
헤테로다인 기법을 이용한 밀리미터파 신호 생성

김정태*

Millimeter-wave signal Generation using Heterodyne Technique

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 방법을 연구 중에 있다. 광학적인 요소에 의한 여러 가지의 연구들이 광검출기의 기능, 밀리미터파 대역의 발진기의 개발 등이 이루어지고 있으며, 무선 통신망에 적용하기 위한 소자기술 등이 발전되고 있다. 본 논문에서는 향후 밀리미터파 대역에서 사용되어질 LMDS(Local Multi-point Distribution Service) 등의 시스템에서 광원으로 응용 가능한 방법을 제안하였다.

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. 서론

최근 인터넷 사용의 급격한 확산으로 인해 이제까지 전화망을 위주로 발전되어 왔던 통신망 구조에는 많은 변화가 일어나고 있다. 먼저, 날로 증가하는 전송용량을 감당하기 위해 초고속 전송이 가능한 광통신 기술이 새로운 통신망 구축에 적용되고 있다. [1] 또한, 일반 수요자들에게 양질의 광대역 서비스를 제공할 수 있는 여러 기술들이 속속 개발되고 있다. 광대역 가입자 접속망 구축

을 위한 기술로는 기존의 통신망을 이용하는 xDSL(x-Digital Subscriber Line) 과 HFC(Hybrid Fiber Coaxial)를 들 수 있고, 새로운 통신망의 구축을 필요로 하는 고속 데이터 전송 시스템으로 WITL(Wireless In The Loop)과 FITL(Fiber In The Loop)이 있다.[2] 이와 같은 차세대 가입자 접속망 기술 중에서 WITL 기술은 그 기반 시설 구축이 비교적 간단하며 멀티미디어 서비스 제공이 가능하다는 면에서 많은 관심의 대상이 되고 있다. WITL의 응용 분야로는 BWLL(Bro-

*목원대학교 IT공학부

접수일자 : 2003. 4. 1

adband Wireless Local Loop), LMDS(Local Multipoint Distribution Service), MBS(Mobile Broadband System) 등이 있다. 최근 우리나라에서도 지식정보사회의 기반이 되는 초고속망의 보편적 접속 및 이용환경을 무선 방식으로 제공할 수 있도록 30 GHz 주변 대역에서 BWLL 용 주파수를 할당하고 이의 사업자를 선정한 바 있다. 또한 실내용 초고속 무선 LAN(Local Area Network), 차량 충돌 방지 시스템 등을 비롯한 ITS(Intelligent Transportation System) 그리고 국방 기술 등 여러 분야에서 밀리미터파 대역 신호를 사용한 기술 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 30 GHz 대역의 밀리미터파 신호 생성을 위해 sideband injection locking 방법을 제안하고, 이론적 모델링을 통한 수치적 해석을 수행하였다.

II. IM-DD 방식

Fiber-optic 밀리미터파 링크를 구현하는 가장 간단한 방법은 IM-DD(Intensity Modulation Direct Detection) 방식이다. 변조기의 사용여부에 따라 직접 / 외부 변조 방식으로 구분되며, 그림 1은 외부 변조 방식의 간단한 블럭도이다.

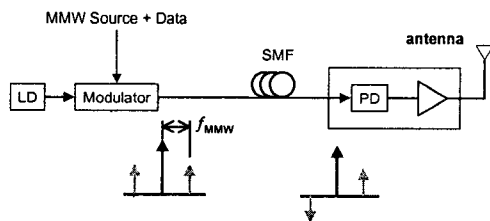


그림 1. 외부 변조에 의한 IM-DD 링크 및 광 스펙트럼 특성

Fig.1 Characteristics of optical spectrum and IM-DD link by external modulation

외부 변조 IM-DD 링크에서의 광변조기는, 레이저 다이오드로부터 인가되는 CW(Continuous Wave) 광원을 밀리미터파 대역 주파수인 f_{MMW} 신호로 변조한다. 이 때 변조기 출력 광 신호는, DSB-LC (Double Sideband - Large Carrier)의

