
광대역 통신시스템을 위한 수십 GHz 신호생성을 위한 수치 해석

김정태*

Numerical Analyses of Several tens of GHz Wave Signal Generation for Broadband Communication System

Jung-Tae Kim*

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 신호 발생을 위한 헤테로다인 방식을 제안하였다. 향후, 무선 이동통신, 광대역 통신망에 사용되어질 밀리미터파 신호는 전기적 요소의 한계로 광학적인 요소에 의해 신호를 생성하는 방법이 많이 연구되고 있다. 광학적인 요소에 의한 여러 가지의 연구들은 주로 광검출기의 기능, 밀리미터파 대역의 발진기의 개발 등이 주로 이루어지고 있으며 무선 통신망에 적용하기 위한 소자기술 등이 발전되고 있다. 따라서 본 논문에서는 향후 밀리미터파 대역에서 사용되어질 LMDS(Local Multi-point Distribution Service) 등의 시스템에서 수십기가 헤르츠급의 광원으로 응용 가능한 헤테로다인 방식을 이용한 밀리미터파 신호의 생성에 대한 수치적인 방법에 대해 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, We have proposed an Heterodyne technique to generate millimeter-wave signal. Microwave signals in cellular broadband mobile communication networks and distributed networks can favorably be generated and distributed by optical techniques. In principle, these techniques have already been investigated for optical control of phase-array antennas, characterization of photo-detector and phase locking of millimeter-wave oscillators and now being applied to wireless communications. The generation and transmission of millimeter-wave radio signals by optical means is of interest for future pico-cell broadband mobile communication system, especially for systems operating at frequencies of 30GHz.

키워드

헤테로다인, 밀리미터파, 반도체레이저

1. 서 론

최근 인터넷 사용의 급격한 확산으로 인해 이제까지는 전화망을 위주로 발전되어 왔던 통신망 구조에 많은 변화가 일어나고 있다. 먼저, 기존의 마이크로파 대역의 전송용량이 포화상태로 됨에 따

라, 더 넓은 주파수 대역의 Millimeter-Wave (MMW) 시스템의 요구가 증가되고 있다. 따라서, MMW를 이용한 기술은, 향후 무선망에서의 멀티미디어 통신을 가능케 할 광대역 무선 통신 시스템의 기술로 발전하고 있다. 이러한 MMW 기술과 Fiber-Optic 기술과의 접목은, 더 넓은 주파수 대역

*목원대학교 공과대학 정보전자영상공과대학부

접수일자 : 2004. 05. 01.

의 제공, 더 많은 전송 용량 및 저 손실이라는 측면에서 큰 장점을 가지고 있다. 그래서, radio-on-fiber 시스템을 위한 연구가 많이 진행되고 있는 추세이다. 기존의 이동통신 분야 이외에, Intelligent Traffic System, Indoor Communication, Remote Antenna, Beam Forming 등과 같은 분야에서도 더 높은 캐리어 주파수가 요구 되어지면서 MMW 시스템에 대한 관심을 보이고 있다. 또한, 향후에는 pico-cellular 광대역의 이동시스템에서 MMW가 필수적이며, 이때 중앙기지국과 이동 기지국의 연결 구성은 광대역성을 얻기 위해 Optical feeder link 로의 구성이 필수적이다. 이때, 수 많은 기지국에서 수행해야 될 기능들을 중앙기지에서 수행함으로써, 설비의 중앙 집중화를 통한 시스템 구축 비용 절감 등과 같은 경제적인 이득이 있다는 점에서 MMW의 생성에 대한 연구의 기대 효과 및 가능성이 매우 크다. 마이크로파 및 밀리미터 대역의 신호를 생성하는 하나의 방법이 optical injection locking(OIL)을 사용한 방법으로 최근에 들어 많은 연구가 되고 있다. 이러한 원리는 (그림1)에서 보는 바와 같이 마스터 레이저(ML)가 반도체에 RF 변조된 신호가 직접 변조되고, 변조되는 주파수 f_m 의 크기에 따라 분리된 다중의 광신호가 측파대역으로 분리되어 생성된다. 이때, 두개의 슬레이브 레이저(SL)가 요구되는 주파수 오셋에 의해 분리된 두 개의 주파수 대역에서 Injection locking된다. 이때, 우리가 원하는 신호가 서로 비팅되어 포도다이오드에서 원하는 신호가 생성된다. 이러한 방법을 통하여, 고주파 대역의 주파수를 얻기 위하여 사용되며, RF 변조되는 ML의 크기는 많은 수의 측파대를 생성하고 충분히 분리될 수 있어야 한다. 이렇게 생성되는 측파대 신호는 변조되는 RF의 전력 및 주파수에 민감하게 의존한다. 이러한 이유로 해서 외부에서 RF 신호를 인가하지 않는 방식이 요구되어지며, OIL 방식은 이러한 단점을 보완하고, 원하는 신호를 두개의 SL에 의해 원하는 주파수를 쉽게 얻을 수 있는 방법이다. 또한, 최근에는 반도체 레이저의 변조 대역을 확장하는 여러 방법들이 발표되고 있는데 이중의 한 방법이 Strong optical injection 방법이다.[1-3] 그러나, Strong optical injection 아래에서의 정적인 방법으로 Stable locking 범위 값을 구하기 위한 방법이 활발히 연구되지 못하고 있다. 아마도, 이러한 영향들은 Undamped relaxation oscillation 및 chaos 현상에 기인한 것으로 여겨진

