

호모다인 방식의 소형 간섭계 모듈에서의 비선형성 에러 분석

*안정호, 김종안¹, 곽윤근², 김수현²

*한국과학기술원 기계공학과, ¹한국 표준 과학 연구원, ²한국과학기술원 기계공학과

Analysis of Nonlinearity Error in Compact Homodyne Interferometer Module

*Jeongho Ahn, Jong-ahn Kim¹, Yoonkeun Kwak², SooHyun Kim²

*Dept. of Mech. Eng., KAIST, ¹KRISS, ²Dept. of Mech. Eng.

Key words : Homodyne interferometer, Nonlinearity Error

1. 호모다인 간섭계에서의 비선형성 에러

간섭계에서의 에러 요인으로는 광원의 안정성(stability of laser source), 정렬 오차(alignment error), 진동(vibration), 온도의 변화(temperature fluctuation) 및 공기 유동(air turbulence) 등이 존재한다. 하지만 이러한 일반적인 에러 요인들이 최대한 보상된다면 실제적으로 간섭계의 성능을 제한하는 것은 신호의 잡음이나 편광 누설(cross talk) 성분에 의한 비선형성 에러(nonlinearity error)이다. 편광 누설 성분은 다음과 같은 요소에 기인한다.

- Imperfection of wave plate
- Imperfection of beam Splitter
- Imperfection of polarizer
- Alignment error

2. 소형 호모다인 간섭계 모듈

본 연구에서 사용할 간섭계의 경우 주파수 안정화된 He-Ne 레이저를 사용하며, 4.21×10^{-9} 의 파장 안정성을 가지며, 광원의 세기는 약 1mW이다. 소형 호모다인 간섭계는 Fig. 1과 같은 광학계 배열을 가지고 있으며, 광검출부와 함께 모듈형태로 구성되어 소형 호모다인 간섭계 모듈의 전체적인 크기는 수십 mm에 불과하다. 간섭계는 double pass의 광경로를 가지며, 광 검출부는 네 개의 포토다이오드를 가지고 각각 90°의 위상차(phase difference)를 가지는 네 개의 신호를 받게 된다. 180°의 위상차를 가지는 신호끼리 차동 증폭기(differential amplifier)를 통과하여 최종적으로 90°의 위상차를 가지는 두 개의 정현파 신호를 얻게 된다.

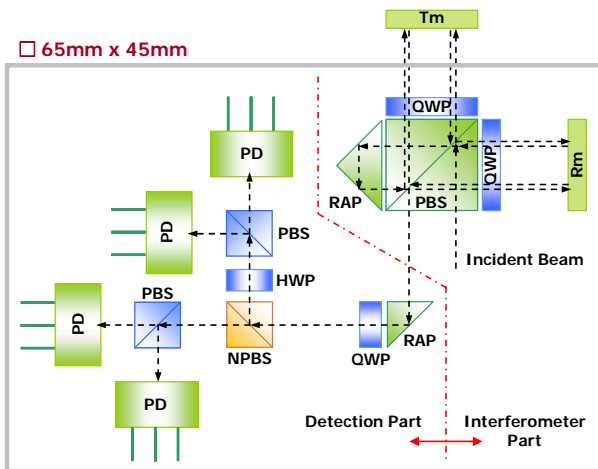


Fig. 1 Optical alignment of compact homodyne ineterferometer module with a quadrature detector system. Tm : target mirror, Rm : reference mirror, QWP : quarter wave plate, RAP : right angle prism, PBS : polarization beam splitter, NPBS : non-polarization beam splitter, HWP : half wave plate, PD : photo diode

하지만 간섭계 모듈에서 사용되어지는 QWP 나 HWP의 경우, 광축이 기준면과 정확하게 45°, 22.5°를 갖지 않는다. 이는 본 연구의 간섭계는 소형의 모듈 형태로 구성되므로, 특별한 광학계 마운트를 사용하지 않고, 각각의 광학계를 광학 접착제(optical adhesive)를 사용하여 결합하므로, 기계적으로 정확이 각도 오차를 보상할 수 없기 때문이다.

3. 호모다인 간섭계에서의 비선형성 보상 방법

(1) Heydemann Method

이러한 호모다인 간섭계에서의 비선형성 오차를 보상하는 방법으로 가장 고전적인 방법은 Heydemann에 의해 제안된 타원 곡선 맞춤(elliptical fitting) 방법이다. 간섭계에서 얻어지는 신호는 완벽한 원의 방정식이 아닌 타원의 방정식이므로 얻어진 데이터를 타원 곡선 맞춤을 통해, 정확한 위상 값을 계산해 내므로 비선형성 오차를 줄일 수 있다.

