

신경망 회로를 이용한 레이저 간섭계의 적응형 오차보정

Adaptive Nonlinearity Compensation in Laser Interferometer using Neural Network

허건행(*), 이우람(**), 유관호(***)
Gun-Hang Heo, Woo-Ram Lee, Kwan-Ho You

Abstract - In the semiconductor manufacturing industry, the heterodyne laser interferometer plays as an ultra-precise measurement system. However, the heterodyne laser interferometer has some unwanted nonlinearity error which is caused from frequency-mixing. This is an obstacle to improve the measurement accuracy in nanometer scale. In this paper we propose a compensation algorithm based on RLS(recursive least square) method and artificial intelligence method, which reduce the nonlinearity error in the heterodyne laser interferometer. With the capacitance displacement sensor we get a reference signal which can be transformed into the intensity domain. Using the back-propagation Neural Network method, we train the network to track the reference signal. Through some experiments, we demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm in measurement accuracy.

Key Words :Nonlinearity, laser interferometer, Neural Network, capacitive displacement sensor, RLS

1. 서론

나노급의 위치측정 장치인 헤테로다인 레이저 간섭계의 비선형적인 문제를 해결하기 위한 노력들이 많은 관점에서 시도되었으며, 헤테로다인 레이저 간섭계의 비선형성은 실험적으로 입증되었다. 측정구간의 길이의 변화는 비선형성의 값을 증가시키는 요인으로 작용하며, 편광혼합분리기에서 발생하는 주파수 혼합은 헤테로다인 레이저 간섭계의 정밀도를 높이는 데에 한계로 작용한다.[2] 또 다른 연구노력으로, 비선형적인 요인은 가우시안 잡음에 의한 것으로 보고 측정정밀도를 높이기 위하여 칼만필터(Kalman filter)를 이용하였다.[3] 그러나 칼만필터를 이용한 보정방법은 헤테로다인 레이저 간섭계에서 실시간으로 측정을 하기가 어렵다.

본 논문에서는, 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 비선형성을 최적화 기법과 인공지능 방법을 이용하여 보정하는 방법을 소개한다. 이러한 방법은 이전에 시도되었던 헤테로다인 레이저 간섭계의 보정방법[5]에서 확장하여 보다 효율적으로 정밀도를 높였다. 제안된 보정방법은 반복최소자승법(recursive least square method(RLS))과 신경망 회로를 이용한 방법이다. RLS를 이용하여 1차적으로 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 비선형 오차를 줄이며, 신경망 회로를 이

용하여 2차적인 보정을 실시한다. 우선 정전용량센서의 출력을 기준신호로 하고 레이저 간섭계의 신호를 측정신호로 정한다. 두 신호를 이용하여 RLS를 통하여 1차적인 보정값을 구한다. 이렇게 얻어진 1차 보정값을 입력값으로 하고, 기준신호를 목표값으로 하여 역전파 학습을 통하여 생성된 신경망 회로를 구성한다. 이렇게 생성된 신경망 회로를 가지고 최종 보정된 값을 구함으로써 비선형 오차를 최소화할 수 있다.

2. 헤테로다인 레이저 간섭계에서의 비선형성

헤테로다인 레이저 간섭계는 주파수가 서로 다르면서 직교 편광되는 광원을 사용하는데, 두 주파수 사이의 비직교성, 타원화와 편광분리기에서의 불완전한 배열로 인한 주파수 혼합으로 비선형적인 오차가 존재한다. 그림 1은 주파수 혼합이 존재하는 헤테로다인 레이저 간섭계를 보여준다. 그림 1에서, 혼합된 성분 Af_1 과 βf_2 는 기본 구간(L_1)을 통과하며 같은 방법으로, 혼합된 성분 $\alpha f'_1$ 과 Bf'_2 는 측정구간(L_2)을 통과한다. PBS를 통하여 각각 분리되고 반사되어 모아진 빛은 서로 영향을 주어 이상적인 경우와 다른 값을 갖는다. f'_1 과 f'_2 는 f_1 과 f_2 에 대한 도플러 효과를 고려한 주파수이며, α 와 β 는 간섭신호의 크기를 가리킨다.

저자 소개

* 準會員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程

** 準會員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程

*** 正會員 : 成均館大學 電子電氣學科 副教授·工博

† 본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(R01-2004-000-10338-0)지원으로 수행되었음.

