

## 광 주입 파장 잠금 반도체 레이저를 이용한 광학 복소 신호 생성시의 주입 매개 변수 정확도 향상

조준형<sup>1\*</sup> · 성혁기<sup>2</sup>

### Accuracy improvement of injection parameters for optical complex signal generation using optical injection-locked semiconductor laser

Jun-Hyung Cho<sup>1\*</sup> · Hyuk-Kee Sung<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Research Professor, Research Institute of Science and Technology, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

<sup>2</sup>Professor, Engineering Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

#### 요 약

광 주입 잠금 반도체 레이저의 주입 매개 변수를 조절하여 광학적 복소 신호를 생성 할 수 있다. 그러므로 정확한 주입 매개 변수의 결정은 광학적 복소 신호 생성 기술에서의 핵심 요소이다. 기존의 주입 매개 변수의 추출 이론은 광 주입 잠금 반도체 레이저의 비율 방정식을 사용하며, 이는 locking map 기반의 보간법을 사용하기 때문에 정확한 주입 매개 변수의 추출에 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 비율 방정식의 새로운 해석법을 제안한다. 제안된 해석법은 비율 방정식을 광학적 복소 신호의 생성에 맞게 수정하여 주입 매개 변수를 직접적으로 도출하는 방법이며, 이를 통하여 보간법을 통한 복소 신호 생성 대비  $10^3$  배의 오차 감소를 달성하였다.

#### ABSTRACT

An injection locking technology of a semiconductor laser is a promising technology to generate optical complex signals by adjusting optical injection parameters. The extraction of the precise injection parameters plays a key role in the generation of the optical complex signal. Rate equations of semiconductor lasers under optical injection are commonly used to map the injection parameters and the corresponding optical complex signal. The accuracy of the generated optical complex signal on the injection parameters is limited since the rate equations require a locking map-based interpolation method. We propose a novel analytic method, namely rate equation-based direct extraction method, to directly calculate the injection parameters without relying on the locking map-based interpolation method. We achieved  $10^3$ -times improvement of the signal accuracy by using the proposed method compared to locking-map based interpolation method.

**키워드** : 반도체 레이저, 광 주입 잠금, 주입 매개 변수, 광학적 복소 신호 생성

**Keywords** : Semiconductor lasers, Optical injection lock, Injection parameters, Optical complex signal generation

Received 23 December 2020, Revised 11 January 2021, Accepted 25 January 2021

\* Corresponding Author Jun-Hyung Cho (E-mail: kadokal@mail.hongik.ac.kr, Tel:+82-2-322-6371)

Research Professor, Research Institute of Science and Technology, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.3.478>

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

광 주입 잠금 상태 하의 반도체 레이저 출력은 광학적 주파수가 외부에서 주입되는 광 신호의 광학적 주파수로 동기화된 상태이다 [1-3]. 상기 상태의 광 출력 신호는 직접 변조 성능 향상, 상대 잡음 감소, 광학적 주파수 불안정 억제와 같은 다양한 성능 향상을 나타내고 있다 [4-7]. 또한 광학적 주파수의 동기화가 수반된 광 주입 잠금 상태는 광학적 주파수의 불안정이 없는 광학적 위상 변조가 가능하므로 광학적 복소 신호 생성과 광학적 위상 배열에 응용 될 수 있다 [8, 9].

광 진폭 및 광 위상을 동시에 변조하여 생성되는 광학적 복소 신호를 발생시키기 위해서는 외부 광 진폭 및 위상 변조기가 필요하다. 그러나 외부 광 변조기는 크기가 크고, 가격이 비싸며, 전력 소모가 크다는 단점을 가지고 있다 [10]. 이를 해결하기 위하여 최근 외부 광 변조기의 문제를 극복하는 광 주입 잠금 상태의 반도체 레이저를 이용한 광학적 복소 신호의 생성법이 제안되고 있다 [8]. 이 기술은 반도체 레이저와 외부에서 주입된 광 신호의 상호 관계인 주입 매개 변수를 조절하여 광학적 복소 신호를 생성한다. 주입 매개 변수는 주입 출력 비와 디튜닝 주파수이고 광 진폭 및 광 위상을 동시에 변조하는 광 주입 잠금 반도체 레이저의 중요 인자이다 [9]. 그러므로 주입 매개 변수와 광 출력 사이의 정확도 높은 추출 및 이를 위한 이론 해석은 광 주입 잠금 레이저를 이용한 광학적 복소 신호 생성의 핵심이다.

