

거리 및 형상 측정을 위한 펨토초 레이저의 주파수 안정화

김영진*, 진종한, 김승우(KAIST 기계공학과)

Frequency Stabilization of Femtosecond Lasers for Dimensional Metrology

Young-Jin Kim, Jonghan Jin, Seung-Woo Kim (Dept. of Mech. Eng., KAIST)

ABSTRACT

A common feature in various methods of optical interferometry for absolute distance measurements is the use of multiple monochromatic light components either in sequence or in parallel at the same time. Two or multiple wavelength synthesis has been studied though its performance is vulnerable to the frequency instability of the light source. Recently continuous frequency modulation is considered a promising method with availability of wide band tunable diode lasers, which also have frequency instability errors. We can lock frequencies of these third-party light sources to the modes of the femtosecond laser which is stabilized to the precision of the standard radio frequency. To this end, we have stabilized all the modes of the femtosecond laser to the atomic frequency standard by using powerful tools of frequency-domain laser stabilization.

Key Words : Frequency stabilization (주파수 안정화), Frequency synthesizer (주파수 합성기), Femtosecond laser(펨토초 레이저), Absolute metrology (절대 측정)

1. 서론

절대 거리(absolute distance) 측정은 두 물체 간의 거리를 한 번의 측정으로 결정하는 것을 말한다[1]. 일반적으로 거리를 측정하기 위해 사용되는 호모다인(homodyne) 및 헤테로다인(heterodyne) 간섭계는 광원의 파장(wavelength)을 측정의 기준 자(ruler)로 사용하여 측정하기 때문에 높은 정밀도를 가진다. 그러나 거리 측정시 발생하는 위상(phase)의 모호성(ambiguity)을 극복하기 위해, 위상의 변화량을 적분하여 변위를 측정하므로 절대 거리 측정에서는 근본적인 한계를 지닌다. 절대 거리 측정에 적합한 방법으로 비행시간법(time-of-flight method)이나 세기 변조법(intensity-modulation)과 같은 방법들이 연구되었으나 이러한 방법들은 비교적 낮은 정밀도를 가지기 때문에 높은 정밀도를 요구하는 분야에서의 적용이 어렵다. 이후 제안된 두파장(two-wavelengths) 혹은 다파장(multiple-wavelengths) 간섭계는 주파수 불안정성(frequency instability)에 민감하다는 한계점을 가지고 있다[2]. 최근에는 주파수 변

조 (frequency tunable) 레이저 다이오드(laser diode)를 이용하여 연속적으로 주파수를 변조(modulation) 및 주사(scanning)하는 형태의 간섭계들이 연구되고 있으며[3][4], 이러한 형태의 간섭계에서도 고정밀도의 구현을 위해 주파수의 변조 혹은 주사량의 안정화 및 정확한 측정이 요구된다. 최근에 절대 광주파수 측정(absolute optical frequency measurement) 및 합성(synthesis) 분야에서 사용되는 주파수 안정화된 펨토초 모드록 레이저(frequency-stabilized femtosecond mode-locked laser)를 이용하면, 주파수의 안정도 및 정확도를 주파수 표준(frequency standard)에 해당하는 마이크로파(microwave) 영역의 원자시계(atomic clock)에 소급하여 측정 및 제어할 수 있기 때문에, 이러한 펨토초 레이저를 이용하면 절대거리 측정에서 필요로 하는 주파수의 안정화 및 정확한 측정을 수행할 수 있다[5].

펨토초 레이저는 주파수 영역에서 각 모드(mode)의 좁은 선폭(line width)과 큰 대역폭(bandwidth)으로 인해 간섭계에 적용할 경우, 단색(monochromatic)광 레이저 및 백색(white-light)광원과

는 다른 독특한 특성을 가진다. 주파수 변조 및 주사형 간섭계 이외에도, 펄스 간섭계(pulse interferometry)에 적용할 경우, 기존의 펄스 간섭계와는 달리 서로 다른 펄스 간의 간섭이 가능하며, 짧은 기준 광경로(optical path length)와 긴 측정 광경로 간의 간섭을 통해 긴 거리의 측정이 가능해진다.[6] 또한, 반복률(repetition rate)의 정수배에 해당하는 수많은 합성파(synthetic wavelength)들을 가지므로, 합성파 간섭계의 구성에도 강점을 가진다[7][8]. 이러한 펄스형 간섭계 및 합성파 간섭계에서는 반복률이 그 측정기준이 되므로 주파수 안정화는 필수적이다.

