

# 펄초 레이저 기반 실시간 고분해능 시간비행법 거리측정 Real-time, high resolution time-of-flight distance measurement based on a femtosecond laser

\*이주형<sup>1</sup>, 김영진<sup>1</sup>, 이상현<sup>2</sup>, #김승우<sup>1</sup>

\*Joohyung Lee<sup>1</sup>, Young-Jin Kim<sup>1</sup>, Sanghyun Lee<sup>2</sup>, #Seung-Woo Kim<sup>1</sup> (swk@kaist.ac.kr)

<sup>1</sup>KAIST 극초단광학 초정밀기술 연구단

<sup>2</sup>KAIST 인공위성연구센터

Key words : femtosecond laser, distance measurement, time-of-flight, balanced optical cross correlator

## 1. 서론

펄스 레이저를 이용한 시간비행법 기반 거리측정은 광원에서 펄스가 방출되는 시점과 펄스가 피측정물에서 반사되어 돌아온 시점 사이의 시간을 측정함으로써 거리를 측정하는 원리이다. 이러한 시간 비행법 원리는 조선산업, 항공산업과 같은 거대제조업 분야에서의 3차원 형상 측정을 비롯하여 토목, 건축에 필요한 지상 기반(groundborne) 또는 비행체기반(airborne) 토지측량(geodetic survey) 분야 그리고 인공위성 레이저 추적 시스템(SLR), 레이저 고도계(laser altimeter) 및 인공위성간의 거리측정과 같은 우주개발 분야 등 다양하게 응용되고 있다. 하지만 최근 조선산업, 항공산업과 같은 거대제조업에서 생산성 향상을 위해 수 백 m의 측정 영역에서 수 mm 이하 분해능의 측정 수요가 증가하고 있으며 우주개발 분야의 경우 미항공우주국 및 유럽항공우주국을 중심으로 진행되고 있는 위성군 사업에서는 수 백 m의 측정 영역에서 수 십  $\mu$ m의 분해능으로 위성간 거리측정이 필요하다[1].

시간비행법 기반 거리측정의 경우 수 m ~ 수백 km 영역의 긴 영역에서 거리를 측정할 수 있다는 장점이 있으나 펄스간의 시간간격을 분해하기 위한 광검출기 반응속도가 수십 ps의 한계를 가지기 때문에 거리 측정 분해능이 수 mm 수준으로 제한되므로 긴 측정 영역에서 수 mm 이하의 측정 분해능을 요구하는 응용분야에 적용하는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 이러한 시간비행법 원리의 분해능 한계를 극복하기 위해 펄스간의 시간 간격을 수 fs 수준으로 분해 가능한 광상호상관기(balanced optical cross-correlator)[2]와 짧은 펄스폭을 가지는 펄초 레이저를 거리측정에 응용하고자 한다.

## 2. 기본 이론 및 구성

균형잡힌 광상호상관기는 펄스간의 시간간격을 정밀하게 분해(< 1 fs) 하기 위한 장치로 Fig. 1와 같이 이차 고조파 생성 크리스탈 (SHG crystal)인 PPKTP(Periodically poled potassium titanyl phosphate)와 균형잡힌 광검출기(balanced photo detector) 및 두 개의 이색거울(dichroic mirror)로 이루어진다.

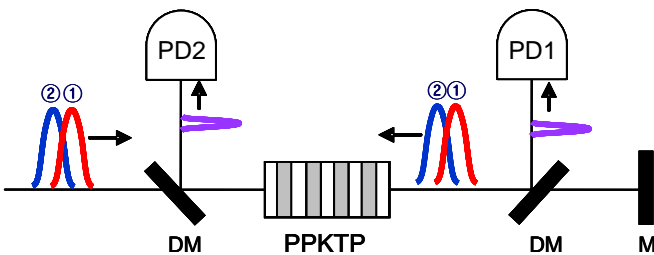


Fig. 1 Principle of balanced optical cross-correlator; DM: dichroic mirror, M: mirror, PD1&PD2: each port of balanced photo-detector

