

광 반송파가 억압된 양측 대역 방식의 광 혼합을 통하여 발생된 밀리미터파 대역 연속파에서 광 반송파 억압 레벨에 따른 위상 잡음 특성 분석

Phase Noise Characterization with Optical Carrier Suppression Level on Continuous Wave in the Ranges of Millimeter Waves Generated by Photomixing of Optical Double Sideband-Suppressed Carrier(DSB-SC)

김 성 일 · 강 광 용

Sungil Kim · Kwang-Yong Kang

요 약

주파수 안정성이 우수한 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 연속파(Continuous Wave: CW) 신호를 발생시키기 위하여 상관관계가 큰 서로 다른 두 파장의 광 신호를 비팅(beat) 시켜 광 혼합(photomixing) 방법에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 광 반송파가 억압된 양측 대역(Double Sideband-Suppressed Carrier: DSB-SC) 방식은 단일 파장 광 신호를 극부 발진기와 광 변조기를 이용하여 CW 변조함으로써 상관관계가 큰 서로 다른 두 파장의 광 신호를 생성하는 방법이다. 본 논문에서는 DSB-SC를 이용한 광 혼합 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호 발생 방법에서 광 반송파 억압 레벨에 따른 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호의 파워 및 위상 잡음 특성을 수치적으로 분석하고 실험적으로 증명하였다. 측정 결과, 광 반송파의 억압 레벨에 따라서 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호의 파워와 위상 잡음이 각각 23.9 dB와 21 dBc/Hz(@ 1 MHz offset frequency) 개선됨을 확인하였다. DSB-SC 방법을 다른 기존 문헌에서는 직관적으로 광 반송파 억제 레벨을 중요성을 언급하였으나, 본 논문에서는 수식 및 측정 데이터에 기반한 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호의 특성 향상을 위한 광 반송파 억제 레벨의 중요성을 확인하였다. 따라서 본 논문의 결과는 광 혼합 방법을 이용한 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호 발생 연구를 위한 기본적인 데이터로서 활용 가치가 높다.

Abstract

Photomixing techniques beating two optical signals with different wavelengths and strong correlations are also very useful techniques to make a continuous wave(CW) signals in the range of millimeter(mm) and terahertz(THz) frequencies. An optical double sideband-suppressed carrier(DSB-SC) technique is one of the popular techniques to generate two optical signals with different wavelengths and strong correlations. DSB-SC signals with strong correlations are generated by a CW modulation of an optical carrier with a local oscillator and an optical modulator. In the previous papers related the DSB-SC for producing the CW signals within the range of mm and THz frequencies, there have been no reports why the optical carrier should suppress. In order to clear that, we have analyzed and measured the

「본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 정보통신 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(2009-F-037-01, 테라헤르츠파 대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼기술연구).」

한국전자통신연구원 융합부품·소재연구부문 신소재/소재연구부 테라전자연구팀(Tera Devices Research Team, New Devices & Materials Research Department, Convergence Components & Materials Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20090730-09S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 3일

characteristics of the mm-wave CW signals made by the DSB-SC photomixing in this paper. From our analysis and measurement results, compared with the case of the DSB with the maximized optical carrier, the power and phase noise have improved about 23.9 dB and 21 dBc/Hz(@ 1 MHz offset frequency) in the case of the DSB with the minimized optical carrier (that is to say, the DSB-SC). Consequently, it is evident reason that the optical carrier should sufficiently suppress to obtain the mm-wave CW signals with the high power and low noise. This paper has given very helpful data to make mm- and THz-wave CW signals using photomixing techniques with the DSB-SC because the reason why the optical carrier should be suppressed is reported in this paper based on the numerical and experimental results.

Key words : DSB-SC, mm-wave, THz-wave, CW, Photomixing

I. 서 론

정보 통신 기술 및 방송 기술의 발달로 인하여 HD(High Definition)급 고화질 멀티미디어 데이터의 무선 전송에 대한 요구가 증가하고 있다. 고화질 영상 및 방송 기술은 Full HD급 영상에서 3차원 영상 기술로 진화하고 있다. 또한, Full HD급 고화질 영상을 이용한 스포츠 중계, 원격 진료 등을 현장과 시간 지연 없이 실시간으로 전송하기 위해서는 무압축 전송이 필수적이다. 10^{-12} 전송 오율(BER: Bit Error Rate)를 유지하며, $1,920 \times 1,080$ 의 해상도와 60 Hz의 프레임 율(frame rate)을 갖는 한 채널의 Full HD급 영상을 시간 지연 없이 무압축으로 전송하기 위해서는 약 3 Gbps의 데이터 전송 속도와 약 2 GHz의 전송 대역폭이 필요하다^{[1],[2]}. 3차원 TV용 3차원 영상을 무압축 전송하기 위해서는 HD급 데이터 전송 속도의 약 1.5배의 데이터 전송 속도가 요구된다^[3].

상기와 같은 고속 무선 통신 환경 구현을 위하여 60 GHz 대역(57~64 GHz) 무선 통신 시스템에 관한 연구 개발 및 표준화가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 60 GHz 대역을 이용한 무선 통신은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식에 기반한 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)이나 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 등의 변조를 통하여 최대 3 Gbps의 전송 속도를 갖는다^[4]. 따라서 60 GHz 대역 무선 통신 시스템을 활용하면 전송 대역폭의 한계로 인하여 한 채널만의 Full HD급 영상 신호를 무압축 전송할 수 있다.

