

論文99-36D-6-9

# 반도체 VCO Laser의 주파수 응답 특성이 Optical Phase-Locked Loop 성능에 미치는 영향

(Influence of Semiconductor VCO Laser Frequency Response on Optical Phase-Locked Loop Performance)

吳世殷\*, 崔佑榮\*

(Se-Eun O and Woo-Young Choi)

## 요약

본 논문에서는 마이크로웨이브 대역의 OPLL 해석시 루프 시간 지연뿐만 아니라, 기존의 연구에서는 고려하지 않았던 반도체 VCO laser의 주파수 응답을 모델링하여 OPLL의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 루프 시간 지연은 시스템의 안정성과 레이저의 최대 허용 선폭에 대한 조건을 더욱 엄격하게 함을 확인할 수 있었다. 또한, VCO laser의 주파수 응답을 고려할 경우 레이저의 최대 허용 선폭을 최적화된 값으로 설정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 대역폭이 큰 OPLL을 설계할 경우에는 루프 시간 지연뿐만 아니라, VCO laser의 주파수 응답 특성까지도 고려되어야 한다.

## Abstract

In this paper, a new model for optical phase-locked loop(OPLL) is proposed that includes VCO laser frequency response as well as loop propagation delay. It is found that both of them greatly affect the OPLL performance. Our model can be used for realizing high-performance microwave-range OPLL.

## I. 서론

최근에 마이크로웨이브 신호의 광 전송과 마이크로웨이브 소자의 광 제어, 그리고 마이크로웨이브 통신 시스템에서 phased array antenna를 위한 optical beam forming등의 응용 분야에서 마이크로웨이브 대역의 광 신호 생성 및 전송과 처리에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 이러한 응용에 필요한 마이크로웨이브 대역의 광 반송파 생성을 위해서, 두 개의 레이저로 안정된 광원을 만들어 내는 헤테로다인 optical

phase-locked loop(OPLL)를 사용할 수 있으며 최근에 Phased Array Communications Antenna를 위한 9GHz OPLL prototype 구현에 관한 연구 결과가 발표된 바 있다<sup>[1]</sup>.

그림 1은 이러한 헤테로다인 OPLL의 구성과 동작을 설명하기 위한 것이다. OPLL은 주파수  $f_m$ 으로 동작하는 Master laser와 주파수  $f_v$ 로 동작하는 VCO laser 간의 비팅 주파수( $f_m - f_v$ )가 안정된 신호원의 기준 주파수  $f_c$ 에 동기 되도록 동작한다. 이 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다. Master laser의 신호( $f_m$ )와 VCO laser의 신호( $f_v$ )가 광 검출기를 통하여 서로 비팅된 후, 전기적인 신호로 변환된다. 다시 이 신호는 비교적 안정된 전기 신호원의 기준 주파수와 믹서를 통하여 합성되고, 이 합성된 신호 중에 두 신호의 주파수 차에 해당하는 성분만이 저역 통과

\* 正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Microelectronics Lab., Dept. of Electronic Eng., Yonsei University)

接受日字:1999年2月23日, 수정완료일:1999年5月3日

여파기(low pass filter)로써 동작하는 루프 필터를 통과하여 VCO laser의 제어 신호로 전달된다. 이런 과정을 통하여 Master laser와 VCO laser는 기준 주파수에 동기된 안정된 비팅 주파수를 제공할 수 있다.

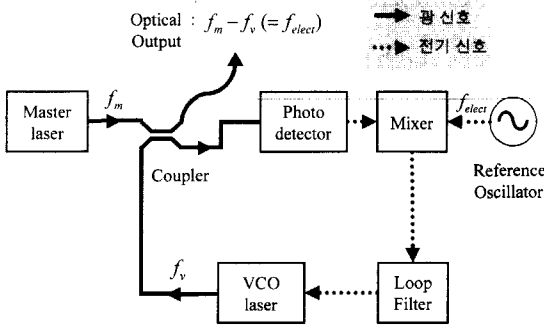


그림 1. 헤테로다인 optical phase-locked loop의 블록 다이어그램

Fig. 1. Block diagram for heterodyne optical phase-locked loop.

