

Optical Phase-Locked Loop의 최적 설계

Optimization of Optical Phase-Locked Loop Design

오 세 은*, 최 우 영
연세대학교 전자공학과

Abstract

Design of Optical Phase-Locked Loop(OPLL) is optimized in regard to laser linewidth, loop delay and phase noise. The values of characteristic parameters for OPLL building blocks are determined so that the phase error variance is minimized. It is shown that the resulting OPLL operates with stability and reliability.

Optical Phase-Locked Loop (OPLL)는 coherent 광통신[1], 위성통신[2] 또는 microwave photonic system[3] 등에서 아주 안정된 광원을 얻기 위해 사용된다. 이러한 시스템에 사용되는 OPLL은 시스템의 위상 오류를 최소화하기 위해서 루프 대역폭과 광원 선폭이 최적화 되어야 한다.

이제까지의 OPLL 해석에 관한 연구 결과를 살펴 보면, Grant는 이상적인 이차 OPLL의 성능에 미치는 영향을 연구했으며[4], Ramos는 이를 유한한 루프 지연과 산탄 잡음(shot noise)을 포함한 해석으로 까지 확대하여 레이저의 선폭과 사이클 슬립의 평균 시간의 함수로서 OPLL의 설계를 위한 선폭과 시간 지연의 한계를 유도했다.[5]

본 연구에서는 밀리미터파 영역에서 사용할 수 있는 안정된 OPLL의 구현을 위한 첫 번째 단계로 OPLL 구조의 최적화에 대한 해석적 연구를 시도하였다. 이를 위해 그림 1의 블록 다이어그램에서 보인 파라미터들을 갖는 OPLL을 선폭, 시간지연과 위상 잡음을 고려하여 수치적으로 구성해 보았다. 우선 OPLL이 충분히 안정적이고 신뢰성 있게 동작하도록 사이클 슬립이 일어나는 평균시간을 10년으로 하여 시간지연에 따른 레이저의 최대 허용 선폭을 구하였다. 아래 식(1)을 이용하여 루프 대역폭(100, 200, 400MHz) 별로 시뮬레이션한 것을 그림 2에 나타냈다.[2]

$$\Delta\nu \leq \frac{2\pi}{\int_0^\infty |1-H(2\pi f)|^2 df \cdot \ln\left(\frac{4T_{\Delta\nu}}{\pi} \int_0^\infty |H(2\pi f)|^2 df\right)} \quad (1)$$

여기서, $\Delta\nu$ 는 두 레이저의 선폭의 합으로 나타나며, 페루프 주파수 전달함수 $H(s)$ 는 다음 식과 같다.

$$H(s) = \frac{K_o K_d F(s) e^{-s\tau_d}}{s + K_o K_d F(s) e^{-s\tau_d}} \quad (2)$$

$F(s)$ 는 루프 필터의 전달함수로서,

$$F(s) = \frac{s\tau_1 + 1}{s\tau_2} \quad (3)$$

이고, K_o , K_d , τ_d 은 그림 1에 나타낸 블록들의 특성 파라미터로 K_o 는 VCO 레이저의 이득, K_d 는 광 검출기(Photo Detector)와 믹서(Mixer)의 이득, τ_d 는 루프의 시간지연이다. 다음으로 그림 2로부터 임의의 구현 가능한 선폭과 시간지연을 정해 이에 대해서 위상 오류를 최소화하는 최적화된 자연주파수(w_n)를 설정했다. 이에 사용된 식을 아래 보였다.

$$\sigma^2 = \frac{\Delta\nu}{\pi} \int_0^\infty \left| \frac{1-H(2\pi f)}{f} \right|^2 df \quad (4)$$

일반적인 반도체 레이저로 구현 가능한 선폭인 8MHz에서 지연시간을 바꾸어가며 행한 시뮬레이션 결과가 그림 3과 같이 나왔다. 또, 회로의 안정적 동작을 확인하기 위해 여기에서 구한 자연주파수를 나이퀴스트 안정도법을 통해 확인해야 한다. 이를 위해 개루프 전달 함수 $G(s)$ 를 구하면,

$$G(s) = w_n^2(1+s\tau_2) \cdot \exp(-s\tau_d)/s^2 \quad (5)$$

이로부터 다음 두 식에 의해 안정성을 위한 w 의 임계값은 쉽게 구할 수 있다.

$$w\tau_d = \arctan(w\tau_2) \quad (6)$$

$$w_n^2(1+(w\tau_2)^2)^{0.5}/w^2 < 1 \quad (7)$$

두 식을 정리하여 $\zeta=1/\sqrt{2}$ 를 대입하면, 아래와 같은 안정성에 관한 조건을 얻을 수 있다.

