

# 펨토초 레이저를 이용한 위성 레이저 거리 측정 Satellite Laser Ranging using a femtosecond pulse laser

\*진종한<sup>1</sup>, 이상현<sup>1,2</sup>, 김경희<sup>2</sup>, #김승우<sup>1</sup>

\*J. Jin<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>1,2</sup>, K. H. Kim<sup>2</sup>, #S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> KAIST BUPE 연구단, <sup>2</sup> KAIST 인공위성연구센터

Key words : Distance measurement, Satellite Laser Ranging (SLR), Ultra-short pulse laser

## 1. 서론

위성레이저 거리 측정(Satellite Laser Ranging, SLR)은 인공 위성의 정밀 궤도 결정 및 고도 결정 등에 유용하게 사용되고 있으며, 최근에는 GPS의 정밀 교정을 위해서 여러 지상관측소에서 여러 인공위성까지의 거리를 측정하여 위성 간의 혹은 지상관측소 간의 기준 주파수 시계의 교정 작업을 위한 갈릴레이 프로그램 등이 국제 협력으로 운영되고 있다.

위성과 지상관측소 사이의 거리를 측정하는 위성 레이저 거리 측정법은 1966년부터 펄스 레이저 관련 연구로부터 미국, 프랑스, 독일 등에서 시작되었다. 초창기 위성 레이저 거리 측정에 사용된 광원은 루비(Ruby) 레이저이며, Q-스위칭 방법으로 20 ns의 펄스 폭을 갖고 1 Hz의 반복률을 갖는 펄스를 생성하였다. 이 때 거리 측정 분해능은 대략 1 m 수준이었다. 그 이후 계속 측정 분해능이 향상되어 현재는 정규점(Normal Point) 기준으로 1mm 수준을 구현하고 있으며, 광원은 Nd:YAG 레이저가 널리 사용된다. 이는 중심파장이 532 nm이며, 펄스폭은 작게는 수십 ps에서 크게는 140 ps을 갖으며, 수 Hz에서 최대 2 kHz의 반복률로 발진한다.

이런 광원의 펄스 폭, 반복률, 광원의 세기 등은 위성 레이저 거리 측정의 측정 분해능과 직접적으로 연관이 있으며, 본 연구는 모드 잠금 방법으로 780 nm의 중심파장으로 10 fs 수준의 펄스폭과 80 MHz의 반복률을 갖는 펨토초 레이저를 위성 레이저 거리 측정법에 적용하고자 한다. 좁은 펄스 폭을 이용하여 향상된 시간 측정 분해능을 구현할 수 있고, 높은 첨두 세기를 통해 좋은 S/N비의 신호를 해석하여 측정 분해능 향상을 꾀할 수 있으며, 넓은 광원의 대역폭은 대기 환경 분포의 측정 등의 정보를 또한 얻을 수 있을 것으로 예측된다. 본 논문에서는 앞서 언급한 위성 레이저 거리 측정법에 펨토초 레이저를 광원으로써의 적용에 대한 가능성을 타진해 보고자 한다.

## 2. 펨토초 레이저

펨토초 레이저는 증폭 매질인 티타늄 사파이어(Ti:Sapphire)가 400 ~ 600 nm에 이르는 넓은 흡수 대역과 650 ~ 1100 nm에 이르는 넓은 방출대역을 갖기 때문에 동시에 많은 수의 주파수 모드들이 발진한다. 본 연구에서 고려하고 있는 펨토초 레이저는 증폭 매질의 대역폭,  $\Delta\nu$ 가 중심파장 780 nm에서 50 nm(FWHM)이고, 주파수 모드간 간격이 80 MHz이므로, 동시에 발진하는 주파수 모드의 수는 대략  $3 \times 10^5$  개이다. 보통의 경우 이 모드들은 독립적으로 진동하지만 외부의 수단에 의해 이들을 결합시키고 위상을 잠금(lock)시킬 수 있으며, 이런 모드 잠금(mode-locking) 방법을 사용하면 펄스 형태의 빛을 발진시킬 수 있다. Fig. 1(a)와 같이 발진하는 주파수 모드들 간의 모드 동기(mode-lock)된 경우 펄스 형태로 발진하는 것을 볼 수 있으며, Fig. 1(b)와 같이 주파수 모드의 위상들이 독립적으로 진동할 경우 백색 잡음(white noise)처럼 발진하는 것을 볼 수 있다.

모드 잠금된 펨토초 레이저에서 발진된 펄스는 공진기 내부의 증폭 매질을 지나면 펄스의 에너지에 따른 비선형

효과로 공진기 내부에서 시간에 따른 펄스의 위상이 천이되는 현상을 보인다. 비선형 위상 천이(nonlinear phase shift)는 넓은 스펙트럼을 갖는 펄스가 공진기 내의 여러 분산 재료(dispersive material)에 의해 군속도 분산(group velocity dispersion, GVD), 즉 군속도(group velocity)와 위상속도(phase velocity)의 차이에 의해 생겨나게 된다. 이를 시간 영역에서 Fig. 2와 같이 고려한다면, 펄스와 펄스 사이의 시간 간격이  $T_r (=1/f_r)$ 이고, 비선형 효과가 전혀 없다면 혹은 완전히 보상된다면 펄스의 첨두와 펄스 내부의 위상 첨두는 같으며, 비선형 효과가 생기게 되면 펄스 첨두와 위상의 첨두가 위상천이(phase shift)량,  $\Delta\Phi$ 만큼 다르게 된다.