간섭계에서 입사된 편광이 서로 수직인 두 빛은 렌즈를 통해 PPKTP에 집광되며 이 때 펄스간의 중첩된 정도에 비례한 이차고조파가 생성된다. 이색거울에 의해 이차고조파는 균형잡힌 광검출기 중 하나의 광소자로 입사되고 기존의 두 개의 서로 수직인 펄스는 이색거울을 통과하게 된다. 이 빛은 거울에 반사되어 다시 PPKTP에 입사되며 이 경우에도 두 펄스의 중첩정도에 비례하여 이차고조파가 발생하게 되며 이는 이색거울에 반사되어 균형잡힌 광검출기의 다른 광소자로 입사된다.

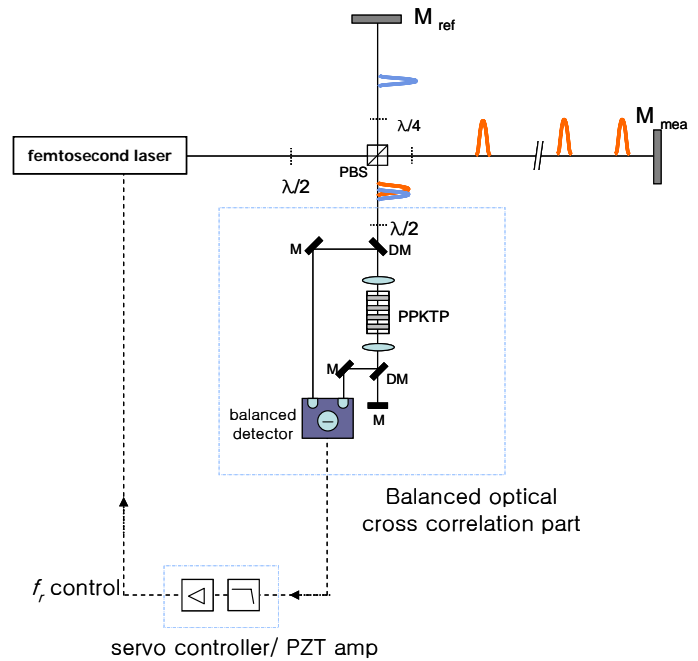


Fig. 2 Schematic diagram of balanced optical cross-correlator based distance meter; PBS: polarized beam splitter, DM: dichroic mirror, M: mirror

본 연구에서 사용한 PPKTP는 편광상태에 따라 크리스탈내의 군굴절률(group velocity)가 서로 다르게 되는데 Fig. 1와 같이 첫 번째 통과 시 ① 편광상태의 펄스가 앞서 있을 경우 두 번째 통과 시에는 크리스탈의 군굴절률 차로 인해 ②편광상태의 펄스가 앞서게 된다. 균형잡힌 광검출기에서는 두 광소자에 입사된 이차고조파의 광강도(intensity)의 차를 출력하기 때문에 간섭계에서 입사된 두 펄스간의 시간차가 크리스탈 내의 군지연(group delay)의 반에 해당한다면 첫 번째 통과 시 두 펄스간의 시간차와 두 번째 통과 시 두 펄스간의 시간차가 정확히 같게 되어 두 펄스가 첫 번째 통과할 경우와 두 번째 통과 시 발생하는 이차고조파의 광강도가 정확히 같게 되므로 0의 신호를 출력하게 된다. 만약 ① 편광상태의 펄스가 ②와 편광상태의 펄스에 비해 군지연의 반에 해당하는 값 이상으로 앞서 있다면 0보다 큰 출력신호를 얻게 되며 반대로 ① 편광상태의 펄스가 군지연의 반보다 작게 앞서있거나 ② 편광상태의 펄스가 오히려 앞서 있다면 음의 신호를 얻게 된다.

