

멀티헤테로다인 원리 기반의 절대거리 측정

Absolute distance measurement based on multi-heterodyne principle

*한성흠, 김영진, 이주형, 이근우, 배은덕, #김승우

*S. Han, Y.-J. Kim, J. Lee, K. Lee, E.-D. Bae, S.-W. Kim (swk@kaist.ac.kr)

KAIST 극초단광학 초정밀기술연구단

Key words : Absolute distance measurement, Femtosecond laser, Multi-heterodyne detection

1. 서론

오늘날 고부가가치의 첨단 산업은 생산성의 증대를 위해서 높은 정밀도를 넓은 영역으로 확장시킬 수 있는 대영역 초정밀 측정을 필요로 한다. 오랜 기간 동안 전세계적으로 대영역 초정밀 센서에 대한 많은 연구들이 활발하게 진행되어 왔으며, 이 중에서 특히 광학 간섭계는 비접촉 방식으로 측정 대상에 손상을 주지 않고, 수 nm의 분해능으로 측정이 가능하기 때문에, 산업계에서 거리 및 형상 측정 기술로 개발, 응용되어 왔다. 최근에는 펨토초 레이저의 좁은 펄스 폭과 넓은 광대역 그리고 높은 광주파수 안정도를 이용한 다양한 정밀거리측정 기술들이 제안되었다 [1]. 이러한 펨토초 레이저의 넓은 광대역과 모드들의 좁은 선폭을 분산간섭계에 적용하면 기존의 간섭계에서 광원의 한계로 인하여 발생하는 측정 영역의 제한을 개선하고 높은 분해능으로 측정이 가능하다. 기존의 펨토초 레이저를 이용한 분산간섭계 연구에서는 분광기의 분해능 한계로 인해 모호성(ambiguity) 없이 측정할 수 있는 최대

측정 영역이 수 mm 수준이었으며 거리 측정에 사용되는 펨토초 레이저의 광 빔 모드들을 보다 세밀하게 분해 함으로써 거리모호성이 개선 될 수 있는 가능성을 제시하였다 [2].

두 대의 펨토초 레이저 광 빔 모드들의 다중맥놀이를 이용하여 광주파수영역의 스펙트럼과 위상정보를 RF 영역에서 분석이 가능한 멀티헤테로다인 원리는 정밀분광, 정밀거리측정, OCT 등 다양한 분야에 응용이 되고 있다 [3][4]. 이러한 멀티헤테로다인 원리를 분산 간섭계에 적용하면 높은 분해능으로 광주파수의 위상측정이 가능하게 되므로 모호성 없이 측정할 수 있는 영역을 크게 확장 시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 멀티헤테로다인 원리 기반의 거리측정기를 구현하고 성능을 검증하였다.

2. 기본이론 및 실험장치

분산 간섭계를 이용하여 측정거리 D 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$D = m \times L_{NAR} + L \quad (1)$$

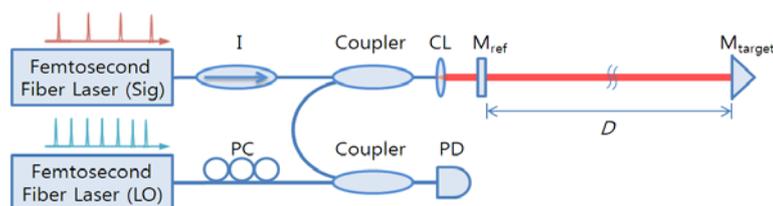


Fig. 1 Absolute distance measurement based on multi-heterodyne principle. The signal optical frequency comb is transmitted to the target and the reflected comb is combined with the local oscillator comb at the coupler. Abbreviations are; Sig: signal oscillator, LO: local oscillator, I: isolator, CL: collimation lens, PC: polarization controller, PD: photodetector, M_{ref} : reference mirror and M_{target} : target mirror.