무선 전송 속도(data rate)와 전송 채널 수를 증가시키기 위해서 무선 통신 주파수 대역은 60 GHz 대역 이상의 밀리미터파 대역으로 확장되고 있다^[5]. 또

한, 기존 60 GHz 대역의 고속 무선 통신 방식이 근거리 개인용 통신(Wireless Personal Area Network: WPAN)에 한정되었던 반면에 70, 80, 100 GHz 대역을 활용하는 초고속 무선 통신 방식은 60 GHz 대역에 비하여 공기 중 감쇠 특성이 낮으므로 수 km의 장거리 신호 전송이 가능하다는 장점이 있다^[6].

상기한 바와 같이 초고속 무선 통신 시스템의 구현 및 실현을 위하여 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역에 대한 관심이 증가하고 있다^[6]. 밀리미터파 및 테라헤르츠파를 이용한 초고속 무선 통신 시스템의 동작 신뢰성 확보와 상용화 가능성을 높이기 위하여 낮은 위상 잡음과 주파수 및 파워 안정성이 뛰어난 밀리미터파(mm-wave) 및 테라헤르츠파(THz wave) 대역의 연속파(Continuous Wave: CW) 발생 장치의 개발 필요성이 증가하고 있다. 밀리미터파 신호원으로 가장 많이 사용되고 있는 건 다이오드(Gunn Diode)는 30~100 GHz 대역에서 동작이 가능하며^[7], 일반적으로 발생시키고자 하는 밀리미터파 대역 신호의 크기보다 20~50배의 DC 전력이 필요하므로 밀리미터파 발생 효율이 매우 낮다는 단점이 있다^[8].

따라서, 주파수 안정성과 밀리미터파 발생 효율을 높이고, 100 GHz 대역 이상의 주파수를 갖는 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 CW 신호 발생 방법으로서 광전 변환(opto-electric conversion)을 활용한 광 혼합(photomixing) 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^{[9]~[13]}. 특히, 광 반송파가 억제된 양측 대역(Double Sideband- Suppressed Carrier: DSB-SC)을 이용한 밀리미터파 대역 CW 신호 발생 방식은 그 방법이 다른 방식들에 비해서 간단하므로 구성 비용을 절감할 수 있으며, 안정적인 주파수 특성을 갖는

CW 신호원을 제작할 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다^{[13]~[15]}.

본 논문에서는 DSB-SC를 이용한 밀리미터파 대역 CW 신호 발생 방식에서 광 반송파 억제 레벨에 따른 밀리미터파 대역 CW 신호원의 특성을 분석하여 기존 문헌^{[13]~[15]}에서 직관적으로 다루었던 광 반송파 억제 레벨과 생성되는 밀리미터파 대역 CW 신호원 특성과의 관계를 실험적으로 증명하였다. 실험 및 측정 결과, 광 반송파가 충분히 억제되었을 경우의 발생된 밀리미터파의 파워는 광 반송파가 억제되지 않았을 경우에 비하여 23.9 dB 개선되며, 위상 잡음은 1 MHz 오프셋 주파수(offset frequency)에서 21 dBc/Hz 감소함을 확인하였다.

따라서, 본 논문의 결과는 서로 다른 두 파장의 광 신호를 광 혼합 방법을 이용하여 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역의 CW 신호를 발생시키고자 하는 연구에 기본적인 데이터로서 활용 가치가 높다.

II. 이론적 배경

낮은 위상 잡음과 온도 및 전파 환경 등의 동작 환경에 민감하지 않은 밀리미터파 대역 이상의 주파수를 갖는 CW 신호 발생을 위하여 광 신호를 이용하는 광 혼합 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[9]~[15]}. 광 혼합 기법은 서로 다른 두 개의 광 신호를 광 혼합기(photomixer)에 입력하여 비팅(beat)시켜 광 혼합함으로써 낮은 위상 잡음과 좁은 반치폭(Full Wave Half Maximum: FWHM)을 갖는 초고주파 대역, 밀리미터파 대역 및 테라헤르츠 대역의 CW 신호를 발생시키는 기법이다.

한편, 광 혼합 기법을 이용한 밀리미터파 대역 연속파 발생 장치는 주파수 편이(frequency drift)를 최소화하고, 좁은 반치폭을 갖는 주파수 안정성이 우수한 연속파 신호를 발생시키기 위하여 강한 상관관계(correlation)를 유지하며, 파장이 서로 다른 두 개의 광 신호를 발생시켜 비팅시킨다. 이러한 상관관계가 강한 서로 다른 두 파장을 광학적으로 생성시키기 위하여 모드 로킹 레이저(mode locking laser) 기법, 듀얼 모드 레이저(dual mode laser) 기법 혹은 인젝션 로킹(injection locking) 기법 및 DSB-SC 발생 기법, 주파수 콤(frequency comb) 기법 등이 연구되고

있다^{[9]~[15]}.