다. 본 논문의 연구는 strong optical injection 아래에서의 반도체 레이저의 스펙트럼 특성을 분석하고, 넓은 주파수 대역의 분리를 가능케 하는 다중 Optical sideband의 생성이 가능하다는 것을 해석하였다.

II. 이론적 배경

단일 광소자를 이용한 수십 GHz의 광 펄스를 얻기 위한 방법으로, Modulation Sideband Techniques, Mode Locked Laser, Dual Mode Laser, FM-modulated Laser in Conjunction with Fiber Dispersion 등의 방법이 있다.[4] 이러한 방법의 경우에는 광소자의 제작이 어려우며, 현 단계에서는 연구 단계에 있으며, 소자의 개발비 및 가격 면에서 경쟁력이 부족하다. 따라서, 현재 상용화되어 있어 있는 반도체 레이저 다이오드 (Laser Diode)의 코히런트한 특성을 이용하여 광학적으로 수십 GHz의 캐리어 주파수를 생성하는 방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 논문에서 사용하고자 하는 방법도 Multiple Optical Source Technique의 한 방법인 Injection locking의 기법을 이용한다.

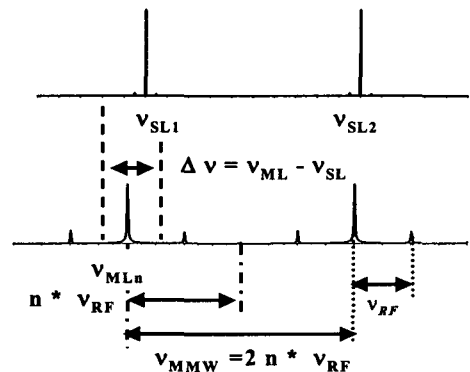


그림 1. SL 사이의 비팅되는 신호의 스펙트럼
Fig.1 Spectrum of Signal employing beating of Slave Laser

Injection locking 기법을 이용한 광학적인 MMW 생성은 기본적으로, (그림2)와 같이, Master Laser (ML)와 두개의 Slave Laser (SL)로 구성된다.

연속적인 펄스(CW)를 이용하여 ML를 직접 변조시키면, 직접 변조된 ML은 IM(Intensity Modulation) 뿐만 아니라, FM(Frequency Modulation)을 수반하여 ML의 중간 주파수 주변으로 여러 개의 Side mode가 생성된다. 이때, 원하는 주파수를 얻기 위해 ML의 바이어스 전류를 조절하여, 안정된 Injection locking range 범위 내에 SL1과 SL2가 존재하도록 조정하여, SL1과 SL2의 주파수의 차이가 원하는 주파수 대역에서 얻게 된다. 이때, 선택된 두 SL의 모드간의 주파수는 포토다이오드에서 비팅되어 원하는 MMW를 얻을 수 있다.

