

ĐO DỊCH CHUYỂN NHỎ DƯỚI NM BẰNG GIAO THOA KẾ HETERODYNE ÁP DỤNG VÒNG KHÓA PHA ĐƠN PHIÊN BẢN 2

SUB-NANOMETER DISPLACEMENT MEASUREMENT USING HETERODYNE
INTERFEROMETRY WITH 2ND PHASE-LOCKED LOOP

Lê Bá Linh^{1,2}, Phan Công Minh¹, Đỗ Duy Tùng¹, Nguyễn Thành Đông^{1*}, Hoàng Hồng Hải¹

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Viện Nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp đo dịch chuyển cơ học với độ phân giải 0.1 nm bằng hệ giao thoa kế heterodyne và máy đo pha dựa trên phương pháp vòng khóa pha đơn phiên bản 2 (2nd single phase-locked loop (PLL)). Phương pháp 2nd PLL không dùng bộ lọc trong vòng lặp để tránh sự trễ pha khi thực hiện so với phiên bản trước. Kết quả thực nghiệm được so sánh giữa máy đo pha tham chiếu (Ref. PM) và 2nd PLL cho thấy cả hai đều có thể xác định được các dịch chuyển bước nhỏ ~2.6 nm và sai lệch chuẩn 0.1 nm trong thời gian đo ~30s và trên hành trình đo 5 μ m. Điều đó chứng minh giao thoa kế heterodyne với phương pháp đo pha mới có thể đạt phép đo độ phân giải vài chục pm trên hành trình đo vài μ m.

Từ khóa: Giao thoa kế heterodyne; Đo dịch chuyển nhỏ với bước pm; PZT; Vòng khóa pha.

ABSTRACT

This paper presents a method of measuring mechanical displacement with a resolution of 0.1 nm using a heterodyne interferometer and a phase meter based on the 2nd single phase-locked loop (version 2). The 2nd PLL does not use a filter in the loop to avoid a phase delay in execution compared to the previous version. The experimental results of the reference phase meter (Ref. PM) and the 2nd PLL show that both can determine small step shifts of ~2.6 nm and a standard deviation of 0.1 nm for ~30s and over a measuring range of 5 μ m for the interferometer. This proves that the heterodyne interferometer with the 2nd PLL can achieve a resolution of several tens of pm over the measuring range of a few μ m.

Keywords: Heterodyne interferometer; Displacement measurement; Pm-order displacement measurement; PZT; Phase-locked loop.

(GCĐ); một gương đo dịch chuyển (GMT); hai tấm phân cực (TPC) và hai cảm biến (CBQ).

Khi qua BTT, chùm tia laser được tách thành hai phần, phản xạ và truyền qua. Phần phản xạ qua TPC về CBQ-1, tạo ra tín hiệu giao thoa chuẩn I_c . Phần truyền qua vào BTP sẽ tách chùm tia phân cực ngang f_N phản xạ và phân cực dọc f_D truyền qua. Ở nhánh tham chiếu, chùm tia f_N qua TCS/4-1, GCĐ, TCS/4-1, BTP, GPX, BTP, TCS/4-1, GCĐ, TCS/4-1, BTP, TPC và về CBQ-2. Tương tự, chùm tia f_D qua TCS/4-2, GMT, TCS/4-2, BTP, GPX, BTP, TCS/4-2, GMT, TCS/4-2, BTP, TPC và về CBQ-2. Tại các cảm biến CBQ-1 và CBQ-2, các tín hiệu giao thoa I_c và I_d lần lượt là:

$$I_c = I_{oc} \cos(\Delta\omega t), \quad (1)$$

$$I_d = I_{od} \cos(\Delta\omega t + \theta_m(t)) \quad (2)$$

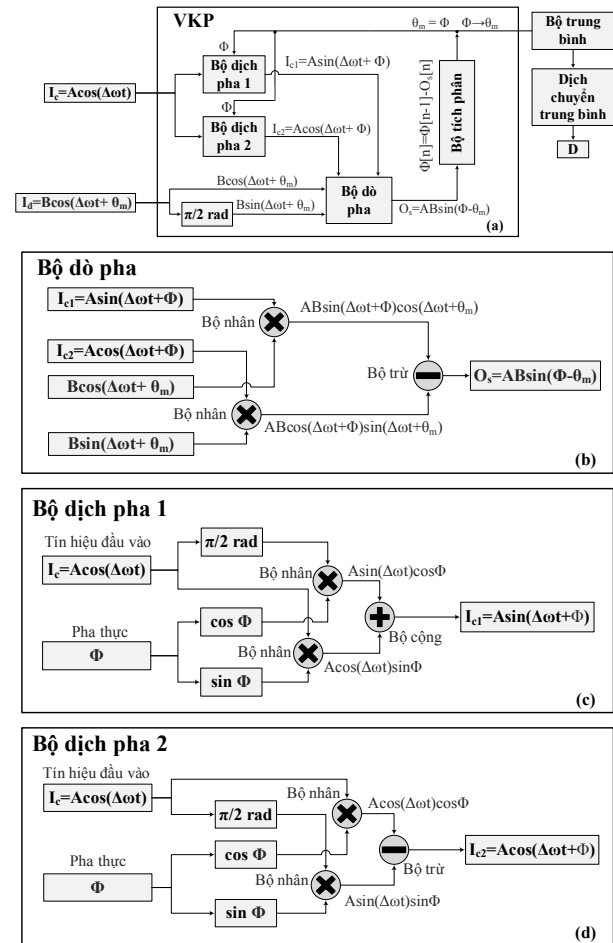
Trong đó: I_{oc} , I_{od} , $\Delta\omega$, $\theta_m(t)$ lần lượt là độ lớn tín hiệu giao thoa ở nhánh tham chiếu và nhánh đo, tần số góc chập ($\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ với $\Delta f = f_D - f_N$, giả sử $f_D > f_N$) và sự thay đổi pha tích lũy do dịch chuyển Doppler. Giả sử sự thay đổi tần số Doppler (Δf_{Dop}) có thể đo bằng cách so sánh I_c và I_d . Mối quan hệ giữa tần số Doppler (Δf_{Dop}) và vận tốc tức thời V của GMT là:

$$\Delta f_{Dop} = \frac{2f_D V}{c} \quad (3)$$

Trong đó, c là vận tốc ánh sáng trong chân không. Sự thay đổi pha tích lũy θ_m có thể được viết là:

$$\theta_m(t) = 2\pi \int \Delta f_{Dop} dt = \frac{4\pi f_D}{c} \int V dt = \frac{4\pi m}{\lambda} D_t, \quad (4)$$

3. MÁY ĐO PHA 2ND PLL



Hình 2. Sơ đồ khối của phương pháp 2nd PLL:
(a) Toàn bộ sơ đồ vòng khóa pha; (b) Bộ dò pha;
(c), (d) Bộ dịch pha 1 và 2.

Từ hình 2, phương pháp 2nd single PLL gồm hai bộ dịch pha 1 và 2, bộ dò pha và bộ tích phân. I_c được chia thành hai phần gửi đến hai bộ dịch pha tương ứng. Hình 2(c) và 2(d) cho thấy nguyên lý của bộ dịch pha 1 và 2. I_c bao gồm phần cùng pha ($\cos(\Delta\omega t)$) và phần trực pha ($\sin(\Delta\omega t)$) lần lượt được nhân với $\sin$ và $\cos$ của pha thực Φ . Các phép nhân đầu ra được cộng (cho bộ dịch pha 1) và trừ (cho bộ dịch pha 2) với nhau. Cả hai bộ dịch pha tích cực đều điều chỉnh pha của I_c thành Φ . Tín hiệu tham chiếu dịch pha I_{c1} và I_{c2} được biểu thị:

$$I_{c1} = A \cos(\Delta\omega t) \sin\Phi + A \sin(\Delta\omega t) \cos\Phi = A \sin(\Delta\omega t + \Phi) \quad (5)$$

$$I_{c2} = A \cos(\Delta\omega t) \cos\Phi + A \sin(\Delta\omega t) \sin\Phi = A \cos(\Delta\omega t + \Phi) \quad (6)$$

