

반도체 레이저의 Side-band Injection-Locking을 이용한 광학적 60 GHz 신호 생성

유해승[†] · 서영광 · 최우영

연세대학교 전기전자공학과

Ⓣ 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134번지

(2002년 11월 8일 발송, 2003년 3월 3일 수정본 발송)

Master laser(ML)의 직접 변조로 생성된 여러 개의 side-bands 중 두 개의 target bands에 두 개의 Slave laser(SL)가 각각 lock이 되도록 하는 side-band injection-locking 방법을 이용하여 광학적 60GHz의 밀리미터파 신호를 구현하였다. ML에 lock이 된 두 SL의 output들은 photo detection시 서로 beating하여 안정적이고 매우 깨끗한 60GHz 신호를 생성하였다.

주제어 : optical millimeter wave transmission system, millimeter wave signal, heterodyne technique, side-band injection-locking.

1. 서 론

이동통신 분야에서 기존 마이크로파 대역 전송용량이 포화가 되어감에 따라 보다 넓은 주파수 대역폭의 제공이 가능한 밀리미터파 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 60 GHz 대역은 대기중에서 산소분자에 의한 흡수율이(15 dB/Km)로 가장 큰 특성을 가지고 있어 이동통신 분야의 Pico-cellular network 관점에서 관심을 받는다.^[1] 큰 RF 전파손실은 셀 크기를 줄이기 때문에 license의 필요 없이 자유로운 사용이 가능하고, 주파수 재사용 효율을 높여 양질의 서비스를 동시에 수많은 가입자에게 보낼 수 있으며 또한, 감소된 RF power로 인해 electro-magnetic interference(EMI) 문제가 줄어들게 된다. 이러한 특성을 갖는 60 GHz 대역의 응용분야로는 400 m에서, 1 km 떨어진 빌딩간 point to point system과 300 m내의 거리에 있는 빌딩과 주변 가옥간 point to multipoint system의 초고속 무선 링크 시스템이 있으며, 100 m이내의 실내용 초고속 무선 LAN과 10 m 이내의 무선 홈 링크 등이 있다. 이처럼 높은 캐리어 주파수와 효과적인 주파수 공유가 필요로 됨에 따라 밀리미터파 시스템과 관련한 기술개발이 요구되고 있다. 특히, 광섬유를 이용한 광학적 밀리미터파 전송은 넓은 주파수 대역폭, 큰 전송 용량 및 저 전송 손실이 가능하다는 장점으로 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^[2-4]

광학적 밀리미터파 전송의 세가지 가능한 시스템 형태는 그림 1과 같다. 그림 1-(a)의 시스템에서는 CS(Central Station)에서 기저 대역의 신호를 만들어 광섬유를 통해 전송하고, BS(Base station)에서 광/전 변환 후 IF대역으로 올리고 다시 한번 LO(Local Oscillator)를 이용해 원하는 밀리미터파 대역으로 주파수 상향변조를 해서 안테나로 전파 시킨다. 그림 1-(b)는 CS에서 IF까지 만들어주고 BS에서 LO를 통해 밀리미터파 신호로 올려주어 전파한다. 이 두 경우 모두 BS에서 주파

수 상향변조를 위해 전기적으로 복잡한 회로를 필요로 하는 단점이 있다. 반면, 그림 1-(c)의 시스템은 CS에서 밀리미터파 신호생성까지 하고 BS에서는 단순한 광/전 변환 후 증폭한 시켜 안테나를 통해 전파한다. 이와 같은 시스템에서 밀리미터파 신호를 다루는 고가의 복잡한 설비들은 CS으로 집중됨에 따라 BS의 단순화를 가능케 함으로써, 시스템 구축 비용 절감 등과 같은 경제적인 이득의 기대가 가능하며, 중앙집중화에 의한 효율적인 BS관리제어가 유리하다.^[5] 따라서 이 밀리미터파 링크의 핵심인 밀리미터파 신호의 광학적 생성기술이 큰 의미를 가짐에 따라 크게 IM-DD(Intensity Modulation-Direct Detection)와 헤테로다인 기법의 두 가지 방법이 연구되어왔다.