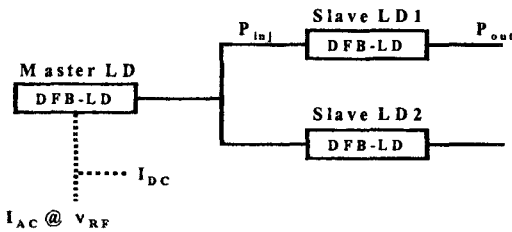


그림 2 제안된 OIL 방식의 블록도
Fig.2 Block of the proposed OIL method

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 해석

3.1 밀리미터파 생성

ML로부터 출력되는 광 출력이 SL에 주입될 때, 레이저의 Locking 특성은 3가지의 영역인 Unlocking, Dynamically stable locking, Dynamically unlocking locking, Dynamically stable 과 Unstable locking 영역으로 분리된다. 이러한 특성들은 ML과 SL 사이의 lasing되는 주파수 오셋과 주입되는 광 출력에 의해 결정된다. 본 논문의 해석을 주입되는 광 입력을 포함한 rate equation을 포함한 수식을 이용하였다.[5] (그림3)은 rate equation 해석으로부터 얻은 3가지 영역에서의 스펙트럼 특성이다. (그림3)에서 Δf 는 lasing되는 ML(fML)과 SL(fSL) 사이의 주파수 차이이고, R은 Optical injection 없는 SL의 광 출력과 주입되는 ML 광 출력 사이의 비로서 정의된다. Static locking regime을 위한 경계 조건은 OIL rate equation의 정상상태로부터 구할 수 있다. Static locking regime 조건에서, 선형화된 전달함

수의 안정도의 분석은 Dynamically stable locking 범위로 부터 결정된다. 다음의 식(1)은 율 방정식(Rate equation)을 이용하여, 광출력 스펙트럼을 분석할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \left[\frac{\Gamma g_0}{1+\epsilon P} (N-n) - \frac{1}{\tau_p} \right] P + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} N + 2K_c \sqrt{P_n P} \cos(\Phi_{ML} - \Phi) \\ \frac{d\Phi}{dt} &= -2\pi f + \frac{1}{2} d \left[\Gamma g_0 (N-n) - \frac{1}{\tau_p} \right] + K_c \sqrt{\frac{P_n}{P}} \sin(\Phi_{ML} - \Phi) \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{qV_a} - \frac{g_0}{1+\epsilon P} (N-n) P - \frac{N}{\tau_n} \end{aligned} \quad (1)$$

(그림3)에서 ①에서 ⑥까지의 동작 영역에서 계산된 광 출력신호의 스펙트럼이 (그림4)에 표시되어 있다. 이러한 값들은 율 방정식의 대신호 분석을 수치적인 방법으로 구하여, 정상상태 분석으로부터 예측할 수 있는데, 구해진 SL 광 출력 값을 푸리에 변환한 후 구할 수 있다. 계산된 스펙트럼 값은 광 주입이 없는 조건 아래서 SL의 스펙트럼 정점에서 정규화하였다. 사용된 계산에서, 잡음은 무시하였고, SL은 1.51th에서 바이어스 하였다. 여기서 fML은 수평축에서의 영의 값을 나타낸다. (그림4)의 광 출력 값은 Unlocking regime에서 보편적으로 나타나는 현상이다. 이때, Unlocked power 값은 fSL에서 나타난다. 반면에, 다른 Unlocking 영역에서의 출력 스펙트럼은 (그림4)와 같으며, Δf 의 값을 가진다. 여기서, 주입되는 광은 증폭되어, SL 값과 비팅된다. 이렇게 비팅되는 값은 ML과 SL 사이에서 four-wave mixing 되어 다중의 Conjugate sideband를 생성하게 된다. Sidemode separation의 값(Δv)은 Δf 와 같으나, 이 영역은 Conjugate side modes가 Coherent하지 않으므로 밀리미터파 생성에는 유용하지가 않다. Dynamically unstable locking regime은 Undamped relaxation oscillation 과 Chaos 영역으로 특징되어지며, 스펙트럼이 조밀하게 분포되어 있다. (그림3)에서 보는 바와 같이 Chaos 영역에서 R의 값이 -14dB 보다 적은 영역에서 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 실험적인 결과와 이론적인 결과가 일치함을 알 수 있다.[6] R 값이 -14 dB 이상 일 경우, Undamped relaxation sideband가 나타나고, Separation R과 Δf 의 값이 증가함에 따라, 증가함을 알 수 있다. 이때 R의 함수로서의 Δv 값의 변화가 (그림5)에 표시하였다. (그림5)에서