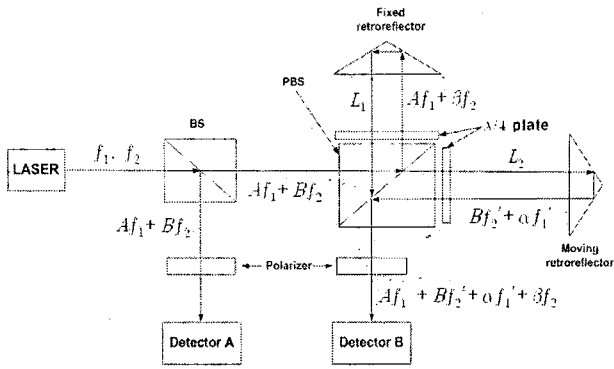


그림 1. 주파수 혼합을 고려한 헤테로다인 레이저 간섭계

레이저 헤드로부터 나오는 전기장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{A1} &= (1/\sqrt{2})A \exp[i(2\pi f_1 t + \Phi_A)] \\ E_{A2} &= (1/\sqrt{2})B \exp[i(2\pi f_2 t + \Phi_B)] \end{aligned} \quad (1)$$

Φ_A 와 Φ_B 는 초기 위상값을 가리키며, $2\pi\Delta f$ 는 기본구간과 이동구간 사이의 위상차이($\Delta f = f_2 - f_1$)를 말한다. 센서 A(Detector A)로부터 얻어지는 기본신호의 세기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_r &\propto (E_{A1} + E_{A2})(E_{A1} + E_{A2})^* \\ &= (1/2)(A^2 + B^2) + AB \cos[2\pi\Delta f t + (\Phi_B - \Phi_A)] \end{aligned} \quad (2)$$

한편, PBS를 통과한 이후의 전기장은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{B1} &= A \exp[i(2\pi f_1 t + \Phi_A)] + \beta \exp[i(2\pi f_2 t + \Phi_B)] \\ E_{B2} &= B \exp[i(2\pi f_2' t + \Phi_B)] + \alpha \exp[i(2\pi f_1' t + \Phi_A)] \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 센서 B(Detector B)로부터 얻어지는 측정신호의 세기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_m &\propto (E_{B1} + E_{B2})(E_{B1} + E_{B2})^* \\ &= \frac{1}{2}(A^2 + B^2 + \alpha^2 + \beta^2) + AB \cos[(2\pi\Delta f + \psi)t + (\Phi_B - \Phi_A)] \\ &\quad + A\beta \cos[2\pi\Delta f t + (\Phi_B - \Phi_A)] + B\alpha \cos[2\pi\Delta f t + (\Phi_B - \Phi_A)] \\ &\quad + A\alpha \cos[\psi t + (\Phi_A - \Phi_A)] + B\beta \cos[\psi t + (\Phi_B - \Phi_B)] \\ &\quad + \alpha\beta \cos[(2\pi\Delta f + \psi)t + (\Phi_B - \Phi_A)] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\Delta f = f_2 - f_1$ 와 ψ 로 정의되며, 도플러 효과($\psi = 2\pi f_2' - 2\pi f_2 = 2\pi f_1' - 2\pi f_1$)에 의한 주파수 차이를 가리킨다. 식 (4)에서 HPF를 통하여 DC성분을 제거할 수 있다. 마찬가지로 초기 위상값($\Phi_A, \Phi_B, \Phi_{\alpha}, \Phi_{\beta}$)들 역시 비선형 문제에서는 무시될 수 있다. 센서 B로부터 검출되는 H_m 신호는 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} H_m &\approx \cos(2\pi\Delta f t + \Phi) \\ &\quad + K_1 \cos(2\Phi\Delta f t) + K_2 \cos(2\pi\Delta f t - \Phi) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $K_1 = (A\beta + B\alpha)/(AB)$, $K_2 = (\alpha\beta)/(AB)$, 그리고 $\Phi = \psi t$ 이다. 식 (5)로부터 첫 번째 항을 제외한 두 번째 항과 세 번째 항은 비선형 요소이다.

그림 2는 Lock-in amplifier(LIA)의 블록도이다. LIA의

위상 천이, 곱셈기능 그리고 LPF 기능을 이용하여 우리는 비선형 오차를 제거할 수 있다. H_r 과 H_m 신호가 LIA에 인가됨으로써 위상(Φ)신호로 뽑아낸다.