IM-DD는 밀리미터파 주파수로 레이저로 직접 변조하는 방법과 외부 변조기를 이용하여 변조하는 방법이 있는데, 직접

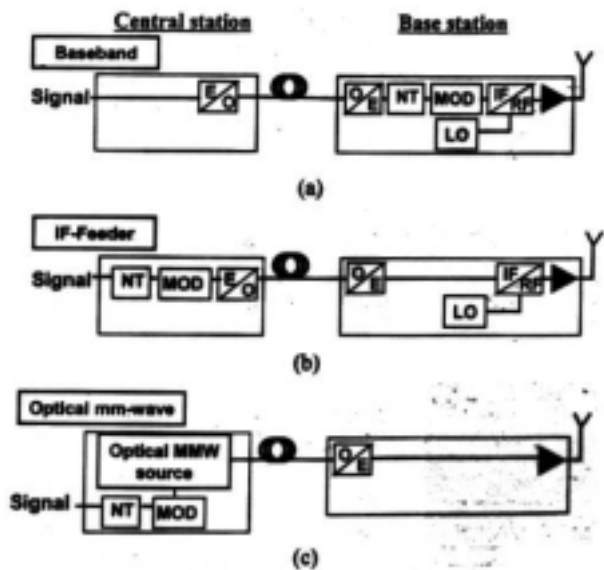


그림 1. 광섬유를 이용한 밀리미터파 링크.

[†]E-mail: hsryu@tera.yonsei.ac.kr

변조는 입력 전류의 크기의 변화에 대해 반도체의 굴절률이 변화하여 주파수가 흔들리는 현상인 chirp에 의해 성능이 감소되는 단점이 있다. 외부 변조기를 이용해 크기변조를 하면 캐리어 주파수를 중심으로 $\pm f_{mod}$ 떨어진 곳에 side-bands가 생성되고, 이 세 개의 주파수 성분이 광섬유를 통해 전송되면서 색분산에 의해 USB(upper side-band)와 LSB(lower side-band)가 서로 다른 위상을 겪게 된다. 이들이 광검출기에서 beating 되어 출력되는 밀리미터신호는 위상차에 따라 보강 또는 상쇄 간섭을 하여 전송거리에 따라 출력의 크기가 변화하게 되는 문제점을 가진다. 따라서 이와 같은 색분산에 의한 거리제한을 해결하기 위하여 밀리미터신호의 광학적 생성기술로 헤테로다인 기법이 이용된다. 본 논문은, 헤테로다인 기법 중의 하나인 side-band injection-locking을 소개하고, 이를 이용하여 국내에서는 처음으로 60 GHz 밀리미터파 신호를 광학적으로 생성한 결과를 보고한다.

II. 이 론

헤테로다인 기법은 각각 ω_1, ω_2 주파수를 갖는 두 레이저에서 나온 광신호가 광검출기에서 beating하여 원하는 target 주파수인 $\omega_1 - \omega_2$ 의 주파수를 갖는 밀리미터파 신호를 생성하는 방법이다. ω_1, ω_2 의 광주파수와 ϕ_1 와 ϕ_2 의 위상성분을 갖는 광신호는 식 (1)처럼 나타난다.^[1]

$$E_1(t) = A \cos(\omega_1 t + \phi_1), E_2(t) = B \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (1)$$

이때, 두 신호가 함께 광검출기에 들어가서 광검출기의 square-law특성으로 나오는 출력 전류인 I_{PD} 는 beat신호이며, 아래 식 (2)의 마지막 부분이 바로 밀리미터파 신호의 생성을 보여준다.^[2] P_1 과 P_2 는 광검출기로 들어오는 두 광신호의 power이고 R 은 광검출기의 Responsivity이다.

$$I_{PD} = R(E_1 + E_2)^2 = R(P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2)) \quad (2)$$