본 연구에서는 주파수 표준에 소급 가능한 절대 거리 및 형상의 측정을 목표로 펨토초 레이저의 주파수 안정화를 수행하였다. 안정화 방법으로는 주파수 영역 레이저 안정화법(frequency-domain laser stabilization)을 이용하였으며, 안정화 기준으로는 루비듐(Rb) 원자시계를 사용하였다.

2. 기본 원리

2.1 펨토초 레이저의 광빔

펨토초 모드록 레이저는 $Ti:Al_2O_3$ 와 같은 넓은 증폭대역(gain bandwidth)을 가지는 증폭매질(gain medium)의 특성과 공진기에서 발생하는 모든 종모드(longitudinal mode)간의 상대 위상(relative phase)을 고정시키는 모드록 기술을 이용하여 펨토초의 극히 짧은 펄스 폭을 가지는 반복적인 펄스 열을 만들어 낸다. 이러한 반복적인 펄스 열은 주파수 영역에서 Fig. 1 과 같이 일정한 간격을 가지는 모드들의 집합, 즉 광빔(optical comb)으로 구성된다. 광빔은 주파수 모드간 간격인 반복률, f_r 과 공진기 내에서의 군속도와(group velocity) 위상속도(phase velocity)의 차로 인해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 로 표현할 수 있으며, 주파수 영역에서 f_r 와 f_o 를 제어함으로써 모든 광빔의 주파수 성분을 정의할 수 있다. 광빔의 n 번째 주파수 모드는 아래의 식과 같이 f_r 와 f_o 의 식으로 쉽게 표현된다.

$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (1)$$

특히, f_r 와 f_o 는 마이크로파 영역에 위치하여 세슘(Cs)이나 루비듐(Rb) 원자시계와 같은 고안정도의 주파수 표준급의 시계에 안정화 될 수 있으므로, 이를 통해 전체 광빔의 주파수 성분을 안정화 기준 원자시계와 같은 정확도로 안정화 할 수 있다.

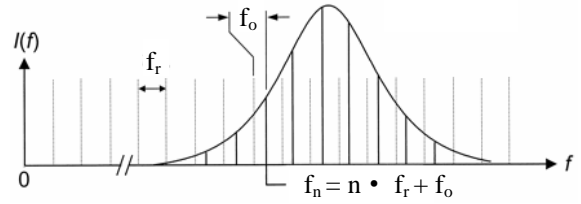


Fig. 1 Optical comb of the femtosecond laser

2.1 반복률 및 오프셋 주파수의 측정 및 제어

주파수 모드간 간격에 해당하는 반복률, f_r 은 펨토초 레이저의 펄스를 대역폭이 큰 광검출기(photo-detector)를 통해 측정함으로써 쉽게 얻을 수 있다. 측정된 신호는 반복률 이외에 반복률의 조화파(harmonics) 성분들을 포함한다. 위상 잠금 회로(Phase Locked Loop : PLL)를 이용하여 원자시계에 잠금된 고정밀 마이크로파 주파수 합성기(high-stabilized radio frequency synthesizer)의 출력 신호와 반복률 혹은 반복률의 조화파의 주파수를 일치시킬 수 있는 제어신호를 얻는다. 반복률의 정수배에 해당하는 고차 조화파를 이용하여 안정화를 수행할 경우, 반복률 안정화의 정밀도를 높일 수 있다. 반복률은 공진기의 길이와 식 (2)와 같은 관계를 가지므로, PZT 를 이용하여 공진기의 길이를 조절함으로써 제어할 수 있다.

$$f_r = \frac{c}{2L_{cavity}} \quad (2)$$

이 때, c 는 빛의 속도, L_{cavity} 는 공진기의 길이를 말한다.

