

헤테로다인 변위 측정 간섭계의 고속, 고분해능 위상 측정

김승우, 김민석*
한국과학기술원 기계공학과

High-speed, High-resolution Phase Measuring Technique for Heterodyne Displacement Measuring Interferometers.

Seung-Woo Kim, Min-Seok Kim
Mechanical Engineering Department, KAIST

ABSTRACT

One of the ever-increasing demands on the performances of heterodyne interferometers is to improve the measurement resolution, of which current state-of-the-art reaches the region of sub-nanometers. We propose a new scheme of phase-measuring electronics that reduces the measurement resolution without further increase in clock speed. Our scheme adopts a super-heterodyne technique that lowers the original beat frequency to a level of 1 MHz by mixing it with electrically generated reference signal. The technique enables us to measure the phase of Doppler shift with a resolution of 1.58 nanometer at a sampling rate of 1 MHz. To avoid the undesirable decrease in the maximum measurable speed caused by the lowered beat frequency, a special form of frequency up-down counting technique is combined with the super-heterodyning. This allows performing required phase unwrapping simply by using programmable digital gates without 2π ambiguities up to the maximum velocity of 2.35 m/s.

Key Words : Heterodyne interferometer (헤테로다인 간섭계), phase meter (위상 측정기), Super-heterodyne technique (슈퍼 헤테로다인 기법)

1. 서론

헤테로다인 변위 측정 간섭계는 우수한 정밀도, 비교적 쉬운 측정 방법, 그리고 비접촉이라는 여러 장점 때문에 공작기계의 교정이나 초정밀 가공기와 리소그래피 스테퍼의 위치 센서 등 산업계 전반에서 광범위하게 사용되고 있다⁽¹⁻²⁾. 헤테로다인 간섭계는 일반적으로 주파수 안정화 이중 주파수 HeNe 레이저, 간섭 광학계 그리고 위상 측정기로 이루어져 있으며 이중에서 위상 측정기는 기준 광검출기와 측정 광검출기에서 나온 두 전기 신호의 위상을 검출하는 장치로 헤테로다인 간섭계의 측정 속도와 분해능을 결정짓는 중요한 요소이다. 헤테로다인 간섭계의 위상 측정은 다른 간섭계와는 달리 높은 측정 대역과 분해능을 동시에 만족시켜야 하므로 위상 측정기의 개발은 큰 부담으로 작용하여 왔다. 이런 이유로 위상 측정기의 개발은 상용 업체들이 주도하게 되었으며 현재 평

면 거울 간섭계를 사용했을 때, 최대 측정 속도 2.1 m/s, 분해능 0.31 nm를 구현하는 위상 측정기를 개발하였다⁽³⁾.

두 전기 신호의 위상을 측정하는 방식은 여러 가지가 있으나 측정 대역과 분해능을 동시에 높이려면 시간 분해능을 높여야 되며 주파수 대역 20 MHz에 위상 분해능 0.1°를 구현하려면 약 10 ps의 시간 분해능이 필요하다⁽⁴⁾. 시간 분해능이 올라가면 올라갈수록 회로를 구성하기가 더욱 힘들어지고 비용도 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 물체가 빠르게 움직일 때와 느리게 움직이는 경우를 나누어 위상을 측정하는 방식이 제안되었다⁽⁵⁻⁶⁾. 하지만 빠르게 움직이는 동안(높은 대역이 필요한 구간)에는 낮은 분해능으로 측정함으로써 움직인 총 변위는 높은 분해능으로 측정할 수 있지만 빠르게 움직이는 순간에서의 변위는 높은 분해능으로 측정하기 어렵다. 본 논문에서는 슈퍼 헤테로다인(super heterodyne) 방식

을 사용해 시간 분해능을 높이지 않고도 측정대역과 분해능을 모두 향상 시키며 빠르게 움직이는 동안에도 높은 분해능으로 측정할 수 있는 위상 측정기를 제안하고 그 성능을 검토한다.