이 방법은 레이저가 수백 THz 광 주파수의 광 신호를 만들기 때문에, 생성 가능한 밀리미터파 신호 주파수는 단지 광검출기의 대역폭에 의해서만 제한된다. 하지만, 독립적으로 구동되는 두 레이저의 위상은 서로 correlation이 없어서 각각 불규칙하게 변하여 phase noise를 얻는다. 그림 2에서 보듯이 두 신호의 위상이 correlation이 있으면 깨끗한 beat신호를 얻지만, correlation없을 경우에 생성된 beat신호는 넓은 선폭을 갖게 된다. 따라서 독립적인 두 레이저의 위상을 동기 시키는 것이 헤테로다인의 구현에 필수적이고 이에 대한 방법으로는 OPLL(Optical Phase Lock Loop), Mode-Locking, 그리고

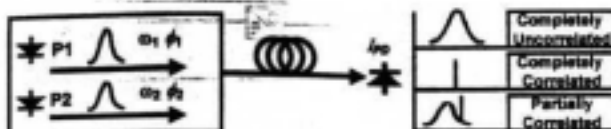


그림 2 헤테로다인 기법

Optical Injection-Locking등이 있다.

OPLL은 두 레이저에서 발진된 광신호의 위상차이에 대한 정보를 피드백하여 한 레이저에게 주어 제어함으로써 위상을 동기화 시키는 방법이다. 이 방법은 피드백을 통해 레이저가 제어될 때까지의 물리적인 시간 지연이 불가피하게 되는데, 특히 광섬유를 통한 광학적 시간지연이 생성하기 원하는 밀리미터파 주파수에 제한요소로 작용하여 렌즈를 이용한 bulk optics와 같은 복잡한 기술을 필요로 한다.^[3] 또한 안정적 OPLL의 구현을 위해서는 선폭이 좁은 레이저가 요구되는 특징이 있다.^[4] 다음으로 Mode-locking을 이용한 방법은 multimode 레이저의 여러 modes의 위상을 동기시키고, 이 Mode-lock된 modes 중 원하는 밀리미터파 주파수 차이를 갖는 두 mode를 filter를 통해 선택하는 것이다. Mode-lock 레이저를 구현하기 위해서는 기본적으로 external cavity와 saturable absorber를 이용하거나, 또는 이 역할을 하도록 특별한 구조의 레이저의 제작이 요구된다.^[5]

본 논문에서 이용한 Side-band injection-locking 방법은 특별히 렌즈나 external cavity 등을 이용하는 위의 다른 두 방법과 달리 일반 레이저를 이용한다. Optical injection-locking은 하나의 안정화된 master laser(ML)의 광 신호를 다른 free-running slave laser(SL)에 주입했을 때, 두 레이저의 발진 파장의 차이와 출력파워의 비를 특정조건에 맞추면, 두 레이저의 위상차를 일정하게 만들어 동기화 시키는 방법이다. 안정적 locking을 위해서 그림 3에서 보듯이 ML과 SL의 주파수 차이인 locking range($\Delta f = f_{ML} - f_{SL}$)와 두 레이저의 파워 비인 injection power ratio(R)를 고려해야 한다. R을 크게 할수록 locking range가 커지며, 이는 ML과 SL의 주파수가 일치하지 않아도 locking이 가능한 주파수 범위가 넓어짐을 의미한다. 이러한 injection-locking을 헤테로다인 방법에 응용하여 세 개의 레이저로 side-band injection-locking을 하면 동기화 된 위상을 갖는 두 SL의 광 신호를 얻을 수 있다. 그림 4(a)에서 ML에 RF 주파수로 직접 변조시킨 광신호가 두 SL에 들어가면 각각의 SL가 injection-locking process를 따라 ML의 위상에 동기가 된다.^[6] ML을 원하는 밀리미터파 신호의 sub-

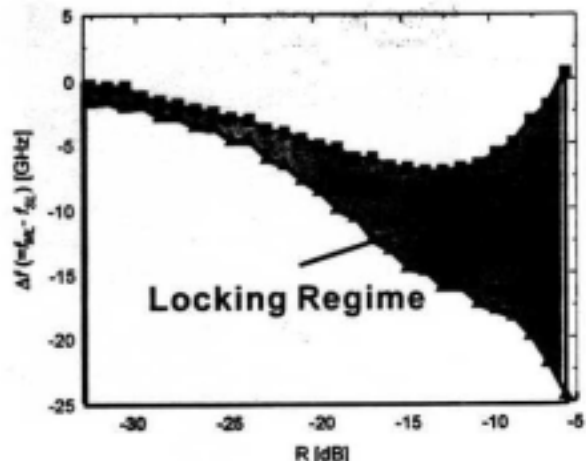


그림 3. Locking Range.

