펄초 레이저를 이용한 고분해능 비행시간법 절대거리 측정

DOI: 10.3938/PhIT.19.058

김승우·이주형·김영진·이근우·이상현

High-resolution Time-of-flight Measurement Using a Femtosecond Laser

Seung-Woo KIM, Joohyung LEE, Young-Jin KIM, Keunwoo LEE and Sang-Hyun LEE

The time-of-flight (TOF) principle measuring the traveling time of long propagating pulse between instrument and objective has been most fundamental and widespread technology in absolute distance measurement owing to its superior advantages in terms of maximum measurable range up to hundreds of kilometer. The achievable resolution of conventional TOF measurement, however, reached only a few sub-millimeters at best. This limitation attributes to direct conversion of optical pulse to microwave pulse in detection part of which state-of-the-art bandwidth is available at picosecond range. To overcome limited resolution of conventional TOF, we exploit a way to directly extract distance information in optical domain by using a femtosecond pulse laser and nonlinear characteristics of second harmonic generation crystal. The timing difference between femtosecond (fs) pulses is traced with precision of less than 1 fs, which corresponds to a sub-micrometer resolution in distance. The high resolution performance is

evaluated in ambient environment and shows 150 nm resolution over 0.7 km. An indirect analysis based on Allan deviation using lock-in control signal shows achievable resolution could reach up to 1 nm in free-space environment.

서론

오늘날의 반도체, 디스플레이, 초고속 정보 통신을 포함한 첨단산업을 주도하는 핵심 기술들은 하드웨어 면에서 초정밀(ultra-precision)이라는 특성을 공통으로 하고 있다. 이에 요구되는 정밀도는 수백 밀리미터의 대영역에서 나노미터 단위의 기능을 구현하는 극초정밀의 수준에 이르고 있다. 이러한 대영역 극초정밀에 대한 기술적 수요는 수~수십 나노미터 수준의 빛의 파장 크기 이하의 영역에서 구현될 수 있는 측정 기술을 요구하고 있으나 기존의 레이저 거리측정기술은 측정 변위를 누적하여 거리를 측정하는 상대거리 간섭계의 원리를 기본으로 하므로 대영역 변위측정시 발생하는 오차들이 누적되어 나타난다. 온도나 공기유동과 같은 주변 환경의 변화에 의한 오차와 변위계산에서 발생한 오차들이 측정변위와 함께 누적될 수 있으며, 특히 이러한 환경의 영향은 측정거리가 길어짐에 따라 비례하여 커지므로 측정영역의 확장에 있어서 중요한 한계로 작용한다. 또 하나의 문제점은 공간상의 장애물로 인해서 측정이 중단되면, 그 동안의 거리변화 정보를 누적할 수 없으므로 거리측정정보를 잃어버리게 된다는 점이다.

이러한 한계를 극복하기 위한 절대거리 측정기술은 기존의 레이저 변위 간섭계와는 달리 측정물체의 이동 및 측정변위의 누적 없이 한 번에 거리를 측정하는 기술을 말한다. 절대거리 간섭계는 오차의 누적이 없으며, 과거의 측정결과가 현재의 측정결과에 영향을 주지 않는다. 이와 같은 장점은 초정밀생산공정의 대영역화 요구에 따라 그 중요성이 증대되고 있으며, 최근에는 미래 거대우주 프로젝트의 하나인 위성군 편대비행(formation flying of multiple-satellite)의 운용을 위한 핵심기술로 그 적용 범위를 확장하고 있다.

위성군 편대비행 운용은 한 대의 대형위성 대비 낮은 비용과 기존에 구현이 어려웠던 다양한 임무를 수행할 수 있는 장점으로 미항공우주국(NASA) 및 유럽항공우주국(ESA)에서 활발히 연구 개발되고 있다.^[1] 대표적인 위성군 프로젝트인 다윈

저자약력

김승우 교수는 Cranfield Univ.(UK) 박사(1984)로서, 한국과학기술연구소 연구원(1984-1985)을 거쳐 현재 KAIST 기계공학과 교수(1985-현재)로 재직 중이며 KI 광기술연구소 소장(2007-현재), KAIST 기계항공시스템학부장(2008-현재), 한국정밀공학회 부회장(2008-2010), 한국정밀공학회 회장(2010-현재)을 맡고 있다. (swk@kaist.ac.kr)

이주형은 KAIST 석사(2007)로서 KAIST 박사과정 중에 있다. (joohyung.lee@kaist.ac.kr)

김영진 박사는 KAIST 박사(2008)로서, KAIST 광기술연구소 박사후연구원(2008-2010)을 거쳐 현재 KAIST 광기술연구소 연구교수로 재직 중이다. (y.j.kim@kaist.ac.kr)

이근우는 KAIST 석사(2009)로서 현재 KAIST 박사과정 중에 있다. (kwl@kaist.ac.kr)