형태를 갖는 신호이며, 이 신호는 광섬유를 통해 기지국에 전달된 후 광검출기(PD: Photo-Detector)에 입사된다. PD는 fMMW 주파수에 해당되는 전기 신호를 생성하며, 이 신호는 대역통과 여파기와 증폭회로를 거쳐 안테나를 통해 대기 중으로 전파된다. 이 방식은 매우 간단하다는 장점이 있지만, 광섬유의 색분산으로 인해 전달된 신호가 전송 거리에 따라 캐리어에 대한 잡음의 비인 CNR(Carrier-to-Noise ratio) 페널티의 변화를 겪는 문제점이 있다.[3, 4]

III. 헤테로다인 방식

색분산에 의한 CNR 페널티를 해결하는 방법으로 RHD(Remote Heterodyne Detection) 밀리미터파 링크를 구성하는 방법이 있다. 이 방법은 원하는 밀리미터파 대역의 주파수를 전기적 신호의 변조가 아닌 광학적 방법에 의해 얻어내는 방법이다. 헤테로다인 기법은 원하는 밀리미터파 대역의 주파수에 해당하는 주파수 차이를 가지는 두 개의 광 캐리어를 PD에 동시에 입력시켜서 두 광 캐리어의 혼합에 의해 원하는 주파수 성분의 전기 신호를 얻는 방법이다. 광 주파수가 ω_1 과 ω_2 인 두 독립적인 광원을 가정하자.

$$E_1 = \sqrt{P_1} \cos[\omega_1 t + \Phi_1(t)] \quad (1)$$

$$E_2 = \sqrt{P_2} \cos[\omega_2 t + \Phi_2(t)] \quad (2)$$

두 광원이 PD에 입력되어 생성된 전류는 다음과 같다.

$$I_{PD}(t) \propto P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos[\omega_2 - \omega_1]t - [\Phi_2(t) - \Phi_1(t)] \quad (3)$$

식 (3)에서 I_{PD} 는 PD의 출력 전류가 되며 이를 beat 신호라 부른다. I_{PD} 에서 $P_1 + P_2$ 는 직류성분이며, 나머지는 원하는 밀리미터파 신호 성분이 된다. 식 (3)에서 볼 수 있듯이, 두 광원의 주파수 차이를 원하는 밀리미터파 주파수 차이가 되도록 조절함으로써, 쉽게 PD 출력 신호에서 원하는 밀

리미터파 신호 성분을 얻을 수 있다. 그러나 독립적인 두 광원의 위상 성분들은 서로 임의의 값을 가지기 때문에, 두 광원이 beating 되어 생성되는 신호의 선폭은 두 광원 선폭의 합으로 나타나며, 보통 수 MHz 정도의 큰 값을 갖는다. 넓은 선폭을 갖는 신호는 데이터통신을 할 때, 주파수 효율성이 작아 실제 응용분야에서는 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위해, 위상 잡음이 작은 밀리미터파 신호원을 구현하는 방법들이 연구되어지고 있다.

IV. 제안된 방법의 원리

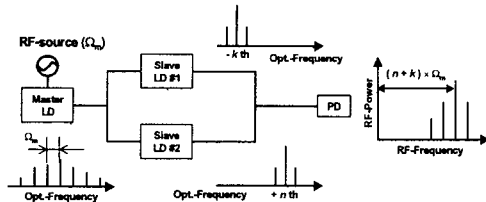


그림 2. Sideband injection locking 방식을 이용한 밀리미터파 생성
Fig.2 Millimeter-wave generation using sideband injection locking method