(2) Gain and offset correction method

Gaolinag Dai에 의해 제안된 방법으로 최종적으로 얻게 되는 두 신호는, 완전한 정현파가 아닌, DC offset과 amplitude의 변화를 갖게 되므로, 이를 간단하게 보상하는 방법이다. 측정된 데이터의 최대값과 최소값을 측정하여 간단히 DC offset 성분과 진폭의 비를 결정 가능하다.

(3) Adjust Gain Method

기본적인 원리는 최종적으로 얻게 되는 I_x, I_y 의 신호의 DC offset 성분이나, 진폭 등을 미리 예측하여, 이러한 성분을 zero로 만들어주는 gain 값, k를 사용하는 것이다. 호모다인 간섭계에서 비선형성 오차의 주 요인은 detection part의 PBS에 의한 것임을 제안하였으며, 따라서 PBS의 특성 값을 이용하여 비선형성 오차를 보상할 수 있다.

4. 비선형성 오차(Nonlinearity Error) 분석

비선형성 오차를 분석하기 위해, 시뮬레이션(simulation)을 수행하였다. 이 때 다음과 같은 가정을 하였고, 이러한 가정은 실제의 데이터에 근거한 것이다.

- ⓐ 광원은 Frequency Stabilized He-Ne laser이며 파장은 632.8nm이고, 1%의 Intensity fluctuation을 가진다.
- ⓑ 스테이지는 632.8nm를 이동한다.
- ⓒ Waveplate는 1/250[rad]의 파장 지연 오차를 갖는다.
- ⓓ Waveplate는 기준면(reference axis)과 광축(optic axis)과의 0.5° 각도 에러를 갖는다

앞서 설명한 바 있는 보상 방법을 적용하여 비선형성 오차를 계산해 보았다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 보상이 되지 않았을 경우 2nm의 비선형성 에러를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 보상 방법 세가지 모두 현격하게 비선형성 오차를 감소시켰다. Heydemann method의 경우

진폭(peak-to-peak)은 거의 0.1nm 에 불과하므로, 다른 Gain & offset correction method 나, Adjust gain method 에 비해 우수한 성능을 보인다. 하지만 offset 를 약 0.3nm 정도 가지므로 정확한 오차를 예측할 수 없다는 단점을 가진다. Gain & offset correction method 과 Adjust gain method 는 거의 비슷한 성능을 보이고 있으며 진폭(peak-to-peak)은 약 0.5nm 정도를 보이고 있다.

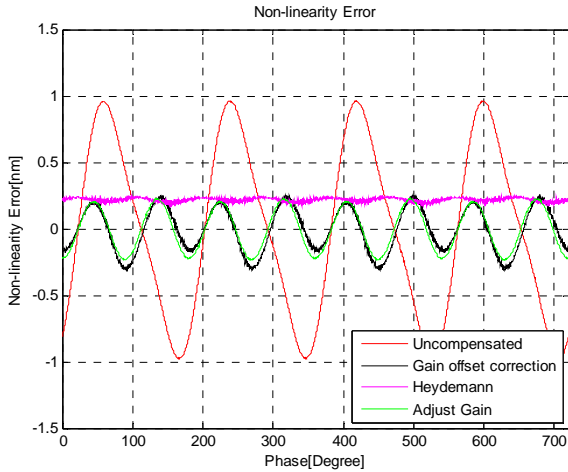


Fig. 2 Nonlinearity Error of Homodyne Interferometer when compensation methods are applied.

이러한 비선형성 오차에 가장 큰 영향을 미치는 것은 편광의 누설 성분이며, 이러한 편광의 누설은 PBS 뿐만 아니라, wave plate 의 파장 지연 오차(ϵ)와, 각도 오차에 기인한다. PBS 는 특성이 이미 정해져 있고, 특별히 각도 오차를 가지지 않는다. 또한 wave plate 의 파장 지연 오차는 매우 작으며 그 영향력 또한 매우 작을 것으로 예상된다. 하지만 wave plate 의 각도 오차는 매우 큰 비선형 오차를 유발할 것이다. 따라서 간섭계 모듈에서 이러한 비선형성 오차에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 알아보기 위해 QWP, HWP 의 영향 정도를 알아보았다.

먼저 간섭계 부분의 QWP 만 각도의 오차를 -0.5° 에서 $+0.5^\circ$ 까지 변화시키고, detection part 의 QWP 와 HWP 는 각도 오차를 갖지 않는 것으로 가정하여, 간섭계 부분의 QWP 의 영향을 알아본다. Detection part 의 QWP 와 HWP 에 대해서도 이와 같은 방법으로 영향력을 알아본다.