모드 로킹 레이저 기법과 듀얼 모드 레이저 기법의 경우, 광 소자 제작이 어렵고, 소자의 개발비 및 가격 면에서 경쟁력이 부족하여 상용화를 위한 실효성이 문제가 되며, 인젝션 로킹 방법은 원하는 신호의 주파수를 얻기 위하여 로킹 과정을 거쳐야 하고 록이저 기법의 동작 조건이 까다롭을 모단 레이저 기법의 실효성에 제약이 있다. 주파수 콤 기법은 광원(Laser Diode: LD)과 광 강도 변조기(optical intensity modulator), 광 위상 변조기(optical phase modulator), AWG(Arrayed Waveguide Grating) 및 광 혼합기로 구성되어 발생하는 신호의 주파수는 광 위상 변조기와 AWG의 성능약이어서 가변적이며, 고가의 광 변조기 두 개와 AWG가 필요하다는 단점이 있다.

DSB-SC 방법은 광학적 헤테로다인(Heterodyne) 방식의 일종으로서 그 구성이 단순하며, 원하는 주파수의 신호를 얻기가 상기한 다른 기법들에 비하여 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다^{[13]~[15]}.

DSB-SC 기법을 이용한 테라헤르츠 연속파 발생 장치는 하나의 광원, 광 강도 변조기, 초고주파 대역용 국부 발진기(Local Oscillator: LO), 광 혼합기, 그리고 광 필터(optical filter)를 비롯한 광 수동 부품 등으로 구성된다. 하나의 광원은 DSB-SC 기법의 테라헤르츠파 발생 장치에서 상관 관계가 강한 두 개의 서로 다른 파장을 갖는 광 신호를 생성하기 위한 광 반송파(optical carrier) 발생원이며, 이러한 광 반송파는 초고주파 국부 발진기에서 출력되어 광 강도 변조기로 입력되는 LO 신호에 의해서 양측 대역(Double Sideband: DSB) 신호로 변조된다. DSB 신호에 포함되어 있는 광 반송파 신호는 광 강도 변조기에 인가되는 DC 바이어스를 적절히 조절함으로써 억제되어 DSB-SC 신호를 형성한다. DSB-SC 변조된 광 신호가 광 혼합기로 입력된 후, 광 혼합 과정을 통하여 밀리미터파 및 테라헤르츠파 대역 연속파 신호가 발생된다.

밀리미터파 대역 신호 발생을 위한 서로 다른 두 파장을 갖는 두 개의 광 신호의 광 혼합 과정은 Square-Root 이론에 의하여 식 (1)에서 식 (3)과 같이 표현된다^[16]. 식 (1)과 (2)는 z 방향으로 진행하는 서로 다른 광 신호의 전기장을 각각 \vec{E}_1 , \vec{E}_2 라 하고,

광 반송파가 억압된 양측 대역 방식의 광 혼합을 통하여 발생된 밀리미터파 대역 연속파에서 광 반송파 억압 레벨...

계산의 편리성을 위하여 각 광 신호의 실수부만을 벡터 성분으로 나타낸 것이다. 각각의 광 신호는 z 방향으로 진행하며, 계산의 편의성을 위하여 $z=0$ 일 경우를 가정하였다. 식에서 ω_1 과 ω_2 는 각각 서로 다른 두 파장을 갖는 광 신호의 주파수를 나타낸다. 또한, $E_{1,x}$, $E_{1,y}$, $E_{2,x}$ 와 $E_{2,y}$ 는 각각 \vec{E}_1 의 x 방향, y 방향 성분과 \vec{E}_2 의 x 방향, y 방향 성분 광 신호의 크기를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(0,t) &= \text{Re}\{[\hat{x}E_{1,x}e^{-jkz} + \hat{y}E_{1,y}e^{-jkz}]e^{j\omega_1 t}\} \\ &= \hat{x}E_{1,x}\cos\omega_1 t + \hat{y}E_{1,y}\cos\omega_1 t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_2(0,t) &= \text{Re}\{[\hat{x}E_{2,x}e^{-jkz} + \hat{y}E_{2,y}e^{-jkz}]e^{j\omega_2 t}\} \\ &= \hat{x}E_{2,x}\cos\omega_2 t + \hat{y}E_{2,y}\cos\omega_2 t \end{aligned} \quad (2)$$

Square-Root 이론에 의한 광 혼합 성분은 식 (3)과 같이 표현된다. 식에서 첫 번째와 두 번째 항은 DC 성분을 나타내며, 세 번째에서 다섯 번째 항은 광 혼합을 위하여 사용되는 광 혼합기의 동작 주파수 대역폭을 넘어서는 성분이고, 여섯 번째 항은 광 혼합되어 생성되는 밀리미터파 대역의 신호를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \vec{E}(0,t) &= \frac{|E_1|^2}{2} + \frac{|E_2|^2}{2} \\ &+ \frac{|E_1|^2}{2}\cos(2\omega_1)t + \frac{|E_2|^2}{2}\cos(2\omega_2)t \\ &+ (E_{1,x}E_{2,x} + E_{1,y}E_{2,y})\cos(\omega_{OR})t \\ &+ (E_{1,x}E_{2,y} + E_{1,y}E_{2,x})\cos(\omega_m)t \end{aligned} \quad (3)$$

(단, $\omega_{OR} = \omega_1 + \omega_2$, $\omega_m = \omega_1 - \omega_2$)

