

레이저 직접 변조를 이용한 광전 발진기의 성능 분석

조준형 · 허서원 · 성혁기*

Performance Analysis of the Optoelectronic Oscillator using the Direct Modulation Laser

Jun-Hyung Cho · Seo-Weon Heo · Hyuk-Kee Sung*

School of Electronic and Electrical Engineering, College of Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

요 약

본 논문에서는 반도체 레이저의 직접 변조를 이용한 광전 발진기의 성능에 대한 이론적인 해석을 수행하였다. 먼저 광전 발진기를 구성하는 각 부분의 응답 특성을 해석하고, 이를 이용하여 광전 발진기 전체의 개방 루프 응답 특성을 얻었다. 다음으로 개방 루프 응답 특성의 크기 응답과 위상 응답 해석 결과에 루프 발진기의 발진 원리를 적용하여 광전 발진기의 발진 주파수, 스퓨리어스 톤의 간격, 위상 잡음의 성능을 도출하였다.

ABSTRACT

The performance analysis of optoelectronic oscillator(OEO) based on a directly modulated semiconductor laser was theoretically achieved. First, the analysis was performed on the open response of the key components that constitute the OEO loop. Using the results, we simulated the open-loop characteristics of the OEO loop. By combining oscillation conditions of loop oscillator in addition to the open-loop magnitude and phase responses, theoretical performance analysis such as OEO's oscillation frequency, spurious tones and phase noise was successfully completed.

키워드 : 반도체 레이저, 직접 변조, 광전 발진기, 개방 루프 응답

Key word : Semiconductor laser, Direct modulation, Optoelectronic oscillator, Open loop response

접수일자 : 2014. 07. 03 심사완료일자 : 2014. 07. 19 게재확정일자 : 2014. 08. 01

* **Corresponding Author** Hyuk-Kee Sung (hksung@hongik.ac.kr, Tel: +82-2-320-3037)

School of Electronic and Electrical Engineering, College of Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.8.2029>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

루프 구조의 발진기는 루프의 지연 시간을 이용한 발진기이다. 이 발진기는 신호가 루프를 통과함에 따라 발생하는 신호 지연 시간이 증가 할수록 위상 잡음이 낮아지는 특성을 가지고 있다. 따라서 낮은 위상 잡음의 발진 신호를 얻기 위해서는 이 발진기의 지연 시간을 증가시켜야 한다. 하지만 루프의 길이를 증가시키면 그에 따른 손실이 증가를 하게 된다. 이를 극복하고 루프가 자체 발진하기 위해서는 보다 높은 증폭률의 증폭기를 사용하여야 한다. 그러나 증폭기 사용은 발진 신호의 위상잡음을 증가시키는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광전 발진기가 제안 되었다[1]. 광전 발진기는 기본적으로 루프 구조를 이용한 발진기이며, 특징은 긴 지연시간을 구성하기 위하여 광섬유를 이용하는 것이다. 광전 발진기의 루프 구성에 사용된 광섬유는 긴 지연 시간을 얻기 위해 매우 긴 길이(수 km 이상)를 이용하지만 광섬유의 전송 손실이 매우 낮아(약 0.2 dB/km 미만) 여타 전송 매체를 이용한 발진 루프에 비하여 손실이 매우 낮다. 만약 스트립 라인이나 금속 도파관을 이용하여 광섬유 루프와 같은 긴 지연시간을 동등하게 구성 하려면 크기가 매우 커질 뿐만 아니라 많은 손실이 발생할 것이다. 그러므로 광섬유 전송 루프를 이용한 광전 발진기에 의해 얻어진 발진 신호는 전기적 루프를 이용한 발진기로부터 얻을 수 있는 발진 신호에 비하여 매우 낮은 위상 잡음을 가진다.