주입 매개 변수를 추출해내는 기존 방법은 광 주입 잠금 레이저의 비율 방정식을 이용하여 locking map을 먼저 구하고, 안정 영역 내에서 보간법을 사용하여 원하는 주입 매개 변수를 찾아나가는 방식을 따른다 [8]. 그러나 locking map의 구형 및 보간법을 이용한 상기 방식은 수백 번 이상의 반복적인 비율 방정식의 계산, 생성하고 자 하는 신호와 주입 매개 변수 관계 재설정, 생성 신호의 정확도 확인이 반복적으로 수행되어야 한다. 또한 주입 매개 변수 사용 가능 영역이 locking map의 안정 영역 내에서 만으로 국한되어 다양한 광 주입 조건에서의 활용 제한이 있다는 제한점을 가진다. 또한 보간법에 기인한 계산법에 의해 추출된 주입 매개 변수는 주파수 관점에서의 주입 매개 변수 정확도에서 실제로 수십 GHz 정도의 오차를 발생시키고, 이는 다시 생성 신호의 극심한 오차로 이어지는 단점을 가진다.

전술한 이러한 문제점들을 해결하여 목표 광학적 복소 신호를 정확하게 생성할 수 있는 주입 매개 변수를 효율적으로 계산해 내기 위해 기존 반도체 레이저의 연립 비선형 방정식에 반복법이 적용된 새로운 주입 매개 변수 추출법을 제안한다. 제안 방법은 광학적 복소 신호 생성을 위해 수정된 비율 방정식을 기반으로 하며, 기존의 locking map기반의 보간법을 사용하지 않는다. 이를 통하여 locking map에서 주입 매개 변수 추출이 안정 영역 내에서만 행해지는 제한점 극복, locking map을 구성하기 위한 반복 횟수의 감소 그리고 추출된 주입 매개 변수를 통해 생성된 최종 목표 광학적 복소 신호의 오차 감소를 동시에 달성할 수 있다.

제안하는 추출법은 다음과 같이 세부적으로 나누어지며, 이를 체계적으로 해석 및 적용하여 낮은 오차를 가진 주입 매개 변수 추출을 통하여 고 정확도의 광학적 복소 신호 발생 결과를 도출하였다. 1) 광 주입 잠금 상태의 반도체 레이저를 이용한 광학적 복소 신호 생성법 해석하며, 2) 미분 방정식 기반의 비율 방정식을 연립 비선형 방정식으로 변환하고 주입 매개 변수 추출에 특화된 비율 방정식의 반복법을 유도하고, 3) 목표 광학적 복소 신호를 설정한 후에 이를 생성할 수 있는 주입 매개 변수를 반복법을 이용하여 정확하게 계산하여 추출한다. 마지막으로 제안 방법을 통해 추출된 주입 매개 변수를 이용하여 계산된 광학적 복소 신호와 기존의 locking map기반 보간법을 사용하여 추출된 주입 매개 변수를 통해 계산된 광학적 복소 신호의 오차 비교 및 계산시의 반복 횟수 비교를 통해 제안 방법을 통한 발생 신호 정확도 향상 및 효율성 향상을 확인한다. 기존과 새로운 제안 방법의 비교 결과로서 제안 방법을 이용하여 동일 반복 계산 횟수 하에서 발생 신호 오차의 30 배 감소 및 동일 오차 허용시  $10^3$ 배 이상의 반복 회수 감소를 달성하였다.

## II. 주입 매개 변수 추출을 위한 비율 방정식 유도

광 주입 잠금 상태의 반도체 레이저를 이용한 광학적 복소 신호 생성법을 검토하고 문제를 파악하여 주입 매개 변수 추출에 특화된 새로운 광 주입 잠금 레이저의 비율 방정식을 유도 하였다.

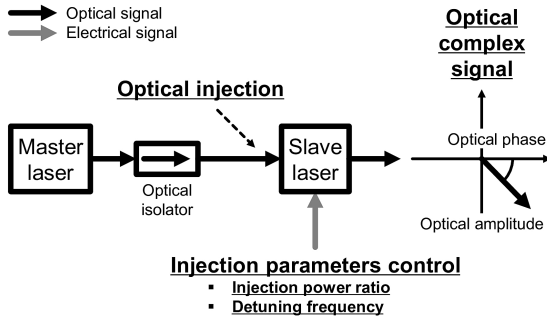


Fig. 1 Illustration of optical complex signal generation using optically injection-locked lasers.

