

광빛의 주파수 안정도 한계 분석

Analysis of Frequency Stability Limit of a Optical Frequency comb

김억봉, 박창용, 박상언, 박영호, 윤태현*, 조혁**, 이호성
 한국표준과학연구원, *고려대학교, **충남대학교
ubkim@kriss.re.kr

펄스모드 레이저의 광빛(optical frequency comb)을 이용한 광의 절대 주파수 측정은 현재 까지 알려진 방법 중 가장 작은 불확도로 레이저 광의 주파수를 측정할 수 있는 방법이다. 그 이유는 국제 표준 물리량 중 유효 숫자가 가장 많은 시간표준기를 기준 주파수로 사용할 수 있고 이 기준 주파수의 안정도가 광빛의 안정도에 전달되도록 하는 위상 잠금 방법을 사용하고 있기 때문이다. 하지만 이러한 시간 표준기를 이용한 위상 잠금 방법에 의해서도 여러 가지 요인(가변 주파수 발생기, 신호 증폭기 같은 전자 장비나 광빛의 반복률을 광센서로 검출하는 과정에서 오는 잡음)에 의해 완전한 안정도 전달이 불가능한데^(1,2) 이러한 광빛의 주파수 안정도를 저해하는 요소들은 결국 광의 주파수 측정 불확도에 영향을 준다.

우리는 이 실험에서 10^{-13} (1 s)의 주파수 안정도를 갖는 세슘 원자시계에 직접적인 주파수 결맞음 상태로 연결된 100 MHz 펄스모드 레이저의 광빛의 불안정도 요인을 알아내기 위하여 신호발생기와 광 검출기에 의한 위상 잡음을 측정하였고 이를 바탕으로 광빛의 안정도를 분석하였다. 또한 시스템의 장기 안정도를 측정하기 위하여 Heterodyne 방법을 이용하였다.

일반적으로 신호 발생기의 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$V(t) = (V_0 + \varepsilon(t))\sin(2\pi ft + \Phi(t)) \tag{1}$$

여기서, $\varepsilon(t)$ 는 신호 크기의 변화이고, $\Phi(t)$ 는 위상의 잡음이다. 푸리에 주파수 f 에 의해 표현되는 위상의 변화를 $\delta\Phi(f)$ 라 하면, 위상 잡음의 파워 스펙트럼 밀도는 $S_\Phi(f) = [\delta\Phi(f)]^2 / \text{Bandwidth}$ 로 정의 된다. 위상 잡음의 파워 스펙트럼 밀도와 Allan 분산과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{2}{(\pi f_c \tau)^2} \int_0^\infty \sin^4(\pi f \tau) S_\Phi(f) H_\Phi(f) df \tag{2}$$

여기서 f_c 는 중심주파수(carrier frequency), $H_\Phi(f)$ 는 전달함수로서 필터의 밴드에 따라 적분구간을 적절히 선택하면 이 값을 1로 변환하여도 무관하다. 이 식에서 알 수 있듯이 주파수 안정도를 알기 위해서는 주파수 영역에 따른 위상 잡음을 측정하여 위상 잡음의 파워 스펙트럼 밀도를 계산하여야 한다. 위상 잡음을 측정하기 위하여 그림 1에서와 같이 두 대의 같은 시스템이 사용되는 맥놀이 주파수 측정 방법을 이용하였고, 두 시스템의 위상은 90도 차이가 나도록 한쪽 시스템의 위상을 조절하였다.

신호 발생기의 주파수 안정도를 측정하기 위하여 그림 1과 같이 2대의 신호발생기를 이용하여 시스템을 구성하였고, 각각의 신호 발생기의 기준 주파수는 1초에서 3×10^{-13} 의 안정도를 갖는 H-maser를 사용하였다. 기준 신호 발생기는 다른 신호 발생기에 비해 위상 안정도가 높은 장비를 사용하였다. 그리고 위상 잡음을 출력하는 믹서(mixer)는 직류 성분이 가장 최소가 되는 double-balanced mixer를 사용하였다. 그림 2는 신호 발생기가 가진 위상 잡음의 파워 스펙트럼 밀도를 측정한 결과이다. 1 GHz의 파워 스펙트럼 밀도를 100 MHz의 파워 스펙트럼 밀도와 비교해 전체적으로 더 큰 위상 잡음을 보여주고 있다. 하지만 그림 1의 결과를 식 2에 대입하여 1초 평균 시간에서의 Allan 분산을 계산하면 100