와 같이 두 개의 SL가 Dynamically stable regime에서 발생한 Sideband에 Lock 되었을 경우, 주파수 필터와 같은 역할을 하며, 원하지 않는 Side mode를 억압한다. 이때, 두개의 SL의 광 출력은 Δv 에 다중 모드에서 분리된 신호에 의해 두 개의 coherent한 신호가 발생하게 되고, Δv 의 멀티모드에서 비팅된 신호가 포토다이오드에서 생성된다.

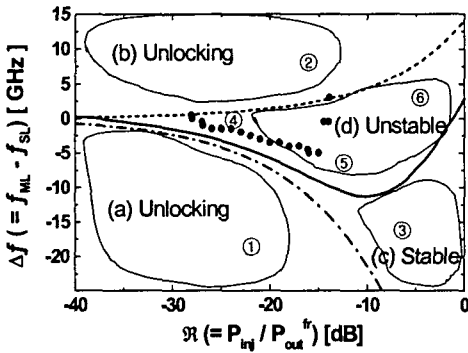


그림 3. 외부의 바이어스와 광 출력 조건에 의한 locking 범위의 의존성
Fig.3 Dependence of locking range by external bias and optical output condition

주입되는 파라미터 값을 적절히 조정함에 따라 매우 작은 Phase noise, 넓은 Tuning range와 높은 안정성을 얻을 수 있기 때문에, 반도체 레이저의 Injection-locking을 이용한 Coherent 광통신, 파장 변환, 광스위칭, MMW 신호 발생 등의 응용분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 MMW 시스템을 근간으로 하는 광대역 이동 통신망에서 Injection locking은 광 Heterodyne을 이용한 MMW 신호를 발생시키는 한 방법으로써, FM sideband locking, Intermodal locking, 35 ~ 60 GHz MMW 생성 등의 이론적인 연구 및 실험들이 활발히 진행되어 오고 있다.[6-7] 대부분의 연구들은 30 dB 이하의 Weak injection level에 초점이 맞추어져 있다. Injection locking은 주어진 주입되는 파라미터 값의 크기에 따라 여러 주파수 특성을 보이는데, 특히 Strong injection level에서는 그 Locking range 안에서도 Unstable한 특성이 나타난다.[7] 따라서, 이에 대한 해석을 위해서, 외부로부터 인가되는 빛의 크기 및 주파수에 따른 여러 특성에 대한 해석 및 모델링 작업이 선행되어야 한다.

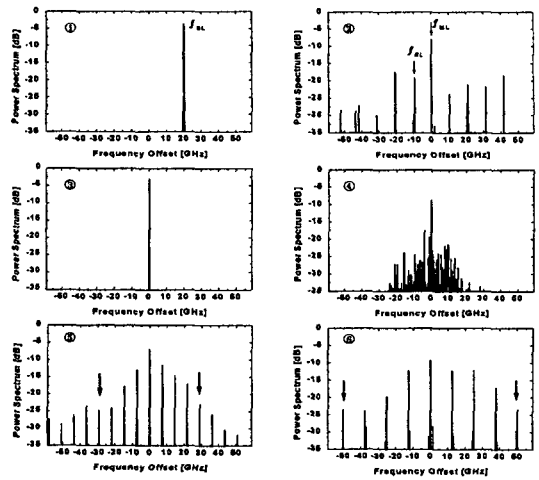


그림 4. 서로 다른 동작점에서 계산된 광 출력 스펙트럼
Fig.4 Optical output spectrum by calculated at different operating point