2. 헤테로다인 간섭계

Fig. 1 은 헤테로다인 변위 측정 간섭계를 간략하게 도시한 것이다. 헤테로다인 간섭계의 광원은 HeNe 레이저로 선형 편광의 서로 수직인 2 개의 주파수를 갖는 광을 내보낸다. 이를 이용해 주파수가 $f_{beat} = f_1 - f_2$ 인 기준 신호와 기준 신호의 주파수에 반사경의 움직임에 의한 도플러 주파수가 더해진 측정 신호를 ($f_{beat} \pm \Delta f$) 만들어 낸다. 도플러 주파수는 다음과 같다.

$$\Delta f = 2nv(t)/\lambda_1 \quad (1)$$

여기서 v 는 반사경의 속도, n 은 공기굴절률이다.

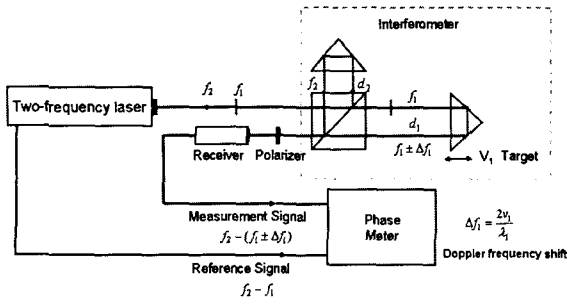


Fig. 1 Block diagram of a typical heterodyne interferometer system. f_1 and f_2 are the frequencies of the two-frequency laser source. Polarization states perpendicular to the plane of the page, \bullet , and parallel to the plane of the page, $|$, are indicated.

식(1)을 시간에 대해 적분하면 반사경의 변위와 비례하는 위상 관계식을 얻을 수 있는데 위상을 얼마나 잘 측정하느냐에 따라 변위 측정의 정밀도가 결정된다. 위상과 변위의 관계식은 식(2)와 같다.

$$\varphi(t) = 4\pi nL(t)/\lambda_1 \quad (2)$$

여기서 L 은 반사경의 변위이다. 위의 관계로부터 0.1 nm의 분해능을 얻기 위해서는 $2 \times 360^\circ \times 0.1 \text{ nm}/(633 \text{ nm}) \approx 0.1^\circ$ 의 위상 측정 분해능이 필요하다 하는 것을 알 수 있다.

3. 위상 측정기

대부분 위상 측정기는 기준 신호의 주기와 두 신호의 영점을 지나는(zero crossing) 시간차의 비를 측정하여 위상 값을 구한다. Fig.2 에 나타나듯이 두 신호의 위상은 다음과 같이 정의된다⁽⁴⁾.

$$\varphi = 360^\circ \times \frac{T_+}{T_R} \quad (5)$$

여기서 T_R 은 기준신호 V_r 의 주기이며, T_+ 은 V_r 과 V_m 이 영점을 지나는 시간차이다. 위상 측정기는 T_+ 와 T_R 의 시간 동안 내부의 클럭을 계수하여 위상 값을 구한다. 따라서 위상 측정기의 분해능은 기준 신호의 주기와 위상 측정기의 시간 분해능에 의해 결정지게 된다.

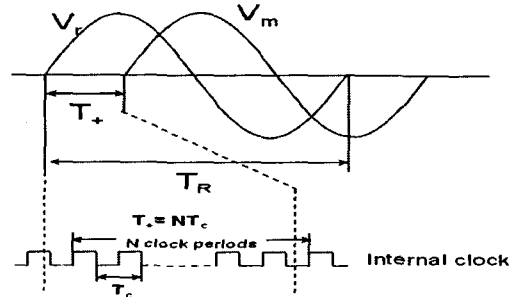


Fig. 2 Diagram illustrating how a phase meter works.

