

헤테로다인 레이저 간섭계에서 고속 측정을 위한 주파수 변조 알고리즘

최현승*(광주과학기술원,원), 윤희선(광주과학기술원,원), 박기환(광주과학기술원)

A FM modulation algorithm for the high speed measurement using a heterodyne laser interferometer

H. S. Choi(Gwangju Institute of Science and Technology), H. S. Yoon(Gwangju Institute of Science and Technology), K. H. Park(Gwangju Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

This article describes a FM modulation algorithm to increase the measurement speed by increasing the beat frequency of the laser without acousto-optic modulator(AOM) in the heterodyne laser interferometer. The proposed algorithm can increase the beat frequency of the heterodyne laser which limit the measurement speed by adjusting a carrier frequency through electronic circuit, while AOM is used to shift the frequency of the heterodyne laser in conventional method. Electronic circuit is constructed to modulate the signals from a laser interferometer and a waveform generator. The brief analysis, the measurement scheme of the system, and the experimental results using a Zeeman-stabilized He-Ne laser are presented. They demonstrate that the proposed algorithm is proven to enhance the measurement speed limit by increasing the beat frequency of the heterodyne laser.

Key Words : heterodyne Laser Interferometer(헤테로다인 레이저 간섭계), High speed measurement(고속 측정), FM Modulation(주파수 변조).

1. 서론

헤테로다인 레이저 간섭계는 선형 변위 또는 각도의 정밀한 측정을 필요로 하는 분야에서 폭 넓게 사용되어지고 있다.^{1,2} 광학계 정렬이 용이하고 높은 신호대 잡음비를 갖고 있기 때문에 상용 레이저 간섭계에서 헤테로다인 기술을 많이 사용하고 있다. 헤테로다인 레이저는 두 개의 주파수 성분(f_1, f_2)을 갖고 있고, 맥놀이 주파수($\Delta f = f_1 - f_2$) 만큼의 차이를 갖는다. 헤테로다인 간섭계에서 맥놀이 주파수에 의해 측정 속도가 제한 되기도 한다. 따라서 측정 속도를 높이기 위해서는 맥놀이 주파수를 높게 하여야 한다. 하지만 높은 맥놀이 주파수를 처리하기 위한 신호처리 회로를 구성하는 것이 어렵기 때문에 맥놀이 주파수를 무한정 올릴 수는 없다. 그래서 맥놀이 주파수는 시스템 성능을 고려해서 결정되어야 한다. 일반 He-Ne 레이저는 하나의 주파수 성분만을 갖고 있기 때문에 헤테로다인 레이저 간섭계를 구성하기 위해서는 두 개의 다른 주파수 성분을 갖는 헤테로다인 레이저를 만드는 작업

이 필요하다. 헤테로다인 레이저를 만드는 방법에는 일반적인 다음과 같은 세가지 방법이 사용된다. 첫 번째는 He-Ne 레이저와 AOM 을 이용하는 방법이다.^{3, 4} Acousto-optic 현상은 빛이 어쿠스틱 신호가 존재하는 유리나 같은 반사체를 통과할 때 일어난다. 어쿠스틱 신호는 RF 신호에 의해 구동되는 압전소자에 의해서 생성된다. 레이저는 입사각 θ 를 갖고 AOM 으로 들어간다. 이 때 acousto-optic 현상에 의해서 입사각에 따라 입사광은 $m=0, 1, 2, 3..$ 등의 차수를 가지며 회절되어서 출력된다. 이 때, $m=0$ 인 광은 주파수가 변하지 않고 AOM 을 통과하며, 1 차광의 광량이 가장 강하기 때문에 0 차와 1 차 광만 사용이 되어진다. 일반적으로 AOM 구동 주파수가 20 MHz 정도이기 때문에, 맥놀이 주파수도 20 MHz 정도이다. 이 방법은, 맥놀이 주파수가 수십 MHz 이기 때문에 대역폭이 넓고, 레이저에 상관없이 항상 일정한 맥놀이 주파수를 제공하기 때문에 안정적이다. 하지만, 회절된 광의 손실이 크고, 완벽한 광정렬을 하기 어려워서 가간섭 거리가 짧아질 수 있는 단점이 있다.