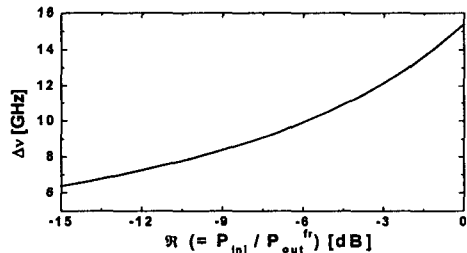


그림 5. 경계조건에 따른 함수로서의 sideband의 분리도
Fig.5 Sideband separatin as function by boundary condition

본 논문에서는 Injection locking 특성에 대하여 대 신호 및 스펙트럼 분석을 이용한 해석이 이루어졌다. (그림2)에서와 같은 Injection locking의 기본 구성은 Master Laser (ML)에서 나온 빛이 Optical isolator를 지나 Slave laser (SL)로 인가되는 형태를 갖는다. Injection locking에 대한 수학적 모델로 Single-mode Van der Pol equation을 본 해석에 사용하였으며, 레이저다이오드의 파라미터 값들은 논문을 참조하였다.[7] 정착상태의 Locking 범위는 다음과 같이 locking 영역의 경계조건을 갖는다.[8-9]

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= 2\pi(f_{ML} - f_{SL}) \\ &= K_c \sqrt{\frac{S_{ML}}{S_{SL}}} (\sin\theta - \alpha \cos\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, K_c 는 coupling coefficient, S_{ML} 은 각각 ML로부터 SL로 인가되는 Photon density, S_{SL} 은 SL cavity내의 Photon density, 그리고, $\Delta\omega$ 는 ML과 SL간의 Phase의 차이이다. 또한, 주어진 울 방정식에 대한 소신호 해석을 통해 얻어지는 3차 시스템 함수는 동적으로 안정된 Lock이 되기 위해서 모든 영의 값은 S-domain의 좌측에 존재하여야 한다. (그림3)에서 볼 수 있듯이, Stable-locking, Unstable locking, 그리고 Unlocked의 세 영역으로 구별된다. (그림4)는 이들 영역의 해들에 대한 신호 응답 및 스펙트럼을 보여주고 있다. 신호응답의 경우, 2ns에서 1.011th에서 1.51th로 Step-like 전류를 인가했을 때의 파형이다. 이 때 발생하는 과도응답 이후 정상상태의 한 부분을 Window로 추출한 후 푸리에 변환하여 얻은 스펙트럼이 (그림4)와 같다. 각 값들은 Free-running 경우의 푸리에 출력 값 중 최고치로 정규화 하였다. Stable-locking (그림3-a)의 경우에는 모든 SL의 출력 광파워는 ML의 주파수에 Locking 됨을 볼 수 있다. Unstable-locking (그림3-b)의 경우에는 Lock이 된 출력 값이 정상상태의 값을 중심으로 진동하여서, (그림3-a)처럼 안정적으로 Lock이 되고 있지는 않지만, Unlocked power가 존재하지 않으므로 넓은 의미에서 Lock이 되었다고 정의할 수 있다. (그림3-b)의 스펙트럼에서 Sideband가 존재하는데, 이는 Relaxation oscillation sideband에 기인한다. Unlocked (그림3-c)의 경우에는 ML 주파수에 Lock되는 출력이 줄어드는 반면에, Unlocked된 출력 값이 증가하여 일정 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 이상으로, 본문에서는 Locking 특성을 울 방정식으로 모델링하고, 이 방정식을 이용하여, Step-like 전류입력에 따른 신호응답 및 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼 해석을 수행하였다. 그림5는 R에 따른 계산된 광/RF 스펙트럼 결과이다. 그림4에서 광 주파수 축의 중심은 비변조시 ML lasing 주파수이다. 그림5(a)와 같이 R이 -37.2 dB인 경우, locking 영역이 매우 협소하여 locking 영역 밖의 선택되지 않은 sideband들은 그다지 큰 기여를 하지 못하고 있다. 결과적으로 생성된 RF 스펙트럼은 원하지 않는 beat 신호 성분이 매우 억제되어 있음을 보인다. 그림5(b)와 (c)와 같이, R이 커짐에 따라 SL을 주파수를 조절하여 목표 sideband에 stable-lock을 시켰다. 그러나 원하지 않는 sideband의 일부는 unstable-locking 영역에 위치하게 되어서 SL에서