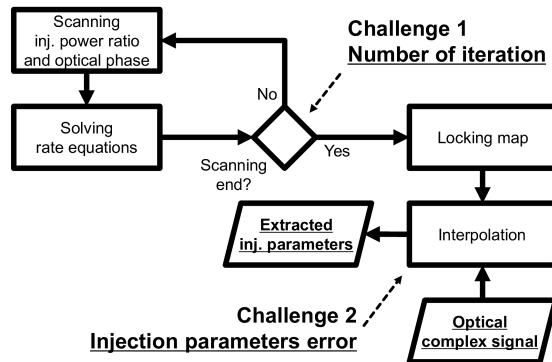
그림 1은 광 주입 잠금 상태의 레이저를 사용한 광학 복합 신호 생성의 개념도이다. 흑색 실선은 광 신호의 흐름이다. 회색 실선은 전기적 신호의 흐름이다. 광 주입 잠금 반도체 레이저는 주 레이저(master laser)와 종 레이저(slave laser) 그리고 광 차폐기(optical isolator)로 구성된다. 주 레이저의 광 신호는 광 차폐기를 통하여 종 레이저에 광 주입(optical injection)된다. 광 차폐기는 종 레이저의 광 신호가 주 레이저로 주입 되는 것을 방지 한다. 광 주입 상태에서 주 그리고 종 레이저의 상호 관계인 주입 매개 변수(injection parameters)의 조절은 종 레이저의 광 주입 잠금 상태를 활성화 시킬 수 있다. 광 주입 잠금 상태는 종 레이저의 광학적 주파수가 주 레이저로 동기화된 상태이다. 주입 매개 변수는 주 그리고 종 레이저의 출력 비인 주입 출력 비(injection power ratio)와 주파수 차이인 디튜닝 주파수(detuning frequency)이다. 광 주입 잠금 상태 하의 주입 매개 변수조절은 광학적 주파수의 불안정이 없는 광 진폭(optical amplitude)과 광 위상(optical phase)의 변화가 가능하므로 광학적 복소 신호(optical complex signal) 생성을 달성 할 수 있다[8]. 그러므로 광 주입 잠금 반도체 레이저를 이용한 광학적 복소 신호 생성은 주입 매개 변수의 정확한 추출이 핵심이다.

그림 2는 광학적 복소 신호 생성을 위한 주입 매개 변수 추출의 흐름도이다. 그림 2(a)는 locking map기반의 보간법을 이용한 추출법 흐름도이다. 주입 출력 비(inj. power ratio: injection power ratio)와 광 위상을 반도체 레이저의 비율 방정식(rate equation)에 인가하고 해석하여 locking map을 구현한다. locking map은 주입 매개 변수 대비 광 진폭 그리고 광 위상의 관계를 나타낸 것이다. 목표 광학적 복소 신호를 설정하고 상응하는 광

진폭과 광 위상을 구현된 locking map으로부터 보간법을 사용하여 계산하여 추출해 낸다. 이러한 locking map 기반의 보간법은 고해상도의 locking map을 구현하기 위하여 비율 방정식 계산 반복 횟수의 증가가 요구되며, 고해상도의 locking map을 얻는다고 하더라도 보간법에 의한 필연적인 오차를 수반하게 된다.

그림 2(b)는 광학적 복소 신호 생성에 특화된 제안 방법을 설명하는 흐름도이다. 먼저 목표 광학적 복소 신호의 광 진폭과 광 위상을 직접적으로 연립 비선형 방정식 형태의 비율 방정식에 인가한 후에 반복 해석과 tolerance 조건의 만족 여부를 통해 주입 매개 변수를 직접 추출해 낸다. 제안 하는 방법은 locking map 구현을 통해 간접적으로 매개 변수를 추출하는 방법을 사용하지 않으며 또한 이에 수반되는 보간법을 사용하지 않는다. 따라서 locking map 안으로 주입 매개 변수의 추출이 국한되는 제한점과 locking map 구성을 위한 고반복 횟수에 따른 계산의 비효율성 문제 그리고 추출된 주입 매개 변수의

(a) Locking map-based interpolation method



(b) Rate equation-based direct extraction method

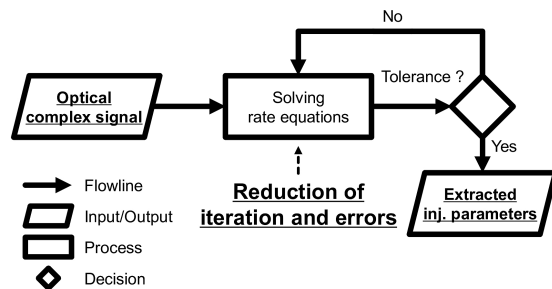


Fig. 2 Flowcharts for injection parameters extraction technique for optical complex signal generation. (a) Locking-map based interpolation method; (b) rate equation-based direct extraction method. inj.: injection.