위상측정기의 시간 분해능이 1 nsec 이고 기준 신호의 주파수가 10 MHz 이면 위상 분해능은 3.6° 가 되며 기준 신호의 주파수가 1 MHz 인 신호의 위상 분해능은 0.36° 가 된다. 이처럼 기준 신호의 주파수가 낮을수록 위상 분해능은 높아지지만 측정 속도에 제약을 받게 된다. 하나의 샘플링 기간 동안 위상 변화량이 $2\pi/3$ 이상이 되면 위상복원(phase unwrapping)에 어려움이 있다⁽⁷⁾. 기준 신호의 주파수가 1 MHz 이고 평면 거울 간섭계를 사용할 경우 측정 가능한 최대 이송속도는 약 $\pm 52 \text{ mm/s}$ 이다. 최대 이송 속도는 기준 신호의 주파수에 비례하므로 빠르게 움직이는 물체를 측정하려면 기준 신호의 주파수를 크게 해야 하지만 분해능이 낮아지게 된다.

4. 슈퍼 헤테로다인 위상 측정

슈퍼 헤테로다인 기법은 UHF 나 VHF 수신기에 많이 사용하는 방법으로 원하는 대역으로 신호를 얻기 위해 헤테로다인(heterodyning)을 2 단계 걸쳐서 수행한다. 본 연구에서도 두 개의 주파수를 가진 광을 간섭시켜 얻은 맥놀이 신호를(1 차 헤테로다인) 다시 전기적으로 믹서와 국부 발진기를 이용하여 맥놀이 신호의 주파수를 위상 측정기에 적합

한 대역으로 낮춘다(2 차 헤테로다인). 이 방법을 이용하면 기준 신호와 측정 신호의 위상을 바꾸지 않고 주파수를 낮춤으로써 위상 분해능을 올릴 수 있다. 하지만 Fig. 3 에서 알 수 있듯이 기준 주파수를 낮추면 도플러 주파수가 음의 부호일 때 측정 대역폭이 좁아지는 문제가 있다.

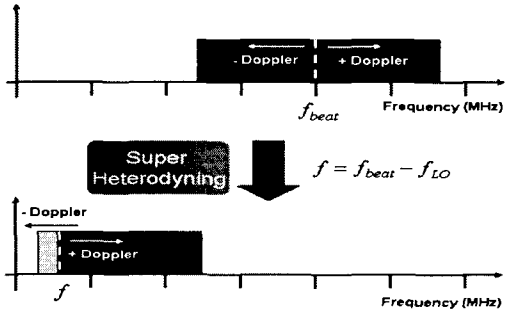


Fig. 3 Detection Bandwidth which is directly related to the maximum measurable slew rate. f_{beat} and f_{LO} are frequencies of optically heterodyned beat signal and electrically generated local oscillator signal, respectively

이를 해결하기 위해 Fig. 4 와 같이 2 개의 국부 발진기를 이용하여 도플러 주파수의 부호에 관계없이 즉, 물체의 운동방향에 관계없이 같은 대역폭을 갖도록 하였다. 도플러 주파수가 양의 부호일 경우 측정신호 A 를 사용하고, 음의 부호일 경우 측정 신호 B 를 사용하면 물체의 운동방향에 관계없이 도플러 주파수는 항상 양의 값이 된다.

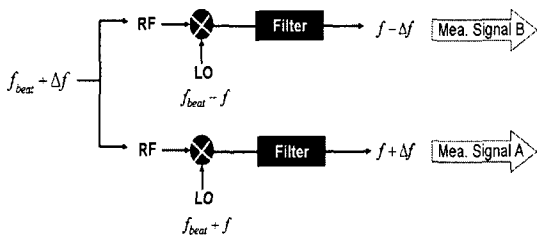


Fig. 4 Two-way heterodyning method.

운동 방향에 따라 측정 신호가 달라지므로 2 개의 위상 측정기를 사용하고 물체의 운동 방향이 바뀔 때 위상 측정기도 같이 변경되도록 하였다. 위상 측정기가 변경될 때 속도가 영에 근접하므로 두 위상 측정기 모두 측정 대역에 들어온다. 이 때 위상 측정기 상호간에 위상 값이 교환되어 측정 방향이 바뀌더라도 위상 손실은 없게 된다.