충분한 이득을 얻을 수 있다. 결과적으로 원하지 않는 sideband들이 억제되지 못하여 RF 스펙트럼 상에서 원하지 않은 beat 신호 성분이 상당히 존재하게 된다. R을 크게 함에 따라, 원하지 않는 beat 신호 성분의 전력이 커져서 RF 스펙트럼 상에서 원하는 beat 성분의 크기와 비슷하게 될 수 있다. 그림5에서, ΔP 는 원하는 신호 성분과 원하지 않는 신호 성분간의 크기 차이를 의미한다. 그림5는 32 GHz의 원하는 beat 신호 성분과 40 GHz의 원치 않는 주변 RF 성분 간의 차이를 보여주고 있다.

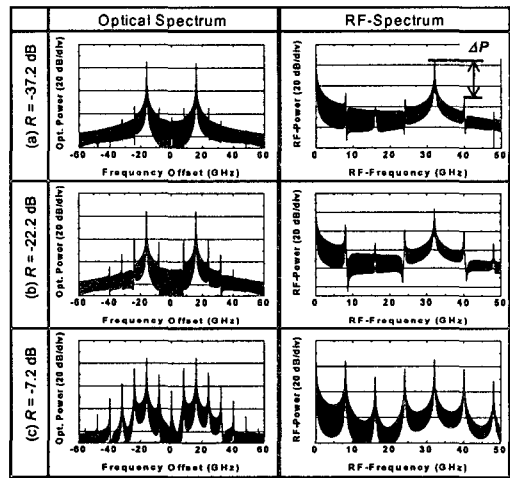


그림 5. 광/RF 스펙트럼 출력파형
Fig.5 Waveform of optical/RF spectrum

3.2 시스템 구성시의 분석

직접 변조된 fiber-optic 링크의 경우 색분산으로 야기된 CNR(Carrier-to-Noise Ratio) 페널티를 구하기 위해 파이버의 전달함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$H(f) = \exp^{-j\theta(f)} = \exp^{-j\alpha f^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \pi D \frac{\lambda^2}{c} L \quad (4)$$

분산에 의한 신호 전력의 변화는 주기성을 가지며, 캐리어 주파수와와의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$\Delta L = \frac{c}{D \lambda^2 f_c^2} \quad (5)$$

또한, Injection locking 방법을 사용한 경우에는 FM을 수반하여 ML의 중간 주파수 주변으로 여러 개의 Side-mode가 생성되어 Injection locking range내에서 원하는 밀리미터파를 생성하여 포토 다이오드에서 비팅되어 원하는 주파수를 얻을 수 있다. 파이버 전송 전에 크기가 같은 4 모드의 입력을 가정하고, 분산과 위상의 변화를 고려하여 CNR 페널티를 계산하였다. 일반적으로, CNR 페널티는 다음의 수식과 같이 파이버의 전송전과 전송 후에서의 신호의 전력비로써 표현할 수 있는데 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\text{Penalty} = -10\log\{\text{Prf}(L)/\text{Prf}(0)\} \quad (6)$$

여기에서 Prf(0)은 파이버로 전송되기 전의 신호의 전력을 표시한다. 시뮬레이션의 결과로부터, 캐리어의 주파수가 증가함에 따라, 전송거리가 감소하고 있음을 알 수 있다.

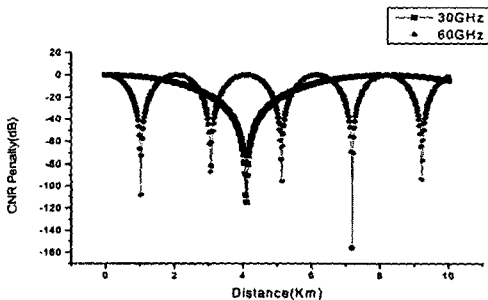


그림 6. 전송거리에 대한 CNR Penalty
Fig.6 CNR Penalty by transmission distance

IV. 결 론

본 논문에서는 헤테로다인 기법을 이용하여 밀리미터파 주파수를 생성하는 방법에 대해 설명하였다. 직접 변조에 의해 밀리미터파를 생성할 경우 광섬유의 색분산에 의한 CNR 페널티를 주기적으로 겪게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 헤테로다인 방식이 제안되어 오고 있는데, 이 방식은 원하는 주파수의 차이를 가지는 두 개의 광 신호를 PD에 입력하여 beating 신호가 원하는 밀리미터파 주파수 성분을 갖게 한다. 무선 통신에 사용할 수 있는 깨끗한 beating 신호를 얻기 위해서 phase-locking이 된 두 개의 광 신호가 필요하다. 헤테로다인 기법은