광전 발진기는 또한 아래와 같은 다양한 장점들을 가지고 있다. 첫째로 광전 발진기의 발진 신호를 얻기 위해서는 전/광 혹은 광/전 변환이 필요하다. 이 과정에서 자연스럽게 광신호 및 전기적 발진 신호를 동시에 모두 얻어낼 수 있다. 따라서 광전 발진기는 전기적 시스템 및 광 시스템, 그리고 양자를 혼용한 시스템에 다양하게 사용될 수 있다. 둘째로 광전 발진을 위한 초기 신호로 광신호를 이용하기 때문에 광전 발진기의 전기적 장치에 성능에 따라 마이크로파, 밀리미터파, 나아가 테라헤르쯔파까지 매우 넓은 대역의 주파수를 가진 발진 신호를 단순한 구조로 얻어 낼 수 있다[2]. 셋째로 발진 주파수가 증가 하더라도 위상잡음은 긴 지연 시간을 가진 광섬유에 의존하기 때문에 추가적인 위상잡음의 증가가 없으므로, 고주파수 발진과 저 위상잡음의 장점들

동시에 달성 할 수 있다.

이러한 장점들에도 불구하고 광전 발진기에 대하여 몇 가지 극복하여야 할 문제가 있다. 첫째로 루프에 의한 신호의 손실이다. 광섬유가 아닌 다른 전송 매체를 이용한 경우 보다는 적은 손실이나 광/전, 전/광 변환을 위해 사용된 외부 광변조기와 광검출기에서 발생한 손실은 보통 약 60 dB 이상이다[3]. 이 손실값을 보충해 주기 위하여 충분한 이득값을 가진 증폭기가 사용되어야만 광전 발진 신호를 얻을 수 있다. 이를 극복하기 위해 광 주입 잠금 레이저와 직접 변조 방식을 이용하여 광전 발진을 위해 필요한 추가 이득을 17 dB로 낮추는 방법이 제안되었다[4]. 또한 이중 전극 구조를 가진 반도체 레이저의 광자-광자 공진 현상을 이용하여 루프 손실의 감소를 제안하였다[5]. 둘째로 스퓨리어스 톤 발생이다. 광전 발진기는 긴 광섬유의 지연 시간에 따른 발진 모드 주변에 발진 주파수 이외의 원치 않는 사이드 모드인 스퓨리어스 톤이 발생하게 된다. 이 스퓨리어스 톤은 매우 좁은 주파수 간격으로 발생하기 때문에 일반적인 대역 통과 필터로는 필터링 할 수 없다. 이러한 스퓨리어스 톤 문제를 극복하기 위해 각기 다른 지연시간을 가진 루프를 두개 혹은 그 이상 사용하는 다중 루프 광전 발진기가 개발되었다[6]. 그리고 전통적인 다중 루프 구조에서 벗어나 광분배기와 광커플러를 이용한 단순한 구조의 다중 루프 광전 발진기도 제안 되었다[7]. 또한 단일 루프에 서로 다른 파장의 광신호와 브래그 격자 반사판을 이용한 다중 루프 광전 발진기도 연구되었다[8]. 더 나아가 광 주입 잠금 레이저와 직접 변조 방식을 이용한 구조의 광전 발진기의 구현을 성공 하였다[9].

이렇게 광전 발진기의 문제를 극복하기 위한 여러 가지 실험적인 방법이 제안 되었고 그에 못지않은 광전 발진기의 이론적인 해석과 모델도 제시 되었다. 전통적인 단일 루프의 광전 발진기 해석은 외부 광변조기의 준선형화와 지연시간을 받은 루프 신호들의 합을 이용한 이론이 제안되었다[1]. 그리고 단일 루프 광전 발진기의 수치해석적인 모델도 제안 되었다[10]. 다중 루프의 경우, 루프의 각기 다른 지연시간이 기인한 이득 변화를 이용한 방법이나 광섬유를 통과하는 광신호의 편광을 이용한 해석 방법이 있다[6, 7]. 또한 다중 루프 광전 발진기의 위상 변화를 해석한 광섬유의 길이와 광신호 인가 비율의 최적화 방법이 개발 되었다[11].

