XÁC ĐỊNH BIÊN ĐỘ VÀ TẦN SỐ ĐIỀU BIẾN TỐI ƯU CHO MÁY ĐO PHỔ HỒNG NGOẠI

INVESTIGATION AND DETERMINATION OF THE OPTIMISED AMPLITUDE AND FREQUENCY MODULATION FOR FT-IR SPECTROMETER

Doãn Giang[1,2], Nguyễn Văn Vinh[1], Nguyễn Thị Phương Mai[1], Vũ Thanh Tùng[1]

[1]Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

[2]Viện Hóa học - Môi trường Quân sự, Binh chủng Hóa học, Bộ Quốc phòng

TÓM TẮT

Trong các máy đo phổ hồng ngoại (FT-IR), kỹ thuật điều biến cường độ hoặc pha thường được sử dụng để loại bỏ ảnh hưởng nhiễu của môi trường và khuếch đại tín hiệu đo. Bài báo này đề xuất phương pháp xác định tần số điều biến tối ưu cho máy phân tích phổ hồng ngoại sử dụng kỹ thuật điều biến pha. Pha của tín hiệu giao thoa được điều biến bằng cách điều biến dịch chuyển gương động của giao thoa kế Michelson sử dụng trong máy đo phổ hồng ngoại. Tần số điều biến tối ưu được xác định dựa vào độ tương phản của vân giao thoa.

Từ khóa: *Máy phân tích phổ hồng ngoại, điều biến pha, bộ trích xuất đồng bộ và khuếch đại, hệ thống cuộn cảm - đệm khí, điều biến quang học, độ nét của tín hiệu giao thoa.*

ABSTRACT

Phase modulation technique is widely utilized for FT-IR spectrometers to improve the signal to noise ratio of the output signal. In this paper, a method to determine the optimized amplitude and frequency modulation is proposed. Phase of the interference signal is modulated by modulating the displacement of the movable mirror of the Michelson interferometer. The optimised amplitude and frequency modulation is determined on the basis of the visibility of the interfernce fringes of He-Ne laser.

Keywords: *Phase modulation, FT-IR interferomter, lock-in amplifier (LIA), Voice Coil, electro-optic modulator, visibility.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

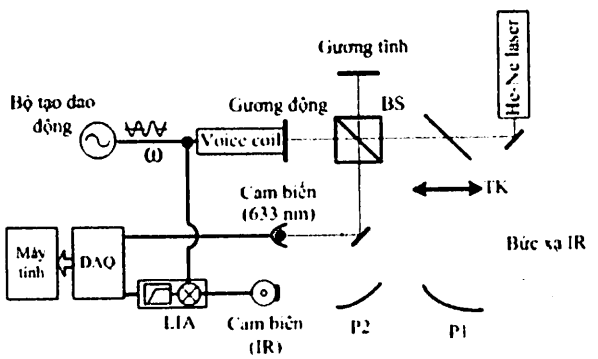
Máy đo phổ hồng ngoại là công cụ phân tích được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khoa học như hóa học, vật liệu hay sinh học. Có hai dạng cơ bản của máy đo phổ hồng ngoại, máy đo chủ động và máy đo bị động. Máy phân tích phổ hồng ngoại chủ động là chiếu một nguồn hồng ngoại đi qua hệ quang và chất mẫu. Bằng việc phân tích phổ của bức xạ sau khi truyền qua mẫu chất và so sánh với phổ bức xạ chuẩn ban đầu, thành phần và số lượng của mẫu chất sẽ được xác định dựa theo định luật Lambert-Beer [1,2]. Máy đo phổ hồng ngoại bị động hoạt động theo nguyên lý tương tự như máy chủ động. Điểm khác biệt duy nhất là đối tượng đo là nguồn hồng ngoại bất kì thay vì nguồn hồng ngoại chủ động. Đối tượng nghiên cứu trong bài báo này là máy đo phổ hồng ngoại dạng bị động dùng phát hiện các bức xạ từ xa.