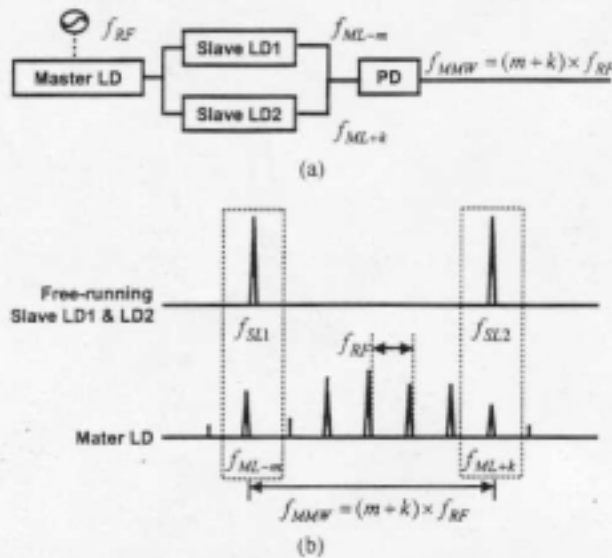


그림 4. Side-band Injection Locking을 이용한 밀리미터파 신호 생성.

harmonic 주파수로 직접 변조시키면 크기변조 뿐만 아니라, 주파수 변조를 수반하여, 그림 4(b)와 같이 ML 변조 주파수 (f_{RF}) 차이를 가지는 여러 개의 side-bands가 생성되고, 이 ML의 광 신호는 두 SL로 주입이 되어 각각 ML에 injection-locking이 된다. ML의 side-bands 중 원하는 두 개 target bands(f_{SL-m} , f_{SL+k})와 근접한 광 주파수(f_{SL1} , f_{SL2})를 갖는 두 SL이 그림 4(b)와 같이 lock이 되도록 하여, 두 SL 발전 과정 차이가 원하는 밀리미터파 신호 주파수($f_{MLW} = f_{SL+k} - f_{SL-m}$)와 동일하도록 선택이 가능하다. 원하는 밀리미터파 신호 주파수 차이에 해당하는 두 ML side-bands에 lock이 된 SL은 동일한 ML에 동기가 되므로, 마치 하나의 레이저에서 나온 두 side-bands처럼 서로 correlation을 갖게 되어, 광검출시 beating이 생겨서 결국 원하는 밀리미터파 주파수를 갖는 깨끗한 신호의 생성이 가능하게 된다.

III. 실험 및 결과

그림 5의 실험장치를 따라 세 개의 DFB(distributed feedback) 레이저로 side-band injection-locking을 이용한 광학적 밀리미터파 60 GHz 생성 실험을 하였다. 그림 6(a)는 ML를 10 GHz (f_m) rf-source로 직접 변조한 경우의 OSA(Optical Spectrum Analyzer)로 측정된 optical spectrum이다. 각 peak간 간격은 인가된 f_m (10 GHz)과 일치한다. 이들 여러 side-bands 중 center (1551.8 nm)를 중심으로 ± 3 번째 peak들을 두 SL에서 각각 선택한 경우의 파형이 그림 6(b)이다. 따라서, 그림 6(b)의 두 peak들 간의 주파수 차이는 ML 구동 주파수, f_m (10 GHz)의 6배인 60 GHz가 된다. 이 두 locking된 SL의 modes는 광검출기를 지나 rf-spectrum analyzer(RF-SA)로 frequency spectrum을 측정한다. 이때, 본 연구에서 사용한 RF-SA는 internal mixing의 경우 30 Hz에서 26.5 GHz의 영역의 측정만 가능하기 때문에 external mixing을 위해 harmonic mixer를