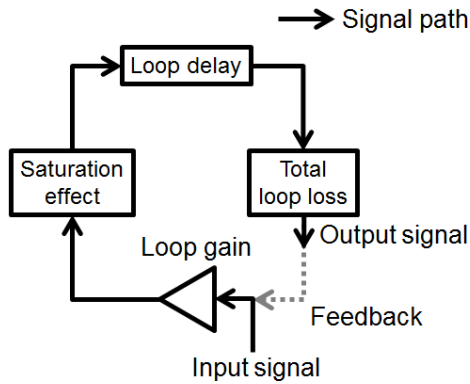


그림 1. 루프 구조 발진기의 구조
Fig. 1 Configuration of loop oscillator

광전 발진기의 문제를 극복하는 제안들을 살펴보면 외부 광변조기를 이용하는 방법보다 레이저의 직접 변조를 이용한 방법이 루프의 손실을 더욱 낮출 수 있으며 구조도 단순해진다. 그럼에도 불구하고 해석적인 관점에서는 외부 광변조기를 이용한 해석과 모델이 많이 이루어 졌으나, 직접 변조를 이용한 구조의 해석이나 모델은 미비한 상태이다.

이에 본 논문에서는 레이저의 직접 변조를 이용한 광전 발진기를 해석 하고 성능 분석을 하였다. 광전 발진기를 구성하는 각 장치의 개방 응답 특성을 해석한 후 각 장치의 응답 특성을 이용하여 광전 발진기 전체 개방 루프 응답 특성을 도출하였다. 특히 직접 변조 반도체 레이저의 응답 특성을 해석하기 위하여 반도체 레이저의 비율 방정식을 이용하였다. 광전 발진기의 전체 개방 루프 응답 특성과 루프 발진기의 발진 원리를 적용하면 실제로 광전 발진기를 단한 루프로 구성 하였을 때 발생하는 발진 지점과 스푸리어스 톤의 간격을 알 수 있고 개방 루프 응답의 위상 변화 주기를 이용하여 발진 신호의 위상잡음을 간접적으로 도출해 낼 수 있다.

II. 개방 루프 응답 특성 분석을 통한 발진 신호의 성능 분석

그림 1 은 루프 발진기의 개념 구조도 이다. 루프 발진기의 입출력은 증폭, 포화, 지연과 손실로 구성 되어 있다. 발진 원리는 매우 작은 크기의 입력 신호가 위의 4

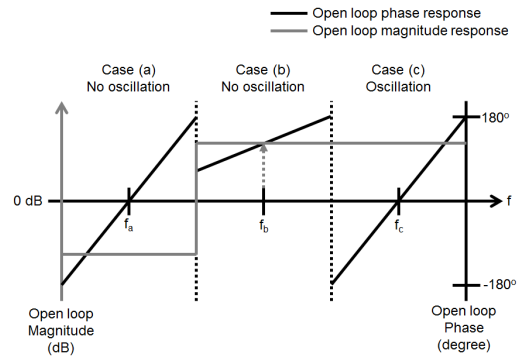


그림 2. 루프 발진기의 개방 루프 응답 특성의 3가지 경우
Fig. 2 Three cases of loop oscillator by open loop response

단계를 거친 후 출력 신호가 되는데, 그 출력신호를 다시 입력 신호로 인가하는 궤환(feedback)을 반복한다. 루프의 신호가 궤환 할 때마다 입/출력 신호의 크기 비율이 0 dB보다 크고 동위상이(in phase)되는 신호 성분은 계속 증폭이 되며 비동위상(out of phase)이 되는 신호 성분은 증폭이 되지 않는다. 이와 같이 증폭된 동위상의 신호 성분은 발진 신호가 된다. 이에 반해 비동위상 신호 주파수 성분은 발진 주파수 주변의 잡음 신호가 된다. 결국 루프 발진기의 입력 신호와 개방 루프 출력 신호간의 위상차와 크기 응답 해석을 통하여 발진기의 발진 주파수 특성 및 위상잡음 특성을 도출해 낼 수 있게 된다.