일반적으로 External cavity를 사용하지 않는 반도체 레이저로 OPLL을 구현하면, 시스템 크기를 소형화할 수 있어 응용성을 크게 높일 수 있다. 그러나, 반도체 레이저의 선폭에서 기인하는 위상 잡음과 루프 돌래를 순환하는 오류 신호의 루프 통과 시간으로 인해 OPLL의 위상 오류 분산(phase error variance)이 커져 안정된 OPLL을 구현하기 힘들어진다. 따라서, 안정된 OPLL의 구현을 위해서는 위상 오류 분산에 영향을 미치는 요인들을 살펴보고, 이로부터 반도체 레이저의 선폭에 대한 제한 조건을 구하는 것이 중요하다. 기존의 연구에서는 루프 시간 지연이 위상 오류 분산에 미치는 영향만을 살펴보았으나, 본 연구에서는 VCO laser의 주파수 응답까지도 고려하여 위상 오류 분산에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 이로부터 OPLL이 안정적으로 동작하기 위한 반도체 레이저의 최대 허용 선폭도 제시하였다.

이제까지의 OPLL 해석에 관한 연구 결과를 살펴보면, Hodgkinson은 검출기의 산탄 잡음(shot noise)과 quantum phase noise를 고려하여 위상 오류 분산을 최소화 하는 최적의 OPLL 대역폭을 결정했고<sup>[2]</sup>, Kazovsky는 호모다인 수신기에서 최적의 루프 대역폭을 결정하고 이로부터 최대 허용 가능한 레이저 선폭의 조건을 제시했다<sup>[2]</sup>. Grant는 이상적인

2차 OPLL의 성능에 루프 시간 지연이 미치는 영향을 분석했으며<sup>[3]</sup>, Ramos는 이를 유한한 루프 시간 지연과 산탄 잡음을 포함한 해석으로까지 확대하여 레이저의 선폭과 사이클 슬립의 평균시간의 함수로서 OPLL의 설계를 위한 선폭과 시간지연의 한계를 유도했다<sup>[4]</sup>. 그러나, 이러한 이전의 연구에서는 루프 시간 지연이 OPLL의 성능에 미치는 영향은 연구되었지만, VCO laser의 주파수 응답의 영향은 고려된 바 없었다.

본 연구에서는 마이크로웨이브 대역에서 사용할 수 있는 안정된 OPLL의 구현이라는 궁극적인 목표 아래 OPLL의 자세한 이론적 해석을 수행하였으며 특히 VCO laser의 주파수 응답 특성이 OPLL 성능에 미치는 영향을 처음으로 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II절은 OPLL 해석에 필요한 선형 모델을 제시하고 이에 대한 시스템 전달함수를 유도하여, 이로부터 시간 지연과 VCO laser의 주파수 응답 특성이 미치는 영향을 분석하기 위한 위상 오류 분산을 유도한다. 제 III절에서는 시간 지연이 시스템의 안정성과 레이저의 최대 허용 선폭에 미치는 영향을 분석한다. 그리고, 제 IV절에서는 VCO laser의 주파수 응답이 OPLL의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 제 V절에서는 앞에서 논의한 시간 지연과 VCO laser의 주파수 응답이 OPLL에 미치는 영향을 요약하는 것으로 끝을 맺는다.

## II. 위상 오류 분산(Phase Error Variance)의 유도

안정된 OPLL을 구현하기 위해서는 레이저의 위상 잡음과 검출기의 산탄 잡음을 고려하여 이들이 위상 오류 분산에 미치는 영향을 최소화 해야한다<sup>[2]</sup>. 그러기 위해, 시스템 전달함수를 사용하여 이들 잡음과 위상 오류 분산과의 관계를 유도할 필요가 있다.

### 1. Phase-Locked Loop의 선형 해석

Phase-Locked Loop의 선형 해석을 위해 PLL을 선형 모델링한다. 여기서 “선형”이란 말의 의미는 PLL이 locked state를 갖도록 하는 위상 오차의 범위 내에서 동작하고 있음을 말한다. 본 논문에서 OPLL 해석시 사용하게 될 루프의 모델은 그림 1을 모델링한 2차 선형 모델이다. 이러한 2차 선형 모델은 입력신호

로  $\phi_r$ , 출력신호로  $\phi_e$ , 대역폭  $f_z$ 를 갖는 2차 저역 통과 여파기로 생각할 수 있다. 루프 대역폭  $f_z$ 는 이러한 2차 저역 통과 여파기의 damping factor, oscillation 등을 고려한 3dB 대역폭을 말한다. 루프 대역폭  $f_z$ 가 클수록 PLL이 쫓아갈 수 있는 위상 오차의 크기가 증가한다고 생각할 수 있다. 이는 그림 2와 같은 블록 다이어그램으로 나타난다. 이 시스템의 전달 함수를 기존의 표준 PLL 해석에서와 유사한 형태로 유도해 낼 수 있는데, 그 과정은 다음과 같다.