Thông thường, bức xạ hồng ngoại trong tự nhiên yếu và bị ảnh hưởng bởi môi trường. Do đó, kĩ thuật điều biến biên độ, tần số hoặc pha thường được sử dụng để loại bỏ nhiễu và khuếch đại tín hiệu đo [3,4]. Điều biến pha có ưu điểm vượt trội là đơn giản, không cần sử dụng thiết bị điều biến, độ phân giải cao. Trên thực tế hệ giao thoa kế rất nhạy với thay đổi nhiệt độ, rung động hay va đập. Muốn nâng cao độ ổn định và độ chính xác của máy đo, các ảnh hưởng này cần được giảm thiểu hoặc loại bỏ.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐO

2.1. Kĩ thuật điều biến pha cho máy đo phổ hồng ngoại

Sơ đồ nguyên lí của máy đo phổ hồng ngoại bị động được thể hiện ở hình 1. Gương parobol hội tụ chùm bức xạ tại tiêu điểm của thấu kính hội tụ. Chùm tia song song sau thấu kính đi vào giao thoa kế Michelson. Lăng kính chia chùm được chế tạo cho phép cường độ ánh sáng truyền qua và phản xạ xấp xỉ bằng nhau. Một nửa chùm tia phản xạ tại lăng kính chia chùm và đi tới gương tĩnh, nửa còn lại truyền qua lăng kính tới gương động. Gương động được dịch chuyển chính xác xung quanh vị trí cân bằng điều khiển nhờ cơ cấu cuộn cảm-đệm khí. Gương tĩnh và gương động phản xạ chùm bức xạ về lăng kính chia chùm và tại đây chúng giao thoa với nhau. Gương parabol thứ 2 hội tụ chùm giao thoa đi vào cảm biến hồng ngoại. Đồng thời, tia laser He-Ne cũng đi vào hệ giao thoa kế Michelson. Dịch chuyển của gương động có thể xác định chính xác nhờ tín hiệu giao thoa của laser được thu bởi cảm biến photodiode ở bước sóng $\lambda = 633$ nm. Phổ của bức xạ hồng ngoại được xác định bằng phép biến đổi Fourier từ tín hiệu giao thoa kết hợp với vị trí của gương động.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lí máy đo phổ hồng ngoại bị động LIA: (lock-in amplifier) bộ trích xuất đồng bộ và khuếch đại; TK: Thấu kính hội tụ, P: Gương parabol, DAQ: Bộ thu nhận dữ liệu.

Trong nghiên cứu này pha của tín hiệu giao thoa được điều biến bằng cách điều biến dịch chuyển của gương động. Tín hiệu điện áp dạng hình sin được cấp cho hệ thống cuộn cảm-đệm khí thay vì dịch chuyển tuyến tính thông thường. Dịch chuyển của gương động bị điều biến dẫn đến hiệu quang lộ giữa hai nhánh

của giao thoa kế bị điều biến theo. Độ trễ giữa hai nhánh của giao thoa kế Michelson thay đổi theo thời gian như sau [5]:

$$\tau(t)=\tau_0+\Delta\tau\sin\omega_m t \quad (1)$$

Trong đó τ_0 là độ trễ ban đầu do quãng đường giữa hai nhánh không bằng nhau, $\Delta\tau$ là biên độ điều biến.

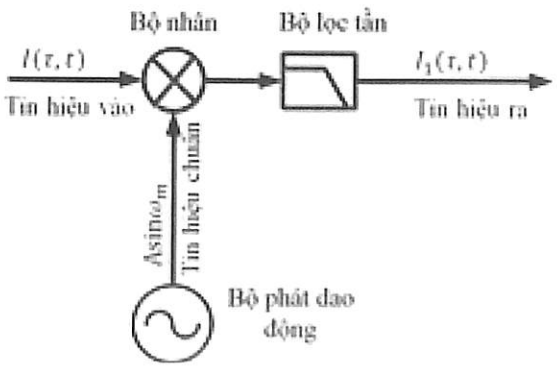
Cường độ tín hiệu giao thoa của nguồn đơn sắc được biểu diễn như sau:

$$I(\tau,t)=I_0\{1+\cos2\pi\upsilon(\tau_0+\Delta\tau\sin\omega_m t)\}, \quad (2)$$

Trong biểu thức (2) I_0 là cường độ trung bình của tín hiệu giao thoa. Khai triển phương trình (2) sử dụng hàm Bessel [6].