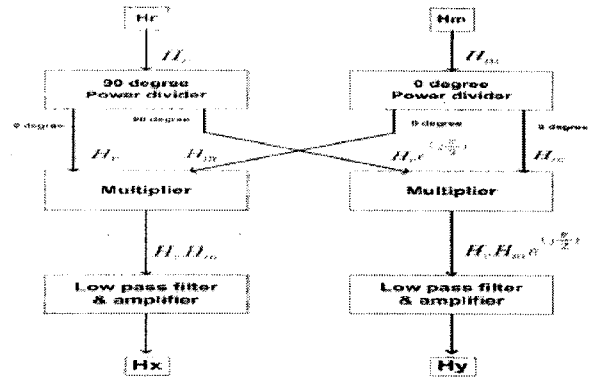


그림 2. Lock-in amplifier의 블록도

LIA를 이용하여 $0^\circ, 90^\circ$ 위상천이 된 신호들의 곱은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} H_m H_r &= \cos(\Delta f t)[AB \cos(\Delta f t + \Phi) \\ &\quad + (A\beta + B\alpha)\cos(\Delta f t) + \alpha\beta \cos(\Delta f t - \Phi)] \\ H_m H_r \exp(j\pi/2) &= \sin(2\pi\Delta f t)[AB \cos(2\pi\Delta f t + \Phi) \\ &\quad + (A\beta + B\alpha)\cos(2\pi\Delta f t) + \alpha\beta \cos(2\pi\Delta f t - \Phi)] \end{aligned} \quad (6)$$

마지막으로 LPF를 통과시키면 다음과 같은 식을 얻어낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_x &= ((AB + \alpha\beta)/2)\cos \Phi + ((A\beta + \alpha B)/2) \\ H_y &= ((AB - \alpha\beta)/2)\sin \Phi \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 α 와 β 는 비선형성 정도를 나타내며, 이는 비선형 오차의 요소로 작용하여 좌표 상에서 원점에 벗어난 타원형태의 모양을 갖게 된다.

3. 비선형성 오차보정

3.1. 반복최소자승법을 이용한 비선형성 오차 보정

정전용량센서로부터 나오는 신호를 기준신호로 하고 측정신호를 보정하기 위하여 다음과 같은 근사식을 이용한다.

$$\Delta\Phi \approx \frac{4\pi n(L_2 - L_1)}{\lambda} = \frac{4\pi n\Delta L}{\lambda} \quad (8)$$

여기서 λ 는 ω_1 과 ω_2 의 평균 파장을 나타내고 n 은 굴절률(refractive index)을 의미한다. ΔL 은 고정경로와 이동경로 사이의 차($\Delta L = L_2 - L_1$)이다.

Φ 를 이용한 기본신호는 식 (9)와 같이 표현되며, 식 (7)로부터 축약된 식 (10)으로 표현될 수 있다.

$$H_x^* = (AB/2)\cos \Phi \quad (9)$$

$$H_y^* = (AB/2)\sin \Phi$$

$$H_x = a \cos \Phi + h \quad (10)$$

$$H_y = b \sin \Phi$$

식 (10)에서의 보정변수를 찾기 위해 RLS 기법을 사용한다.

우선 최소자승법(least square method(LS))을 통하여 a , b , h 의 근사값을 구한 뒤 RLS 기법(식 (11))을 이용하여 최적의 보정변수(\hat{a} , \hat{b} , \hat{h})를 구할 수 있으며, 식 (12)와 같은 1차 보정값을 얻어낼 수 있다.

$$P_{k+1} = P_k - P_k A_{k+1}^T (I + A_{k+1} P_k A_{k+1}^T)^{-1} A_{k+1} P_k \quad (11)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + P_{k+1} A_{k+1}^T (b^{(k+1)} - A_{k+1} x^{(k)})$$

$$\hat{H}_x = \hat{a} \cos \Phi + \hat{h} \quad (12)$$

$$\hat{H}_y = \hat{b} \sin \Phi$$

3.2. 신경망 회로를 이용한 비선형성 오차 보정

신경망 회로는 효과적인 학습능력으로 인해 복잡한 고차의 시스템을 간단하게 근사시킬 수 있고, 시스템의 불확실성과 외부 잡음에 강인한 시스템 모델을 만들 수 있는 강점을 가지고 있다.

2차 보정값을 구하기 위하여 역전파 알고리즘을 통하여 신경망 회로를 학습하게 되는데, RLS 방법으로부터 얻어진 1차 보정값(식 (11))을 학습과정의 입력값으로, 기본신호(식 (9))를 목표값으로 정하여 학습을 하게 된다. 여기서 목표함수는 식 (13)과 같이 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c \left\| (H_x^* - \hat{H}_x) + (H_y^* - \hat{H}_y) \right\|^2 \quad (13)$$

c 는 샘플 데이터의 수이며 Gradient Descent 방법에 의해 신경망 회로의 가중치가 결정되고 E 값이 목표오차에 도달되었을 때, 학습된 신경망 회로가 생성된다. 이렇게 생성된 신경망 회로에 1차 보정값을 입력값으로 넣어주며, 이때 출력되는 값들이 2차 보정값이 된다. 최종 보정값을 $[\tilde{H}_x, \tilde{H}_y]$ 라고 정의하면 보정된 위상 $\tilde{\Phi}$ 는 식 (15)에 의해서 구해진다.