두 번째 방법은 Zeeman 타입의 헤테로다인 레이저이다.^{5, 6} Zeeman 효과는 자기장 하에서 스펙트럴 라인이 여러 개의 성분으로 나뉘는 현상이다. 레이저 공진기가 횡자장 하에서, 서로 다른 주파수를 가지는 두 개의 선형 편광된 레이저가 발진된다. 쉬운 방법으로 헤테로다인 레이저가 구성이 된다. 하지만, 맥놀이 주파수는 레이저 공진기의 길이와 자장의 세기와 관련이 있고, 이 방법에서는 맥놀이 주파수가 3 MHz 정도까지로 알려져 있다.

세 번째 방법은 2 모드 헤테로다인 레이저를 이용하는 것이다. 2 모드 레이저는 서로 수직인 두 개의 주파수 성분을 만들어 낸다. 이 레이저는 두 개의 주파수 성분을 만들기 위한 어떤 주변장치도 필요하지 않고, 맥놀이 주파수가 600~1000MHz 정도 되기 때문에 최대 측정 속도 역시 맥놀이 주파수에 의해 제한되지 않는다. 레이저의 출력이 다른 구조보다 높기 때문에 다축 측정에 보다 적합하다. 2 모드 사이의 맥놀이 주파수를 이용한 변위 측정에 대한 많은 연구가 소개 되어져 왔다.^{7, 8} 그러나 두 개의 파장으로 구성된 장파장 빛을 이용하였기 때문에 분해능이 mm 단위로 매우 낮다. 이런 문제를 해결하기 위해 S. C. Bartlett et al.⁹ 이 10nm 분해능을 갖는 2 모드 레이저 간섭계를 사용해 빛을 조합하는 방법으로 분해능이 0.5nm 인 새로운 system 을 제안했다.

본 논문에서는 간단한 구조와 신호처리부를 이용하여, Zeeman 방식 레이저의 단점을 극복하기 위해 맥놀이 주파수를 증가시키는 방법으로 주파수 변조 알고리즘이 제안 되었다. 간단한 구조를 위해 주파수 변조를 위한 회로와 Zeeman 주파수 안정화된 레이저를 이용하여 고주파 변조된 맥놀이 주파수를 얻는 방법으로 쉽게 측정속도를 높일 수 있다.

2. 동작 원리

2.1 헤테로다인 레이저 간섭계

Fig. 1 System configuration for the heterodyne laser

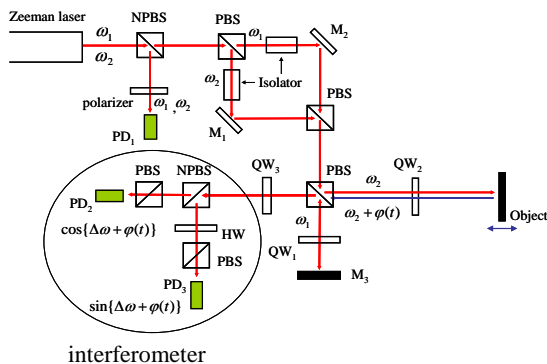


Fig. 1 은 헤테로다인 레이저 간섭계를 보여준다. 주파수 ω_1 과 ω_2 (파장 λ_1 , λ_2), 진폭 A, B, 초기 위상 ϕ_A , ϕ_B 을 갖는 두 개의 수직 선형 편광된 빛으로 구성된 레이저 출력은 광분할기에 의해 두

개의 광으로 분리 된다. 하나는 기준광으로 이용되고 다른 하나는 측정을 위해 이용된다. 레이저에서 나오는 각각의 전자기파는 다음과 같이 표현 된다.

$$E_1 = A \exp[i(\omega_1 t + \phi_A)], E_2 = B \exp[i(\omega_2 t + \phi_B)] \quad (1)$$