펄스의 군속도와 위상속도의 차이에 의해 발생하는 오프셋 주파수, f_o 는 $f-2f$ 간섭계를 이용하여 측정할 수 있다[9]. $f-2f$ 간섭계는 한 옥타브(octave) 이상을 포함하는 광대역의 파장영역을 단파장 영역과 장파장 영역으로 나눈 후, 장파장 성분을 이차 조화파 생성을 통해 발생한 단파장과 기존의 단파장을 간섭시키는 형태로 구성된다. 기존의 단파장 영역에 해당하는 주파수는 식 (3)으로 표현되고, 기존의 장파장 영역에 해당하는 주파수는 식 (4)로 표현된다.

$$f_{2n} = 2 \cdot n \cdot f_r + f_o \quad (3)$$

$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (4)$$

이차 조화파 생성(Second Harmonic Generation : SHG)을 통해 식 (5)와 같은 주파수를 얻을 수 있으며, 식 (3)과 식 (5)의 주파수 차에 해당하는 식 (6)와 같은 간섭신호를 얻을 수 있다.

$$2 \cdot f_n = 2 \cdot n \cdot f_r + 2 \cdot f_o \quad (5)$$

$$f_{2n} - 2 \cdot f_n = f_o \quad (6)$$

펨토초 레이저의 출력 파장영역은 한 옥타브 영역을 포함하지 못한다. 따라서 $f\text{-}2f$ 간섭계의 구성을 위해서는 highly nonlinear photonic crystal 광섬유(optical fiber)를 사용하여 출력 파장영역을 넓히는 작업이 필요하다. Photonic crystal 광섬유는 기존의 내부전반사(total internal reflection)를 이용하는 광섬유와는 달리 photonic band gap 현상을 이용하여 광을 유지하는 형태의 광섬유이다. Highly nonlinear photonic crystal 광섬유는 이러한 photonic band gap 현상을 이용하여 작은 광섬유 코어(core)에 광을 강하게 집중시킴으로써 광강도(intensity)에 비례하는 self-phase modulation 과 four wave mixing 과 같은 비선형 광학 현상(nonlinear effect)을 증가시킨 광섬유이다.

이렇게 $f\text{-}2f$ 간섭계를 통하여 얻어진 읍셋 주파수, f_0 는 위상 잠금 회로(Phase Locked Loop : PLL)를 이용하여 반복률의 약수에 해당하는 주파수와 일치하도록 제어신호를 얻는다. 반복률의 안정화와는 달리 원자시계에 잠금된 고정밀 마이크로파 주파수 합성기(high-stabilized radio frequency synthesizer)를 직접 사용하지 않는 이유는, 반복률과 읍셋 주파수 사이의 위상 가간섭성(phase coherence)을 유지하기 위함이다. 읍셋 주파수는 식 (7)과 같이 표현되므로, 반복률이 안정된 경우, 공진기의 미러의 기울기(tilt)

혹은 공진기에 공급되는 광펌핑(optical pumping) 량을 조절함으로써 제어할 수 있다.

$$f_o = \left(\frac{dn}{d\lambda} + I \frac{dn_2}{d\lambda} \right) \cdot L_{cavity} \quad (7)$$

이 때, n 은 결정의 굴절률, n_2 는 비선형 굴절률을 의미한다.

3. 실험 구성

펨토초 레이저의 주파수 안정화 시스템은 Fig. 2 와 같다. 크게 펨토초 레이저 공진기(oscillator) 부분과 반복률 및 읍셋 주파수의 측정 부분 및 제어 신호 발생 부분의 세 부분으로 구성된다.