$$w_n\tau_d < 0.736 \quad (8)$$

나머지 설계 파라미터들은 다음에 나열하는 수식들로부터 구한다.

$$K_d = 2R\sqrt{P_r P_v} \quad (9)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_o K_d}{\tau_1}} \quad (10)$$

$$\zeta = \frac{w_n \tau_2}{2} \quad (11)$$

편의상, ζ 는 일반적으로 OPLL의 최적화된 특성을 나타내게 하는 $1/\sqrt{2}$ 를 사용했다. 식(4)과 식(9)에서 구한 w_n 과 K_d 으로부터 식(10)에서 τ_2 를 구하고 식(11)으로부터 τ_2 를 구한다. 레이저의 특성이 정해졌을 경우 변화시키기는 어려우므로 설계시에 조정할 수 있는 것은 루프 필터의 R, C이다.

실제로 8MHz의 선폭을 갖고, 지연시간이 400ps인 OPLL의 경우, 루프 대역폭이 217MHz, 위상 오류가 0.0472rad^2 , 사이클 슬립이 일어나는 평균시간은 71년으로 계산되었다. 이는 시스템이 신뢰성 있게 동작하기에 충분한 값들이다.

지금까지 알려진 레이저는 형태에 따라 다른 선폭을 갖는다. external grating cavity를 가진 레이저는 10-50kHz 정도의 선폭을, 복합 공진기 레이저(compound cavity laser)는 500kHz 정도이며, DFB 레이저의 경우에는 10MHz 정도의 선폭을 갖는다.[4] 간단하고 더 쉽게 구할 수 있는 레이저일수록 선폭이 커져가는 것을 알 수 있으며, 효율적인 시스템 구현을 위해 선폭이 큰 광원을 사용할 경우, 본 연구에서 수행된 바와 같은 최적화가 꼭 필요함을 알 수 있다.

참고문헌

[1] J. R. Barry and J. M. Kahn, "Carrier Synchronization for Homodyne and Heterodyne Detection of Optical Quadrature-Shift Keying," IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. 4, No. 8, 1992.
 [2] U. Gliese *et al.*, "Laser Linewidth Requirement and Improvements for Coherent Optical Beam Forming Networks in Satellites," IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. 9, No. 6, 1991.
 [3] U. Gliese *et al.*, "A Wideband Heterodyne Optical Phase-Locked Loop for Generation of 3-18GHz Microwave Carriers," IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. 4, No. 8, 1992.
 [4] M. A. Grant *et al.*, "The Performance of Optical Phase-Locked Loops in the Presence of Nonnegligible Loop Propagation Delay," IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. LT-5, No. 5, 1987.
 [5] R. T. Ramos and A. J. Seeds, "Delay, Linewidth and Bandwidth Limitations in Optical Phase-Locked Loop Design," IEE Electron. Lett., Vol. 26, No. 6, 1990.

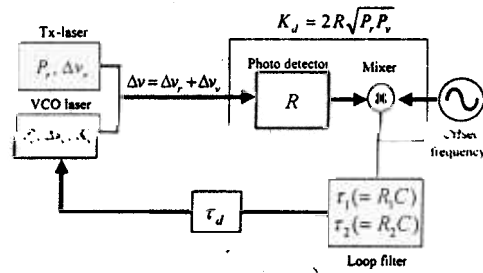


그림 1. OPLL의 블록 다이어그램

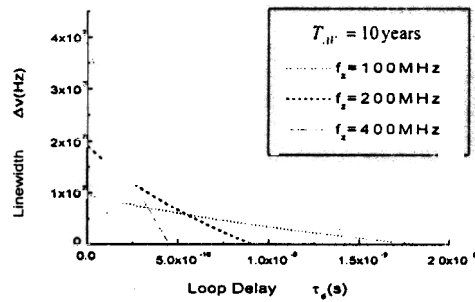


그림 2. 루프의 안정된 동작을 위해 허용되는 레이저의 선폭

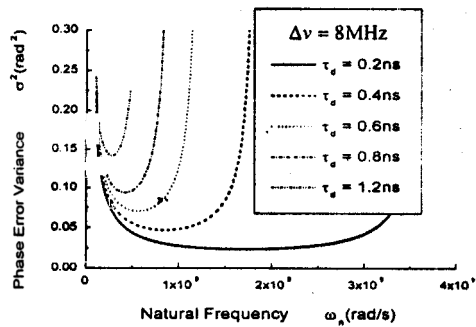


그림 3. 주어진 선폭과 시간지연에서 위상오류를 최소화하는 최적화된 자연주파수