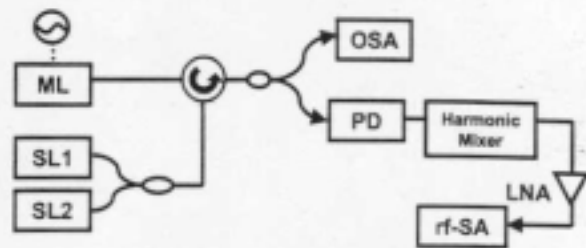


그림 5. 광학적 60GHz의 밀리미터파 신호 생성 실험 장치도

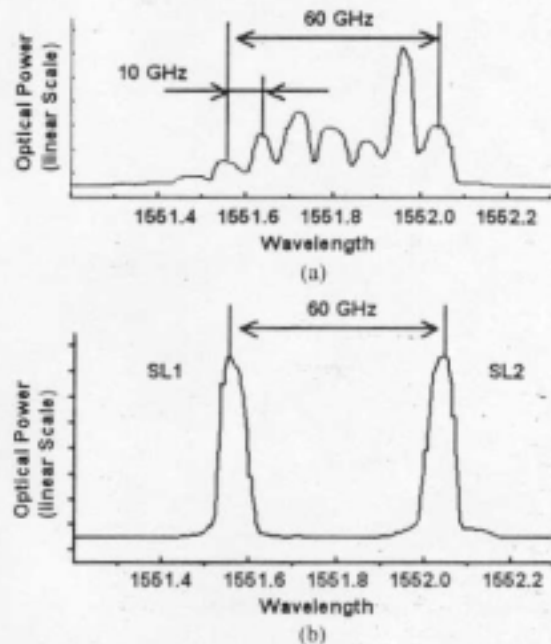


그림 6. 측정된 ML의 직접변조의 Optical Spectra (a)와 두 개의 locking 된 SL Optical Spectra (b).

사용하였다. harmonic mixer는 3 GHz에서 6.1 GHz범위를 갖는 LO주파수의 14번째 harmonic을 이용하여 50 GHz에서 75 GHz의 영역의 신호 측정을 가능하게 한다. 그러나, harmonic 성분을 이용하기 때문에 conversion loss가 47 dB로 매우 커서 이 loss를 보상에 주기위해 광검출기와 Mixer사이에 LNA (Low Noise Amplifier)를 추가하였다.

그림 7은 10 MHz span으로 측정된 60 GHz신호의 frequency spectrum이다. 측정된 60 GHz 신호의 선폭 측정은 사용된 rf-spectrum analyzer의 resolution에 제한을 받는다. Single side-band(SSB)의 phase noise를 측정할 결과는 그림 8과 같다. 광학적으로 생성된 60 GHz신호의 phase noise는 100 kHz offset에서 약 -88.71 dBc/Hz을 얻었다. 이 phase noise를 ML을 변조한 10 GHz RF source의 phase noise와 비교하였는데, 그림 8과 같이 100 KHz에서 약 17.8 dB의 차이가 나타난다. 이는 ideal multiplication law ($20 \cdot \log(m)$, m: multiplication factor)¹⁰에 의한 약 16dB의 차이에 harmonic mixer에 의한 conversion loss를 보상하기 위해 사용된 LNA에 의한 부가적 phase noise를 고려하면 측정결과가 이론에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다.

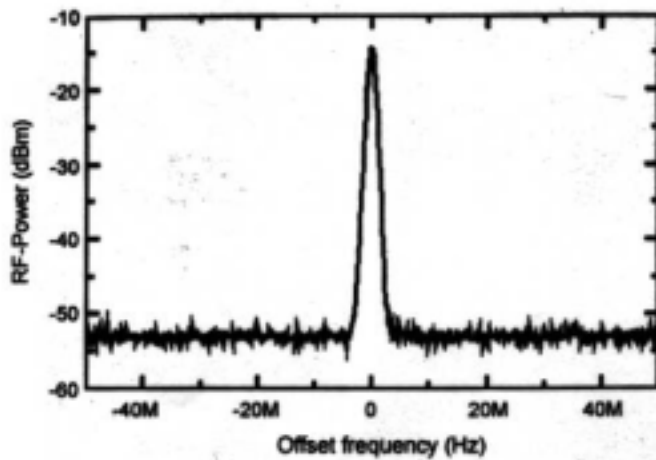


그림 7. 60 GHz 신호의 측정 rf-spectrum.