오차 문제를 동시에 극복 할 수 있다.

제안하는 주입 매개 변수 추출에 특화된 비율 방정식 기반의 직접 추출법을 유도하기 위해 광 주입 비율 방정식을 아래와 같이 해석한다. 비율 방정식은 상 미분 방정식이고 다음과 같이 표현할 수 있다 [8, 11, 12].

$$\frac{d}{dt}S(t) = GS(t) + \frac{\beta_{sp}}{\tau_n}N(t) + \kappa\sqrt{S_{ml}S(t)}\cos[\phi(t) - \phi_{ml}] \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\phi(t) = \frac{\alpha}{2}\left(G - \frac{1}{\tau_p}\right) - \kappa\sqrt{\frac{S_{ml}}{S(t)}}\sin[\phi(t) - \phi_{ml}] - \Delta\omega_{inj} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}N(t) = J_{bias} - \frac{1}{\tau_n}N(t) - GS(t) \quad (3)$$

여기서  $S(t)$ ,  $\phi(t)$ , 그리고  $N(t)$ 는 시간  $t$ 에 따른 광 주입 상태의 종 레이저에 대한 광자의 개수, 광 위상 그리고 전자의 개수이다.  $G$ 는 순 유도 방출율이다.  $\tau_p$  그리고  $\tau_n$ 는 광자와 전자의 소멸 시간이다.  $\beta_{sp}$ 는 자발 방출 인자이다 [13].  $\kappa$ 는 광 주입 결합 비율이다.  $S_{ml}$  그리고  $\phi_{ml}$ 은 주 레이저로부터 주입된 광자의 개수와 광 위상이다.  $\Delta\omega_{inj}$ 는 디튜닝 각 주파수이다.  $\alpha$ 는 선폭 강화 인자이다 [14].  $J_{bias}$ 는 종 레이저로 인가된 전자의 주입율이다.  $d/dt$ 는 시간 미분이다. 주 그리고 종 레이저의 상대적 특성은  $\kappa$  와  $\Delta\omega_{inj}$ 이다. 주 레이저의 특성은  $S_{ml}$  와  $\phi_{ml}$ 이다. 그 외의 변수는 종 레이저의 고유 특성이다.

수식 (1) - (3)에 포함된 순 유도 방출률은 아래와 같다.

$$G = \frac{g}{1 + \epsilon_g S(t)}(N(t) - N_{tr}) \quad (4)$$

여기서  $g$ 는 선폭 유도 방출 이득률이다.  $\epsilon_g$ 는 이득 압축 계수이다 [15].  $N_{tr}$ 은 투명 전자 수이다. 수식 (1) - (4)에 포함된 모든 물질 정보는 표 1의 값을 사용하였다. 표 1은 해석에 사용된 레이저 특성의 기호, 설명, 단위, 그리고 물리량을 표시한 것이다.

수식 (1) - (4)를 연립 비선형 방정식으로 변환하고 목 표 광학적 복소 신호의 광 진폭과 위상을 상기 연립 방정식에 인가하며 반복적으로 주입 매개 변수를 직접 계산하여 추출해낸다.

제안된 추출법을 유도하기 위해 수식 (1) - (3)을 정상

상태로 가정하고 연립 비선형 방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$f_s = GS + \frac{\beta_{sp}}{\tau_n} + \kappa\sqrt{S_{ml}S}\cos[\phi - \phi_{ml}] \quad (5)$$

$$f_\phi = \frac{\alpha}{2}\left(G - \frac{1}{\tau_p}\right) - \kappa\sqrt{\frac{S_{ml}}{S}}\sin[\phi - \phi_{ml}] - \Delta\omega_{inj} \quad (6)$$

$$f_n = J_{bias} - \frac{1}{\tau_n}N - GS \quad (7)$$

여기서  $S$ ,  $\phi$ , 그리고  $N$ 은 정상 상태의 광자의 개수, 광 위상 그리고 전자의 개수이며 시간 독립적이다.

수식 (5) - (7)에 제안하는 추출법을 적용하여 아래의 수식을 유도 할 수 있다 [16].

$$[z_{next}] = [z_{prev}] - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} f_s(z_{prev}) \\ f_\phi(z_{prev}) \\ f_n(z_{prev}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

수식 (8)의  $m$ 은 추출법의 안정도 향상을 위한 계수이며 자연수이다. 위 첨자  $-1$ 은 역행렬을 의미한다.  $z_{next}$  와  $z_{prev}$ 은  $S_{ml}$ ,  $\Delta\omega_{inj}$ ,  $N$ 가 미지수인 반복 이후와 이전의 미지수 행렬이다.  $3 \times 1$  행렬은  $S_{ml}$ ,  $\Delta\omega$ ,  $N$ 가 변수인 수식 (5) - (7)이다.  $3 \times 3$  행렬은 수식 (5)-(7)을 상기 미지수로 미분한 행렬이고 각 원소는 다음과 같다.