$$I(\tau,t) = I_0\{1+\cos(2\pi\upsilon\tau_0)[J_0(2\pi\upsilon\Delta\tau)+2\sum(J_{2k}(2\pi\upsilon\Delta\tau)\cos2k\omega_m t)] - \sin(2\pi\upsilon\tau_0)2\sum_{k=1}^{\infty}(J_{2k-1}(2\pi\upsilon\Delta\tau)\sin(2k-1)\omega_m t)\}. \quad (3$$

Trong phương trình 3, cường độ nguồn giao thoa bao gồm thành phần một chiều và chuỗi các hàm điều hòa với tần số là bội số của tần số điều biến. Hàm điều hòa thành phần được xác định sử dụng kĩ thuật trích xuất đồng bộ và khuếch đại (lock-in amplifier, LIA). Sơ đồ nguyên lí của bộ LIA được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Nguyên lí của bộ dao động trích xuất đồng bộ

Một tín hiệu chuẩn ($A\sin\omega_m$) đồng bộ với tín hiệu điều biến được tạo ra từ bộ tạo dao động. Tín hiệu chuẩn sau đó được nhân với tín hiệu giao thoa nhờ bộ nhân tín hiệu. Do đó, tín hiệu thu nhận được không còn bị ảnh hưởng bởi nhiễu và được khuếch đại. Kĩ thuật LIA cho phép đo các tín hiệu điều hòa được tạo ra bởi một trong các kĩ thuật điều biến pha, cường độ hay tần số có cường độ nhỏ trên nền nhiễu lớn. Đặc biệt trong một số trường hợp nhiễu có thể lớn hơn nhiều lần tín hiệu. Sử dụng kĩ thuật LIA, cường độ của tín hiệu bậc một, trích xuất từ tín hiệu giao thoa dùng nguồn đơn sắc được biểu diễn như sau:

$$I_1=2I_0J_1(2\pi\upsilon\Delta\tau)\sin2\pi\upsilon\tau_0 \quad (4)$$

Khi nguồn có dải phổ rộng với nhiều tần số đi vào giao thoa kế, phân bố phổ được đặc trưng bởi các thành phần tần số có cường độ $I(\upsilon)$ như trong phương trình 2, các bức xạ có tần số khác nhau không kết hợp với nhau, cường độ giao thoa tổng hợp của nguồn đa tần số là tổng của các nguồn đơn sắc:

$$I(\tau,t)=\int_0^{\infty}I(\upsilon)\{1+\cos2\pi\upsilon(\tau_0+\Delta\tau\sin\omega_m t)\}d\upsilon. \quad (5)$$

Tương tự như đối với nguồn đơn sắc, sử dụng kĩ thuật LIA, cường độ tổng hợp của các tín hiệu bậc một ở các tần số khác nhau được xác định như sau:

$$I_1(\tau,t)=\int_0^{\infty}2I_1(\upsilon)I_0J_1(2\pi\upsilon\Delta\tau)\sin2\pi\upsilon\tau_0\,d\upsilon. \quad (6)$$

Vế phải của phương trình (6) có dạng sine theo biến đổi Fourier của $I_1(\upsilon)$,do đó phương trình (6) có thể được viết lại:

$$I_1(\tau,t)=\mathrm{F}\{I_1(\upsilon)\}. \quad (7)$$

Khi thuật toán biến đổi Fourier được thực hiện, cường độ và tần số của các bức xạ thành phần trong nguồn dải rộng được xác định. ☞

2.2. Phương pháp đánh giá, lựa chọn tần số và biên độ điều biến tối ưu cho máy đo phổ hồng ngoại bị động

Trong kĩ thuật điều biến pha, cấp một dao động cho cơ cấu cuộn cảm-đệm khí có nhiều ưu điểm như đáp ứng nhanh, dải động lớn, độ phân giải lực hay momen mà cơ cấu sinh ra chỉ phụ thuộc vào độ phân giải của điện áp hay dòng điện cung cấp. Tuy nhiên, nhược điểm của cơ cấu này là phạm vi làm việc thông thường chỉ vài centimet [7]. Trong hệ thống thử nghiệm sử dụng laser He-Ne (633 nm) được cho giao thoa kế Michelson. Tia laser nằm trong dải nhìn thấy nên dễ dàng cho việc hiệu chỉnh hệ thống. Đường đi của tia laser là hoàn toàn trùng khớp với đường đi của bức xạ hồng ngoại, do đó được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của biên độ và tần số điều biến. Biên độ và tần số điều biến tối ưu được xác định trên cơ sở đánh giá độ tương phản của vân giao thoa laser. Độ tương phản của vân được đánh giá theo [8].