DSB-SC 방식으로 생성된 상관관계가 높은 광 신호의 광 혼합의 수식적 표현을 식 (4)에서부터 식 (7)까지 나타내었다. 식 (4)~(6)은 각각 z 방향으로 진행하며 DSB 신호를 생성하기 위한 광 반송파, 광 반송파의 왼쪽과 오른쪽에 생성된 측대역(sideband) 신호의 실수부만을 $z=0$ 일 경우를 가정하여 벡터 성분으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_C(0,t) &= \text{Re}\{[\hat{x}E_{C,x}e^{-jkz} + \hat{y}E_{C,y}e^{-jkz}]e^{j\omega_c t}\} \\ &= \hat{x}E_{C,x}\cos(\omega_c)t + \hat{y}E_{C,y}\cos(\omega_c)t \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{SL}(0,t) &= \text{Re}\{[\hat{x}E_{SL,x}e^{-jkz} + \hat{y}E_{SL,y}e^{-jkz}]e^{j\omega_{SL} t}\} \\ &= \hat{x}E_{SL,x}\cos(\omega_{SL})t + \hat{y}E_{SL,y}\cos(\omega_{SL})t \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{SR}(0,t) &= \text{Re}\{[\hat{x}E_{SR,x}e^{-jkz} + \hat{y}E_{SR,y}e^{-jkz}]e^{j\omega_{SR} t}\} \\ &= \hat{x}E_{SR,x}\cos(\omega_{SR})t + \hat{y}E_{SR,y}\cos(\omega_{SR})t \end{aligned} \quad (6)$$

광 반송파로부터 생성된 DSB 신호의 크기는 거의 동일하므로 $E_{SL,x}$, $E_{SL,y}$, $E_{SR,x}$ 와 $E_{SR,y}$ 는 각각 $E_{S,x}$ 와 $E_{S,y}$ 로 표현할 수 있다. DSB-SC 방식으로 생성되는 DSB 광 신호와 광 반송파는 상관 관계가 매우 높으므로 DSB 광 신호와 광 반송파 신호가 갖는 파워의 합은 에너지 보존 법칙에 의하여 일정하게 유지된다. 또한, 광 반송파가 없이 상관관계가 강한 서로 다른 두 파장의 광 신호의 광 혼합의 경우와 비교를 위하여 DSB의 주파수 성분인 ω_{SL} 과 ω_{SR} 이 상기한 식 (1)부터 (3)에 나타낸 ω_1 과 ω_2 와 동일하다고 가정하면, Square-Root 이론에 의한 DSB-SC 신호의 광 혼합 신호는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}(0,t) &= \frac{|E_{SL}|^2}{2} + \frac{|E_C|^2}{2} + \frac{|E_{SR}|^2}{2} \\ &+ \frac{|E_{SL}|^2}{2}\cos(2\omega_{SL})t + \frac{|E_C|^2}{2}\cos(2\omega_C)t \\ &+ \frac{|E_{SR}|^2}{2}\cos(2\omega_{SR})t \\ &+ (E_{S,x}^2 + E_{S,y}^2)\cos(\omega_{OR})t \\ &+ 2(E_{S,x}E_{C,x} + E_{S,y}E_{C,y})\cos(\omega'_{OR})t \\ &+ 2(E_{S,x}E_{C,y} + E_{S,y}E_{C,x})\cos(\omega_N)t \\ &+ (E_{S,x}^2 + E_{S,y}^2)\cos(\omega_m)t \end{aligned} \quad (7)$$

(단, $\omega_{OR} = \omega_{SL} + \omega_{SR}$, $\omega'_{OR} = \omega_{SL} + \omega_C = \omega_{SR} + \omega_C$,
 $\omega_N = \omega_{SL} - \omega_C = \omega_{SR} - \omega_C$, $\omega_m = \omega_{SL} - \omega_{SR}$)

식 (7)에서 첫 번째 항부터 세 번째 항까지는 DC 성분을 나타내며, 네 번째부터 여덟 번째까지의 항은 광 혼합을 위하여 사용되는 광전 변환기의 동작 주파수 범위를 넘어서는 성분을 나타낸다. 또한, 아홉 번째 항은 DSB 광 신호와 광 반송파 신호의 광 혼합으로 발생하는 성분이며, 마지막 열 번째 항은 DSB 광 신호가 광 혼합되어 생성되는 밀리미터파 대역의 신호이다.

식 (3)과 비교하여 식 (7)에서 관찰되는 아홉 번째 항은 DSB-SC 광 신호의 광 혼합 과정에서 발생하는 고려하지 않은 신호 성분이다. 아홉 번째 항은 광 혼

함을 위하여 사용되는 광 혼합기의 동작 주파수 내에 존재하며, 이의 고조파 성분은 광 혼합을 통하여 발생시키고자 했던 밀리미터파 대역 CW 신호에 잡음 성분으로서 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

일반적으로 신호 발생기의 위상 잡음은 신호 발생기 출력 신호의 크기 및 신호 발생기의 Q 값(quality factor)와 반비례하므로^[17] 식 (7)에서 확인할 수 있듯이 광 반송파의 억제 레벨이 증가할수록 DSB 광 신호의 크기가 증가하여 광 혼합되어 발생하는 밀리미터파 대역 연속파의 위상 잡음 특성이 개선될 수 있음을 예상할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 광 반송파로 인하여 발생된 잡음 성분으로 인한 DSB-SC 광 신호의 광 혼합으로 발생한 밀리미터파 대역 CW 신호의 특성 변화를 확인하기 위하여 광 반송파의 억제 레벨에 따른 밀리미터파 신호의 파워와 위상 잡음 특성을 분석하였다.