광섬유 색분산의 영향을 받지 않을 뿐 아니라, 생성시킬 수 있는 주파수 대역의 제한을 크게 받지 않는다는 점에서 많은 관심의 대상이 된다.

향후, 광대역 통신망에서 응용하기 위하여 주파수 대역폭의 증가가 필요로 하다. 이에 부응하기 위한 방법의 하나가 Injection locking 방법으로 수십 GHz의 주파수를 얻을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 밀리미터파를 생성하기 위한 방법과 직접 변조방식과 heterodyne 방식에서의 시스템 성능 평가를 구하기 위해 밀리미터파 대역에서 파이버의 분산 영향과 위상의 변화를 고려하여 시뮬레이션을 통하여 그 가능성을 살펴보았다. 특히, 본 논문에서는 sideband injection locking을 이용하여 30 GHz 대역의 신호를 광학적으로 생성하였으며 이는 추후 발전될 다양한 fiber-radio 응용분야에서 고품질의 밀리미터파 신호 시스템 설계 시 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] J. Wang, M. K. Haldar, L. Li, and F. V. C. Mendis, Enhancement of Modulation Bandwidth of Laser Diodes by Injection Locking, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 1, pp. 34-36, 1996.
- [2] T. B. Simpson, M. Liu, and A. Gavrieldides, Bandwidth Enhancement and Broadband Noise Reduction in Injection-Locked Semiconductor Lasers, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 7, pp. 709-711, 1995.
- [3] J. M. Liu, H.F. Chen, X.J. Meng, and T. B. Simpson, Modulation Bandwidth, Noise, and Stability of a Semiconductor Laser Subject to Strong Injection Locking, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 10, pp. 1325-1327, 1997.
- [4] L. Noel, D. Marcenanc, and D. Wake, Optical millimeter-wave generation technique with high efficiency, purity and stability, Electron. Lett., vol. 32, no. 21, pp. 1997-1998, 1996.
- [5] J. C. Cartledge, and G.S. Burley, The Effect of Laser Chirping on Lightwave System Performance, J. Lightwave Technol., vol. 7, no. 3, pp. 568-573, 1989.
- [6] V. Kovanis and A. Gavrieldides, Instabilities and chaos in optically injected

semiconductor lasers, Appl. Phys. Lett., vol. 67, no. 19, pp. 2780-2782, 1995

- [7] R. P. Braun, G. Grosskopf, R. Meschenmoser, D. Rohde, F. Schmidt and G. Villino, Microwave generation for bidirectional broadband mobile communications using optical sideband injection locking, Electron. Lett., vol. 33, no. 16, pp. 1395-1396, 1997.
- [8] K. Kikuchi, C.-E. Zah, and T.-P. Lee, Amplitude-modulation sideband injection locking characteristics of semiconductor lasers and their application, J. Lightwave Technology, vol. 6, no. 12, pp. 1821-1830, 1988.
- [9] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, and T. Kimura, Direct Frequency Modulation in AlGaAs Semiconductor Lasers, IEEE J. Quantum. Electron., vol. QE-18, no. 4, pp. 582-595, 1982.

저자소개

김정태(Jung-Tae Kim)



1989년 2월 영남대학교 전자공학
과 졸업

1991년 8월 연세대학교 대학원
전자공학과 석사

2001년 8월 연세대학교 대학원
전자공학과 박사

1991년 8월~1996년 2월 한국전자통신연구원
(ETRI) 선임연구원

2002년 10월~현재 목원대학교 정보전자영상공학
부 교수

※ 관심 분야: Microwave photonics, Optically fed
wireless communication system design,
Information security system design, Network
Security, ASIC Design.