반사된 빛은 두 개의 직교하는 빛의 편광축에 45° 기울어진 편광자를 통과해 광센서(PD₁)로 들어간다. 단순히 하기 위해, 비선형 오차를 고려하지 않은 PD₁의 출력신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_r = AB \cos(\Delta\omega t) \quad (2)$$

이 때, $\Delta\omega$ 는 ω_1 과 ω_2 의 주파수 차이이다. 빛의 각 주파수 성분은 편광분할기(PBS)에 의해 분리 되고 간섭계의 각 부분으로 들어간다. 기준반사경에서 반사된 빛과 측정체에서 반사된 빛은 PD₂에서 만난다. QW₁ 과 QW₂ 는 위상 지연시키는 역할을 하고, 기준 반사경에서 반사된 빛과 대상체에서 반사된 빛이 레이저 소스로 들어가는 것을 막아준다. QW₁ 과 QW₂ 의 사용으로 레이저의 효율을 높일 수 있고 레이저의 원하지 않는 불안정성 또한 막을 수 있다.

비선형 오차를 포함하는 복잡한 수식 대신 도플러 주파수와 헤테로다인 반송 신호를 포함한 간단한 헤테로다인 간섭 신호 수식은 다음과 같다.

$$\Phi_m = AB \cos\{\Delta\omega t + \varphi(t)\} \quad (3)$$

이 때, φ 는 광경로 차이에서 나타나는 위상을 나타낸다.

2.2 헤테로다인 신호의 FM 변조

본 논문에서는 Zeeman 주파수 안정화된 레이저를 이용하여 맥놀이 주파수를 증가시키는 방법으로 FM 변조가 사용되었다. 이를 위해서는 광학적인 방법으로 quadratic 간섭 신호를 얻어내는 과정이 필요하다. 따라서 Fig. 1 의 원으로 표시된 부분에서 볼 수 있듯이 광학부품을 기존의 헤테로다인 간섭계에 추가 하여야 한다. 측정된 In-phase 간섭신호와 quadratic 간섭 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{m,i} = \hat{\Phi} \cos\{\Delta\omega t + \varphi(t)\} \quad (4)$$

$$\Phi_{m,q} = \hat{\Phi} \sin\{\Delta\omega t + \varphi(t)\}$$

여기서 $\hat{\Phi} = AB$, 하첨자 i 와 q 는 각각 in-phase 신호, quadratic 신호를 나타낸다.

Quadratic 신호는 위상천이 필터나 호모다인 간섭계와 같은 듀얼빔 간섭계를 통해 얻어낼 수 있다. 여기서 헤테로다인 간섭계의 quadratic 기준 간섭 신호는 위상천이 필터에 의해 얻어졌고 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{r,i} = \hat{\Phi} \cos\{\Delta\omega t\} \quad (5)$$

$$\Phi_{r,q} = \hat{\Phi} \sin\{\Delta\omega t\}$$

함수발생기에서 얻은 in-phase 신호와 quadratic 신호는 다음과 같다.

$$\Phi_{s,i} = \hat{\Phi} \cos\{\omega_s t\} \quad (6)$$

$$\Phi_{s,q} = \hat{\Phi} \sin\{\omega_s t\}$$

앞으로, 함수발생기에서 생성되는 천이 시키고 자하는 주파수를 천이신호, $\Delta\omega$ 는 맥놀이 주파수, ω_s 는 천이주파수라고 한다. 레이저 간섭계의 in-phase 신호와 quadratic 기준 신호, 그리고 측정된 간섭신호는 천이신호로 변조 된다. 빛의 파장은 지수함수로 표현된다. 측정된 간섭신호와 천이신호는 다음과 같은 지수 함수 형태로 표현할 수 있다

$$e^{j(\Delta\omega t + \phi(t))} \cdot e^{j\omega_s t} \quad (7)$$

$$= [\cos\{\Delta\omega t + \phi(t)\} + j\sin\{\Delta\omega t + \phi(t)\}] \cdot [\cos(\omega_s t) + j\sin(\omega_s t)]$$

$$= [\cos\{\Delta\omega t + \phi(t)\} \cdot \cos(\omega_s t) - \sin(\omega_s t) \cdot \sin\{\Delta\omega t + \phi(t)\}]$$

$$+ j[\cos\{\Delta\omega t + \phi(t)\} \cdot \sin(\omega_s t) + \cos(\omega_s t) \cdot \sin\{\Delta\omega t + \phi(t)\}]$$

$$e^{j((\Delta\omega + \omega_s)t + \phi(t))} \quad (8)$$

$$= [\cos\{\Delta\omega t + \omega_s t + \phi(t)\} + j\sin\{\Delta\omega t + \omega_s t + \phi(t)\}]$$