따라서 두 펄스간의 시간차에 따라 균형잡힌 광검출기의 출력이 Fig. 3의 실선과 같이 S자 형태의 곡선을 보이게 된다.

본 연구에서 제안하는 거리측정기는 Fig. 2와 같이 주파수 안정화된 광원, 간섭계, 펄스간의 시간측정을 위한 균형잡힌 광상호상관기 그리고 광원의 반복률 제어를 위한 제어부로 구성된다.

간섭계는 마이켈슨(Michelson) 형태이며 편광광분할기(polarized beam splitter)를 통해 서로 수직인 두 편광상태의 빛이 각각 기준 거울과 측정 거울에 반사된 후 균형잡힌 광상호상관기로 입사되게 되어 펄스간의 시간 간격을 측정하게 된다. 이 때 균형잡힌 광상호상관기를 이용하여 출력 신호를 얻기 위해서는 기준거울과 측정거울에서 반사된 두 펄스 사이의 중첩이 필요하며 이는 펄스초 레이저의 반복률 조절을 통해 중첩이 가능하다[3].

본 연구에서는 펄스초 레이저의 반복률 조절을 통한 펄스의 중첩 후 광원의 반복률(repetition rate)를 미세(fine) 제어함으로써 Fig.3의 실선으로 나타낸 S자 형태의 곡선의 0에 해당하는 부분에 출력신호를 잠금하고자 한다. 이때 기준거울과 측정거울 사이의 거리 차는 광원의 반복률 측정으로부터 계산될 수 있으며 이는 다음 식(1)과 같다.

$$\Delta L = m \frac{c}{2f_r n} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\Delta L$ 은 두 거울 사이의 거리 차,  $c$ 는 빛의 속도  $f_r$ 은 광원의 반복률이다. 이 때 광원에서는 연속적으로 펄스가 방출되기 때문에 기준거울과 측정거울에서 반사된 두 펄스가 중첩되더라도 측정거리가 증가함에 따라 모호성이 발생하게 되며 이를 해결하기 위해서는 식 (1)의  $m$  값을 결정하는 것이 필요하다. 이는 펄스 중첩을 위해 반복률 조절시 측정거리에 따라 펄스 간의 시간 간격의 변화량을 통해 결정할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} 2\Delta L / c &= m / f_{r1} - \Delta t_1 \\ 2\Delta L / c &= m / f_{r2} - \Delta t_2 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $f_{r1}$ 과  $f_{r2}$ 는 각각 반복률 조절 전과 반복률 조절 후의 값이며  $\Delta t_1$ 과  $\Delta t_2$ 는 각각 반복률 조절 전과 조절 후의 펄스간의 시간간격이다. 이 때  $m$  값 결정을 위한 펄스간의 시간 측정은 반응시간이 수ns 수준의 일반적인 광검출기로 충분히 결정 가능하다.

본 연구에서 제안하는 균형잡힌 광상호상관기 기반의 거리측정기는 수 fs 수준으로 두 펄스사이의 시간 간격 잠금이 가능하다고 했을 때 수  $\mu\text{m}$  이하의 거리측정 분해능을 기대할 수 있다. 측정 영역의 경우 기준 거울과 측정거울에서 반사된 두 펄스사이의 시간 간격을 비간섭성(incoherent) 방법으로 측정하기 때문에 광원의 가간섭성(coherence)에 영향을 받지 않게 되므로 이론적으로 최대측정거리에 제한이 없다. 또한 균형잡힌 광검출기의 각각의 광소자에서 검출되는 신호의 차를 이용하기 때문에 측정펄스 또는 기준펄스에서의 광강도 잡음(noise)에 둔감하며 두 펄스 사이의 시간 간격을 일정한 값에 잠금하므로 주기오차(cyclic error)가 발생하지 않는다. 한편 측정값으로부터 거리값 계산을 위한 복잡한 후처리 과정이 없으므로 빠른 반복률 조절을 통해 실시간 거리측정이 가능하다.