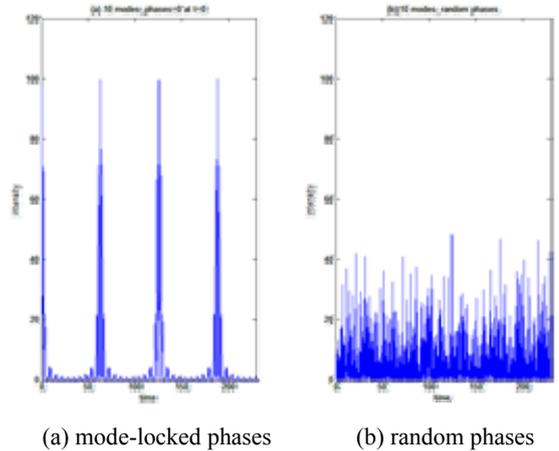


Fig. 1 Illumination of the influence of the phase relation between frequency modes of the optical comb

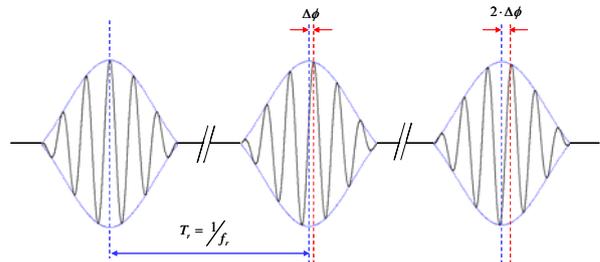


Fig. 2 Phase shift due to group velocity dispersion, GVD

펨토초 레이저의 주파수 모드는 Fig. 3과 같이 우리가 흔히 사용하는 빔(comb)과 비슷하여, 광주파수 대역의 빔이라는 이름으로 광 빔(optical comb)이란 표현을 사용한다. 광 빔의  $i$  번째 주파수 모드,  $f_i$ 는 Fig. 3과 같이 펄스와 펄스 사이의 시간 간격의 역수인 반복률,  $f_r$ 과 공진기 내부에서 생기는 분산에 의한  $n$  번째 주파수,  $f_0$ 로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_i = i \cdot f_r + f_0 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

일반적으로 빛의 주파수는 300 ~ 400 THz이며, 반복률의 주파수,  $f_r$ 와  $n$  번째 주파수,  $f_0$ 는 수십 MHz 수준이므로, 아주

안정화된 원자 시계를 통해 라디오 주파수 (radio frequency) 영역의 두 주파수의 안정화를 통해 수백 THz 에 해당하는 높은 광 주파수를 안정화할 수 있다. 이런 안정화된 펄토초 레이저의 광 빛은 정밀 광주파수 측정 및 분광학에서 널리 사용된다<sup>1</sup>.

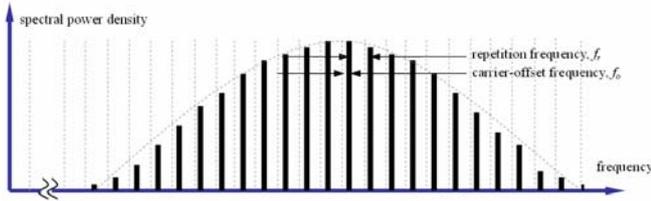


Fig. 3 optical comb of a femtosecond pulse laser

### 3. 위성 레이저 거리 측정

위성 레이저 거리 측정(SLR, Satellite Laser Ranging)은 지상으로부터 펄스 레이저가 발사된 시간과 위성에 부착된 레이저 반사경으로부터 되반사한 광자가 지상 관측소의 검출기에 의해 검출된 시간을 측정하여, 지상 관측소로부터 위성까지의 거리를 정밀하게 측정하는 기술이다. 위성 레이저 거리 측정 시스템은 Fig. 4 와 같이 크게 지상 관측소의 지상시스템과 위성에 부착되는 레이저반사경으로 구성된다. 또한 지상시스템은 레이저를 발진하는 레이저 광학부 (laser optics), 발진된 레이저를 발사하고 광자를 수신하는 망원경부 (telescope), 수신된 신호를 감지하는 검출기부 (detector), 및 레이저 발진시간과 반사경으로부터 반사된 신호가 도착하는 시간을 측정하는 시간 측정부 (timing system)로 크게 구분된다<sup>2,3</sup>.