주 레이저(ML)를 원하는 밀리미터파 주파수의 sub-harmonic 주파수로 변조하면, 그림2에서처럼 ML의 광 스펙트럼에서 변조 주파수의 간격을 갖는 여러 sideband들이 발생함을 볼 수 있다. 이들 중 원하는 밀리미터파 주파수 차이를 갖는 두 개의 sideband를 두 개의 종 레이저 (SL)에 입력시켜 injection-locking을 일으키게 하면, 두 SL은 원하는 밀리미터파 주파수 차이를 가질 뿐만 아니라, 같은 ML에 동기되어 있으므로 동시에 phase-locking을 얻게 된다. 물론, 두 SL을 원하는 ML sideband에 동기시키기 위해서는 SL의 발진 파장을 원하는 sideband가 갖는 locking-range 안에 들어가도록 SL 동작 전류와 온도 조절을 통하여 발진 주파수를 조절해주어야 한다. 따라서 두 독립적인 SL이 ML의 sideband들에 의해 동기됨으로써, 두 레이저간의 위상은 상관관계를 갖게 되어서, PD에서 beating 신호의 선폭이 작게 되

며, 광섬유 색분산의 영향을 받지 않는다.

V. 이론적 모델

RF 변조 ML의 출력 전계는 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.^[5-7]

$$\tilde{E}^{ML}(t) = S_{ML}^{1/2} [1 + m_{IM} \cos(\Omega_m t + \Phi_{IM})]^{1/2} e^{jm_{FM} \sin(\Omega_m t + \Phi_{FM})}, \quad (4)$$

SML은 평균 ML 광밀도, Ω_m은 변조 각주파수, m_{IM}과 m_{FM}은 intensity-modulation (IM)과 frequency-modulation (FM) 지수, 그리고 Φ_{IM}와 Φ_{FM}은 IM와 FM의 각 위상 성분들이다. 식 (1)을 Bessel 함수로 표현할 수 있다.^[7]

$$\begin{aligned} \tilde{E}^{ML}(t) &= S_{ML}^{1/2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[J_k(m_{FM}) + \frac{m_{IM}}{4} (J_{k+1}(m_{FM})e^{j\Delta\Phi} + J_{k-1}(m_{FM})e^{-j\Delta\Phi}) \right] e^{jk(\Omega_m + \Phi_{FM})} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_k^{ML} \cdot e^{j\Omega_m t}, \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$E_k^{ML} = S_{ML}^{1/2} \cdot e^{j\Phi_{FM}} \cdot \left[J_k(m_{FM}) + \frac{m_{IM}}{4} (J_{k+1}(m_{FM})e^{j\Delta\Phi} + J_{k-1}(m_{FM})e^{-j\Delta\Phi}) \right]$$

이다.

ΔΦ는 Φ_{FM}과 Φ_{IM}의 차이 값이다. 위의 식에서 J_{-k}(m_{FM}) = (-1)^k J_k(m_{FM})이다. 식 (5)는 RF-변조된 ML이 광 스펙트럼에서 Ω_m씩 떨어져 있는 여러 개의 sideband들로 구성됨을 보여준다. RF-변조된 ML 빛이 인가되는 SL을 모델링하기 위해, Lang의 율 방정식을 다음과 같이 확장할 수 있다.^[8]

$$\frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \left(\Gamma G(N) - \frac{1}{\tau_p} \right) \cdot (1 - j\alpha) \cdot E_k + j(\omega_k^{ML} - \omega^f) \cdot E_k + 2K_c E_k^{ML} \quad (6)$$

$$\frac{dS_k}{dt} = \left(\Gamma G(N) - \frac{1}{\tau_p} \right) \cdot P_s + \Gamma \beta \frac{N}{\tau_s} \quad (7)$$

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left(\Gamma g_0 (N - n_s) - \frac{1}{\tau_p} \right), \quad (8)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV_a} - G(N) \cdot \left(P_s + \sum_k |E_k|^2 \right) - \frac{N}{\tau_a}, \quad (9)$$

$$G(N) = \frac{g_0(N - n_s)}{1 + \epsilon S}, \quad \text{그리고, } S = P_s + \sum_k |E_k|^2.$$