앞서 언급하였듯이 최대 측정속도는 2π 모호성 (ambiguity) 때문에 기준 신호의 주파수에 비례한다. 2 차 헤테로다인에 의해 기준 주파수가 낮아졌으므로 기존의 방법으로는 측정 속도를 높일 수 없

다. 따라서 본 연구에서는 위상 측정기에 위상이 2π 만큼 바뀔 때 이를 측정하는 2π 카운터를 설계하여 추가하였다. 물체가 빠른 속도로 움직이면 기준 신호의 한 주기 안에 측정 신호의 위상이 2π 이상 변하게 되는데 위상의 차수는 2π 카운터로 측정하고 나머지 2π 미만의 위상의 측정은 고 분해능 위상 측정기가 맡게 된다.

5. 위상 측정기의 제작

위상 측정기의 구조를 Fig. 5 에 나타내었다. 헤테로다인을 통해 1 MHz 로 주파수를 낮춘 기준 신호와 측정 신호를 위상 측정기의 입력으로 받는다. 고 분해능 위상측정기는 100 MHz 시스템 클럭으로 동작하는 8 bit 카운터로 구성되어 있으며 위상 분해능은 $1 \text{ MHz} / 100 \text{ MHz} \times 360^\circ = 3.6^\circ$ 이다. 2π 카운터는 24 bit 카운터로 구성되어 있고 기준 신호가 High 일 때 카운트를 하도록 설계되어 있다. 최종적으로 얻어지는 위상 측정 데이터는 32 bit 데이터 형식으로 기준 신호의 한 주기마다 위상 측정기 내부의 버퍼(buffer)에 저장되며 외부 호출이 있을 경우, PCI I/O 카드를 통해 PC 로 전송된다. 이 모든 위상측정기의 디지털 회로는 Programmable gate array(FPGA)를 사용하여 하나의 칩 속에 간단하게 구현하였다. 하나의 위상 측정기에서 다른 위상 측정기로 그 측정 역할이 바뀌게 되는 경우, 현재 측정 역할을 수행하고 있는 위상 측정기의 위상 값을 다음 위상 측정기로 넘겨 주어야 하는데 이러한 역할 교대의 판단은 위상 측정기 외부의 PC 에서 이루어 지게 되며, 현재 측정된 속도 값과 과거 속도 값의 변화를 통해 위상 측정기 역할 교체의 판단을 하게 된다.

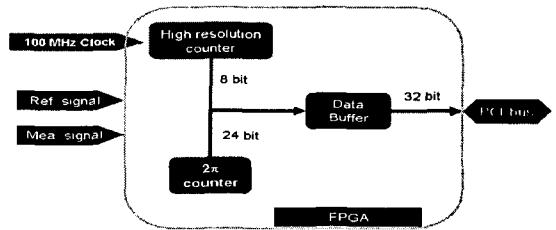


Fig. 5 Block diagram of the phase meter

6. 위상 측정기의 검증

제작된 위상 측정기는 위상 조정이 가능한 두 대의 신호 발생기로 가상의 기준 신호와 측정 신호를 생성하여 검증하였다. 위상 측정기의 검증은 크게 세가지로 측정 물체가 거의 정지하였을 때를 나타내는 정적 테스트, 물체가 움직이고 있을 때를

나타내는 동적 테스트 그리고 물체의 방향이 바뀔 때를 나타내는 변환 테스트로 나누어서 실시하였다. 정적 테스트는 두 신호 발생기의 주파수를 1 MHz 로 같게 맞추고 위상을 1°의 간격으로 0°에서 360°까지 조절하면서 위상 측정기의 출력과 비교하였다. 위상 오차를 변위 오차로 환산하여(평균거울 간섭계 기준) 나타냈을 때 변위 오차는 모두 $\pm 1.58 \text{ nm}$ 안에 있으며 이는 위상 측정기의 분해능 3.6°에 해당한다. 동적 테스트는 하나의 신호 발생기 출력 주파수를 1 MHz 로 고정하고, 다른 하나의 신호 발생기의 주파수를 바꿈으로써 측정 물체가 일정한 속도로 움직이는 상황을 재연하였다. 측정 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 마찬가지로 위상 오차를 변위 오차로 환산하였으며 100 개의 위치와 시간 데이터를 받아 표준편차를 구하였다.