이때 $L_{NAR}(=c_0/4Np)$ 은 모호성 없이 측정할 수 있는 최대 측정 영역을 나타내며 m 은 L_{NAR} 의 배수 그리고 L 은 위상의 기울기와 식(2)를 이용하여 계산한 거리이다 [2]. (여기서, p 는 주파수 샘플링 간격, c_0 는 진공 중의 광속, N 은 매질의 균 굴절률, ν 는 광주파수 그리고 ϕ 는 위상을 나타낸다.)

$$L = \frac{c_0}{4\pi N} \frac{d\phi(\nu)}{d\nu} \quad (2)$$

멀티헤테로다인 원리 기반의 거리측정기의 구성은 Fig. 1 과 같다. 반복률이 서로 다른(100 MHz, 100 MHz + 50 Hz) 안정화된 두 대의 펄스 레이저와 마이켈슨 형태의 간섭계로 이루어져 있다. 두 펄스 레이저의 광 빛이 광섬유 결합기에서 간섭 시 가시도(visibility)를 향상시키기 위해 편광조절기를 이용하여 편광을 조절 하여 주었다. 기준거울(M_{ref})은 일부의 빛은 투과 하고 일부는 반사하는 거울을 사용하였으며 측정거울(M_{target})은 광경로의 정렬이 용이하도록 역반사경(retro-reflector)을 사용 하였다.

3. 실험결과 및 결론

두 광 빛을 멀티헤테로다인 함으로써 Fig. 2 와 같은 시간 영역에서의 간섭신호를 얻었다. 이때 얻어진 간섭신호를 푸리에변환 하게 되면 RF 영역에서 위상과 진폭을 얻을 수 있다. RF 영역에서 얻어진 위상과 진폭은 측정에 사용한 펄스 레이저 광 빛의 위상과 진폭 정보를 담고 있기 때문에 광주파수 대역으로 변환하여 Fig. 2(b) 와 같이 측정 펄스의 위상을 얻었다. 본 실험에서는 모호성 없이 측정할 수 있는 최대 측정영역(L_{NAR}) 2.5 mm 와 위상의 기울기로부터 계산된 거리(L) 1.87 mm 이 측정 결과로 얻어 졌다. 주파수 분해능은 30.2 GHz 이었으며 주파수 분해능은 데이터 획득 시간을 늘림으로써 향상 될 수 있다. 또한 모호성 없이 측정할 수 있는 영역은 나이키스트 샘플링 이론에 의해 주파수 분해능이 좋아 질수록 개선될 수 있다. 펄스 레이저의 반복률이 100 MHz 경우 0.75 m 까지 확장이 가능하다. 이러한 멀티헤테로다인 기반의 절대거리 측정은 높은 분해능으로 긴 거리를

모호성 없이 빠른 측정이 가능하기 때문에 초정밀 생산기술 또는 위성간 거리측정과 같은 미래 우주프로젝트 등에 적용이 가능하며 스펙트럼의 흡수선 분석과 함께 LIDAR 시스템에도 적용이 가능 할 것으로 예상된다.

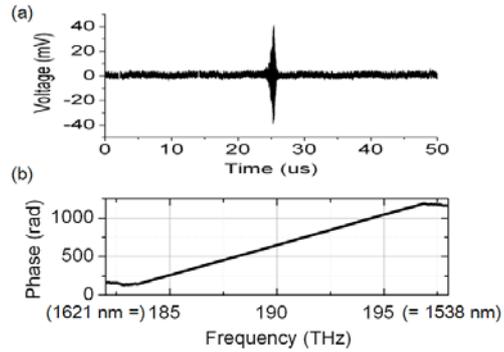


Fig. 2 The results of multi-heterodyning. (a) Time domain multi-heterodyned data. (b) By performing FFT time domain multi-heterodyned data, the phase and amplitude are obtained. From the slope of the phase the distance is be measured.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 도약연구사업과 우주기초핵심기술개발 사업의 지원을 받아 KAIST 극초단광학 초정밀기술연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Seung-Woo Kim, "Combs rule," NATURE PHOTONICS, **3**, 313-314, 2009.
2. Ki-Nam Joo and Seung-Woo Kim, "Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser," Optics Express, **14**, 5954-5960, 2006.
3. Albert Schliesser, Markus Brehm and Fritz Keilmann, "Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing," Optics Express, **13**, 9029-9038, 2005.
4. I. Coddington, W. C. Swann, L. Nenadovic and N. R. Newbury, "Rapid and precise absolute distance measurements at long range," Nature Photonics, **3**, 351 – 356, 2009.