III. 실험 결과

그림 1은 DSB-SC 광 신호 발생 및 광 혼합 실험을 위한 개요도를 나타낸다. 그림에서 LD, MZM, LO, EDFA, 3-dB Coupler, Photomixer, Electrical SA, 그리고 OSA는 각각 광 반송파를 발생시키는 레이저 다이오드, DSB 광 신호 발생을 위한 마하젠더 광 변조기(Mach-Zender Optical Modulator), 광 반송파를 DSB-SC 변조하기 위한 국부 발진기, 광 변조기의 삽입 손실과 변조 손실을 보상하기 위한 에르븀이 증착된 광 섬유 광 증폭기(Er-Doped optical Fiber Amplifier: EDFA), 발생한 DSB-SC 신호를 모니터링 하기 위하여 설치한 3-dB 광 결합기, 서

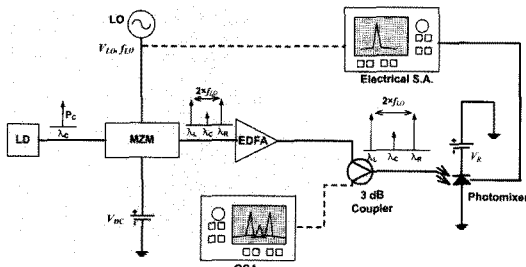


그림 1. DSB-SC 광 신호 발생 및 광 혼합 실험 개요도
Fig. 1. An experimental schematic to make optical DSB-SC signals and photomix them.

로 다른 파장을 갖는 두 개의 광 신호를 비팅(beat)시켜 밀리미터파 대역 CW 신호를 발생시키는 광 혼합기, LO 신호 모니터링과 광 혼합기 출력 신호를 측정하기 위한 전자 주파수 분석기(Electrical Spectrum Analyzer: ESA), 그리고 광 신호 분석을 위한 광 주파수 분석기(Optical Spectrum Analyzer: OSA)를 나타낸다. 또한, V_{LO} , f_{LO} , V_{DC} , 그리고 V_R 은 각각 국부 발진기 출력의 전압과 주파수, 광 변조기와 광 혼합기의 바이어스 전압을 나타낸다.

DSB-SC 광 신호 발생을 위하여 LD에서 출력되는 광 반송파는 광 변조기로 입력되어 국부 발진기에서 출력되는 CW 신호에 의하여 DSB 변조된다. DSB 광 신호에 존재하는 광 반송파 성분은 광 변조기에 인가되는 바이어스 전압을 적절히 조절함으로써 감소시킬 수 있다. 광 변조기의 출력은 EDFA에 인가되어 광 변조기의 삽입 손실과 DSB-SC 변조로 인하여 감소된 파워를 적절한 레벨로 증폭된다. 발생한 DSB-SC 광 신호는 3-dB 광 결합기에 입력되어 두 개의 출력단으로 나누어지며, 그 중 하나의 출력단은 광 혼합기에 연결되어 밀리미터파 대역 CW 신호를 출력한다. 3-dB 광 결합기의 나머지 한 출력단은 OSA에 연결되어 광 혼합기에 인가되는 DSB-SC 신호의 특성을 모니터링하기 위하여 사용된다.

그림 2는 광 변조기에서 DSB-SC 변조되고, 광 증폭기를 통하여 증폭된 DSB 광 신호와 광 반송파를 광 반송파의 억제 레벨에 따라서 OSA로 측정한 결과이다. 그림에서 'DSB with Maximized Carrier',

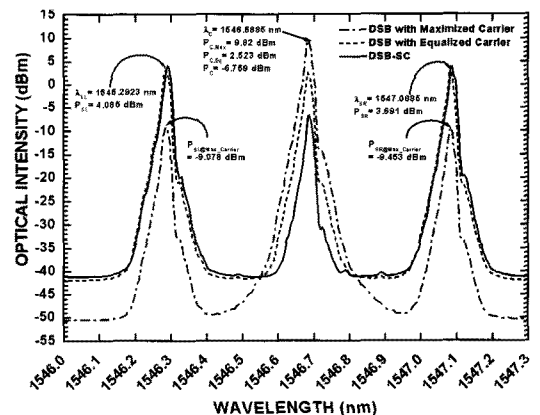


그림 2. 광 반송파 억제 레벨에 따른 DSB 광 신호
Fig. 2. The DSB optical signals with optical carrier suppression levels.

