

논문 2006-43TC-11-22

100GHz 대역 Gunn VCO를 이용한 DPLL 시스템 개발연구

(DPLL System Development using 100GHz Band Gunn VCO)

이창훈*, 김광동*, 정문희*, 김효령*

(Changhoon Lee, K. D. Kim, M. H. Chung, and H. R. Kim)

요약

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 수신 시스템을 위한 국부발진 시스템의 DPLL 시스템을 개발하였다. 이 국부발진 시스템의 구성은 86 ~ 115GHz의 Gunn 다이오드 발진기, diplexer와 고조파믹서 등을 포함하는 RF 프로세싱 부분과, Gunn 모듈레이터와 제어기를 포함하는 DPLL 시스템으로 구성된다. 본 논문에서 개발되는 DPLL 시스템의 가장 중요한 설계기준으로는 수퍼헤테로다인 형태의 밀리미터파 대역 수신기의 믹서로 인가되는 국부발진주파수 신호의 주파수와 출력전력의 안정성을 확보하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기위해서 기존에 사용되어왔던 아날로그 PLL 방식 대신에 DPLL 방식을 적용해 시스템을 설계 개발하였다. 이러한 목적 하에서 개발된 시스템의 성능을 확인하기위해 장시간 동안의 주파수 및 출력전력의 안정성 시험을 수행한 결과 $\pm 10\text{Hz}$ 이내의 안정된 주파수 특성과 0.2 ~ 0.3dBm의 매우 우수한 출력전력의 drift 특성을 갖고, 또한 locking 범위 역시 200MHz 정도로 매우 넓어 우주전파관측 수신시스템에 매우 적합함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we develop the PLL system of the local oscillator system using Gunn oscillator VCO for millimeter wave band receiving system. The local oscillator system consists of the 86 ~ 115GHz Gunn diode oscillator part, the RF processing part including the diplexer and the harmonic mixer, and the DPLL system including Gunn modulator and controller. Based on this configuration, we verify the frequency and power stability of the developed local oscillator system. We developed system which applied to DPLL technique instead of the existing analog PLL method to accomplish this purpose. The developed system for this purpose is tested the frequency and power stability for a long time to confirm performance. Since we confirmed this system that had frequency characteristic of within $\pm 10\text{Hz}$, very fine output drift power characteristic of 0.2 ~ 0.3dBm and about 200MHz locking range, it verified suitable for cosmic radio receiving system through the test result.

Keywords : Gunn Oscillator, Millimeter wave receiver, PLL system, Frequency and power stability

I. 서론

밀리미터파 대역 수신시스템의 국부발진 시스템에서 핵심이 되는 발진기 원으로는 일반적으로 Gunn 다이오드를 사용하는 Gunn 발진기와 YIG(Yttrium Iron Garnet)를 사용하는 YIG 발진기가 사용된다^[1, 2].

현재까지 밀리미터파 대역의 우주전파 관측에 사용되는 수퍼헤테로다인 형태의 수신 시스템에서 국부발진

시스템은 Gunn 혹은 YIG 발진기를 VCO(Voltage Controlled Oscillator)로 하여, 주파수 및 출력전력의 안정도를 높이기 위한 PLL(Phase Locked Loop) 시스템을 구성하여 사용되어왔다^[3, 4]. 전파천문 관측연구에서 안테나 온도가 0.1[Kelvin] 미만의 아주 미약한 선 스펙트럼 관측을 위해서는 수신기의 중간주파수와 전파분광기의 전력 안정성 확보와 기기 자체의 잡음이 최소화되어야 가능하다^[3]. 그 중에서도 수신기의 중간주파수 전력 안정도는 관측 데이터의 안정성에 매우 중요하며, 이 안정도를 최대한 확보하기 위해서는 믹서로 공급되는 국부발진 주파수의 안정성을 확보하는 일이 우선적으로 선행되어야 한다.

본 연구에서는 85~115GHz 대역의 국부발진 시스템

* 정희원, 한국천문연구원 전파연구부
(Radio Research Division/Korea Astronomy and Space Science Institute)

※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구사업(R01-2004-000-10294-0)지원으로 수행되었음.

접수일자: 2006년8월15일, 수정완료일: 2006년11월20일

을 Gunn 발진기를 VCO로 하여 안정하고 정확한 국부 발진 주파수를 믹서로 공급하기 위한 DPLL(Digital PLL) 시스템을 설계 제작하였다^[5, 6]. 개발된 DPLL 시스템은 수신기로부터의 중간주파수 신호를 ECL 레벨의 디지털 신호로 변환하는 회로, 위상 오차 검출회로, 루프 이득 제어회로, 및 PLL 상태를 모니터링하고 제어하기 위한 notch 필터와 대역통과 필터 회로 등으로 구성 된다.