### 3. 실험결과

본 연구에서는 광원으로 1550 nm의 중심파장, 60 nm의 대역폭 그리고 150 fs의 펄스폭을 가지는 광섬유 펄스초 레이저를 이용하였으며 균형잡힌 광상호상관기 구현을 위해 100 nm의 준위상정합(quasi phase matching) 대역폭을 가지는 4 mm의 길이의 PPKTP를 이용하였다. 다음 Fig. 3는 측

정 거울의 이동을 통해 기준펄스와 측정 펄스간의 시간 간격을 조절하면서 균형잡힌 광상호상관기의 출력신호를 측정 한 결과이다.

점선으로 표시된 부분은 균형잡힌 광검출기의 각각의 광소자에서 출력된 신호곡선이다. 이 때 PPKTP 내의 편광 상태에 따른 군굴절률차이에 의한 군지연차이에 해당하는 시간간격으로 두 곡선이 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다. 실선으로 표시된 신호는 두 곡선의 차에 해당하는 S자 모양의 곡선이고 이 때 반복률 조절을 통한 출력신호의 잠금을 위한 제어신호의 기울기가 -6 mV/fs임을 확인하였다.

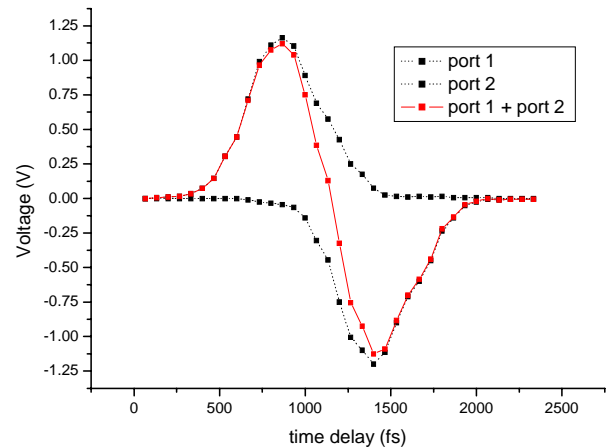


Fig. 3 Output signal of balanced optical cross-correlator; black dotted curve: output signal for each port, red curve: balanced output signal

### 4. 결론

본 연구에서는 균형잡힌 광상호상관기를 이용한 펄스초 레이저기반 거리측정기를 제안하고 광상호상관기를 구현하였으며 측정거리를 광원의 반복률에 잠금하기 위한 제어신호를 획득하였다. 이 거리측정기는 비간섭성(incoherent) 원리를 이용하여 측정하기 때문에 최대 측정 거리에 제한이 없고 1  $\mu\text{m}$  이하의 거리측정 분해능이 기대된다. 또한 측정 펄스 및 기준 펄스의 광강도 잡음에 둔감하고 주기오차가 발생하지 않으며 복잡한 후처리 과정 없이 빠른 반복률 조절을 통해 실시간 거리 측정이 가능하다. 제안된 거리측정기는 거리측정 이외에도 피측정물 또는 광원이 통과하는 매질에 의한 광원의 스펙트럼 변화를 통한 분광정보를 분석하여 대기 및 해양의 오염물질 농도 분포 측정, 정확한 날씨예측, 수목 및 생식 분포 측정과 같은 다양한 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구는 교육과학부 우주원천기초기술과제의 지원을 받아 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. PG Halverson, A Kuhnert, J Logan, "Progress Towards Picometer Accuracy Laser Metrology For The Space Interferometry Mission "- International Conference of Space Optics, ICSO Dec, 2000
2. J.Kim, J.Chen, Z.Zhang, F.N.C Wong, and F.X. Kaertner, "Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross correlator", Opt. Lett, V.32, 1044
3. J.Ye, "Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe", Opt. Lett, V29, 1153