**Table. 1** Simulation parameters

Symbol	Quantity	Unit	Value
$g$	Linear stimulated-emission gain	1/s	$4.7 \times 10^4$
$\epsilon_g$	Gain compression factor	.a	$5 \times 10^{-5}$
$N_{tr}$	Transparent carrier number	.	$9.3617 \times 10^9$
$\tau_p$	Photon lifetime	ps	2
$\tau_n$	Electron lifetime	ns	1
$\beta_{sp}$	Spontaneous emission factor	.	$1 \times 10^{-4}$
$\alpha$	Linewidth enhancement factor	.	5
$J_{bias}$	Injection carrier rate	1/s	$1 \times 10^{17}$
$S_{fr}$	Free-running photon number	.	$1.6 \times 10^5$
$\kappa$	Injection coupling ratio	1/ns	225
$\phi_{ml}$	Initial phase of master laser	rad	0
$m$	Stability coefficient	.	2

<sup>a</sup>Middle dot: No unit.

$$m_{11} = \frac{SP}{S_{ml}} \cos[\phi - \phi_{ml}] \quad (9-1)$$

$$m_{13} = \frac{\partial G}{\partial N} S - \frac{\beta_{sp}}{\tau_n} \quad (9-2)$$

$$m_{21} = -\frac{P}{2S_{ml}} \sin[\phi - \phi_{ml}] \quad (9-3)$$

$$m_{22} = -1 \quad (9-4)$$

$$m_{23} = \frac{\partial G}{\partial N} \frac{\alpha}{2} \quad (9-5)$$

$$m_{33} = -\frac{\partial G}{\partial N} S - \frac{1}{\tau_n} \quad (9-6)$$

여기서 정상 상태의 순 유도 방출률, 전자 수의 변화에 따른 순 유도 방출 변화량 그리고  $P$ 는 아래와 같다.

$$G = \frac{g}{1 + \epsilon_g S} (N - N_{tr}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial G}{\partial N} = \frac{g}{1 + \epsilon_g S} \quad (11)$$

$$P = \kappa \sqrt{\frac{S_{ml}}{S}} \quad (12)$$

수식 (9)에 없는 행렬의 원소는 모두 0이다.

목표 광학적 복소 신호의 광 진폭과 광 위상을 수식 (8)에 대입하면  $z_{next}$ 를 해석할 수 있다.  $z_{next}$ 를  $z_{prev}$ 로 갱신하고 다시 반복 수행 하면 정확한 주입 매개 변수를 추출할 수 있다.  $z_{next}$  그리고  $z_{prev}$ 의 인자인  $S_{ml}$  그리고  $\Delta\omega_{inj}$ 는 주입 매개 변수로 표현할 수 있다.

$$\Delta f_{inj} = \frac{\Delta\omega_{inj}}{2\pi} \quad (13)$$

$$R_{inj} = 10 \log_{10} \frac{S_{ml}}{S_{fr}} \quad (14)$$

여기서  $\Delta f_{inj}$ 는 추출된 디튜닝 주파수이고  $R_{inj}$ 은 추출된 주입 출력 비이다.  $\pi$ 는 원주율이다.  $S_{fr}$ 은 광 주입이 없는 자유 동작 상태의 종 레이저에 대한 광자 수이다.

### III. 주입 매개 변수 추출 결과

제안하는 추출법을 적용하여 목표 광학적 복소 신호에 알맞은 주입 매개 변수를 추출하고 locking map 기반

보간법과 비교하여 반복 횟수 감소와 오차 감소를 확인하였다.

그림 3은 해석에 사용된 목표 광학적 복소 신호와 제안된 추출법을 사용하여 추출한 주입 매개 변수이다. 그림 3(a)는 해석에 사용된 목표 광학적 복소 신호와 역 위상 광 반송자(antiphase optical carrier)이다. 역 위상 광 반송자는 광 반송자의 위상이  $\pi$  radian만큼 이동한 광학적 신호이다. x축은 광학적 실수 진폭(optical real amplitude)이고 y축은 광학적 허수 진폭(opt. imag. amp.: optical imaginary amplitude)이며 단위는 모두 임의의 단위(arbitrary unit: a.u.)이다. 광학적 실수 그리고 허수 진폭과 광 진폭 그리고 광 위상의 관계는 다음과 같다.