$$[\tilde{H}_x, \tilde{H}_y] = NN(\hat{H}_x, \hat{H}_y) \quad (14)$$

$$\tilde{\Phi} = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{H}_y}{\tilde{H}_x} \right) \quad (15)$$

이렇게 유도된 $\tilde{\Phi}$ 를 식(8)의 변형된 식에 의하여 최종 보정된 측정거리 \tilde{L} 을 구할 수 있다.

4. 실험결과

이 장에서는 실험을 통해 제안된 보정 알고리즘의 효과를 증명한다. 레이저 간섭계의 측정거리와 이를 보정한 거리값의 성능을 비교함으로써 보정 알고리즘의 우수성을 증명한다. 보정 알고리즘의 보다 명확한 성능측정을 위해 정전용량 센서를 기준으로 하여 보정 전후를 비교하였다. 실험에서 사용된 ω_A , ω_B 의 진폭 A , B 는 1(V), 굴절률 n 은 1.00000026654516, 그리고 평균파장(λ)는 0.6329912(μm)이다.

그림 3은 헤테로다인 레이저 간섭계에 제안된 신경망 회로 보정 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 나노 단위의 위치 이동이 가능한 압전변환기(piezo-electric transducer)를 이용하여 10nm~200nm 구간에서 계단형태로 움직이는 스테이지를 구성하고 그 위치를 측정하였다. 가는 실선은 정전용

량센서, 점선은 레이저 간섭계 그리고 굵은 실선은 보정된 레이저 간섭계의 측정값을 의미한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 신경망 회로를 이용하여 보정을 시작한 이후에는 출력 신호

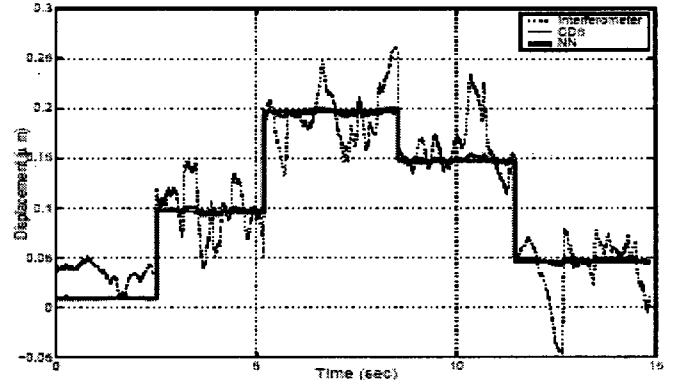


그림 3. 보정 전·후의 측정결과 값 비교

의 출력임이 감소하였다. 또한 출력 신호의 최고점이 현저하게 낮아지는 것을 볼 때 적응성 보정 알고리즘이 결과값을 개선하는데 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 초정밀 위치 측정을 하려고 할 때, 광학기기 자체의 불완전함에서 발생하는 비선형성 오차는 가장 큰 제한요소 중 하나다. 본 논문을 통해 RLS 방법과 신경망 회로를 이용한 혼합형 비선형성 오차 보정 알고리즘을 제안하였다. 정전용량센서의 신호와 1차 보정 신호를 이용하여 신경망 회로를 구성·학습 시키고, 이후에 들어오는 새로운 자료들을 완성된 신경망 회로로 보정하였다.

실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하였으며, 실험결과 레이저 간섭계의 비선형 오차가 효과적으로 보정되었음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Freitas and M. A. Palyer, "Polarization effects in heterodyne interferometer," J. Mod. Opt. 42, 1875 - 1899, (1995).
- [2] N. Bobroff, "Residual errors in laser interferometer from air turbulence and nonlinearity," Appl. Opt. 26, 2676 - 2682, (1987).
- [3] T. J. Park, H. S. Choi, C. S. Han, and Y. W. Lee, "Real-time precision displacement measurement interferometer using the robust discrete time Kalman filter," Opt. Laser Tech. 37, 229-234, (2005).
- [4] T. B. Eom, J. W. Kim, and B. C. Park, "A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyneinterferometer," Meas. Sci. Tech. 13, 222 - 225, (2002).
- [5] M. H. Hong, J. W. Jeon, K. H. Park, and K. H. You, "Adaptive nonlinearity compensation of heterodyne laser interferometer," LNAI 4252, 545 - 552, (2006).