이를 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 그림 2는 루프 발진기의 개방 루프에 대한 위상 및 크기 응답 특성을 다양한 경우에 대하여 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 단일 루프 통과시 입출력이 동위상을 가지는 주파수 f_a 의 신호에 대하여 도시하였다. 이 경우 크기 응답은 0 dB 보다 작은 경우를 예를 들어 나타내었다. 그림 2(b)는 주파수 f_b 신호에 대하여 도시한 것으로 크기 응답이 0 dB 이상이나 위상차가 비동위상인 경우를 나타내었다. 마지막으로 그림 2(c)의 f_c 주파수는 동위상이면서 크기 응답이 0 dB 이상일 때이다. 그림 2(a)에 대하여 주파수 f_a 성분에서 입출력 신호의 위상차가 0인 동위상이기 때문에 루프를 닫고 궤환 발진 구조를 만들 경우에는 신호가 자체 발진할 수 있는 잠재력이 있다. 하지만 크기 응답 특성이 0 dB 보다 작기 때문에 신호가 루프를 궤환하는 횟수가 증가할수록 신호의 크기가 감

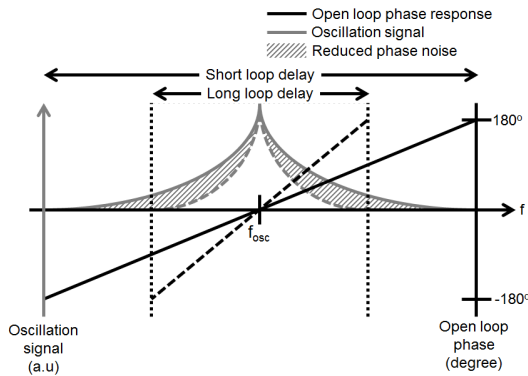


그림 3. 루프 지연 시간에 따른 개방 루프 위상 응답 특성과 발진 신호의 관계
Fig. 3 Relationship between open-loop phase response and oscillation signal for different loop-delay values

쇄하므로 최종적으로 발진을 할 수 없게 된다. 그림 2(b)의 경우는 크기 응답이 0 dB 이상이기 때문에 루프 궤환시 신호의 크기가 커질 수는 있으나 위상 응답 특성이 동위상이 아니기 때문에 루프 내에 존재하는 동일 주파수 신호 간의 간섭에 의해 결국 발진할 수 없게 된다. 마지막으로 그림 2(c)는 위상이 동위상이어서 발진의 잠재력이 있으며, 크기 응답이 0 dB 이상이기 때문에 루프 궤환에 의한 신호의 감쇄를 막을 수 있다. 따라서 닫힌 루프를 구성하는 경우 주파수 f_c 에서 발진하는 신호를 얻을 수 있다. 세 가지 경우를 고찰해 보면 루프 발진기가 발진하기 위해서는 개방 루프 응답 신호의 크기 응답이 0 dB 이상이어야 하고 동시에 위상 응답이 “0”이 되어야 한다. 위상 및 크기 응답 조건 중 하나의 조건이라도 만족 하지 않는 주파수 성분은 발진 신호가 되지 못하고, 잡음 역할을 하게 된다. 즉, 개방 루프에 대한 크기 및 위상 응답 특성을 구하여 해석함으로써 루프 발진기의 특성 중 하나인 발진 주파수를 도출해 낼 수 있다.

다음으로 발진 신호의 중요한 성능인 위상잡음 특성을 개방 루프 위상 응답 특성으로부터 도출해 낼 수 있다. 이는 그림 3의 루프의 지연 시간에 따른 개방 루프 위상 응답과 발진 신호 스펙트럼과의 관계를 도시한 개념도로부터 설명 가능하다. 발진 주파수 주변의 주파수를 가진 신호의 위상 응답은 발진 지점 “0”을 기준으로 -180도에서 180도까지 선형적으로 변하며, 이는 계속적으로 반복된다. 여기서 위상 응답이 0인 지점은 발진