펨토초 레이저 공진기 부분은 기본적인 펨토초 레이저의 공진기와 주파수 안정화를 위한 구동 부분을 포함하고 있다. 532 nm 파장의 다이오드 펌핑된 고체(Diode Pumped Solid State : DPSS) 레이저로 Ti:Al₂O₃ 결정(crystal)을 광펌핑 하였을 때 발생하는 800 nm 을 중심파장으로 하는 빛이 공진기에서 발진하게 된다. 공진기 내부에는 회절격자(diffraction grating) 혹은 프리즘(prism) 쌍이 위치하여, 결정에서 발생하는 분산(dispersion)에 의해 펄스폭이 넓어지는 것을 보상에 준다. Output coupler 에는 피스톤(piston) 방향의 움직임이 가능한 PZT 를, 공진기의 반대쪽 미러에는 기울기 방향의 움직임이 가능한 PZT 를 장착하여 각각 반복률과 읍셋 주파수의 제어가 가능하게 하였다.

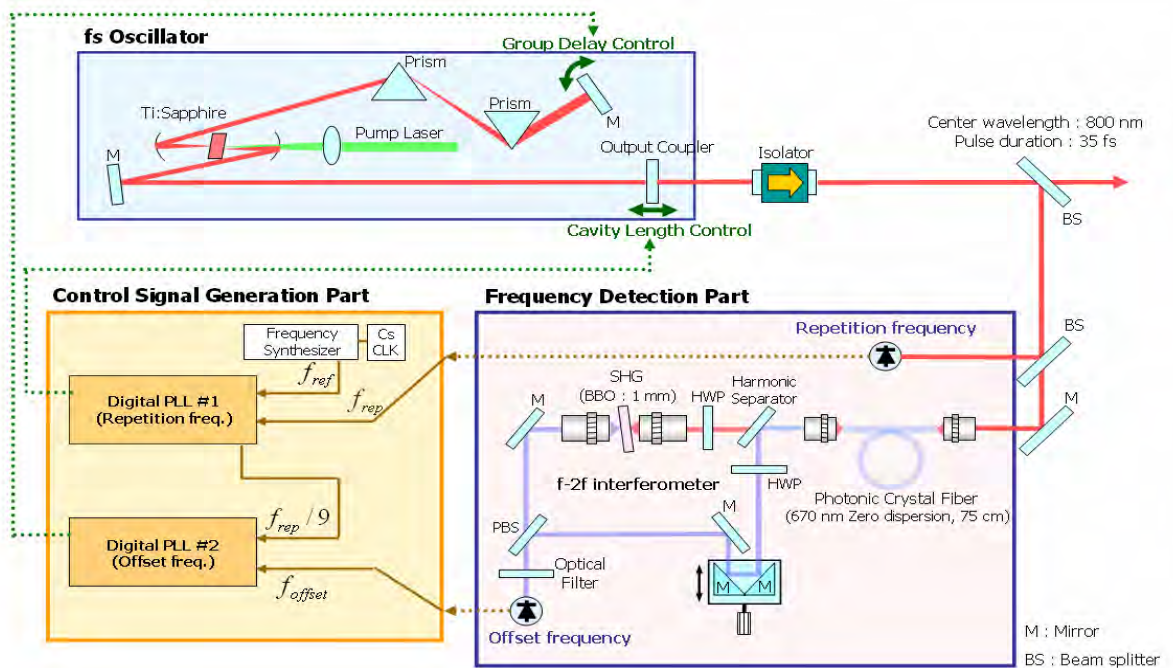


Fig. 2 Experimental configuration of frequency stabilization of the femtosecond laser