식(7)과 식(8)에서 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\cos\{\Delta\omega t + \phi(t)\} \cdot \cos(\omega_s t) - \sin(\omega_s t) \cdot \sin\{\Delta\omega t + \phi(t)\} = \cos\{(\Delta\omega + \omega_s)t + \phi(t)\} \quad (9)$$

같은 방법으로 기준 간섭신호와 천이신호를 이용한 변조 신호도 얻을 수 있다.

$$\cos(\Delta\omega t) \cdot \cos(\omega_s t) - \sin(\omega_s t) \cdot \sin(\Delta\omega t) = \cos\{(\Delta\omega + \omega_s)t\} \quad (10)$$

$\Delta\omega + \omega_s (= \omega_f)$ 는 최종 맥놀이 주파수를 나타낸다. 따라서 맥놀이 주파수는 천이주파수를 조정함으로써 쉽게 증가시킬 수 있다. Fig. 2 는 FM 변조를 위한 신호 처리 회로를 나타낸다. 변조된 간섭신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{r,s} = \hat{\Phi} \cos\{(\Delta\omega + \omega_s)t\} \quad (11)$$

$$\Phi_{m,s} = \hat{\Phi} \cos\{(\Delta\omega + \omega_s)t + \phi(t)\}$$

간섭신호가 얻어지면 변위는 계수 방법, 위상 encoding 방법, arc-tangent 방법 등 여러 가지 방법으로 얻어 낼 수 있다. 이 방법들은 모두 헤테로다인 반송 신호($\Delta\omega$)를 없애기 위해 믹서가 필요하다.

3. 실험

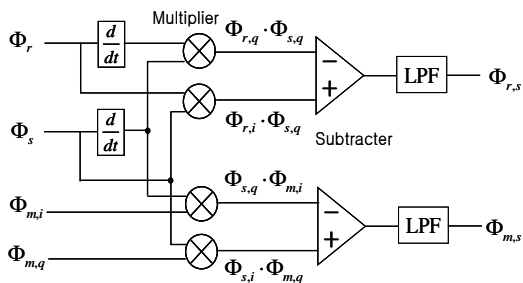


Fig. 2 Signal processing algorithm of the FM modulation

Fig. 1 은 실험을 위한 헤테로다인 간섭계를 나

타낸다. System 은 레이저 광원, 광학 부품, 위상 신호를 주기 위한 가진기로 구성되어 있다. Zeeman 주파수 안정화된 He-Ne 레이저⁶ 는 두개의 선형 편광된 빛의 coherent 광원으로 이용되었다. Faraday optical isolator 는 광원으로 빛이 들어가지 못하도록 하기 위해 사용되었다. 헤테로다인 레이저의 맥놀이 주파수 $\Delta\omega$ 는 450kHz 정도 이고, 절대 안정도는 10^{-9} 급이다. 24 시간 가동을 했을 때 주파수 변화량은 2MHz(4.3×10^{-9}) 미만이다. 일반적으로 도플러 주파수는 대칭이기 때문에, 실제로 ± 450 kHz 의 도플러 주파수가 복조 될 수 있다. 간섭신호의 최대 주파수는 900kHz 이다. 따라서 레이저 광원만을 고려 했을 때 이동물체의 최대 측정속도는 ± 0.14 m/s 이다. 레이저 간섭계의 기준 간섭신호, in-phase 신호, quadratic 측정 간섭신호는 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 신호처리 알고리즘을 통해 맥놀이 주파수를 천이 시키는데 사용된다. 90° 위상 지연된 quadratic 신호를 얻기 위해서는 광학적으로 간섭신호를 얻고 회로적으로 천이신호를 만들어야 한다. 실험의 편이를 위해 본 실험에서는 맥놀이 주파수를 900kHz 로 두 배 증가 시켰다. 곱셈 계산에 의해 생성된 저주파 신호는 고주파 통과 필터를 이용해 쉽게 제거할 수 있으므로 원래의 맥놀이 신호와 천이된 신호가 근접한 주파수 영역에 있다면 보다 깨끗한 신호를 얻을 수 있다. 맥놀이 주파수를 올리기 위한 회로는 고속 OP Amp 인 AD8056, 고속 Multiplier 인 AD734 를 이용해 구현 되었다. 이 소자들의 bandwidth 는 1MHz 이상이다. 구성된 FM 변조 회로는 간섭신호를 변조하기에 충분한 대역폭을 갖고 있다. 함수 발생기에서 얻는 천이주파수를 증가 시킴으로써 최대 측정 속도를 증가 시킬 수 있다. 따라서 맥놀이 주파수를 무한대로 증가 시킬 수 있다. 하지만 실제적으로 수십 MHz 이상의 신호를 처리 할 수 있는 회로를 구성하기는 쉽지가 않다.