위의 식들에서, E_k 는 k -번째 ML sideband에 lock이 된 전계를 의미한다. $|E_k|^2$ 는 k -번째 sideband에 lock된 광 밀도에 상응한다. ω^f 은 free-running SL의 발진 각주파수이다. S_u 와 ϕ_u 는 lock이 되지 않은 광 밀도와 광 위상이다. 여기서, Langevin 잡음 성분은 고려하지 않았다. 결합계수(KC)는 $vg/2L$ 로, SL cavity 길이(L)이 300 μm 에 해당되는 141.7 GHz를 사용하였다. 기타 매개변수들은 통상적인 의미를 갖으며, 그 값들은 참고문헌을 참조하였다.[8]

표 1. 시뮬레이션에 사용된 레이저 매개변수
Table 1 Laser parameters used in simulation

Symbol	Parameter	Value	Unit
λ	lasing wavelength	1550	nm
Γ	confinement factor	0.4	
n_s	transparent carrier density	1.0×10^{18}	cm^{-3}
τ_p	photon lifetime	3.0×10^{12}	sec
τ_n	carrier lifetime	1.0×10^9	sec
β	spontaneous emission factor	3.0×10^{-5}	
u_g	group velocity	8.5×10^9	cm/sec
g_0	differential gain	12.75×10^7	cm^2/sec
ϵ	gain suppression factor	5×10^{17}	cm^3
V_a	volume of active layer	1.5×10^{10}	cm^3
α	linewidth enhancement factor	5	
η_{ex}	LD differential quantum efficiency	0.4	

기존의 Lang 모델은 단일 모드 레이저가 인가되는 SL을 다루는 반면에, 본 연구에서는 임의의 갯수의 ML sideband들을 고려할 수 있도록 기존의 Lang 모델을 재구성하였다. k -번째 sideband의 크기는 레이저 chirp 특성과 밀접한 관계가 있는 m_{FM} 에 따라 결정된다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서는 ML과 SL로 사용되는 세 개의 레이저 다이오드가 동일하다고 가정하였다. ML은 문턱값의 1.57배로 인가되어 있고, 8 GHz로 변조된다고 가정한다. 변조 전류가 25 mA일 때, 선형화된 울 방정식을 통해 얻은 m_{IM} 과 m_{FM} 은 각각 0.4와 2.7이다. 이 경우, ML의 ± 2 -번째 sideband가 주변의 다른 sideband보다 크게 된다. 시뮬레이션에서는 기준 최고치 값을 포함하여 총 17개의 sideband를 고려하였다. 이 중 +2와 -2 번째 sideband를 두 SL이 각각 injection-lock될 목표 sideband로 설정하여, 32 GHz가 생성되도록 하였다. 이러한 조건에서, ML 인가 전력을 달리 해 가면서 injection-lock에 관여하지 않은 다른 sideband들의 영향을 살펴보았다. 이때, ML과 두 SL간의 경로 길이의 차이와 두 SL과 PD까지의 경로 길이의 차이는 고려하지 않았으나, 이러한 경로 길이 차이들은 상대적인 광 위상을 달리하여 전체의 시스템 성능에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. PD는 인가되는 광 전계에 대해 이상적인 square law device로 가정한다.

ML의 목표 sideband들에 lock된 두 SL의 출력은 독립적으로 식 (6)에서 (8)까지의 식을 4차 Runge-Kutta 적분법을 통해 계산된다. 두 SL은 문턱 전류의 1.96배로 인가되어서, 외부 광주입이 없는 경우 약 5mW의 광 출력을 나타낸다. 2-ps의 시간 간격으로 10000회 반복하여 울 방정식을 계산하였다. SL 출력이 정상상태에 도달한 후, SL 출력을 푸리에 변환을 통해 SL의 광 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이를 통해 얻은 두 SL 광 스펙트럼을 두 SL 간의 발진 주파수 차이를 고려하여 광 주파수 영역에서 합치고, 그 결과를 역 푸리에 변환함으로써 시간 축 상에서의 광 전계를 구할 수 있다. 이렇게 구한 광 전계를 제곱함으로써 PD 출력 전류를 계산할 수 있고, 이를 다시 푸리에 변환함으로써 beating 신호의 RF 스펙트럼을 얻을 수 있다.