'DSB with Equalized Carrier', 그리고 'DSB-SC'는 각각 최대 크기의 광 반송파를 포함하는 DSB 광 신호, DSB 광 신호와 동일한 크기를 갖는 광 반송파를 포함하는 DSB 광 신호, 그리고 최대로 억제된 광 반송파를 갖는 DSB 광 신호를 나타낸다. 광 반송파의 크기는 광 변조기에 인가되는 DC 바이어스 전압을 이용하여 제어하였다. 또한, λ_c , P_c , $P_{C,Eq}$, $P_{C,Max}$, λ_{SL} , P_{SL} , λ_{SR} , P_{SR} , $P_{SL@Max_Carrier}$, 그리고 $P_{SR@Max_Carrier}$ 는 각각 1,546.6885 nm의 파장을 갖는 광 반송파, 광 변조기의 DC 바이어스에 의하여 최대로 억제되어 -6.759 dBm의 파워를 갖는 광 반송파의 크기, DSB 신호의 크기와 동일한 레벨로 제어되어 2.523 dBm의 파워를 갖는 광 반송파의 크기, 광 변조기의 DC 바이어스 제어를 통하여 9.82 dBm의 최대 파워를 갖는 광 반송파의 크기, DSB 신호 중 광 반송파의 왼쪽에 생성된 1,546.2923 nm의 파장을 갖는 좌측 대역(left sideband) 신호, 광 반송파가 최대 억제 레벨을 기질 경우와 DSB 신호와 동일한 레벨을 경우의 4.085 dBm의 파워를 갖는 좌측 대역 신호 크기, DSB 신호 중 광 반송파의 오른쪽에 생성된 1,547.0885 nm의 파장을 갖는 우측 대역(right sideband) 신호, 광 반송파가 최대 억제 레벨을 가질 경우와 DSB 신호와 동일한 레벨을 가질 경우의 3.691 dBm의 파워를 갖는 우측 대역 신호 크기, 광 반송파의 크기가 최대일 경우에 -9.078 dBm의 파워를 갖는 좌측 대역 신호 크기, 그리고 광 반송파의 크기가 최대일 경우에 -9.453 dBm의 파워를 갖는 우측 대역 신호 크기를 나타낸다.

그림 2에서 DSB 광 신호는 광 반송파를 CW 변조하여 생성됨으로써 좌우 측대역 광 신호와 광 반송파 간에 매우 큰 상관관계를 가지므로 광 반송파가 최대값을 갖게 되면 DSB 광 신호가 감소되는 것을 관찰할 수 있다. DSB 광 신호의 크기를 극대화하여 광 혼합되어 생성되는 밀리미터파 대역 CW 신호의 크기를 극대화하기 위해서는 광 반송파를 최대한 억제하여야 한다. 본 논문에서는 측정 환경을 고려하여 100 GHz의 주파수를 갖는 밀리미터파 대역 CW 신호 발생을 위하여 50 GHz 국부 발진기를 사용하였다. 식 (7)에서 예상할 수 있듯이 DSB 신호의 좌측 대역 신호와 우측 대역 신호는 광 반송파를 기준으로 국부 발진기의 주파수만큼의 차이를 가지며 광

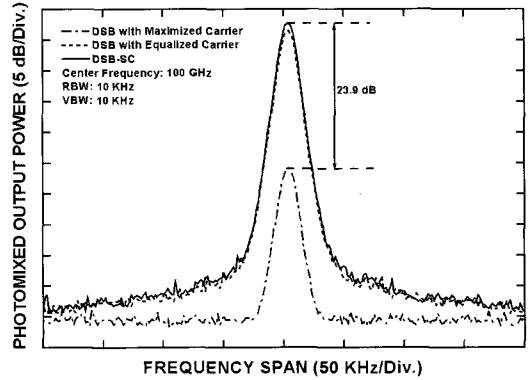


그림 3. 광 반송파 억압 레벨에 따른 광 혼합된 밀리미터파 대역 CW 신호의 출력 파워

Fig. 3. The photomixed mm-wave CW signal output power with the optical carrier suppression levels.

반송파의 좌우에 생성된다. 따라서, 좌우 측대역 광 신호는 광 반송파로부터 각각 4 nm (~50 GHz)의 파장 간격을 가지며, 좌우 측대역 신호간의 파장 간격은 약 8 nm 임을 확인하였다. 높은 상관 관계를 가지며 서로 다른 파장을 갖는 DSB 광 신호는 광 혼합 과정을 통하여 최소화된 주파수 편이와 좁은 FWHM을 갖는 안정된 주파수 특성의 100 GHz 대역의 CW 신호 발생이 가능함을 예상할 수 있다.

그림 3은 광 반송파 억압 레벨에 따른 광 혼합된 밀리미터파 대역 CW 신호의 파워 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 'DSB with Maximized Carrier', 'DSB with Equalized Carrier', 그리고 'DSB-SC'는 각각 광 반송파의 크기가 최대일 경우, 광 반송파의 크기가 DSB 광 신호와 동일한 레벨로 제어된 경우, 그리고 광 반송파가 광 변조기의 DC 바이어스 조절을 통하여 최대로 억제된 경우의 밀리미터파 대역 CW 신호를 주파수 분석기의 RBW(Resolution Bandwidth)와 VBW(Video Bandwidth)를 10 kHz로 설정하여 측정할 결과를 나타낸다. 측정 결과, DSB-SC 광 신호의 광 혼합을 통하여 11 kHz의 좁은 FWHM과 주파수 편이를 무시할 수 있는 안정된 주파수 특성의 100 GHz 대역 CW 신호가 발생됨을 확인하였다. 또한, 광 반송파가 최대로 억제되어 광 반송파의 크기가 최소일 경우, 광 반송파의 크기가 최대일 경우와 비교하여 발생된 밀리미터파 신호의 크기가 23.9 dB 개선됨을 관찰하였다. 이는 그림 2에서 확인하였듯이 광

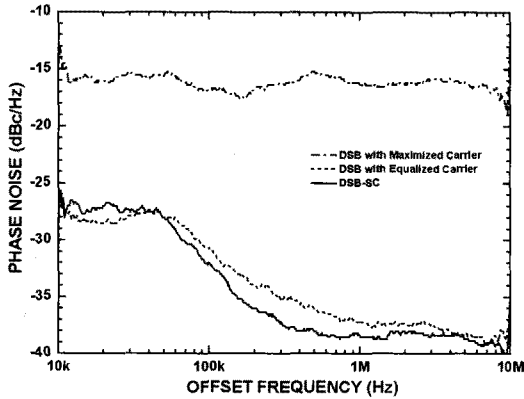


그림 4. 광 반송파 억압 레벨에 따른 광 혼합된 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성

Fig. 4. The phase noise characteristics of the photo-mixed mm-wave CW signal output power with the optical carrier suppression levels.