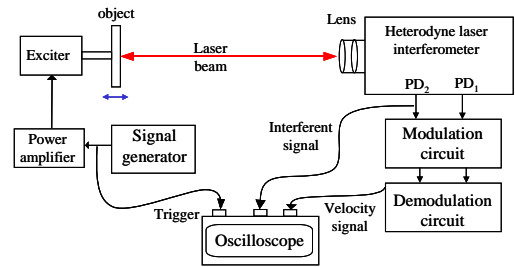


Fig. 3 Experimental setup for the FM modulation and demodulation system using heterodyne laser interferometer.

Fig. 3 은 헤테로다인 간섭계를 이용한 FM 변조 복조 실험 장치에 보여준다. 함수 발생기로부터 의 신호로 가진기를 가진 시킨다. 이 신호는 오실로스코프의 트리거 신호로도 사용된다. 함수발생기로부터 얻어지는 신호는 미약하기 때문에 가진기를 가진시키기 위해 충분한 힘을 얻기 위해 파워앰프를

사용하였다. 대상체(가진기)의 움직임에 따라 발생하는 간섭계의 변조된 간섭 신호를 얻은 후 아날로그 신호처리 회로를 이용해 FM 변조된 간섭신호를 복조 한다.

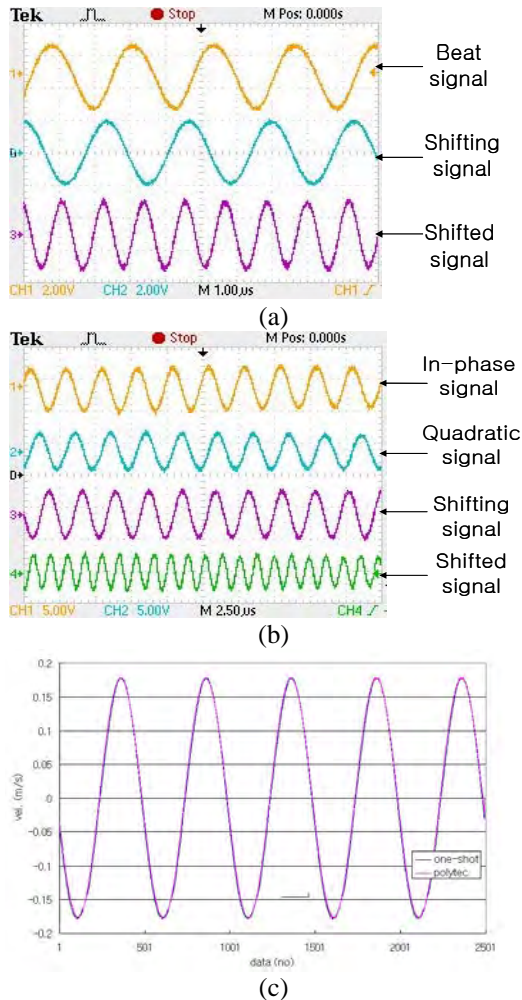


Fig. 4 Original signal and modulated signals of the beat signal (a), the interference signals after FM modulation (b) and the final velocity signal