가능 주파수이다. 발진 주파수 주변의 주파수 신호들은 비동위상 부분으로써 발진 신호 주파수에 대하여 위상 잡음에 해당 되는 영역이다. 위상 응답이 -180도 및 180도인 부분은 신호가 한번 루프를 지날시 완전히 위상 반전 되므로 신호가 상쇄되어 신호가 존재하지 않는 지점이 된다. 즉 발진 신호 대비 위상 잡음이 가장 낮은 오프셋 주파수가 된다. 그리고 동위상으로 가까이 갈수록 신호의 위상잡음이 증가하게 된다. 이러한 특성으로부터 개방 루프의 위상응답 특성의 기울기는 발진 신호의 위상 잡음과 반비례함을 알 수 있다. 그림 3의 검은 실선과 회색 실선은 상대적으로 각각 길고 짧은 루프를 사용하였을 때의 개방 루프 위상 응답과 그에 따른 발진 신호 스펙트럼에 대한 개념도이다. 짧은 루프의 경우, 루프 지연시간이 짧고, 이 지연 시간에 반비례하는 주기를 가진 개방 루프 위상 응답을 형성한다. 즉, 긴 루프에 대한 위상 응답(=실선의 경우)과 비교하여 더 작은 기울기를 가지 위상 응답을 형성하며, 이는 넓은 스펙트럼을 가진 신호를 발생시킨다. 즉, 짧은 루프의 경우, 발진 주파수 주변의 오프셋 주파수에서 더 큰 신호를 가지므로 위상잡음 관점에서 더 큰 위상 잡음을 가진 발진 신호를 형성하게 된다.

요약하면 루프 발진기의 개방 루프의 크기 응답과 위상응답을 구할 수 있다면 닫힌 구조의 발진 루프를 형성한 경우를 해석하지 않더라도 1) 발진 주파수 도출이 가능하며, 2) 발진 신호의 위상 잡음 성능을 도출해 낼 수 있게 된다. 본 논문에서는 위의 원리에 기반을 두어 직접 변조된 레이저를 이용한 광전 발진기의 개방 루프 특성을 반도체 레이저의 비율 방정식 모델링을 통하여 얻어냄으로써 광전 발진 신호의 발진 주파수와 위상 잡음 성능을 도출해 내었다.

III. 직접 변조된 반도체 레이저를 이용한 광전 발진기 모델링 및 성능 분석

그림 4는 직접 변조된 반도체 레이저를 이용한 광전 발진기의 구조도이다. 최초로 주파수 및 위상 잡음을 가진 임의의 주파수의 전기적 입력 신호 $I_m(f)$ 는 반도체 레이저의 직접 변조에 의하여 광신호로 변환된다. 변환된 광신호는 긴 길이의 광섬유(=수 km)를 통과하면서 루프에 의한 신호의 지연을 겪는다.

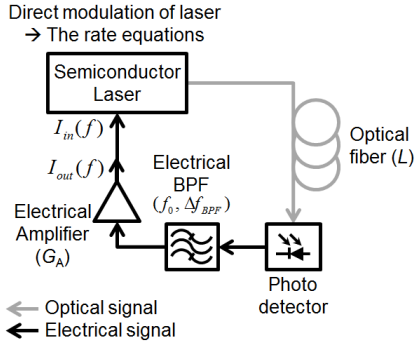


그림 4. 반도체 레이저의 직접 변조를 이용한 광전 발진기의 구조도

Fig. 4 Schematic of an optoelectronic oscillator using a directly-modulated semiconductor laser

광섬유를 통과한 광신호는 광검출기에 의하여 전기적 신호로 변환된 후 중심주파수가 f_0 이고 대역폭이 Δf_{BPF} 인 대역 통과필터를 통과한다. 그리고 루프에 의한 신호의 손실을 보충하기 위하여 이득률이 G_A 인 전기적 증폭기에 의하여 증폭된다. 이와 같이 루프를 한번 통과한 신호를 단일 루프 출력 신호 $I_{out}(f)$ 라 하자. 실제로 광전 발진 신호를 얻기 위해서는 단일 루프 출력 신호인 $I_{out}(f)$ 가 다시 반도체 레이저를 직접 변조하고, 루프를 궤환하는 과정을 무한히 반복하며, 이 과정을 통하여 낮은 위상잡음을 가진 전기적 발진 신호를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 직접변조를 이용한 광전 발진기의 개방 루프 응답 특성을 입력신호 $I_{in}(f)$ 와 위와 같이 정의된 출력신호 $I_{out}(f)$ 의 관계를 이용하여 구함으로써 발진 신호의 성능을 도출해 내하고자 하였다.