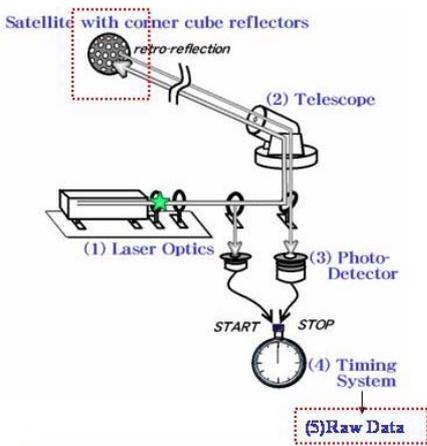


Fig. 4 Schematics of satellite laser ranging

현재 위성 레이저 거리 측정 방법에서 널리 사용되고 있는 ps 펄스 레이저의 펄스 폭은 10 ps 수준이다. 펄토초 레이저의 경우에는 10 fs ~ 120 fs 의 수준으로 아주 짧은 펄스 폭을 갖기 때문에 시간 분해능이 높아지며, 따라서 정밀도 또한 높아질 것으로 기대한다. 하지만 대기에서의 산란과 분산 효과에 의해 펄스 폭이 늘어나는 문제가 생길 수 있어 이를 고려해야 한다.

반복률의 경우에는 펄토초 레이저가 250 kHz ~ 1 GHz 로 기존의 ps 펄스 레이저에서 얻을 수 있는 2 kHz 보다 훨씬 빠르기 때문에 단위 시간당 들어오는 펄스의 수가 많아져 훨씬 높은 S/N 비를 갖는 신호를 획득할 수 있으며, 이 역시 정밀도를 향상 시킬수 있을 것으로 기대한다.

하지만 위성과 지상 관측소 사이의 거리가 수백 km 의 긴 거리이기 때문에 빛의 세기가 충분해야 한다. 현재 ps 펄스 레이저의 경우에는 532 nm 의 단파장으로 대략 수십

mJ 의 에너지를 갖는다. 펄토초 레이저의 경우에는 780 nm 의 중심파장을 갖으며, 에너지는 훨씬 낮은 수준이다. 하지만 펄토초 레이저는 여러 단에 걸쳐 증폭이 가능하기 때문에 대략 수 mJ 수준의 광 에너지를 얻을 수 있다.

그리고 펄토초 레이저를 사용함으로써 생기는 장점은 대역폭이 넓기 때문에 대기를 통과하기 전과 통과하고 난 후의 스펙트럼(spectrum)을 통해 대기 환경을 측정할 수 있으며, 이를 통한 정밀한 거리를 얻기 위한 교정을 수행할 수도 있다. 특히 펄토초 레이저의 중심 파장인 780 nm 의 대역은 지구 대기 환경에서 아주 낮은 흡수율을 갖는 흡수 대역이므로, 기존의 532 nm 단파장을 사용하는 것보다 더 많은 수의 광자를 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

Table 1 Comparison of light source of SLR

Item	ps pulse laser (state of the art)	fs pulse laser
amplification medium	Nd:YAG	Ti:Sapphire
pulse width	10 ps	10 fs ~ 120 fs
repetition rate	2 kHz	250 kHz ~ 1 GHz
maximum energy	~ mJ @ 532 nm	~ mJ @ 780 nm (after amplification)
wavelength	532 nm (1064 nm)	250 nm ~ 2500 nm (Broadband)

### 4. 결론

위성 레이저 거리 측정 방법은 10 ps 수준의 펄스 폭을 갖는 532 nm 단파장 펄스 레이저를 이용하여 1 mm 의 측정 분해능으로 위성과 지상 관측소 사이의 거리를 측정하였다. 펄토초 레이저는 대역폭이 넓고 주파수 모드의 모드 잠금을 통해 10 fs 수준의 짧은 펄스 폭을 생성할 수 있다. 이는 시간 분해능을 향상시켜주며, 동시에 수십 MHz 의 반복률로 높은 S/N 비의 신호를 얻을 수 있다. 펄스는 지구 대기를 통과하면서 많은 흡수가 생기므로 높은 에너지가 필요하면, 펄토초 레이저의 경우에는 여러 단의 증폭을 통해 mJ 수준의 펄스 에너지를 얻을 수 있고 동시에 흡수가 적은 780 nm 대역의 중심파장을 사용함으로써 더 많은 광자를 통한 측정이 가능할 것으로 기대된다. 그리고 펄토초 레이저의 넓은 대역폭을 통한 대기 환경 측정이 가능하게 되어, 거리 측정 뿐만 아니라 대기 환경 분석까지도 가능할 것으로 기대한다. 하지만 펄토초 레이저를 사용함에 있어 생기는 검출기 개발의 문제나 각종 대기 분산에 따른 거리 정보의 왜곡 문제들도 동시에 고려해야 할 것이다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering) 연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Jin J., Kim Y.-J., Kim Y., Kang C.-S., Kim S.-W., "Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser," *Opt. Exp.*, **14**(13), 5968-5974, 2006.
- Degnan, J.J, "Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review, *Contributions of Space Geodesy: Technology.*" AGU Geodynamics Series, **25**, 133-162, 1993.
- HU Jingfu, LI Xin, YANG Fumin, CHEN Wanzhen, AHANG Zhongping, "Calculation of distribution of effective reflection area for space-borne laser retro-reflector array," *Science in China Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy*, **47**(3), 330-337, 2004.