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (8)$$

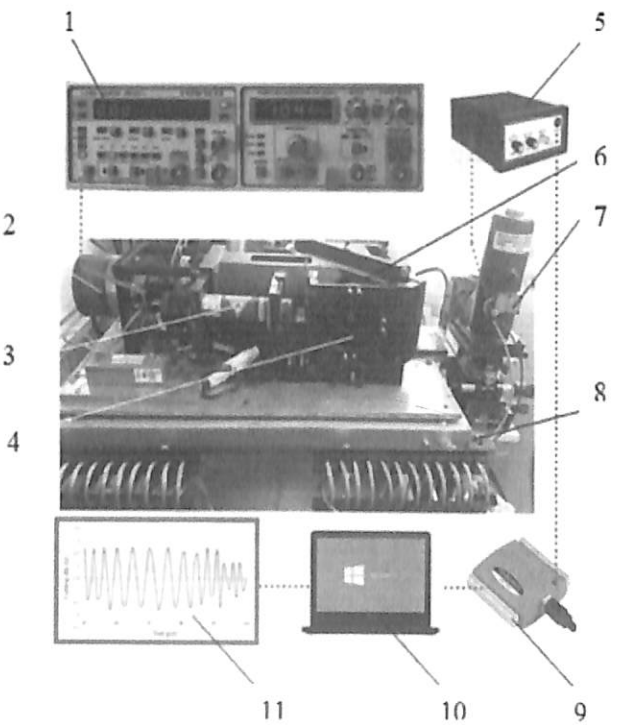
Trong công thức trên I_{max}, I_{min} lần lượt là cường độ lớn nhất và nhỏ nhất của vân giao thoa thu bằng cảm biến.

3. THỰC NGHIỆM

Hệ thống thiết bị đo phổ hồng ngoại bị động được thể hiện trong hình 3. Hệ thống giao thoa kế được đặt trên bàn chống rung để giảm thiểu ảnh hưởng của rung động đến hệ thống. Nguồn laser He-Ne ở bước sóng 633 nm được sử dụng để xác định ảnh hưởng của tần số và biên độ điều biến tới độ tương phản của vân giao thoa.

Tín hiệu giao thoa của giao thoa kế Michelson được thu bởi cảm biến photodiode. Tín hiệu sau cảm biến được cho qua bộ biến đổi tương tự sang số (ADC, USB 1208FS, Measurement Computing Corp.). Bộ chuyển đổi ADC này có 12 bit (độ phân giải =1/212) và cho phép lấy mẫu với tần số 50 kS/s. Tín hiệu sau chuyển đổi được xử lí và lưu vào máy tính nhờ giao tiếp USB trong môi trường của phần mền DASYLAB (Measurement Computing Corp.).

Ngoài ra, để xác định tín hiệu thành phần bậc nhất như trong phương trình (4) bộ lock-in amplifier được sử dụng (PS1 Sciencetech Inc.). Tín hiệu giải điều biến cấp cho bộ lock-in amplifier được cung cấp từ một bộ phát dao động nên hoàn toàn đồng bộ với tín hiệu điều biến cấp cho cuộn cảm-đệm khí.