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (15)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (16)$$

여기서  $r$ 은 광 진폭이고 수식 (5) - (7)의  $\sqrt{S}$ 이다.  $x$

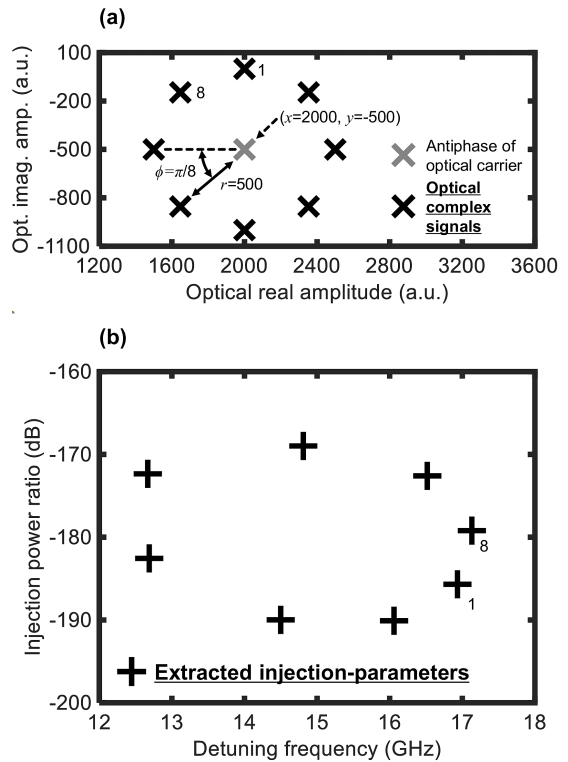


Fig. 3 (a) Optical complex signals presented on complex plane; (b) Extracted injection parameters using rate equation-based direct extraction method. opt.: optical; imag.: imaginary; amp.: amplitude.

는 광학적 실수 진폭이다.  $y$ 는 광학적 허수 진폭이다.  $\phi$ 는 수식 (5) - (7)의 광 위상과 같다.

회색 굵 기호는 목표 광학적 복소 신호들이고 회색 얇 기호는 역 위상 광 전송자이다. 목표로 설정한 1부터 8 까지 반시계 방향으로 구성된 광학적 복소 신호는 역 위상 광 반송자로부터 500의 광 진폭을 가진다. 각 광학적 복소 신호들의 광 위상 간격은 역 위상 광 반송자를 기준으로  $\pi/8$  radian이다. 역 위상 광 반송자는 광학적 실수 진폭이 2000 그리고 허수 진폭이 -500이다. 상기 생성된 8 개의 광학적 복소 신호에 실수 진폭이 -2000이고 허수 진폭이 500인 광 반송자를 결합하면 크기가 500이고 위상차가  $\pi/8$  radian인 광학적 복소 신호 8개가 생성된다 [10].

그림 3(b)는 제안하는 비율 방정식 기반의 직접 추출법을 사용한 추출된 주입 매개 변수이다. x축은 주입 출력 비이고 단위는 dB이며 y축은 디튜닝 주파수이고 단위는 GHz이다. 회색 십자 기호는 그림 3(a)의 광학적 복소 신호에 대응하는 추출된 주입 매개 변수이고 1부터 8 까지 반시계 방향이다. 추출된 주입 매개 변수의 주입 출력 비는 약 12 dB로부터 18 dB까지 형성 되고 디튜닝 주파수는 약 -190 GHz 부터 -170 GHz까지 형성되었다.

그림 4는 반복 횟수 대비 추출된 주입 매개 변수의 관계이다. x축은 디튜닝 주파수이며 단위는 GHz이고 y축은 주입 출력 비이며 단위는 dB이다. 회색 십자는 반복 횟수에 따른 추출된 주입 매개 변수이다. 회색 실선은 반복 횟수의 증가 방향이며 회색 실선 상에는 추출된 주입 매개 변수가 없다. 회색 십자는 54회 반복하여 추출

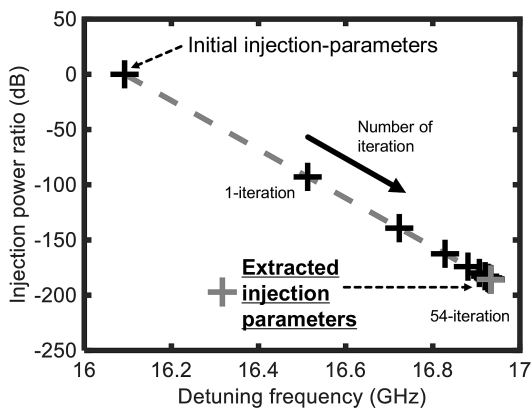


Fig. 4 Evolution of the extracted injection-parameters converging to the final values when the number of the calculation iteration increases.