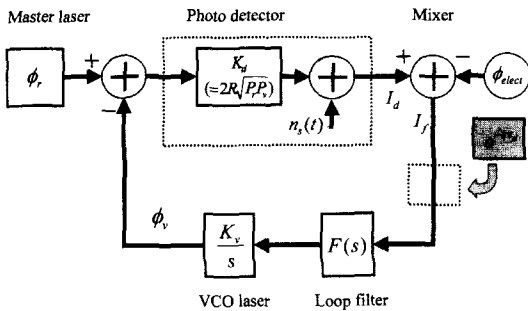


그림 2. 헤테로다인 optical phase-locked loop의 선형 모델

Fig. 2. Linear model for heterodyne optical phase-locked loop.

그림 2에서와 같이 Master laser의 신호와 VCO laser 신호가 광 검출기를 통과하면, 검출기의 출력 광 전류는 DC 전력 항을 제거할 경우에 다음과 같이 주어진다<sup>[4]</sup>.

$$I_d(t) = 2R\sqrt{P_r P_v} \cdot \sin(\phi_r - \phi_v) + n_s(t) \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 광 검출기의 responsivity,  $P_r$ 과  $P_v$ 은 각각 Master laser와 VCO laser 신호의 전력,  $\phi_r$ 과  $\phi_v$ 는 각각 Master laser와 VCO laser 신호의 위상이다.

식 (1)에 sine함수에 대한 선형 근사화를 사용하면,

$$I_d(t) = 2R\sqrt{P_r P_v} \cdot (\phi_e) + n_s(t) \quad (2)$$

여기서,  $\phi_e = \phi_r - \phi_v$  (3)

이고  $n_s(t)$ 는 검출 과정과 빛의 양자 특성과 관련된 산탄 잡음 항목으로 다음과 같은 전력 스펙트럼 밀도를 가진다. 즉,

$$S_{SN} = 2eRP_v \quad (4)$$

여기서,  $e$ 는 전자의 전하량이다.

위상 오류  $\phi_e$ 은 위상 잡음  $S_{PN}$ 을 포함한다. 위상 잡음  $S_{PN}$ 는 다음과 같은 양측 전력 스펙트럼 밀도를 가진 Master laser와 VCO laser의 위상 잡음의 합으로 나타난다.

$$S_{PN} = \frac{\Delta v_r + \Delta v_v}{2\pi f^2} = \frac{\Delta v_{TOT}}{2\pi f^2} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta v_r$ 과  $\Delta v_v$ 은 각각 Master laser와 VCO laser의 선폭(FWHM : full-width-half-maximum)이다.

광 검출기 이득  $K_d$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$K_d = 2R\sqrt{P_r P_v} \quad (6)$$

위상과 산탄 잡음을 추가한 것을 별도로 할 때, 식 (2)는 표준 PLL 해석과 유사한 형태를 취한다. 이렇게 하여 그림 2의 OPLL의 전달 함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H(s) = \frac{K_v K_d F(s)}{s + K_v K_d F(s)} \quad (7)$$

여기서,  $K_v$ 는 VCO 이득이고,  $F(s)$ 는 루프 필터의 전달 함수이다. 본 논문에서는 루프 필터의 전달 함수를 다음과 같은 1차 능동 필터를 사용하는 것으로 가정한다.

$$F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{s\tau_1} \quad (8)$$

또한, 루프 전달 함수로부터 루프 자연주파수  $\omega_n$ 와 감쇄 상수  $\zeta$ 를 정의할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_v K_d}{\tau_1}} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{\tau_2 \omega_n}{2} \quad (10)$$

### 2. 위상 오류 분산(Phase Error Variance)

모든 잡음 분포가 에르고딕하다고 가정하면, 레이저의 위상 잡음과 검출기의 산탄 잡음을 포함하는 위상 오류 분산은 다음과 같이 구해진다<sup>[5]</sup>.

$$\sigma_\phi^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{PN} |1 - H(j2\pi f)|^2 df + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_{SN}}{K_d^2} |H(j2\pi f)|^2 df \quad (11)$$

위 식은 OPLL의 성능을 나타내는 일반적인 식으로 두 개의 적분은 다음과 같은 잡음 대역폭으로 표시될 수 있다.