반송파와 DSB 신호의 높은 상관관계로 인하여 광 반송파의 크기와 DSB 광 신호의 크기가 반비례하기 때문에 광 반송파의 크기가 최대로 억제되어 그 크기가 최소일 경우, 광 혼합되어 밀리미터파 대역 신호 발생에 직접 기여하는 DSB 광 신호의 크기가 광 반송파의 크기가 최대일 경우에 비하여 증가했기 때문이다.

그림 4는 광 반송파 억압 레벨에 따른 광 혼합된 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성을 나타낸다. 그림에서 'DSB with Maximized Carrier', 'DSB with Equalized Carrier', 그리고 'DSB-SC'는 각각 광 반송파의 크기가 최대일 경우, 광 반송파의 크기가 DSB 광 신호와 동일한 레벨로 제어되었을 경우, 그리고 광 반송파가 광 변조기의 DC 바이어스 조절을 통하여 최대로 억제되어 광 반송파의 크기가 최소일 경우의 밀리미터파 대역 CW 신호의 위상 잡음 특성이다. 측정 결과, 광 반송파가 최대로 억제되어 광 반송파의 크기가 최소인 DSB-SC 광 신호가 생성되었을 경우, 광 반송파의 크기가 DSB 신호의 크기와 동일한 경우, 그리고 광 반송파의 크기가 최대일 경우의 1 MHz 오프셋 주파수(offset frequency)에서 위상 잡음 특성은 각각 -38 dBc/Hz, -37 dBc/Hz, 그리고 -16.5 dBc/Hz로 측정되었다. 따라서, 광 반송파가 최대로 억제되어 광 반송파의 크기가 최소일 경우, 광 혼합되어 발생된 밀리미터파 대역 CW 신호의 특성에 영향을 미치는 식 (7)의 아홉 번째 항인

광 반송파로 인한 잡음 성분이 감소하여 광 반송파의 크기가 최대일 경우와 비교하여 10 kHz와 1 MHz 오프셋 주파수에서 각각 10 dBc/Hz와 21 dBc/Hz의 위상 잡음 특성이 개선됨을 확인하였다.

따라서, DSB-SC 방식을 통하여 상관관계가 높은 서로 다른 파장을 갖는 두 개의 광 신호를 생성하고 이를 광 혼합하여 밀리미터파 대역 CW 신호를 발생시킬 경우, 발생되는 밀리미터파 대역 CW 신호의 크기 및 위상 잡음 특성 개선을 위하여 광 반송파는 최대로 억제되어야 함을 실험을 통하여 확인할 수 있다.

IV. 결 론

서로 다른 두 파장의 광 신호를 비팅시켜 밀리미터파 대역 CW 신호를 발생시키는 광 혼합 방식은 발생하는 신호의 주파수 안정성 확보를 위하여 광 혼합에 사용되는 서로 다른 두 파장의 광 신호가 강한 상관관계를 유지해야 한다. 단일 파장을 갖는 광 반송파를 국부 발진기와 광 변조기를 이용하여 DSB-SC 변조시켜 서로 다른 파장을 갖는 두 개의 광 신호를 발생시키는 방법은 그 구성이 단순하고 동작 신뢰성이 우수하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나, 상관관계가 높은 서로 다른 두 파장의 광 신호를 발생시키기 위해서 사용된 광 반송파의 억제 레벨이 밀리미터파 대역 CW 신호의 특성에 미치는 영향은 정확히 보고된 바가 없다.

따라서, 본 논문에서는 주파수 안정성이 뛰어난 밀리미터파 대역과 테라헤르츠 대역의 신호원 개발을 위한 DSB-SC 방식에서 광 반송파 억제 레벨에 따른 발생된 밀리미터파 대역 CW 신호의 파워와 위상 잡음 특성을 분석하였다. 수식 해석 결과, 서로 다른 두 파장만을 광 혼합하였을 경우와 비교하여 DSB-SC의 광 혼합 수식에서는 광 반송파와 DSB 광 신호와의 광 혼합으로 발생하는 잡음 성분을 확인하였다. 또한, 측정을 통하여 광 반송파가 억제되지 않았을 경우와 비교하여 광 반송파가 광 변조기에 인가되는 DC 바이어스 전압에 의하여 충분히 억제되었을 경우에 발생하는 밀리미터파 대역 CW 신호는 23.9 dB의 파워 증가와 1 MHz 오프셋 주파수에서 약 21 dBc/Hz의 위상 잡음 특성이 개선됨을 확인하였다.