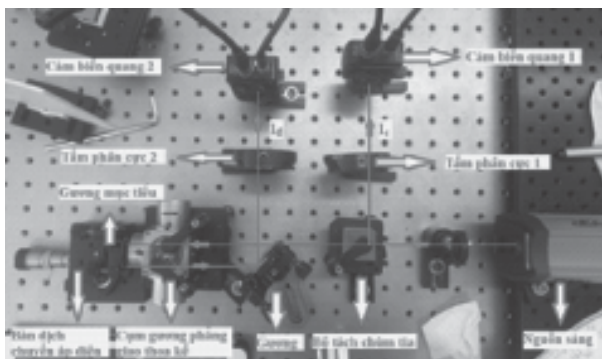
Hình 2(b) cho thấy nguyên lý của bộ dò pha. I_d được chia thành hai thành phần, phần cùng pha ($B \cos(\Delta\omega t + \theta_m)$) và phần trực pha ($B \sin(\Delta\omega t + \theta_m)$) được nhân lần lượt với I_{c1} và I_{c2} . Kết quả $AB \sin(\Delta\omega t + \Phi) \cos(\Delta\omega t + \theta_m)$ trừ đi $AB \cos(\omega t + \Phi) \sin(\Delta\omega t + \theta_m)$ sẽ được tín hiệu sai số O_s :

$$O_s = AB \sin(\Delta\omega t + \Phi) \cos(\Delta\omega t + \theta_m) - AB \cos(\omega t + \Phi) \sin(\Delta\omega t + \theta_m), \quad (7)$$

$$O_s = AB \sin(\Phi - \theta_m) \approx AB (\Phi - \theta_m).$$

Ở đây, giả sử $(\Phi - \theta_m) \ll 1$. Điều chỉnh O_s bằng 0 bởi bộ tích phân sao cho $\Phi = \theta_m$ [17]. Cuối cùng, kết quả độ dịch chuyển D_t có thể tính toán và thu được từ độ lệch pha θ_m giữa hai tín hiệu heterodyne đầu vào thông qua phương trình (4). Ưu điểm so phiên bản 1 [16] là phiên bản này không dùng bộ lọc trong vòng lặp để tránh sự trễ pha trong thực hiện.

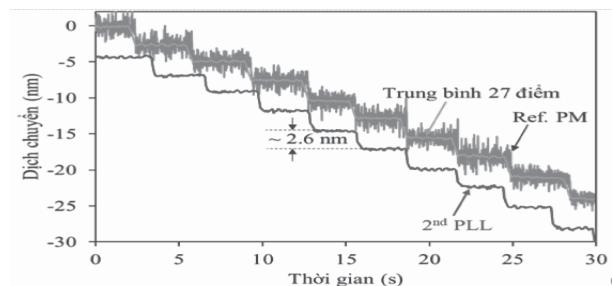
4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM



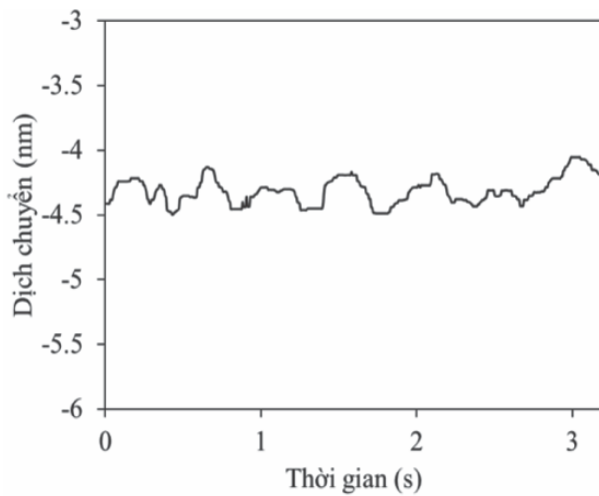
Hình 3. Hệ giao thoa kế Heterodyne cấu hình Michelson.