$$B_{PN} = \int_0^\infty \left| \frac{1-H(j2\pi f)}{f} \right|^2 df \quad (12)$$

$$B_{SN} = \int_0^\infty |H(j2\pi f)|^2 df \quad (13)$$

식 (11)에 (4), (5), (6)를 대입하고, 식 (12)와 (13)를 사용하여 위상 오류 분산을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_\phi^2 = \frac{4v_{TOT}}{\pi} B_{PN} + \frac{e}{RP_r} B_{SN} \quad (14)$$

### III. 루프 전달 시간지연의 영향

OPLL에는 광학적 루프 경로와 전기적 루프 경로가 사용된다. 주로 광학적 경로에서 발생하는 루프 시간 지연으로 인해 OPLL의 전달함수는 추가적인 극(pole)을 갖게 된다. 일반적으로 극의 수가 증가할수록 시스템의 안정성 요건은 복잡해진다. 작은 선폭을 가진 레이저를 사용한 시스템에서는 시스템의 위상 오류 분산을 최소화하기 위해 필요한 루프 대역폭이 작기 때문에 루프 전달 시간지연을 무시한 해석이 유효하다. 그러나, 대역폭이 큰 시스템에 대해서는 선폭이 큰 광원을 위상 동기시키고자 할 때, 시간지연을 무시할 수 없으며, 이런 경우에 절대적인 안정성을 보장할 수 없다. 아래에서는 시간 지연의 영향을 고려하여 전체 위상 오류 분산의 악화로 인한 최대 허용 선폭의 감소와 안정성 보장을 위한 루프 대역폭과 시간 지연에 대한 필요충분 조건을 유도한다. 이를 위해 그림 2에 루프 시간 지연을 고려한 지수함수 블록을 포함시킬 수 있다.

#### 1. 안정성의 악화

루프가 선형 시스템이므로, 루프 시간 지연이 포함된 그림 2과 같이 전체 루프 지연을 합쳐 하나로 취급할 수 있다. 그러면, 개루프 전달 함수  $G(s)$ 는 아래와 같이 수정된다.

$$G(s) = K_v K_d F(s) e^{-s\tau_d} = \frac{\omega_n^2 (1 + s\tau_2)}{s^2} e^{-s\tau_d} \quad (15)$$

나이키스트 안정도 기법을 사용하여 루프 안정성에 대한 제한을 세울 수 있다. 이로부터 다음 두 식에 의해 안정성을 위한  $\omega$ 의 임계값 ( $\omega_{cr}$ )을 쉽게 구할 수 있다.

$$|G(j\omega_{cr})| = 1 \quad (16)$$

$$\angle G(j\omega_{cr}) < -\pi \quad (17)$$

이 두 식으로부터 안정성에 관한 조건을 유도할 수 있다.

$$\omega_n \tau_d < \frac{P.V. [\arctan(2\zeta\sqrt{2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}})]}{\sqrt{2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}}} \quad (18)$$

이 조건에 일반적으로 PLL이 최적의 동작을 하도록 하는  $\zeta = 1/\sqrt{2}$ 를 대입하면<sup>[6]</sup>,

$$\omega_n \tau_d < 0.736 \quad (19)$$

이라는 조건을 얻을 수 있다. 이것은 루프 시간 지연을 고려하지 않을 경우 ( $\tau_d = 0$ )에는 나타나지 않는 조건으로, 유한한 시간 지연에 대해 시스템이 안정화되기 위해서는 자연주파수  $\omega_n$ 에 대한 제한이 주어짐을 의미한다. 또한, 루프 대역폭이 자연주파수  $\omega_n$ 에 비해 하므로, 대역폭이 큰 OPLL의 경우, 안정화를 위한 시간 지연의 조건이 더욱 엄격해짐을 나타낸다.

#### 2. 레이저 선폭의 필요조건

OPLL이 선형 영역에서 동작할 때에도, 잡음으로 인해 VCO 레이저가 한번 혹은 그 이상의 사이클을 놓쳐 루프가 동기를 잃을 가능성이 존재한다. 이러한 사이클 슬립이 일어나는 평균 시간은 다음과 같은 근사화된 식으로 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$T_{av} \cong \frac{\pi e^{2/(\sigma_\phi)^2}}{4B_{SN}} \quad (20)$$

식 (14)과 (20)을 정리하여 선폭에 관한 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\Delta v \leq \frac{\pi}{B_{PN}} \left[ \frac{2}{\ln(T_{av} \cdot 4B_{SN}/\pi)} - \frac{eB_{SN}}{RP_r} \right] \quad (21)$$

위 식은 평균 사이클 슬립이 일어나는 시간  $T_{av}$ , 루프 시간 지연  $\tau_d$ 와 루프 대역폭이 주어질 경우, 최대 허용 레이저의 선폭을 계산하는데 사용할 수 있다.