된 최종 주입 매개 변수이다. 목표 광학적 복소 신호는 그림 3(a)의 1로 표시된 지점에 해당하는 신호이다. 초기 주입 매개 변수는  $S_{inj}$ 와  $\Delta\omega$ 가 16.09 dB이고 0 GHz이다. 초기 주입 출력비는 수식 (14)와 그림 3(a)의 1 지점에 해당하는 광학적 복소 신호의 광 진폭을 사용하였다. 계산 반복 횟수가 1회에서 54회로 증가 할수록 오차가 감소함을 확인할 수 있다. 제안하는 방법을 기반으로 54회 반복하여 추출한 주입 매개 변수를 사용한 광학적 복소 신호는 목표 광학적 복소 신호와 <math>10^{-7}</math>의 오차가 있다. 그림 3(a)의 1번 광 신호를 발생시키기 위하여 추출된 주입 매개 변수는 다음과 같다. 주입 출력비는 16.93 dB 이고 디튜닝 주파수는 -185.7 GHz이다.

그림 5는 반복 계산 횟수와 반복 계산을 통하여 추출된 주입 매개 변수를 대입하여 최종 생성된 복소 광신호의 오차 관계를 나타낸 그림이다. x축은 반복 횟수이고 y축은 Error Vector Magnitude(=EVM)이다. EVM은 발생을 목표로 하는 광학적 복소 신호 대비 추출된 주입 매개 변수를 이용하여 계산된 광학적 복소 신호의 오차율로 정의되는데, 광학적 복소 신호의 광 진폭과 광 위상의 오차율을 결합한 정량화된 수치이다 [8]. 이러한 관계를 기존의 보간법과 제안하는 추출법에 대하여 모두 확인하였다. 두 방법 모두 계산 횟수가 증가할수록 목표-발생 신호간의 오차가 감소함을 확인할 수 있다. 회색 실선과 원 기호는 제안하는 추출법에 의한 계산 횟수-오차 결과이며 회색 실선과 사각 기호는 locking map기반의 보간법을 사용한 경우에 대한 사용

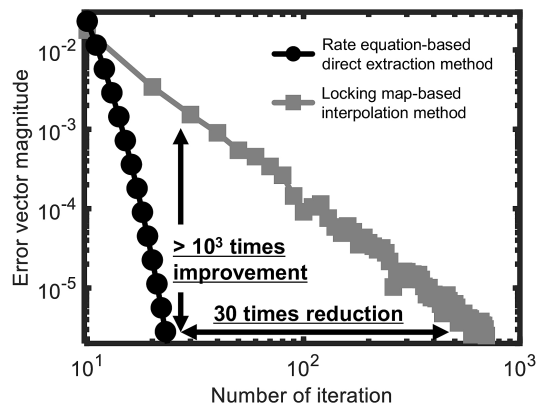


Fig. 5 Error vector magnitude dependence on the number of iterations for locking map-based interpolation method (circle) and rate equation-based direct extraction method (square).

된 계산 횟수-오차 결과이다. 반복 횟수가 20회인 경우의 예를 확인해보면 제안하는 추출법은 기존 보간법보다  $10^3$ 배 이상의 오차 향상을 가진다. 또한 목표-발생 신호간 오차를  $10^{-5}$ 를 기준으로 본다면 제안 추출법을 사용할 경우 기존의 보간법 보다 30배 이상의 계산 횟수 감소를 달성할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안 추출법은 기존의 locking map기반의 보간법보다 반복 횟수를 감소를 통한 효율적인 계산과 목표-발생 신호간의 오차 감소를 동시에 달성 할 수 있다.

#### IV. 결론

광학적 복소 신호 생성을 위한 주입 매개 변수 추출을 위한 반복 해석법을 제안하고, 이를 통하여 목표-발생 신호간의 오차를 획기적으로 감소시켰으며 동시에 이를 위한 계산 반복 횟수 감소를 달성하였다. 이를 위하여 광 주입 반도체 레이저의 비울 방정식을 연립 비선형 방정식으로 변환하여 이용하는 방법을 제안 및 해석하였다. 이를 통하여 기존의 locking map기반의 해석 및 추출법과 비교하여  $10^3$ 배 이상의 계산 효율 향상 및 30배 이상의 오차 감소를 달성하였다. 제안한 추출법은 고 정확도의 광학적 복소 신호가 요구되는 대용량 광 신호 전송 시스템, 광학적 위상 배열기 및 광신호 처리를 비롯한 다양한 광기술 응용 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under the Basic Science Research Program (NRF-2019R111A1A01058848 and NRF-2019R1F1A1040959).

