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \left[\frac{\frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \cos(\omega_1 \tau + \xi)}{\frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2) \tau) + \frac{aB}{2} \sin(\omega_1 \tau + \xi)} \right] \\ &\quad - \tan^{-1} \left[\frac{\frac{AB}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2) \tau)}{\frac{AB}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2) \tau)} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\alpha = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_0.$$



Ở đây, $\Delta\Phi_0$ và $\Delta\Phi_1$ là giá trị lý tưởng và giá trị thực với lỗi phi tuyến chu kỳ.

3. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ ĐO



Hình 2. Kết quả đo của giao thoa kế: (a) Dịch chuyển 2 μm ở tần số lặp 0.05 Hz và sai lệch so với hàm gần tuyến tính, (b) và (c) mật độ công suất phổ của sai lệch từ (a) với các trục đồ thị tuyến tính và logarit tương ứng.

Trong thực nghiệm, một đầu laze He-Ne (Agilent 5517C) được sử dụng như nguồn sáng. Gương MM gắn trên bàn dịch chuyển

áp điện PZT (Chuo Precision Industrial). Bàn PZT được cấp với các tín hiệu sóng tam giác ở tần số lặp 0.05 Hz với biên độ 2 V từ một máy phát sóng để tạo chuyển động tuyến tính. Biên độ dịch chuyển là 2 μm với độ nhạy 1 $\mu\text{m}/1$ V. Một cảm biến điện dung với bộ điều khiển (Microsense 4830) được sử dụng để tham chiếu. Hai tín hiệu giao thoa được gửi tới LIA (NF Corporation, LI-5660). Kết quả được xử lý trên máy tính.

Hình 2 là kết quả đo của giao thoa kế. Một hàm gần với phương trình $y = 0.1974x + 0.4451$ được sử dụng để khớp kết quả đo. Sai lệch của kết quả đo so với hàm gần có biên độ ~ 20 nm và sai lệch chuẩn ~ 5.6 nm có trong hình 4(a). Sai lệch được phân tích bởi biến đổi nhanh Fourier (FFT) cho thấy một độ phổ công suất trên miền tần số [0.01 Hz, 100 Hz]. Từ hình 4(b), các đỉnh ở các tần số 0.02 Hz và 0.08 Hz được tìm thấy có biên độ lần lượt là 9.91 và 21.2 nm/Hz^{1/2}. Mức nhiễu nền dưới 10 nm/Hz^{1/2} ở trên tần số 0.1 Hz và giảm xuống có thể đạt dưới mức 0.01 nm/Hz^{1/2} trên 10 Hz. Điều này cho thấy các nhiễu tần số 10 Hz và cao hơn ít ảnh hưởng hệ đo. Tuy nhiên, các tần số dưới 1 Hz ảnh hưởng đến mức nm/Hz^{1/2}. Các sai số phi tuyến chu kỳ đã được tìm thấy, có thể kể đến tại 0.02 Hz và 0.08 Hz. Với các sai số phi tuyến chu kỳ liên quan đến sự phân cực ánh sáng không đúng là các thành phần $\lambda/2$ và $\lambda/4$. Với dịch chuyển 2 μm theo một hướng ở tần số 0.05 Hz, các thành phần $\lambda/2$ và $\lambda/4$ được xác định ở tần số ~ 0.16 Hz và ~ 0.08 Hz tương ứng. Từ hình 4(b), các thành phần $\lambda/2$ và $\lambda/4$ là 9.91 và 4.05 nm/Hz^{1/2} tương ứng. Các thành phần 0.02 Hz và khác cũng góp phần tạo nên lỗi phi tuyến chu kỳ của kết quả đo. Đây có thể do sai số trễ (hysteresis) của bàn PZT.

4. 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 được tách theo hai nhánh riêng trong không gian để tránh xảy ra hiện tượng lẫn gây ra lỗi phi tuyến theo chu kỳ. Phương pháp hàm gần tuyến tính đánh giá phép đo dịch chuyển của giao thoa kế. Kết quả đo cho thấy các thành phần lỗi $\lambda/4$ và $\lambda/2$ được tìm thấy tuy nhiên giá trị chỉ vài nm/Hz^{1/2} trên vùng 2 μ m. Các sai số phi tuyến lẫn do chuyển động cũng được tìm thấy. Độ chính xác phép đo giao thoa kế được cải thiện. Nhờ tùy biến cấu hình phù hợp để giảm sai số phi tuyến, giao thoa kế heterodyne phù hợp cho các ứng dụng cần kiểm tra độ dịch chuyển nhỏ tới nanomet với độ chính xác cao trong tương lai.

Kinh phí (Funding):

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) dưới đề tài mã số T2024-PC-029. ❖

Ngày nhận bài: 02/4/2025

Ngày phản biện: 21/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. Lawall and E. Kessler (2000), “*Michelson interferometer with 10 pm accuracy*”. Rev. Sci. Instrum. 71, 2669-2676.
- [2]. Sun, Y.; Li, W.; Xing, X.; Wang, J.; Hu, P.; Tan, J. (2024), “*A Picometre-Level Resolution Test Method without Nonlinearity for Heterodyne Interferometer Measurement Electronics*”. Photonics 2024, 11, 331.
- [3]. F. Chen, W. Dong, M. Yang, L. Sun, and Z. Du (2019), “*A PZT actuated 6-DOF positioning system for space optics alignment*”. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 24, 2827-2838.
- [4]. “*The international system of units (SI)*”. International Bureau of Weights and Measures (BIPM) (2019), <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf> (accessed 15 August 2020).
- [5]. Wang, X. Guo, Y. Wang, C. Jiang, J. Jiang, and Z. Zhang (2020), “*All-fiber differential interferometer for nanometric displacement measurement*”. Optical Communications 475, 126283.
- [6]. Junhao Zhu, Shengtong Wang, Xinghui Li, “*Ultraprecision Grating Positioning Technology for Wafer Stage of Lithography Machine*” [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922019.
- [7]. Ahlawat, V., Deopa, S. P. S., & Patil, S. (2022), “*Quantitative Elasticity of Flexible Polymer Chains Using Interferometer-Based AFM*”. Nanomaterials, 12(3).
- [8]. Qian, Y., Li, J., Feng, Q., He, Q., & Long, F. (2023), “*Error Analysis of Heterodyne Interferometry Based on One Single-Mode Polarization-Maintaining Fiber*”. Sensors, 23(8), 4108.
- [9]. Badami, V. G., & Patterson, S. R. (2000), “*A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry*”. Precision Engineering, 24(1), 41-49.
- [10]. Nguyễn Thành Đông (2024), “*Giao thoa kế heterodyne sửa đổi với hai tần số tách biệt trong không gian cho phép đo dịch chuyển nhỏ*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 316(35), tr. 215-219.