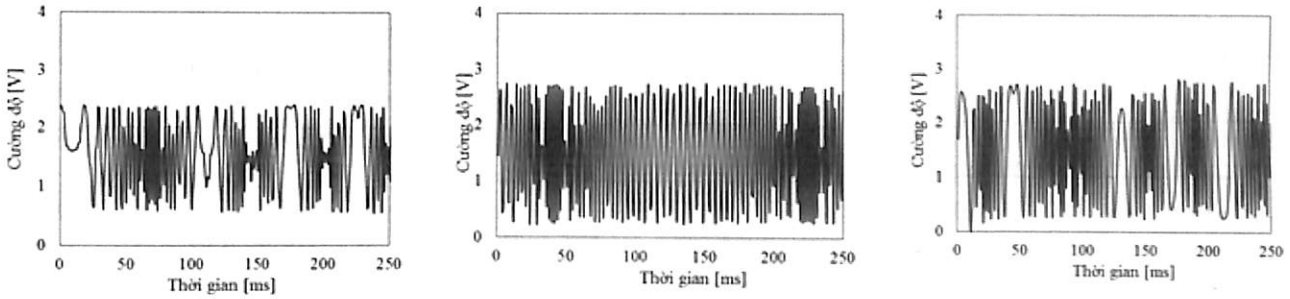


Hình 3. Máy đo phổ hồng ngoại bị động:
1) Bộ phát dao động; 2) Động cơ Voice Coil;
3) Nguồn laser; 4) Cửa sổ vào;
5) Lock-in amplifier; 6) Bộ giao thoa Michelson;
7)Cảm biến hồng ngoại;
8)Bàn giảm chấn; 9)Bộ thu thập dữ liệu;
10)Máy tính; 11)Kết quả đo.

Điều kiện thí nghiệm được mô tả trong bảng 1. Để xác định được thông số điều biến tối ưu, biên độ và tần số điều biến được thay đổi. Độ tương phản của vân giao thoa được sử dụng để đánh giá và lựa chọn bộ thông số điều biến tối ưu. Kết quả thí nghiệm được trình bày trên hình 4 và hình 5. Khi pha của tín hiệu giao thoa được điều biến, cường độ giao thoa cũng bị điều biến theo hàm số như phương trình 2. Hình 4 thể hiện vân giao thoa khi giữ nguyên biên độ điều biến 5 V, đồng thời thay đổi tần số điều biến từ 4 Hz, 8 Hz và 30 Hz. Độ tương phản của vân giao thoa được tính bằng công thức (8). Trong các tần số điều biến, tần số 8 Hz cho giá trị độ tương phản là cao nhất (≈87%, hình 4b). Hình 5, thể hiện vân giao thoa khi giữ nguyên tần số điều biến 8 Hz, đồng thời thay đổi các giá trị biên độ điều biến từ 4 V, 6 V và 8 V. Trong trường hợp này biên độ điều biến bằng 8 V cũng cho độ tương phản cao nhất (hình 5b). Như vậy, trong thí nghiệm này, tần số 8 Hz và biên độ điều biến 6 V cho độ tương phản là cao nhất.

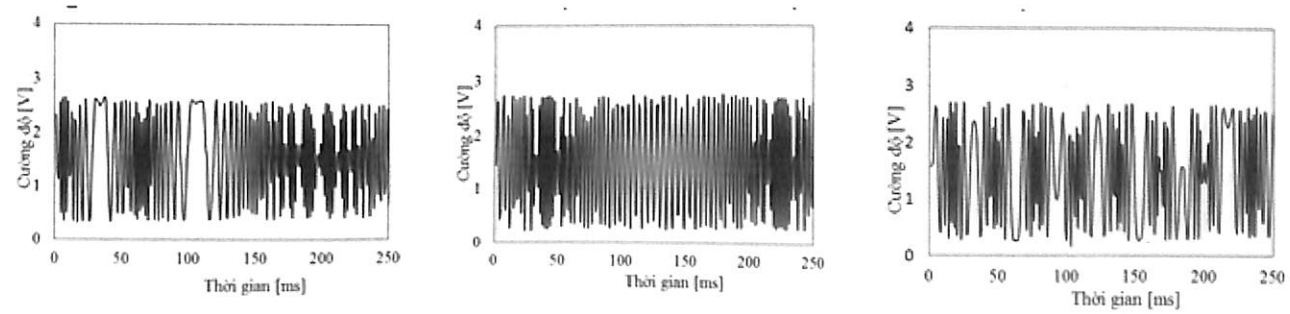
Bảng 1. Điều kiện thí nghiệm xác định độ tương phản của vân giao thoa