DSB-SC를 이용한 밀리미터파 대역 CW 신호 발생 기법에서 광 반송파 억제 레벨에 따른 밀리미터파 대역 CW 신호원의 특성을 분석한 본 논문은 기존 문헌에서 직관적으로 다루었던 광 반송파 억제 레벨과 생성되는 밀리미터파 대역 CW 신호원 특성과의 관계를 수식과 실험을 통하여 규명함으로써 광 신호를 이용하여 밀리미터파 대역과 테라헤르츠 대역 신호를 발생시키는 연구의 기본 데이터로서 활용 가치가 높다.

참 고 문 헌

- [1] Su Khiong Yong, Chia-Chin Chong, "An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: potentials and technical challenges", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, issue 1, pp. 1-10, Jan. 2007.
- [2] IMEC, *IEEE 802.15-0387-02-003c*, Sep. 2006.
- [3] Matthew C. Forman, Amar Aggoun, and Malcolm McCormick, "Novel coding scheme for full parallax 3D-TV pictures", *Proceedings of The 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(ICASSP '97)*, vol. 4, pp. 2945-2947, Apr. 1997.
- [4] France Telecom Research and Development Division, *IEEE 802.15-07-0539-00-003c*, Jan. 2007.
- [5] Toshihiko Kosugi, Akihiko Hirata, Tadao Nagatsuma, and Yuichi Kado, "Mm-wave long-range wireless systems", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 68-76, Apr. 2009.
- [6] Akihiko Hirata, Tadao Nagatsuma, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi, Ryoichi Yamaguchi, Naofumi Shimizu, Naoya Kukutsu, Koichi Murata, Yuichi Kado, Hidehiko Ikegawa, Hiroshi Nishikawa, and Toshihiro Nakayama, "10-Gbit/s wireless communications technology using sub-terahertz waves", *Proc. of SPIE*, vol. 6772, pp. 67720B-1-11, 2007.
- [7] 정현수, 한석태, 이창훈, 밀리미터파 공학, 문운당, pp. 71-75, 1998년 8월.
- [8] Delton T. Horn, *Basic Electronics Theory*, McGraw Hill Professional, pp. 302-307, 1994.
- [9] Amarildo J. C. Vieira, Peter R. Herczfeld, "Microchip laser for microwave and millimeter-wave generation", *IEEE MTT-S IMOC'97 Proceedings*, pp. 333-337, 1997.
- [10] D. Y. Kim, M. Pelusi, Z. Ahmed, D. Novak, H.-F. Liu, and Y. Ogawa, "Ultrastable millimetre-wave signal generation using hybrid modelocking of a monolithic DBR laser", *IEE Electronics Letters*, vol. 31, no. 9, pp. 733-734, Apr. 1995.
- [11] G. Allen Vawter, Alan Mar, Vince Hietala, John Zolper, and John Hohimer, "All optical millimeter-wave electrical signal generation using an integrated mode-locked semiconductor ring laser and photodiode", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 1634-1636, Dec. 1997.
- [12] S. Fukushima, C. F. C. Silva, Y. Muramoto, and Alwyn J. Seeds, "Optoelectronic millimeter-wave synthesis using an optical frequency comb generator, optically injection locked lasers, and a uni-traveling-carrier photodiode", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 12, pp. 3043-3051, Dec. 2003.
- [13] Hiroyuki Furuta, Mikio Maeda, Toshihiro Nomoto, Jun Kobayashi, and Shegeo Kawasaki, "Optical injection locking of a 38-GHz-band InP-Based HEMT oscillator using a 1.55- μ m DSB-SC modulator lightwave", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 19-21, Jan. 2001.
- [14] J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann, and R. Hofstetter, "Optical generation of very narrow linewidth millimetre wave signals", *IEE Electronics Letters*, vol. 28, no. 25, pp. 2309-2311, Dec. 1992.
- [15] Guohua Qi, Jianping Yao, Joe Seregelyi, Stephane Paquet, and Claude Belisle, "Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 10, pp. 3090-3097, Oct. 2005.

[16] Masahiko Tani, Osamu Morikawa, Shuji Matsuura, and Masanori Hangyo, "Generation of terahertz radiation by photomicing with dual-and multi-mode lasers", *Semiconductor Science and Technology*,

vol. 20, no. 7, pp. S151-S163, Jul. 2005.

[17] Thomas H. Lee, Ali Hajimiri, "Oscillator phase noise: a tutorial", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 3, pp. 326-336, Mar. 2000.

김 성 일



1995년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 1월~1997년 10월: 현대전자 연구원

1997년 11월~2000년 4월: LG 전자 주임연구원

2000년 11월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

[주 관심분야] 초고속/고밀도 반도체 집적회로/패키지를 위한 Signal Integrity/EML/EMC 설계 및 측정, THz 통신 시스템 설계 및 구현

강 광 용



1975년: 서울대학교 섬유고분자공학과 (이학사)
1988년: 부산대학교 물리학과 (이학박사)
1989년~현재: 한국전자통신연구원 융합·부품연구부문 테라전자연구팀장

[주 관심분야] 강유전체(Ferroelectrics) 박막성장/물성 및 초고주파 소자, 고온초전도 마이크로파 수동·능동 부품 설계/제작(공진기, 필터, 믹서 등), 금속-절연체 상전이(MIT)형 소자 및 소자(초고속 트랜지스터), THz-Electronics/Photonics 소자/THz-Wave Source, THz 응용분야 (T-ray 분광/이미징/센싱/통신 기술)