이상현 연구원은 경북대학교 석사(1994)로서 한국타이어 중앙연구소 연구원(1995)을 거쳐 1995년부터 현재 KAIST 인공위성연구센터 연구원으로 재직 중이다. (shlee@satrec.kaist.ac.kr)

(Darwin)은 다수의 위성을 동시에 쏘아 올린 후 합성개구 이미징(synthetic aperture imaging)을 통해 기존의 한대의 위성에서 얻을 수 없었던 고분해능 이미징을 가능하게 하고 이를 통해 지구와 같은 별을 찾는 것을 주목적으로 하고 있으며 LISA(Laser interferometer for satellite antenna)의 경우 세대의 위성을 이용하여 우주공간의 중력과 검출을 통한 일반상대성이론의 검증을 목적으로 하고 있다.^[1,2] 이러한 위성군 편대비행 프로젝트에서는 각 위성의 상대자세제어 및 전체 위성군의 형태를 유지하기 위한 위성간 실시간 정밀거리측정이 핵심기술로 분류되고 있으며 수백 m의 측정거리에서 수 nm 수준의 거리측정분해능이 요구되고 있다. 이를 위해 기존의 다이오드 레이저를 이용한 주파수 천이 간섭계, 다파장 간섭계 등의 다양한 거리측정 기술이 연구되고 있으며 최근에는 펄스 레이저를 이용한 절대거리측정 기술들이 앞서 제시한 성능을 만족시키기 위해 집중적으로 연구되고 있다.^[3]

펄스 레이저를 이용한 고분해능 비행시간법측정

기존의 비행시간법(time-of-flight) 거리측정은 펄스가 발사된 기준 시점과 측정대상물에서 반사되어 되돌아온 펄스의 검출시점 사이의 시간차를 측정하여 거리를 측정하는 원리이다. 이러한 비행시간법 거리측정은 수 m ~ 수백 km 영역의 긴 영역에서 거리 모호성(distance ambiguity) 없이 거리를 측정할 수 있다는 장점이 있고 비교적 구현이 방법이 간단하기 때문에 조선산업, 항공산업과 같은 거대제조업 분야에서의 3차원 형상 측정을 비롯하여 토목, 건축, 도시개발에 필요한 지상기반(groundborne) 또는 비행체기반(airborne)의 측지측량(geodetic survey) 분야에 적용되고 있으며 특히 인공위성 레이저 추적 시스템(SLR), 레이저 고도계(laser altimeter) 및 인공위성간의 거리측정과 같은 우주개발 분야에도 다양하게 응용되고 있다. 하지만 이러한 기존 방식의 비행시간법 측정은 펄스간 시간차 측정을 위해 광 펄스를 전기적인 펄스신호로 변환하는 과정에서 광검출기 및 전자회로의 수 ps 수준의 반응속도에 제한을 받게 되며 이로 인해 거리 측정 분해능이 수 mm 수준으로 제한되는 한계점이 있다.^[4]

본 연구에서는 장거리측정 시 분해능을 수 μm 이하로 가져가기 위해 10^{15} 초 단위의 좁은 펄스 폭 및 높은 첨두출력(peak power)을 가지는 펄스 레이저와 펄스 레이저의 시간차를 정밀하게 측정하기 위한 광상호상관(optical cross-correlation)을 이용하여 고분해능 비행시간법 절대거리측정원리를 Fig. 1과 같이 구현하였다.

기준펄스와 측정펄스간의 시간차는 비행시간법에서 거리정보를 담고 있으며 이를 정밀하게 측정하기 위해 광상호상관기내

Fig. 1. High-resolution time-of-flight measurement using a femto-second laser. (a) Timing detection by optical cross-correlation. (b) Experiment configuration. Abbreviations are EDFA, erbium-doped fiber amplifier; L, lens; PBS, polarization beamsplitter; HWP, half-wave plate; QWP, quarter-wave plate; M, mirror; M_{REF} (M_{MEA}), reference (target) mirror; PD, photodetector; BW, birefringent wedge; DM, dichroic mirror; f_r , pulse repetition rate.

의 이차조화파생성결정(second harmonic generation crystal)에 입사시키게 된다. 이때 두 펄스간의 시간차에 따라 서로 다른 광강도(intensity)의 이차조화파펄스가 생성되게 되는데 Fig. 1(a)의 삽입된 그림과 같이 두 펄스가 가까워지면 높은 광강도를 가지는 이차조화파가 발생하게 되고 두 펄스가 멀어지면 낮은 광강도의 이차조화파가 발생하게 된다. 이러한 이차조화파의 광강도 측정을 통한 펄스간 시간차 측정은 기존의 비행시간법에서 광 펄스를 직접적으로 검출 시 제한되는 수 ps 수준을 넘어선 1 fs 이하의 분해능 구현이 가능하다. 하지만 생성된 이차조화파의 광강도는 펄스간의 시간차 이외에도 사용되는 광원의 광강도, 측정펄스의 공기중에서의 감쇄(attenuation) 그리고 측정대상물의 반사율에 따라 달라질 수 있기 때문에 균형잡힌 광상호상관기법(balanced optical cross-correlation)을 이용하여 이러한 효과를 보상하였다.^[5] 이러한 광상호상관기에서 검출된 신호를 이용한 광원의 반복률의 피드백제어(feedback control)를 통해 기준펄스와 측정펄스간의 시간차를 일정한 값에 잠금(locking) 가능하며 이때 원자시계에 참조된 주파수 측정기(frequency counter)를 이용하여 광원의 반복률을 측정하게 되면 주파수 표준에 소급된 거리측정이 가능하게 된다.^[6] 펄스 레이저와 광상호상관기 그리고 장거리 측정을 위한 어븀첨가광섬유증폭기(Er-doped fiber amplifier)와 빔 확장기(beam expander)를 이용하여 구성된 실험장치는 Fig. 1(b)와 같다.