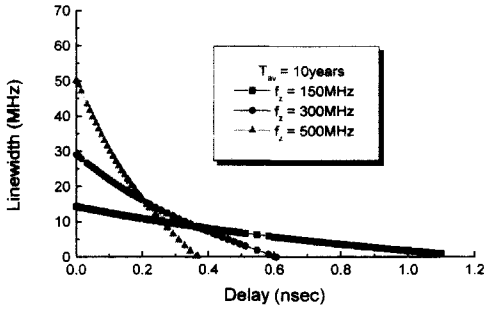


그림 3. 시간 지연의 함수로서 나타낸 루프의 안정적 동작을 위한 레이저의 최대 허용 선폭 (fz: 루프 대역폭)

Fig. 3. Maximum permissible linewidth for lasers when OPLL is stable loop as function of loop time delay(fz: loop bandwidth).

그림 3는 식 (21)을 사용하여 평균 사이클 슬립이 일어나는 시간  $T_{av}$ 을 10년으로 하여 각각의 루프 대역폭에 대하여 시간 지연에 따른 레이저의 최대 허용 가능한 선폭을 나타낸 것이다. 이로부터 루프 대역폭이 큰 경우, 시간 지연의 영향은 크지만 최대 허용 레이저의 선폭은 늘어나고, 루프 대역폭이 작은 경우에는 시간 지연에 대한 영향은 작지만, 최대 허용 레이저의 선폭 또한 줄어들음을 볼 수 있다. 이것은 시스템의 대역폭이 커짐에 따라 루프 둘레를 순환하는 오류 신호의 루프 통과 시간에서 기인하는 위상 천이에 의한 영향, 즉 루프 시간 지연의 영향이 커짐을 나타내는 것이다.

#### IV. VCO Laser 주파수 응답의 영향

지금까지 제시된 분석은 VCO laser의 주파수 응답을 모든 주파수 영역에서 균일한(uniform) 것으로 가정하여 이에 대한 고려를 하지 않았다. 그러나 본 연구의 결과로부터 VCO laser 주파수 응답의 3dB 대역폭과 공진 주파수의 변화가 OPLL 성능에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 아래에서는 VCO laser의 주파수 응답을 3dB 대역폭 제한과 공진 주파수에 의한 변화로 나누어 OPLL의 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

##### 1. VCO laser의 주파수 응답

VCO laser의 주파수 응답은 FM(Frequency

Modulation) 응답과 AM(Amplitude Modulation) 응답으로 이루어진다. FM 응답 효율과 AM 응답 효율을 VCO 이득( $K_v$ )과 광 검출기 이득( $K_d$ )에 포함시켜 고려할 경우, FM 응답  $D(s)$ 와 AM 응답  $E(s)$ 은 비율 방정식의 소신호 분석으로부터 각각 다음과 같은 식으로 주어진다<sup>[7]</sup>.

$$D(s) = \frac{1 + s/\Omega_c}{1 + s(\Omega_d + \Omega_c)/\omega_r^2 + s^2/\omega_r^2} \quad (22)$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + s(\Omega_d + \Omega_c)/\omega_r^2 + s^2/\omega_r^2} \quad (23)$$

여기서, spontaneous emission을 무시하기 위해 레이저가 threshold보다 충분히 높은 영역에서 동작한다고 가정하면, 식 (22)와 (23)의 공진 주파수  $\omega_r$ , damping correction frequency  $\Omega_c$ , damping frequency  $\Omega_d$ 는 다음과 같이 근사화하여 나타낼 수 있다.

$$\omega_r \cong AN_p/\tau_p \quad (24)$$

$$\Omega_c \cong \chi\omega_r^2\tau_p \quad (25)$$

$$\Omega_d = (1/\tau) + \omega_r^2\tau_p \quad (26)$$

여기서,  $\chi$ 은 아래와 같이 정의되는 감쇄 파라미터이며,

$$\chi \equiv \frac{\epsilon}{A\tau_p} \quad (27)$$

$A$ 는 temporal gain cross section,  $N_p$ 는 광자의 농도,  $\tau_p$ 은 광자의 수명,  $\tau$ 는 캐리어의 수명,  $\epsilon$ 는 gain compression factor이다.