Nguồn sáng:	He-Ne laser, 633 nm, 100 μW
Tần số điều biến:	4 Hz, 6 Hz, 10Hz
Biên độ điều biến:	4 V, 6V, 8 V
Tần số lấy mẫu:	10 kHz



a)Độ tương phản V≈68 % *b)Độ tương phản V≈ 87 %* *c)Độ tương phản V≈ 84 %*

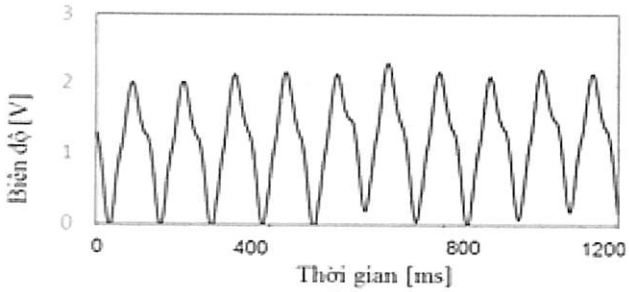
Hình 4. Tín hiệu giao thoa của giao thoa kế Michelson với cùng biên độ điều biến 6 V và các giá trị tần số điều biến khác nhau a) Tần số 4 Hz; b) Tần số 8 Hz; c) Tần số 30 Hz.



a) Độ tương phản V≈ 78 % *b) Độ tương phản V≈ 87 %* *c)Độ tương phản V≈ 86 %*

Hình 5. Tín hiệu giao thoa của giao thoa kế Michelson với cùng tần số điều biến 8 Hz và các giá trị biên độ điều biến khác nhau: a) Biên độ 4 V; b) Biên độ 6V; c) Biên độ 8V.

Để kiểm tra tín hiệu thành phần bậc một trong phương trình 4, tín hiệu giao thoa với tần số và biên độ điều biến tối ưu lần lượt là 8 Hz và 6 V đi vào bộ lọc cho qua tần số thấp. Tần số ngưỡng 10 Hz và độ khuếch đại 10 lần được sử dụng. Tín hiệu điều hòa bậc một được thể hiện trong hình 6: Tín hiệu có độ nét cao và ổn định, do đó hoàn toàn phù hợp với lí thuyết đã xây dựng.



Hình 6. Tín hiệu thành phần bậc một trích xuất từ tín hiệu giao thoa laser

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, cơ sở lý thuyết của máy đo phổ hồng ngoại sử dụng kĩ thuật điều biến pha được phân tích, đề xuất. Laser He-Ne được sử dụng để hiệu chỉnh và xác định ảnh hưởng của tần số và biên độ điều biến tối ưu cho voice-coil. Bộ thông số điều biến tối ưu được xác định dựa trên độ tương phản của vân giao thoa. Tần số và biên độ điều biến tối ưu được lần lượt là 8 Hz và 6 V là phù hợp nhất với hệ thống được nhóm nghiên cứu thực hiện. Kết quả nghiên cứu đóng góp vào cơ sở nhằm xây dựng, hoàn thiện và nâng cao chất lượng của máy đo phổ hồng ngoại bị động.❖

Ngày nhận bài: **12/3/2017**
Ngày phản biện: **10/4/2017**

Tài liệu tham khảo:

[1]. P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, "*Fourier Transform Infrared Spectrometry 2nd edition*", John Wiley & Sons, Inc, 2007.

[2]. A. Beil et al, "*Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry*" Proc. of SPIE, Vol. 3493 (1998), pp. 32-43.

[3]. Bhattacharya, et al.,"*Wavelength modulation spectroscopy using novel mechanical light chopper blade designs, Review of scientific instruments*", Vol. 76, (2005), pp. 083903.

[4]. Lindsay, I. D., et al. "*Mid-infrared wavelength-and frequency-modulation spectroscopy with a pump-modulated singly-resonant optical parametric oscillator.*" Optics Express, Vol. 14, (2006), pp. 12341-12346.kiểm tra lại số trang

[5]. Hariharan P, *Optical Interferometry 2nd Edition*, Academic Press, Elsevier, 2003.

[6]. Thanh-Tung Vu, et al., *Accurate displacement-measuring interferometer with wide range using an I2 frequency-stabilized laser diode based on sinusoidal frequency modulation*, Measurement Science and Technology, Vol. 27, (2016), pp.105201.

[7]. Wavre. N& Thouvenin. X, "*Voice-coil actuators in space*", Proc. Of Sixth European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 4th -6th October, Zürich-Switzerland, (1995), pp. 227-232.

[8]. Réfrégier P., and Antoine R., "*Visibility interference fringes optimization on a single beam in the case of partially polarized and partially coherent light.*" Optics letters, Vol. 32, (2007), pp. 366-1368.