구현된 고분해능 비행시간법 절대거리측정기의 장거리에서

Fig. 2 Demonstration of long-distance measurement. (a) The target mirror was placed at a remote building located at 0.7 km from the apparatus. (b) Distance measurement for 80 seconds (c) Magnified plot of the red box in b. (d) Fourier-transformed spectrum of b.

의 분해능 검증을 위하여 KAIST 캠퍼스 내 약 0.7 km의 거리를 측정하였다. 측정거울을 PZT 위에 설치하였으며 150 nm의 진폭과 10 Hz의 주파수로 흔들어주면서 Fig. 2(b)와 같이 실시간으로 거리를 측정하였다. 이때 80초 동안 약 40 μm 의 거리측정 천이(drift)가 있었으며 이는 공기유동 또는 실험장치와 측정대상물이 서로 다른 건물에 위치함에 따른 진동과 같은 외부환경요인이 주요 원인이다. Fig. 2(b)에 표시된 빨간색 직육면체로 부분을 확대하면 측정거울을 150 nm 진폭으로 흔들어진 부분이 명확하게 측정되었으며 80초 동안 측정된 거리측정결과를 푸리에 변환하였을 때 거울을 흔들어진 10 Hz의 주파수 성분이 Fig. 2(d)와 같이 확인되었다.

비행시간법 절대거리측정기의 분해능 한계를 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 광상호상관기에서 검출된 잠금제어신호의 알란 편차(Allan deviation)를 이용하여 분해능을 측정거리 및 평균 시간(averaging time)에 따라 분석하였다. 앞서 실험한 0.7 km의 측정거리에서 150 nm 수준의 분해능은 5 ms의 평균 시간을 통해 측정되었으며 이는 Fig. 3(b)에서 분석된 결과와 일치한다. 외부왜란이 없는 우주환경과 같은 진공상태에서는 광원 또는 광검출기가 가지는 잡음(noise)에만 영향을 받기

Fig. 3. Evaluation of measurement precision. (a) Jitter signals at various target locations. (b) Allan deviation of analysis for each target location.

때문에 10 ms 수준의 평균시간에서는 8.7 nm 그리고 1초의 평균시간에서는 1.1 nm 수준의 분해능 도달이 가능하다.^[6]

맺음말

본 기고에서는 미래 거대우주 프로젝트인 위성군 편대비행의 핵심기술로 분류되는 장거리 정밀절대거리측정기술의 구현을 위한 펄스 레이저를 이용한 비행시간법 절대거리 측정에 대한 연구결과를 기술하였다. 이는 펄스 레이저의 좁은 펄스 폭 및 광학비선형효과를 이용한 높은 분해능의 펄스 간 시간차 측정을 통해 기존의 장거리측정 시 제한되던 수 mm의 분해능을 1 μm 이하로 향상시켰다. 또한 이를 장거리 측정에서 실험적으로 입증하고 공기유동과 같은 외부왜란 요인이 없는 진공상태에서는 1 nm의 분해능의 성능구현이 가능함으로 증명하였다. 이러한 절대거리측정기는 기존의 장거리측정이 적용되는 조선산업, 항공산업, 국방기술 등의 대영역 정밀공학분야뿐만 아니라 위성군 편대비행과 같은 미래거대우주프로젝트에 적용하여 천문학, 일반상대성원리 증명과 같은 기초과학 분야에 중요한 핵심기술로 자리잡을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] P. Gondoin, Nat. Photon. **1**, 605 (2007).
- [2] R. Dolei, *et al.*, Classical and Quantum Gravity **20**, S99 (2003).
- [3] S.-W. Kim, Nat. Photon. **3**, 313 (2009).
- [4] J. Ye, Opt. Lett. **29**, 1153 (2004).
- [5] J. Kim, J. Cox, J. Chen and F. X. Kartner, Nat. Photon. **2**, 733 (2008).
- [6] J. Lee, Y.-J. Kim, K. Lee, S. Lee and S.-W. Kim, Nat. Photon. **4**, 716 (2010).