VCO laser의 주입 전류  $I_{cont}$ 에 대한 주파수 변화  $\Delta\omega_{out}$ 를 VCO laser의 FM 응답  $D(s)$ 를 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\omega_{out}(s)}{I_{cont}(s)} = K_v \cdot D(s) \quad (28)$$

여기서, VCO 이득  $K_v$ 는 레이저의 FM 응답 효율을 포함한 것이다. 위상은 주파수에 대한 시간 적분이므로, VCO의 입출력 전달 함수를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Theta_{out}(s)}{I_{cont}(s)} = \frac{1}{s} \frac{\Delta\omega_{out}(s)}{I_{cont}(s)} = \frac{K_v}{s} D(s) \quad (29)$$

또한, VCO laser의 주입 전류  $I_{cont}$ 에 대한 출력 전력 변화  $\Delta P_{out}$ 를 VCO laser의 AM 응답  $E(s)$ 를 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta P_{out}(s)}{I_{cont}(s)} = P_v \cdot E(s) \quad (30)$$

여기서, VCO 출력 전력  $P_v$ 는 레이저의 AM 응답 효율을 포함한 것이다. 따라서, 광 검출기의 이득  $K_d$ 는 아래와 같은 형태로 변환된다.

$$K_d = 2R\sqrt{P_r P_v E(s)} = 2R\sqrt{P_r P_v} \sqrt{E(s)} \quad (31)$$

그림 4는 그림 2에 VCO laser의 주파수 응답  $D(s)$ ,  $E(s)$ 까지를 고려하여 나타낸 블록 다이어그램이다.

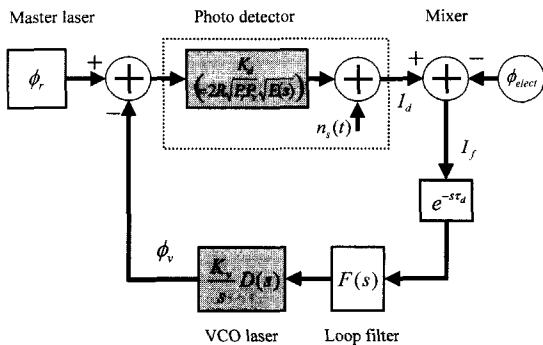


그림 4. VCO laser 주파수 응답을 포함한 헤테로다인 optical phase-locked loop의 선형 모델

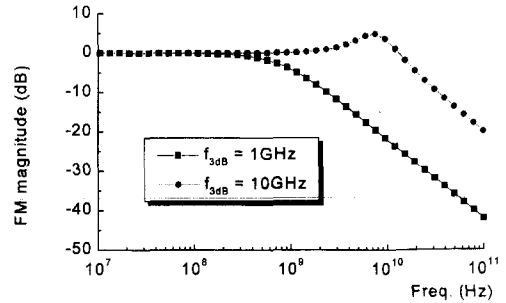
Fig. 4. Linear model for heterodyne optical phase-locked loop including the frequency response of VCO laser.

2. 3dB 대역폭 변화에 의한 영향

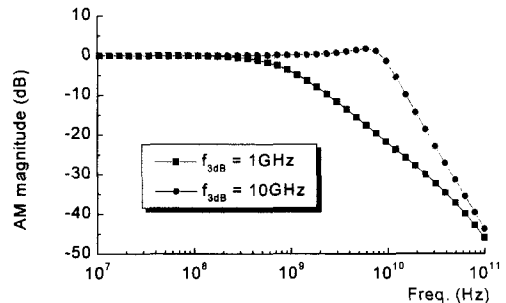
식 (24)과 (27)를 살펴보면 공진 주파수와 감쇄 파라미터는 여러 가지 파라미터에 대해 동시에 의존하는 값이므로 공진 주파수와 감쇄 파라미터를 독립적으로 변화시키는 것은 어렵다. 따라서, 3dB 대역폭의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해서 임의로 공진 주파수를 고정한 상태에서 감쇄 파라미터 값을 8과 100으로 설정하였다. 이를 나타낸 것이 그림 5의 (a)와 (b)이다.

그림 5의 (a)와 (b)에서 각각의 두 곡선은 공진 주파수를 8GHz로 고정한 상태에서 감쇄 파라미터를 8과 100으로 조정하여, 각각 1GHz와 10GHz의 대역폭을 갖도록 하였다. 이러한 VCO laser의 주파수 응답

을 시스템 전달함수에 포함하여 III절의 식 (21)을 사용하여 루프 대역폭에 따른 레이저의 최대 허용 가능한 선폭을 나타낸 것이 그림 6이다.