k -번째 sideband에 lock이 될 수 있는 SL의 주파수 locking 범위는 간단히 다음과 같다.[9]

$$|\Delta f_k| \leq \frac{K_c}{2\pi} \sqrt{\frac{|E_k^{ML}|^2}{S} (1 + \alpha^2)}. \quad (10)$$

이 locking 범위는 stable-locking과 unstable-locking 영역으로 세분화된다. stable-locking 영역에서는 출력 전력이 다소의 변화 값으로 인가되었을 때, steady-state 값으로 수렴한다. 반면, unstable-locking 영역에서는 steady-state 값으로 수렴하지 못하고 자체(self-sustained) 발진이나 chaos 현상이 일어난다. 단일 모드 ML 빛이 SL로 인가되는 경우에는, 선형화된 율방정식의 s-domain 해석을 통해 stable-locking 영역을 결정할 수 있다. 그러나 한 개 이상의 ML 모드가 인가되는 경우에는 위의 방법을 적용할 수 없다. 여러 개의 ML sideband들이 stable-locking 영역에 미치는 영향을 함께 고려하기 위해, 다음과 같은 방법으로 stable-locking 영역을 결정하였다. 먼저, k-번째 목표 sideband 주변으로 100 MHz의 간격으로 SL 발진 주파수를 바꾸어가면서 식 (6)에서 (9)까지의 율 방정식을 수치적으로 계산하였다. 시간 축에서 얻은 해를 통해 다음과 같은 기준을 가지고 SL이 k-번째 sideband에 stable-lock 여부를 결정하였다. 첫째, k-번째 목표 sideband에 lock된 광 밀도는 unlocked된 광 밀도에 비해 커야 한다. 즉, 다음의 값을 만족한다. $|E_k|^2 > S_u$ ($k = \pm 2$). 둘째, k-번째 목표 sideband에 lock된 광 밀도는 다른 sideband에 lock된 광 밀도 보다는 커야한다. 즉, $|E_k|^2 > |E_m|^2$ ($m \neq \pm 2$)를 만족한다. 어느 특정 locking 범위 내에 한 개 이상의 sideband가 존재할 수 있다. 마지막으로, lock된 광 밀도의 relaxation 발진이 정상상태에서 충분히 억제되어야 한다. 본 논문에서는 30 dB suppression ratio를 다음과 같이 정의하였다.

Suppression Ratio

$$\equiv \frac{\max(|E_k(t)|^2) - \min(|E_k(t)|^2)}{\max(|E_k(t)|^2) + \min(|E_k(t)|^2)}$$

위의 기준을 통해, 여러 injection ratio, R에 대해 +2와 -2 sideband에 lock된 SL의 stable-locking

범위를 결정할 수 있다. 여기서, injection ratio, R,은 평균 ML 인가 전력과 free-running SL 전력 간의 비율로 정의한다. 그림3은 계산상 구한 stable-locking 영역이다. 그림3의 (c)영역은 stable-locking 영역을 표시하며, Injection ratio 값이 증가함에 따라, SL의 발진 주파수로부터 낮은 주파수 쪽으로 stable-locking 영역의 중심이 치우쳐 있음을 알 수 있다.

이 후 시뮬레이션에서는, 세가지 R에 대해 SL 광 스펙트럼 및 beat 신호 RF 스펙트럼을 비교하였다. 각 R에 대해, 그림4에서 구한 $\Delta f \pm 2$ 의 중간값을