#### REFERENCES

[ 1 ] R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 976-983, Jun. 1982.  
 [ 2 ] J. S. Suelzer, T. B. Simpson, P. Devgan, and N. G. Usechak,

"Tunable, low-phase-noise microwave signals from an optically injected semiconductor laser with opto-electronic feedback," *Optics Letters*, vol. 42, no. 16, pp 3181-3184, Aug. 2017.  
 [ 3 ] Z. Liu and R. Slavík, "Optical Injection Locking: From Principle to Applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 43-59, Jan. 2020.  
 [ 4 ] N. H. Zhu, Z. Shi, Z. K. Zhang, Y. M. Zhang, C. W. Zou, Z. P. Zhao, Y. Liu, W. Li, and M. Li, "Directly Modulated Semiconductor Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 1-19, Jan.-Feb. 2018.  
 [ 5 ] H. Kalagara, G. A. Smolyakov, and M. Osinski, "Rate Equation Analysis of Q-Modulated Strongly Injection-Locked Whistle-Geometry Ring Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 619-627, Nov. 2015.  
 [ 6 ] D. Wang, G. Xia, Y. Hou, W. Yang, E. Jayaprasath, J. Chen, and Z. Wu, "Theoretical Investigation of State Bistability Between Pure-and Mixed-Mode States in a 1550-nm VCSEL Under Parallel Optical Injection," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19791-19797, Mar. 2018.  
 [ 7 ] J. T. Kim, "Analyses of Encryption Method for Chaos Communication Using Optical Injection Locked Semiconductor Lasers," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 811-815, May. 2005.  
 [ 8 ] J. H. Cho, C. H. Cho, and H. K. Sung, "Theoretical Performance Evaluation of Optical Complex Signals Based on Optically Injection-Locked Semiconductor Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1-9, Jun. 2019.  
 [ 9 ] A. H. Nguyen, J. H. Cho, H. J. Bae, and H. K. Sung, "Side-lobe Level Reduction of an Optical Phased Array Using Amplitude and Phase Modulation of Array Elements Based on Optically Injection-Locked Semiconductor Lasers," *Photonics*, vol. 7, no. 1, pp. 20, Feb. 2020.  
 [ 10 ] Z. Liu, Kakande, B. Kelly, J. O'Carroll, R. Phelan, D. J. Richardson, and R. Slavík, "Modulator-free quadrature amplitude modulation signal synthesis," *Nature Communications*, vol. 5, no. 1, pp. 5911, Dec. 2014.  
 [ 11 ] C. Henry, N. Olsson, and N. Dutta, "Locking range and stability of injection locked 1.54  $\mu$ m InGaAsp semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 21, no. 8, pp. 1152-1156, Aug. 1985.  
 [ 12 ] P. D. Pukhrbamb, S. Lee, G. Keiser, and W. Y. Al-Smadi, "Radio-over-fiber transmission using semiconductor laser

- under weak external light injection,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, no. 3, pp. 213, Feb. 2016.
- [13] L. A. Coldren, M. L. Mašanović, and S. W. Corzine, “Spontaneous Emission,” in *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, ch. 4, pp. 192-198, 2012.
- [14] C. Henry, “Theory of the linewidth of semiconductor lasers,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 259-264, Feb. 1982.
- [15] Y. Shen, G. Gao, Y. Meng, X. Fu, and M. Gong, “Gain-phase modulation in chirped-pulse amplification,” *Physical Review A*, vol. 96, no. 4, pp. 043851, Oct. 2017.
- [16] J. D. Faires and R. L. Burden, “Solutions of Systems of Nonlinear Equations,” in *Numerical Methods*, 3rd ed. Pacific Grove, CA: Brooks Cole, ch. 10, pp. 416-449, 2003.



조준형(Jun-Hyung Cho)

2011년 02월 홍익대학교 전자전기공학부 공학학사  
2018년 02월 홍익대학교 전자정보통신공학과 공학박사  
2020년 03월 - 홍익대학교 과학기술연구소 연구 교수  
※ 관심분야 : 반도체 레이저 고속 변조, 광 주입 잠금, 밀리미터/마이크로파 생성



성혁기(Hyuk-Kee Sung)

1999년 연세대학교 전자공학과 공학학사  
2006년 08월 Ph.D, EECS University of California, Berkeley  
2007년 09월 - 홍익대학교 전자전기공학부 교수  
※ 관심분야 : 초고속 반도체 레이저, Microwave photonics, 광학 바이오 센서