(a)



(b)

그림 5. 감쇄 파라미터의 변화에 따른 VCO laser의 FM (a)와 AM (b) 응답 특성

Fig. 5. FM (a) and AM (b) response characteristics of VCO laser for the variation of damping parameter.

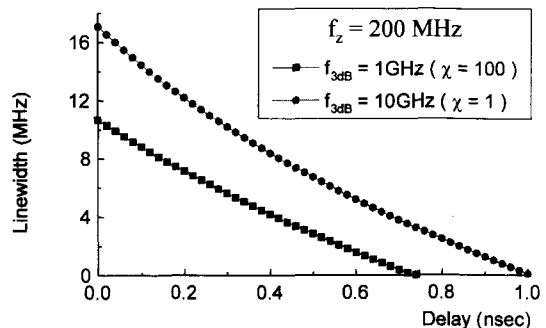


그림 6. VCO laser 주파수 응답의 대역폭 변화에 따른 시간지연과 레이저 최대 허용 선폭의 관계  
Fig. 6. Relation between loop time delay and maximum permissible linewidth for VCO lasers with different damping parameter.

이 때, 평균 사이클 슬럼프가 일어나는 시간  $T_{av}$ 를 10년으로 하고, 시간 지연을 400ps로 하였다. 이를 보

면, VCO laser의 3dB 대역폭이 10GHz이상일 경우에 FM 응답을 고려하지 않은 경우와 같은 결과를 가져오나, 이보다 작은 경우 최대 허용 레이저의 선폭이 작아짐을 알 수 있다. 이것은  $\Pi$  절의 식 (12)와 (13)의 시스템 잡음 대역폭이 레이저의 대역폭에 의해 영향을 받아서 VCO laser의 주파수 응답을 고려하지 않은 경우보다 커져 나타내는 현상이다.

3. 공진 주파수의 변화에 의한 영향

그림 7의 (a)와 (b)는 공진 주파수의 변화에 따른 VCO laser 주파수 응답의 특성을 살펴본 것이다. 감쇄 파라미터를 8로 고정된 상태에서 공진 주파수만을 변화시킬 경우, 응답의 3dB 대역폭은 크게 변화하지 않는 상태에서 응답 곡선의 최대값이 나타나는 위치와 크기만이 심하게 변화함을 볼 수 있다.

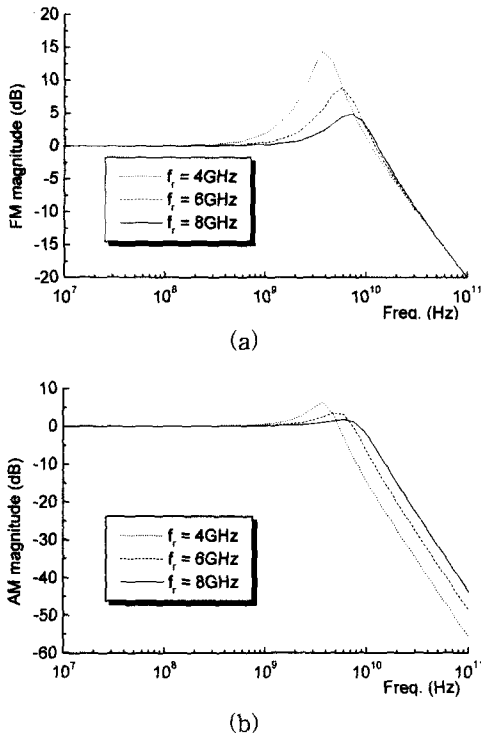


그림 7. 공진 주파수의 변화에 따른 VCO laser의 FM (a)와 AM (b) 응답 특성  
 Fig. 7. FM (a) and AM (b) response characteristics of VCO laser for the variation of resonance frequency.

그림 8는 그림 7과 같은 VCO laser의 공진 주파수 변화에 따른 레이저의 최대 허용 선폭을 살펴본 그래프이다. 루프의 대역폭을 180MHz, 262MHz와

424MHz로 바꾸어 가며 각각의 대역폭마다 공진 주파수를 4GHz, 6GHz와 8GHz로 하여 시뮬레이션 하였다. 이를 보면 루프 시간 지연만을 고려한 경우와 같이 루프 대역폭에 따른 레이저의 최대 허용 선폭에 관한 제한은 루프 대역폭이 증가함에 따라 증가하지만 루프 시간 지연의 증가와 함께 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 VCO laser의 주파수 응답을 고려한 경우에 VCO laser의 공진 주파수가 작아짐에 따라 레이저의 최대 허용 선폭은 증가함을 알 수 있다. 이것은 VCO laser의 공진 주파수를 고려할 경우, OPLL를 안정적으로 동작시키기 위한 레이저의 최대 허용 선폭에 대한 값을 최적화할 수 있음을 나타낸다.