Fig. 7 에서 볼 수 있듯이, 간섭계 부분에 있는 QWP 의 경우 0.5° 의 각도 오차에 의해 약 0.015nm 의 비선형 오차를 유발한다. 하지만 광검출기 부분의 QWP 는 0.001nm 정도의 오차만을 유발하므로 거의 영향을 주지 않는다. 하지만 이와는 대조적으로 HWP 의 경우 0.5° 의 각도 오차에 의해 약 0.2nm 의 오차가 발생됨을 알 수 있다.

이를 통해 알 수 있듯이 detection part 의 HWP 와 interferometer part 의 QWP 의 각도 오차 보정이 가장 중요함을 알 수 있다.

5. 결론

지금까지 호모다인 방식의 소형 간섭계 모듈의 구성 및 비선형성 오차에 대한 분석에 대해 논의하였다. 시뮬레이션 결과에서도 볼 수 있듯이, 기존에 제시된 많은 보상 방법은 완벽하게 비선형 오차를 줄일 수 없으며, 그 한계를 보였다.

이러한 결과로 볼 때, 새로운 보상 방법이 제시되지 않는다면 sub-nano 의 분해능을 구현하는 데에 큰 어려움이 예상된다. 따라서 새로운 방식의 보상 방법이 필요하며, 이는 추후 연구 과제로 진행될 것이다.

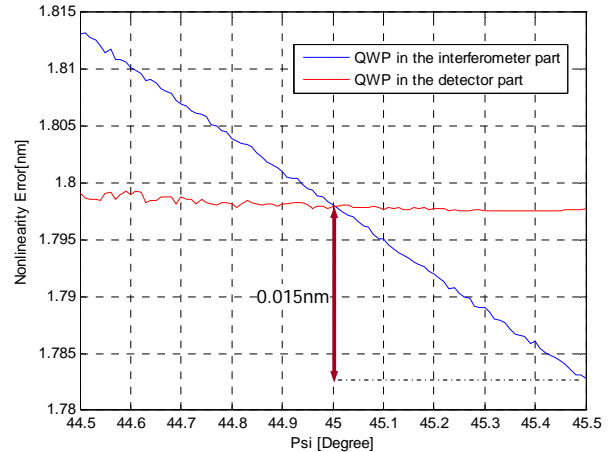


Fig. 3 Nonlinearity Error of Homodyne Interferometer according to the angular error of QWP

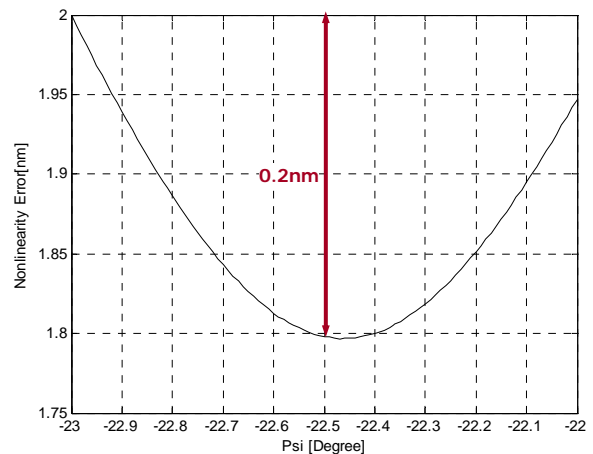


Fig. 4 Nonlinearity Error of Homodyne Interferometer according to the angular error of HWP.

참고문헌

1. P.L.M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," Appl. Opt. 20, 3382-3384 (1981)
2. K.P.Birch, "Optical fringe subdivision with nanometric accuracy," Precis. Eng. 12, 195-198 (1990)
3. C.-M. Wu and C.-S. Su, "Nonlinearity in measurement of length by optical interferometry," Meas. Sci. Technol. 7, 62-68 (1996)
4. C.-M Wu, C.-S. Su, and G.-S. Peng, "Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry," Meas. Sci. Technol. 7, 520-524 (1996)
5. T.B.Eom, J.Y.Kim, and K.Jeong, "The dynamic compensation of nonlinearity in a homodyne laser interferometer," Meas. Sci. Technol. 12, 1734-1738 (2001)
6. Gaoliang Dai, "Improving the performance of interferometers in metrological scanning probe microscope," Meas. Sci. Technol. 15, 444-450 (2004)
7. Taeho Keem, "Removing nonlinearity of a homodyne interferometer by adjusting the gains of its quadrature detector systems," Appl. Opt. 43, 2443-2448, (2004)
8. Taeho Keem, "Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system," Appl. Opt. 44, 3492-3498, (2005)