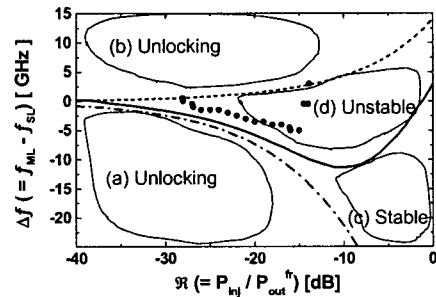


그림 3. Stable-locking 영역
Fig.3 Region of stable-locking

이용하였다. 그림4는 R에 따른 계산된 광/RF 스펙트럼 결과이다. 그림4에서 광 주파수 축의 중심은 비변조시 ML lasing 주파수이다. 그림4(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. 그림4(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 않는 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. 그림4에서, 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. 그림3에서 계산한 stable-locking 영역 크기도 함께 보여주고 있다. R의 크기가 작은 경우,

V. 결론

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 광신호를 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 광신호가 필요하다. 헤테로다인 기법은 광섬유 색분산의 영향을 받지 않을 뿐 아니라, 생성 시킬 수 있는 주파수 대역의 제한을 크게 받지 않는다는 점에서 많은 관심의 대상이 된다.

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.

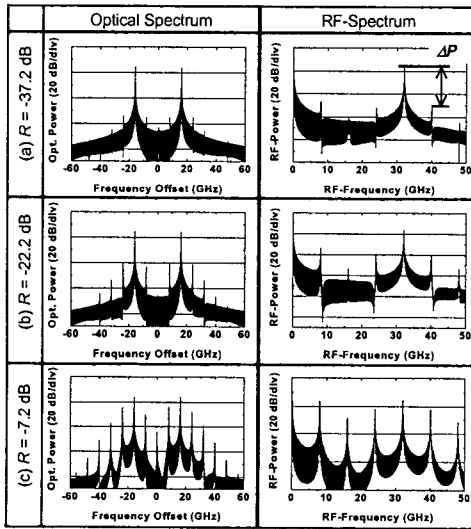


그림 4. 광/RF 스펙트럼 출력파형
Fig.4 Waveform of optical/RF spectrum

원치 않는 RF 전력을 충분히 억제시킬 수는 있으나, locking 영역을 도리어 줄이게 된다.

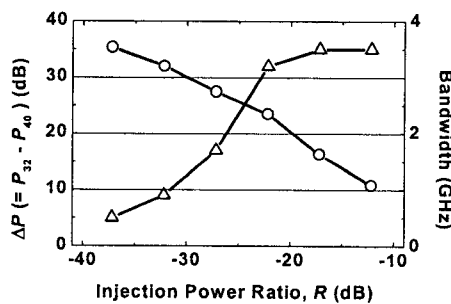


그림 5. ΔP (circle)와 stable-locking 폭 (triangle)의 R 의존도
Fig.5 Dependence of ΔP and stable-locking width

참고 문헌

- [1] M. Gagnaire, "An overview of broad-band access technologies," *Proc. of IEEE*, vol. 85, no. 12, pp. 1958-1972, 1997.
- [2] U. Gliese, S. Nørskov, and N. Nielsen, "Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1716-1724, 1996.
- [3] G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed, "Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 8, pp. 1410-1415, 1997.
- [4] G. H. Smith, D. Novak, C. Lim, and K. Wu, "Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems," *Electron. Lett.*, vol. 33,

- no. 1, pp. 74-75, 1997.
- [5] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, and T. Kimura, "Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. QE-18, no. 4, pp. 582-595, 1982.
- [6] E. Peral and A. Yariv, "Large-signal theory of the effect of dispersive propagation on the intensity modulation response of semiconductor lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 1, pp. 84-89, 2000.
- [7] R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. QE-18, no-6, pp. 976-983, 1982.
- [8] 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.
- [9] J. Troger, P.-A. Nicati, L. Thevenaz, and Ph. A. Robert, "Novel measurement scheme for injection-locking experiments," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 35, no. 1, pp. 32-38, 1999.

저자 소개



김정태(Jung-Tae Kim)

1989년 2월: 영남대학교 전자공학과 졸업

1991년 8월: 연세대학교 대학원 전자공학과 석사

2001년 8월: 연세대학교 대학원 전자공학과 박사

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

2002년 10월~현재: 목원대학교 IT공학부 전임강사

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