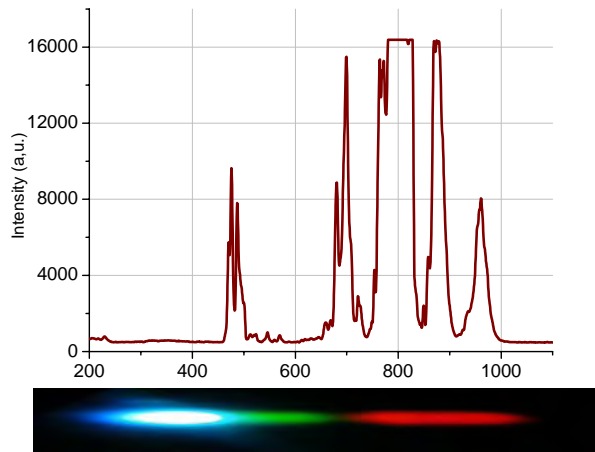


Fig. 3 Octave spanning spectrum

주파수 측정 부분은 크게 반복률 측정부와 옵셋 주파수 측정부로 나뉜다. 반복률은 펄스열을 측정함으로써 쉽게 구현된다. 옵셋 주파수의 측정부는 $f-2f$ 간섭계에 해당하는 부분이다. 60 배 대물렌즈(objective)로 공진기의 출력광을 15 cm, 670 nm zero dispersion 파장의 photonic crystal 광섬유에 집광시키면, Fig. 3 과 같은 광대역의 파장분포를 얻을 수 있다. Fig. 3 의 아래 그림은 회절격자를 이용하여 빛의 스펙트럼을 얻은 결과이다. 광섬유의 출력을 이색성 미러(dichroic mirror)를 이용하여 단파장 성분은 반사되고 장파장 성분은 투과함으로써 파장별로 광경로를 분리한다. 장파장 성분은 이차 조화파 생성을 통해 단파장 영역의 파장 성분과 겹치게 되어 간섭이 일어나고, 이 간섭 신호를 민감도(sensitivity)가 우수한 아발란치 광검출기(avalanche photo detector)를 이용하여 검출한다. 얻어지는 간섭신호는 식 (6)과 같은 주파수를 가진다.

제어 신호 발생 부분은 반복률과 옵셋 주파수의 제어를 위한 두 개의 위상 잠금 회로(Phase Locked Loop : PLL)로 구성된다. 디지털 위상 잠금 형태로 구성하였으며, 기준 주파수원으로는 각각 원자시계와 안정화된 반복률의 1/9 에 해당하는 신호를 사용하고 있다. 얻어진 제어 신호는 PZT 에 공급하기 위한 증폭단을 지나 공진기 내부의 제어 PZT 에 공급된다.

4. 결론

주파수 표준에 소급 가능한 절대 거리 및 형상의 측정을 목표로 펄스초 레이저의 주파수 안정화를 수행하였다. 안정화 방법으로는 주파수 영역 레이저 안정화법을 이용하여 반복률 및 옵셋 주파수를 안정화 하였으며, 안정화 기준으로는 루비듐(Rb) 원자시계를 사용하였다. 구현된 안정화된 펄스초 레이저는 그 자체 혹은 별도의 광원의 주파수를 측

정 및 제어함으로써 마이크로파 영역의 주파수 표준에 소급된 거리 및 형상 측정 간섭계의 구현에 사용된다.

후 기

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

참고문헌

1. Jun Ye, Steven T. Cundiff, Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Applications, (Springer, 2005)
2. Osami Sasaki, Tomokazu Kuwahara, Ryohta Hara, Takamasa Suzuki, Applied Optics, Vol. 39, pp. 3847-3853, 2000
3. Toshihiro Kubota, Makoto Nara and Tohshihiko Yoshino, "Interferometer for measuring displacement and distance," Optics letters, Vol. 12, No. 5, pp. 310-312, 1987.
4. K.Ikezawa, K.Isozaki, E.Ogita and T.Ueda, "Measurement of absolute distance employing a tunable CW dye laser," IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, No.1 , pp. 36-39, 1992.
5. R.Holzwarth, M.Zimmermann, Thomas Udem, and T.W.Hansch, "Optical Clockworks and the measurement of laser frequencies with a mode-locked frequency comb," IEEE journal of quantum electronics, Vol. 37, No.12, pp. 1493-1501, 2001.
6. Jun Ye, "Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe," Optics Letters, Vo. 29, pp. 1153, 2004
7. U. Schnell, R. Dandliker, S. Gray, "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target", Optics Letters, Vol 21, pp. 528, 1996
8. Kaoru Minoshima, Hirokazu Matsumoto, "High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser," Applied Optics, Vol. 39, pp. 65, 2000
9. David J. Jones, Scott A. Diddams, Jinendra K. Ranka, Andrew Stentz, Robert S. Windeler, John L. Hall, Steven T. Cundiff, "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis", Science, Vol. 288, pp. 635-639, 2000.