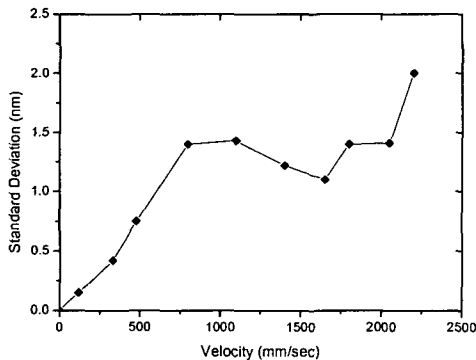


Fig. 6 Results of dynamic test.

신호 발생기의 최대 출력 주파수가 15 MHz 로 제한되어 그 이상의 성능은 평가하지 못했지만 14.9 MHz 의 측정 신호 주파수를 물체의 이송 속도로 환산하면 약 2.35 m/s 로 2 m/s 이상으로 빠르게 움직이는 물체도 측정 가능함을 알 수 있다. 이 때 최대 오차는 2 nm 이하이다. 두 위상 측정기의 변환 테스트는 신호 발생기의 출력 주파수 한계로 광학적인 방법을 이용하여 부호가 서로 반대인 도플러 주파수를 가진 두 개의 측정 신호를 만든 후⁽⁸⁾ 직접 스테이지의 움직임을 측정하여 평가하였다.

스테이지를 왕복운동 시켰을 때, 운동 방향에 따라 각기 다른 위상 측정기로 측정했음에도 초기 위치로 0.5 μm 이내로 복귀함을 알 수 있었다. 스테이지에 장착된 센서의 분해능이 0.5 μm 이어서 더 이상의 정밀도를 확인할 수는 없었지만 변환은 큰 오차 없이 이루어짐을 알 수 있었다.

7. 결론

헤테로다인 변위 측정 간섭계에 쓰이는 위상

측정기의 분해능과 측정 속도를 모두 높이기 위해 기존의 시간 분해능을 높이는 방식이 아닌 슈퍼 헤테로다인 방식을 제안하여 이를 구현하였다. 제작된 위상 측정기는 100 MHz 의 클럭으로도 기준신호 1 MHz 에 대해 $\pm 1.58 \text{ nm}$ 의 정밀도와 2.35 m/s 이상의 측정 속도를 가지며 Programmable gate array 를 사용하여 간단하게 제작되었다. 빠른 물체를 측정하기 위해 위상 측정기 내부에 2π 카운터를 추가하였으며 속도 방향에 따라 위상 측정기가 변환되도록 하였다.

본 연구에서 개발된 위상 측정기는 고속으로 움직이는 나노 스테이지의 움직임을 측정하는데 충분히 활용할 수 있을 것이라 판단되며 추후 지속적으로 성능을 개선시킬 계획이다.

후 기

본 연구는 2001 년도 창의적 연구진흥사업의 재정지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. C.R. Steinmetz, "Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry," *Prec. Eng.* Vol. 12, pp. 12-24, 1990
2. Norman Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry", *Meas. Sci. Tech.*, 907-926, 1993
3. Frank C Demarest, "High-resolution, high speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 9, pp. 1024-1030, 1998
4. N.M. Oldham, J.A. Kramar, P.S. Hetrick, and E.C. Teague, "Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry," *Prec. Eng.* Vol. 15, pp. 173-179, 1993
5. Sadao Mori, Toshio Akatsu, and Chuichi Miyazaki, "Laser measurement system for precise and fast positioning," *Optical Eng.* Vol. 27, pp. 823-829, 1983
6. Noh-Bin Yim, Cheon II Eom, and Seung-Woo Kim, "Dual mode phase measurement for optical heterodyne interferometry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 11, pp. 1131-1137, 2000
7. K Oka, M Tsukada, and Y Ohtsuka, "Real-time phase demodulator for optical heterodyne detection processes," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 2, pp. 106-110, 1991
8. S. Yokoyama, "A high-speed and high-resolution heterodyne interferometer," *Proc. of SPIE*, Vol. 1319, pp 212, 1990