Hệ giao thoa kế được thiết lập như Hình 3. Hệ có nguồn laser He-Ne (Zygo ZMI 7705, tần số chập 3,6 MHz) làm nguồn sáng. Các dịch chuyển cơ học của gương GMT được tạo từ bàn PZT (Thorlabs NFL5D20P/M, độ nhạy 267 nm/V, phạm vi 20 μ m) [17]. Các tín hiệu giao thoa được thu bởi hai PD (Thorlabs PDA36A2). Hai máy đo pha tham chiếu (Ref. PM) (Moku:lab) [17] và 2nd PLL được sử dụng thực hiện phép đo. Bàn PZT được dịch chuyển nhờ cấp điện áp 1, chiều bước 0.01 V trong 10 bước. Mỗi 0.01 V tương ứng dịch biểu kiến ~ 2.67 nm ($= 0.01$ V / 75 V x 20 μ m).

Hình 4 chỉ ra kết quả đo dịch chuyển. Cả hai máy đo pha đều đo ~ 2.6 nm. So dịch chuyển biểu kiến, kết quả đo nhỏ hơn, do bàn PZT chịu tải từ gương và đồ gá và sự suy hao điện áp trên đường dây cáp. Máy đo pha Ref. PM khủ nhiễu kém hơn máy đo pha 2nd PLL do lọc nhiễu kém. Kết quả của máy đo pha Ref. PM được cải thiện khi lọc trung bình 27 điểm được thực hiện và do đó hai kết quả đo của của hai máy đo pha cho thấy tương đồng trong phép đo ~ 30 s. Tiếp theo, hệ đo sử dụng 2nd PLL có thể thực hiện các phép đo dịch chuyển trong vùng lớn 5 μ m, như trình bày ở hình 5. Điều đó chứng tỏ giao thoa kế kết hợp với máy đo pha 2nd PLL có thể thực hiện các phép đo dịch chuyển nhỏ với bước cỡ 0.1 nm hoặc dưới và trên vùng đo 5 μ m. Để cải thiện độ phân giải đo, hệ cần được che chắn kín và hệ cơ khí PZT dịch chuyển được tăng độ cứng hơn.

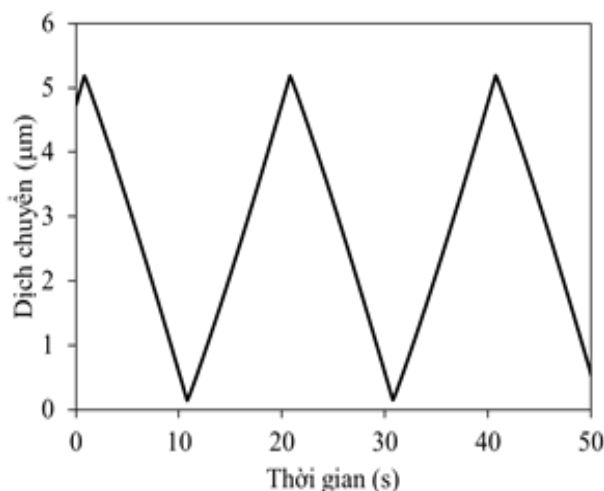


(a)



(b)

Hình 4. Kết quả đo dịch chuyển nhỏ giữa các máy đo pha (tham chiếu Ref. PM và 2nd PLL)



Hình 5. Kết quả đo dịch chuyển hành trình 5 μm từ máy đo pha 2nd PLL

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày giải pháp đo dịch chuyển siêu nhỏ với độ phân giải 0.1 nm hoặc thấp hơn trên vùng đo 5 μm thông qua hệ giao thoa kế heterodyne. Trong hệ đo này, cấu hình giao thoa kế nhỏ gọn, che chắn kín. Toàn bộ hệ quang được ổn định trên bàn chống rung quang học. Điểm mới của bài báo là hệ đo được sử

dụng máy đo pha dựa trên vòng khóa pha đơn phiên bản 2 mới. Ưu điểm so phiên bản 1 là phiên bản 2 không dùng bộ lọc trong vòng lặp để tránh sự trễ pha trong thực hiện. Kết quả chứng minh hệ đo sử dụng cả hai máy đo pha tham chiếu Ref. PM và 2nd PLL có thể đo dịch chuyển cơ học nhỏ với bước ~ 2.6 nm, độ phân giải 0.1 nm trong thời gian đo ~ 30 s và trên hành trình đo 5 μm . Mặc dù vậy, hệ đo dịch chuyển ở tốc độ thấp và chưa được hiệu chỉnh sai số do ảnh hưởng môi trường. Trong tương lai, phát triển hệ thống xử lý tín hiệu tốc độ cao cần thực hiện. Các sai số hệ đo cần được khảo sát.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-BKA-09. ❖