이를 위해서는 먼저 레이저의 직접 변조 응답 특성을 도출하는 것이 필요하다. 레이저의 직접 변조 응답 특성은 단일 모드 반도체 레이저 비율 방정식의 소신호 응답 특성을 이용하여 구하였다 [12]. 그림 5는 바이어스 전류의 값에 따른 레이저의 직접 변조 응답 특성을 구한 그림이다. 그림에서 보듯이 광전 발진 목적을 위해서는 큰 값의 크기 응답을 가지는 것이 유리하므로 레이저의 공진 주파수 영역을 발진 목표 주파수로 설정하면 추후 용이하게 발진 조건을 달성할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 10-GHz 대역에서 발진 신호를 생성하기 위해서는 12배의 문턱 전류(= $12J_{th}$) 값으로 레이저를 구동하는 것이 효과적이다.

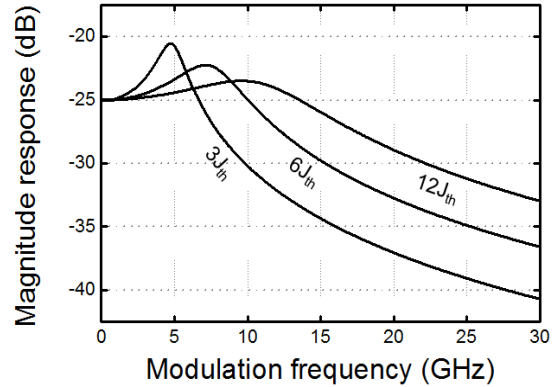


그림 5. 바이어스 전류에 따른 직접 변조 레이저의 변조 특성
Fig. 5 Modulation response of a semiconductor laser for various current bias values.

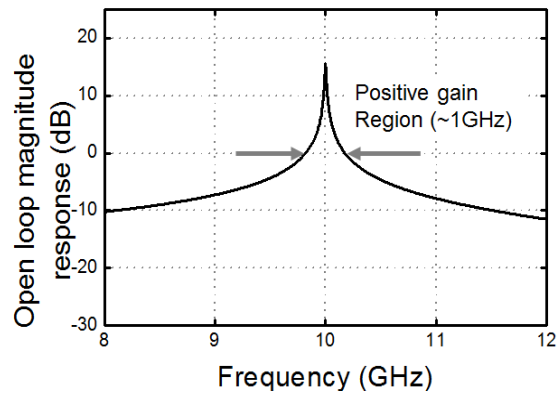


그림 6. 광전발진기의 전체 루프 크기 응답
Fig. 6 Magnitude response of total open loop in optoelectronic oscillator

이 때 변조에 의한 전광 변환 손실은 4 dB이므로 이 손실은 추후 있게 될 전송 손실 및 광검출기에서의 광전 변환 손실과 함께 추가적인 증폭기에 의해 보충되어야만 한다. 발진 루프의 모델링을 위하여 전기적 대역 통과 필터의 Q-factor는 1000, 중심주파수(= f_0)는 10 GHz, 대역폭(= Δf_{BPF})은 10 MHz인 가우시안 응답 특성을 가지고 있으며, 전기적 증폭기는 40 dB의 증폭율을, 그리고 광검출기는 0.8(A/W)의 광전 변환 효율을 가지고 있는 것으로 설정하였다. 또한 광섬유의 길이는 $L = 1 \text{ km}$ 로 두었다.

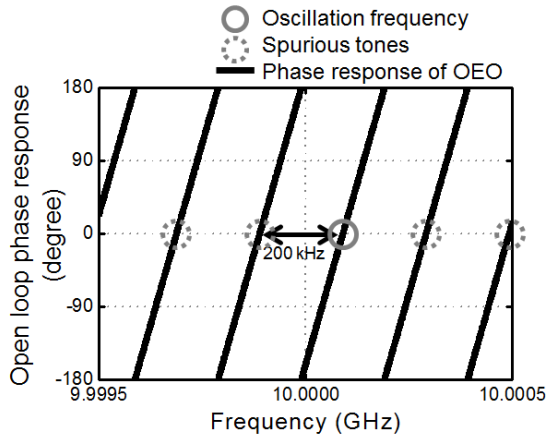


그림 7. 광전 발진기의 개방 루프 위상 응답을 이용한 발진 신호와 스퓨리어스톤의 위치
Fig. 7 Oscillation frequency and spurious tones by utilizing open loop phase response of optoelectronic oscillator.