Fig. 4 에서는 레이저 간섭계의 원 신호와 변조된 신호를 보여준다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 기준 맥놀이 신호와 FM 변조후의 간섭신호를 보여준다. Fig. 4(c)는 1 kHz 로 가진 했을 때, FM 변조와 one-shot F/V 변환기를 사용한 복조 이후 최종 속도 신호를 나타낸다. 이 때, 최종 속도 신호는 상용 레이저 도플러 진동 측정기 (OFV3001 of Polytec Co.)를 이용해 비교하였다. F/V 변환기 자체의 비선형 오차가 적기 때문에 두 시스템이 거의 동일한 결과를 보인다. 실제 가진기가 0.17 m/s 로 가진을 하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 기존의 맥놀이 주파수(450 kHz)에서 측정해낼 수 있는 속도(0.14m/s) 보다 높다. 이를 통해서 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 Zeeman-안정화 He-Ne 레이저의 주파수의 맥놀이 주파수를 증가시켜 측정 속도를 향상 시키는 FM 변조 알고리즘이 제안된다. 이 방법은 원하는 양 만큼의 반송 주파수를 천이 시킨다. 제안된 알고리즘은 단순한 구조와 고효율의 장점을 유지하면서, 상대적으로 낮은 맥놀이 주파수를 가지는 Zeeman 형태의 레이저의 단점을 극복한다. 수 MHz 의 대역폭을 가지는 고속 FM 변조 회로가 설계되었다. 제안된 방법은 다축 측정을 고려한 다른 방법보다 훌륭하다. AOM 으로부터 나온 회절 신호의 효율은 높지 않고 측정 축이 증가함에 따라 빔 효율이 낮아지기 때문에 다축 측정에서는 기존의 AOM 방법은 사용되지 않는다. Zeeman-안정화 He-Ne 레이저를 사용한 이론적 해석과 실험적 결과는 제안된 알고리즘이 헤테로다인 레이저의 맥놀이 주파수를 증가시킴으로써 측정 속도 한계를 향상시키는 것을 나타내었다. 또한, FM 변조 간섭 신호를 이용한 속도측정 시스템이 구성되었고, 상용 레이저 속도측정계와 실험적으로 비교를 통해 개발된 시스템과 비교하였다.

참고문헌

1. B. Norman, "Recent advances in displacement measuring interferometry", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 4, pp.907-926, 1993
2. G. E. Sommargren, "A new laser measurement system for precision metrology", *Prec. Eng.*, Vol. 9, pp.179-184, 1987
3. M. G. Gazalet et al, "Acousto-optic low-frequency shifter", *Appl. Phys.*, Vol. 33, pp.1293-1298, 1994
4. P. Dirksen et al, "Novel two-frequency laser", *Prec. Eng.*, Vol. 17, pp.114-116, 1995,
5. N. Umeda et al, "Stabilized He-Ne transverse zeeman laser", *Appl. Phys.*, Vol. 19, pp.442-450, 1980
6. T. B. Eom et al, "Frequency stabilization of an internal mirror He-Ne laser by digital control", *Rev. Sci. Inst.*, Vol. 73, pp.221-224, 2002
7. K. Seta et al, "Distancemeter utilizing the interbeat of a He-Ne laser", *Appl. Opt.*, Vol.29, pp.1525-1529, 1989
8. T. Araki et al, "Simple optical distancemeter using an intermode-beat modulation of a He-Ne laser and an electrical-heterodyne technique", *Rev. Sci. Inst.*, Vol. 65, pp.1883-1888, 1994
9. S. C. Bartlett et al, "A dual resolution non-contact vibration and displacement sensor based upon a two wavelength source", *Rev. Sci. Inst.*, Vol. 61, pp.1014-1017, 1990
10. T. B. Eom et al, "A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 13, pp.222-225, 2002