MHz는 4×10^{-12} , 1 GHz는 6.6×10^{-13} 으로 계산되어 1 GHz에서 더 좋은 안정도를 갖는다. 이러한 결과를 분석해보면 이론적으로는 중심 주파수의 증가에 따른 위상 잡음의 증가는 주파수의 제곱으로 증가하게 되지만, 실제적으로는 중심 주파수 증가에 비해 실제 위상 잡음의 증가가 작기 때문에 낮은 주파수보다는 높은 주파수에서 좋은 안정도가 측정되는 것이다.

광빔 안정도에 중요한 역할을 하는 펄스 레이저의 반복률을 측정하는 검출기 시스템에도 위와 같은 실험을 실행하였다. 실험 결과 신호 발생기의 경우와 같이 1 GHz에서 스펙트럼이 전체적으로 더 큰 위상 잡음을 포함하고 있지만 Allan 분산은 더 작음을 알 수 있었다. 즉 펄스 레이저의 반복률을 검출할 때 반복률의 높은 고차 조화파를 이용하면 할수록 안정도 측면에서 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

위상 잡음 측정방법은 단기 안정도를 측정하기에 적당한 방법이지만, 장기 안정도를 측정하기에는 적절하지 않다. 그래서 우리는 Heterodyne 방법을 사용하여 광빔 안정화에 사용되는 장비에 대하여 장기 안정도를 측정하였다. 신호 발생기의 경우 1000 초에서 Allan 분산이 10^{-15} 으로 측정 되었다.

위의 실험과정에서 주변 온도의 변화에 따른 장비의 특성 변화가 안정도에 중요한 요인으로 작용하고 있음을 알게 되었고, 현재 mixer의 온도 변화와 종류에 따른 특성이 펄스 레이저의 주파수 안정도에 미치는 영향 대한 연구가 진행 중이다.

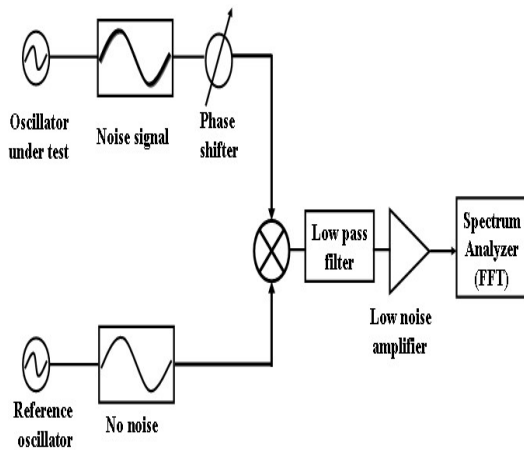


그림 1. 위상 잡음 측정을 위한 장치도.

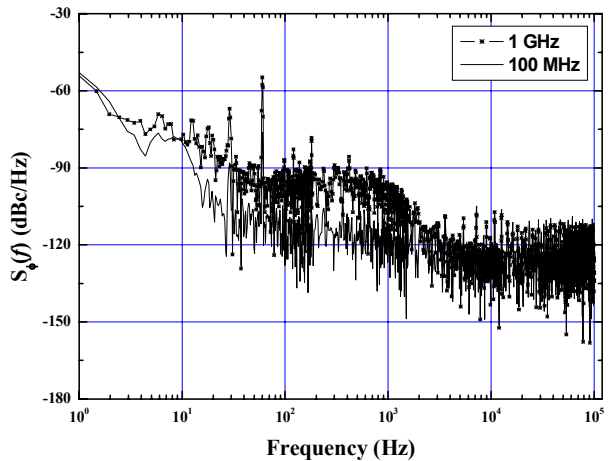


그림 2. 신호 발생기의 위상 잡음 파워스펙트럼 밀도.

참고문헌

(1) E. N. Ivanov, S. A. Diddams, et al., IEEE J. Select. Top. Quant. Elect. **9**, 1059-1065 (2003).
 (2) H. Inaba, S. Yanagimachi, F-L. Hong, et al., IEEE Trans. Instrum. Meas. **54**, 763-766 (2005).