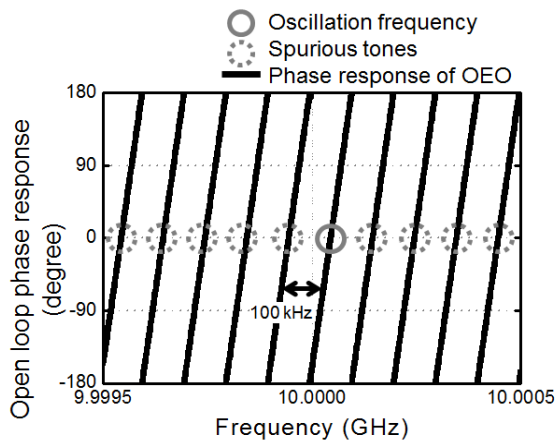


그림 8. 2 km 길이의 광섬유 루프를 사용한 경우에 대한 개방 루프 위상 응답
Fig. 8 Open-loop phase response using 2-km fiber loop

그림 6은 광전 발진기의 각 장치를 모두 구성한 광전 발진기의 전체 개방 루프 크기 응답 특성이다. 중심 주파수가 10 GHz 주변에 크기 응답이 0 dB 이상의 주파수 대역이 약 1 GHz 정도 발생한다. 이와 같은 양의 값을 가진 이득영역 내에서 광전 발진기의 개방 루프 위상 응답이 “0”인 주파수 지점에서 발진 신호는 가장 큰 값을 가지게 되고, 일반적으로 이를 발진 주파수

라 한다. 양의 이득 대역 이외의 대역은 루프 발진기의 발진 조건을 만족 하지 못하기 때문에 발진을 할 수 없다.

그림 7은 그림 6에서 구해진 양의 이득 대역에 대하여 개방 루프 위상 응답을 구한 것이다. 그림 7에는 발진 가능 주파수의 위치가 원으로 표시되어 있다. 이 중에서 가장 큰 크기 응답 부분인 실선 원으로 표시된 주파수가 실제 발진 주파수이다. 10 GHz에서 약 100 kHz 벗어난 실선 원의 주파수가 개방 크기 응답의 증폭률이 가장 높은 부분으로 발진 주파수가 된다. 발진 주파수 지점 외에도 광섬유의 길이와 루프 지연에 의하여 200 kHz의 위상 변화 주기가 형성된 것을 알 수 있다. 나머지 개방 루프 위상 응답이 “0”인 200 kHz 간격의 지점들은 원하는 발진 신호가 아닌 스퓨리어스 톤이다. 스퓨리어스 톤의 간격은 개방 루프 위상 응답 한주기와 같다. 따라서 스퓨리어스 톤의 주파수 간격은 광섬유의 길이가 길어질수록 좁아지게 된다. 다른 조건은 모두 동일하게 유지하고, 단지 광섬유의 길이만을 2 km로 변화시킨 경우의 위상 응답 특성이 그림 8에 나타나 있다.

발진 신호의 위상 잡음은 기울기에 반비례하므로 이 경우의 위상 잡음 성능은 1km 길이의 광섬유를 사용한 경우보다 더 향상됨을 알 수 있다. 반면 스퓨리어스 톤의 간격은 더 좁아지게 된다. 따라서 발진 신호만을 필터링하기는 더 어렵게 되나 이는 이중 루프 구조의 발진기를 적용함으로써 해결할 수 있다[6]. 그러므로 고성능의 저잡음 발진 신호를 얻고자 하는 경우는 긴 길이의 광섬유를 사용하여야 함이 필수적이다. 긴 길이의 광섬유를 사용하는 루프 구성에서 스퓨리어스 톤이 완전히 제거된 신호를 얻기 위해서는 이중 루프를 적용하여야 하는 구조의 복잡성을 수반할 수밖에 없게 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 직접 변조 반도체 레이저를 이용한 광전 발진기의 성능을 이론적으로 도출해 내었다. 먼저 반도체 레이저의 비율 방정식을 통하여 직접 변조 응답 특성을 구하고, 이를 이용하여 광전 발진기 개방 루프 특성을 얻어내었다. 얻어진 개방 루프의 크기 응답 및