Ngày nhận bài: 08/5/2023

Ngày phản biện: 02/6/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. W. Polspoel, W. Vandervorst, L. Aguilera, M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich; *Nanometer-scale leakage measurements in high vacuum on de-processed high-k capacitors*, Microelectronics Reliability, 2008.
- [2]. Stephen Knight, Joaquin V. Martinez de Pinillos, Michele Buckley; *Semiconductor Microelectronics and Nanoelectronics Programs*, National Institute of Standards and Technology, July 2010.
- [3]. T. Namazu; "Mechanical Property Measurement of Micro/Nanoscale Materials for MEMS: A Review". Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 18, no. 3, pp. 308-324, 2023.
- [4]. Horacio D. Espinosa, Yong Zhu, Nicolaie Moldovan; "Design and operation of a MEMS-based material testing system for nanomechanical characterization". Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 16, no. 5, p. 1219–1231, 2007.

- [5]. Peter Z Qin, Ian S Haworth, Qi Cai, Ana K Kusnetzow, Gian Paola G Grant, Eric A Price, Glenna Z Sowa, Anna Popova, Bruno Herreros, Honghang He; "*Measuring nanometer distances in nucleic acids using a sequence-independent nitroxide probe*". *Nature protocols*, vol. 2(10), pp. 2354-2365, 2007.
- [6]. Suat Topcu, Luc Chassagne, Darine Haddad, Yasser Alayli, Patrick Juncar; "*Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale*". *Review of Scientific Instruments*, pp. 74 (11), pp.4876-4880 10.1063/1.1614858, hal-00870597, 2003.
- [7]. Che Liu, Yanling Guo; "*Modeling and Positioning of a PZT Precision Drive System*". *Sensors*, vol. 17(11), p. 2577, 2017.
- [8]. Andrew J. Fleming, Kam K. Leang; *Design, Modeling and Control of Nanopositioning Systems*, 2014.
- [9]. Kang-Chin Yang, Chen Hsieh; "*Nanometer Positioning of a Dual-Drive Gantry Table with Precise Yaw Motion Control*". *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers - Series C*, vol. 36, pp. 107-117, 2015.
- [10]. H. Shinno, H. Hashizume; "*High Speed Nanometer Positioning Using a Hybrid Linear Motor*". *CIRP Annals*, vol. 50, no. 1, pp. 243-246, 2001.
- [11]. D. Gillet; "*Strategy for the Control of a Dual-stage Nano-positioning System with a Single Metrology*". In 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2006.
- [12]. Jehyun Lee, Sooyoung Park, Dae Han Seo, Sin Hyuk Yim, Seokchan Yoon, D Cho; "*Displacement measurement using an optoelectronic oscillator with an intra-loop Michelson interferometer*". *Optics Express*, vol. 24, no. 19, pp. 21910-21920, 2016.
- [13]. F. C. Demarest; "*High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics*". *Measurement Science and Technology*, vol. 9, p. 1024, 1999.
- [14]. Jason M. Hogan and Mark A. Kasevich; "*Atom interferometric gravitational wave detection using heterodyne laser links*". *Phys. Rev. A* 94, 033632, 2016.
- [15]. Stephanie E Sanders, Poul B Petersen; "*Heterodyne-detected sum frequency generation of water at surfaces with varying hydrophobicity*". *J. Chem. Phys.* 150, 204708 (2019).
- [16]. Thanh Dong Nguyen, Quang Anh Duong, Masato Higuchi, Thanh Tung Vu, Dong Wei, Masato Aketagawa; "*19-picometer mechanical step displacement measurement using heterodyne interferometer with phase-locked loop and piezoelectric driving flexure-stage*". *Sens. Actuat. A Phys*, vol. 304, p. 111880, 2020.
- [17]. Dong, N., Tai, N., Hoang, D., Mai, N., Tung, V., Thang, V.; "*Sub-nanometer Displacement Measurement Using Heterodyne Interferometer and Down-Beat Frequency Technique*". *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021.