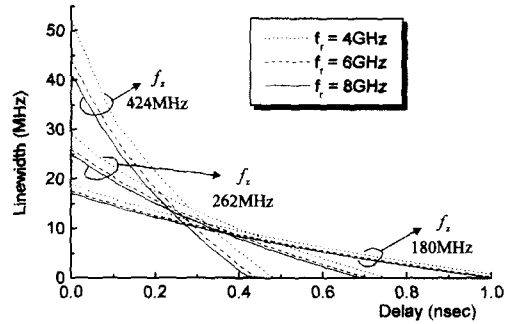


그림 8. VCO laser 주파수 응답의 공진 주파수 변화에 따른 레이저의 최대 허용 선폭  
 Fig. 8. Relation between loop time delay and maximum permissible linewidth for VCO lasers with different resonance frequency.

V. 결론

본 논문에서는 OPLL 해석시 루프 시간 지연뿐만 아니라, VCO laser의 주파수 응답을 모델링하여 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 시간 지연이 시스템에 미치는 영향의 경우, 루프 대역폭이 커짐에 따라서 안정성과 레이저의 최대 허용 선폭에 대한 조건이 더욱 엄격함을 확인하였다. 또한, 기존의 연구에서 고려하지 않았던, VCO laser의 주파수 응답을 고려하여, 이에 의한 레이저의 최대 허용 선폭에 대한 영향을 살펴보았다. VCO laser 주파수 응답의 3dB 대역폭이 작은 경우 레이저의 최대 허용 선폭을 제한하게 됨을 확인하였다. 또한 VCO laser 주파수 응답의 공진 주파수 변화를 고려할 경우, 더욱 최적화된 레이저의 최대 허용 선폭을 구할 수 있음을 확인하였

다. 따라서, 실제적으로 대역폭이 큰 OPLL을 설계할 경우, 루프 시간 지연뿐만 아니라, VCO laser의 주파수 응답 특성까지 고려해야 함을 알 수 있었다. VCO laser의 주파수 응답을 고려할 경우에 OPLL의 구현을 위한 보다 정확한 시뮬레이션 정보를 얻을 수 있으므로, 본 연구의 결과는 반도체 레이저를 이용한 실용적인 OPLL의 구현에 많은 도움을 주리라 생각된다.

참 고 문 헌

[ 1 ] L. N. Langley, "Optical Phase locked loop (OPLL) module for use as a 9 GHz source in phased array communications antennas," *International Topical Meeting on Microwave Photonics, Technical Digest*, pp. 141-142, 1998.

[ 2 ] T. G. Hodgkinson, "Phase-locked-loop analysis for pilot carrier coherent optical receivers," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 25/26, pp. 1202-1203, 1985.

[ 3 ] L. G. Kazovsky, "Balanced phase-locked loops for optical homodyne receivers: performance analysis, design consider-

ations, and laser linewidth requirements," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 2, pp. 182-195, 1986.

[ 4 ] M. A. Grant, W. C. Michie, and M. J. Fletcher, "The performance of optical phase-locked loops in the presence of nonnegligible loop propagation delay," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pp. 1083-1093, 1991.

[ 5 ] R. T. Ramos and A. J. Seeds, "Delay, Linewidth and bandwidth limitations in optical phase-locked loop design," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 6, pp. 1202-1203, 1990.

[ 6 ] R. E. Best, *Phase-Locked Loops : Theory, Design and Applications*, 2nd ed, McGraw-Hill, NY, 1984.

[ 7 ] M. Kuznetsov, "High-speed frequency modulation and switching of tunable distributed feedback lasers with two active segments," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 668-677, 1991.

저 자 소 개

吳世殷(正會員)  
1997년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(학사), 1999년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)

崔佑榮(正會員)  
1963년 8월 10일생, 1988년 5월 MIT EECS BS 및 MS 취득. 1994년 5월 동 대학원 Ph.D 취득. 1994년 10월 ~ 1995년 8월 일본 NTT 광전자 연구소 Post-doctoral fellow. 1995년 9월 ~ 현재 연세대학교 기전공학부 조교수. 주관심분야는 Ultra fast devices and systems