위상 응답 특성을 해석하여 광전 발진기의 주요 성능인 발진 주파수, 스퓨리어스 톤의 간격 및 위상 잡음 성능을 구할 수 있었다. 직접 변조된 반도체 레이저를 이용한 광전 발진기는 구성의 단순성에 기인하여, 상당히 잠재력이 있는 발진기 기술이므로, 본 논문의 성능 해석 방법은 발진기 기술의 상용화 및 성능 향상을 위하여 다양하게 사용될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011- 0009493)을 받아 수행된 기초연구사업으로, 관계부처에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] X.S. Yao and L. Maleki, "Optoelectronic Oscillator for Photonic Systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, pp. 1141-1149, Jun. 1996.
- [2] D. Zhu, S. Liu, D. Ben, and S. Pan, "Frequency-Quadrupling Optoelectronic Oscillator for Multichannel Upconversion," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 5, pp. 426-429, Mar. 2013.
- [3] S. Romisch, J. Kitching, E. Ferrè-Picak, L. Hollberg, and F.L. Walls, "Performance Evaluation of an Optoelectronic Oscillator," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 47, pp. 1159-1165, Sep. 2000.
- [4] H.K. Sung, X. Zhao, E. K. Lau, D. Parekh, C. J. Chang-Hasnain, and M.C. Wu, "Optoelectronic oscillators using direct modulated semiconductor laser under strong optical injection," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 15, pp. 572-577, May/June. 2009.
- [5] J.H. Cho and H.K. Sung, "Simple Optoelectronic Oscillators Using Direct Modulation of Dual-Section Distributed-Feedback Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 2172-2174, Dec. 2012.
- [6] X.S. Yao and L. Maleki, "Multiloop Optoelectronic Oscillator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, pp. 79-84, Jan. 2000.
- [7] Y. Jiang, J.L. Yu, Y.T. Wang, L.T. Zhang, E.Z. Yang, "An Optical Domain Combined Dual-Loop Optoelectronic Oscillator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, pp. 807-809, Jun. 2007.
- [8] E. Shumakher and G. Eisenstein, "A novel multiloop optoelectronic oscillator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, pp. 1881-1883, Nov. 2008.
- [9] J.Y. Kim, J.H. Jo, W.Y. Choi, and H.K. Sung, "Dual-Loop Dual-Modulation Optoelectronic Oscillators With Highly Suppressed Spurious Tones," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 706-708, Apr. 2012.
- [10] E.C. Levy, M. Horowitz, and C. R. Menyuk, "Modeling optoelectronic oscillators," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 26, no. 1, pp. 148-159, Jun. 2009.
- [11] T. Bánky, B. Horváth, and T. Bercei, "Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 7, pp. 1371-1380, Jun. 2006.
- [12] E.K. Lau, L.J. Wong, and M.C. Wu, "Enhanced Modulation Characteristics of Optical Injection-Locked Lasers: A Tutorial," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 618-633, May/June. 2009.



조준형(Jun-Hyung Cho)

2011년 홍익대학교 전자전기공학부 공학사
 2013년 홍익대학교 전자정보통신 공학과 공학 석사
 2013년 ~ 현재 홍익대학교 전자정보통신 공학과 박사과정
 ※관심분야: 광전 융합 시스템, 광 신호처리



허서원(Seo-Weon Heo)

1990년 서울대학교 공학사
1992년 서울대학교 공학 석사
2001년 Purdue University 공학박사
2006년~현재 홍익대학교 전자전기 공학부 부교수
※관심분야 : 통신 시스템 소자, 임베디드 시스템 설계



성혁기(Hyuk-Kee Sung)

1999년 연세대학교 공학사
2001년 연세대학교 공학 석사
2007년 UC Berkeley 공학 박사
2007년~현재 홍익대학교 전자전기 공학부 부교수
※관심분야 : 광소자 및 광응용 시스템