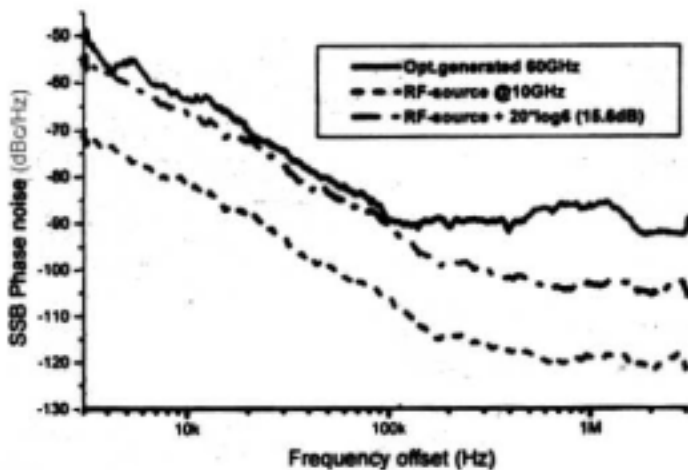


그림 8. 광학적으로 생성된 60 GHz 신호와 변조 신호인 10 GHz 신호의 SSB phase noise.

IV. 결 론

광학적 밀리미터파 전송시스템에서 중요한 연구 주제인 광학적 밀리미터파 신호에 대해 살펴보았다. 먼저, side-band injection-locking 방법을 이용하여 적은 phase noise와 안정된 밀리미터파 대역의 신호를 광학적으로 발생시킬 수 있음을 실험적으로 살펴보았다. 특히, 이동통신 분야의 Pico-cellular network 관점에서 관심을 받는 60GHz 신호를 광학적으로 생

성하였다는데 의미를 가진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL)사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Y. Lostanlen, Y. Corre, Y. Louet, Y. Le Helloco, S. Colonge, and G. El-Zein, "Comparison of measurements and simulations in indoor environments for wireless local networks at 60 GHz," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Conference 2002, 2002, pp. 389-393.
- [2] R.-P. Braun, G. Grosskopf, D. Rohde, and F. Schmidt, "Optical millimetre-wave generation and transmission-experiments for the mobile 60GHz band communications," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 7, 1996.
- [3] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, "Microwave signal generation with injection locked laser diodes," *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 13, pp. 491-493, 1983.
- [4] 서준혁, 최우영, "헤테로다인 기법을 이용한 광 밀리미터파 신호생성," *광학과 기술*, 5권1호, pp. 5-11, 2001.
- [5] R. T. Ramos and A. J. Seeds, "Delay, linewidth and bandwidth limitations in optical phase-locked loops," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 6, pp. 389-391, 1990.
- [6] L. N. Langley, M. D. Elkin, C. Edge, M. J. Wale, U. Gliese, X. Huang, and A. J. Seeds, "Packaged semiconductor laser optical phase-locked loop (OPLL) for photonic generation, processing and transmission of microwave signals," *IEEE Trans. Microwave and Techniques*, vol. 47, no.7, pp. 1257-1264, 1999.
- [7] M. D. Pelusi, H. F. Liu, D. Novak, and Y. Ogawa, "THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol.71, no.4, pp. 449-451, 1997.
- [8] R.-P. Braun, G. Grosskopf, R. Meschenmoser, D. Rohde, F. Schmidt, and G. Villino, "Microwave generation for bidirectional broadband mobile communication using optical sideband injection locking," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 16, pp. 1395-1396, 1997.

Optical 60 GHz signal generation using side-band injection-locking of semiconductor lasers

Ryu Hye Seung[†], Seo Young Kwang, and Choi Woo Young

Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA

[†]E-mail: haryu@tera.yonsei.ac.kr

(Received November 8, 2002, Revised manuscript March 3, 2003)

Optical 60 GHz millimeter-wave (MMW) signal generation is demonstrated using the sideband injection-locking method in the master/slave configuration, where two slave lasers are locked to two among several side-bands produced by the direct rf-modulation of a master laser. These two locked slave laser outputs beat against each other in the photo-detector and produce stable and very pure 60 GHz signals.

OCIS Code : 140.596.