II. 국부발진 시스템 설계 및 제작

1. 시스템 구성 및 설계

본 연구에서 사용된 cavity-tuned Gunn 발진기의 출력 주파수는 Gunn 바이어스 전압의 전기적인 튜닝과 U-band backshort의 기계적인 튜닝을 함으로서 조정된다^[7, 8]. 즉, 출력 주파수 ν 는 Gunn 바이어스 전압 V 와 cavity 길이 L 의 함수가 된다.

$$\nu = f(V, L) \tag{1}$$

특정한 튜닝점 i 에서 함수 f 는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\nu = \nu_i + \kappa_{V,i} \Delta V_i + \kappa_{L,i} \Delta L_i$$

where $\left. \frac{d\nu}{dV} \right|_i = \kappa_{V,i}$ and $\left. \frac{d\nu}{dL} \right|_i = \kappa_{L,i}$ (2)

일반적으로 $\kappa_{V,i}$ 는 양의 값을 갖고, 단위는 MHz/Volt 이며, $\kappa_{L,i}$ 는 마이크로미터의 튜닝 특성으로부터 보간법에 의해 예측할 수 있으며, 음의 값을 갖고 단위는 mil/GHz이다. 즉, PLL 시스템의 적용으로 상온에서 $\Delta L(t)$ 의 드리프트는 $\Delta V(t)$ 의 바이어스 전압을 제어 함으로서 일정한 주파수를 유지하게 된다.

Gunn 발진기를 VCO로 사용하는 86~115GHz의 밀리미터파 대역의 국부발진 시스템의 구성은 그림 1과 같이 설계하였다.

발진되는 Gunn의 발진주파수와 위상을 피드백하여 PLL 제어기에 입력하기 위해 고조파 믹서와 diplexer를 사용하였다. Diplexer의 LO는 신호발생기에서 lock 주파수에 따라 고조파 정수를 정해 6~8GHz의 주파수가 입력되도록 하였다. 이로부터 diplexer의 출력으로 0~200MHz의 중간주파수 신호가 출력된다. 또한 전력의 세기가 아주 미약한 고조파 믹서의 출력을 제어기에서 처리될 수 있도록 하기위해서 약 65dB의 이득을 갖는 증폭기를 사용하였다.

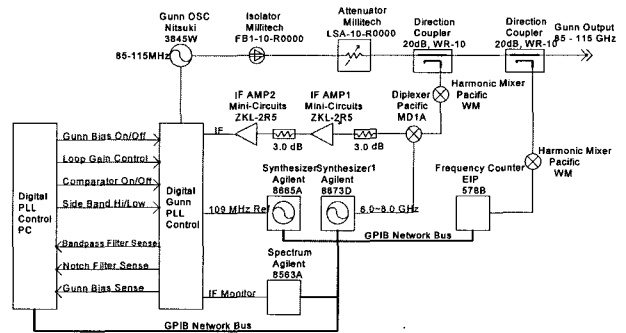


그림 1. DPLL시스템을 사용한 국부발진 시스템의 구성
Fig. 1. Configuration of LO system using DPLL.

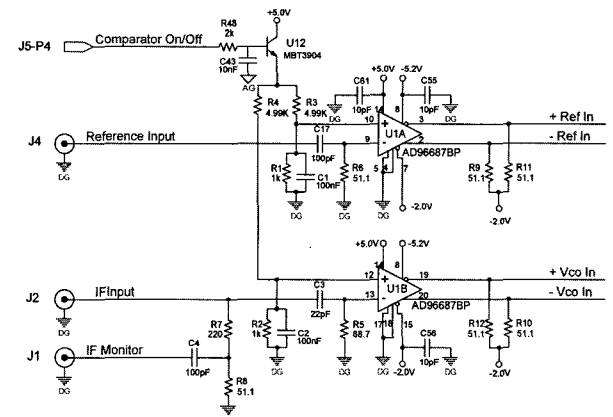


그림 2. 아날로그 / ECL 레벨 디지털 신호 변환기
Fig. 2. Analog / ECL Level Digital Signal Converter.

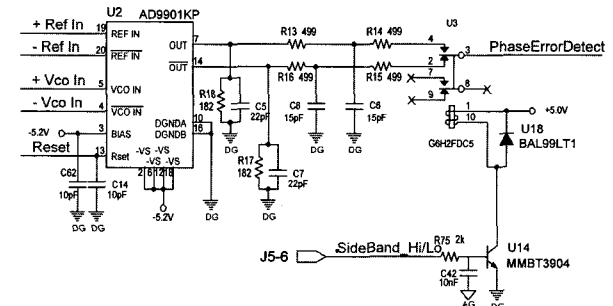


그림 3. 위상 오차검출 회로
Fig. 3. Phase error detector circuit.

위 중간주파수 신호와 109MHz의 기준주파수 신호의 크기를 초고속으로 비교 측정하여 ECL 디지털 신호로 변환하기 위해 그림 2와 같이 AD96687 비교기를 사용하였다.

그림 3에서는 초고속 위상/주파수 변별기능을 가진 AD9901KP를 이용하여 위상오차 검출회로를 설계하였다. 이 IC는 ECL 레벨의 디지털 신호를 본 논문에서 사용되는 중간주파수 대역인 200MHz 까지 바로 입력하여 위상이나 주파수 변별기로 이용이 가능하다.

이 회로에서 다이오드 U18 (BAL99LT1)은 Side Band 선택 스위칭 릴레이 U3의 구동용 TR U14

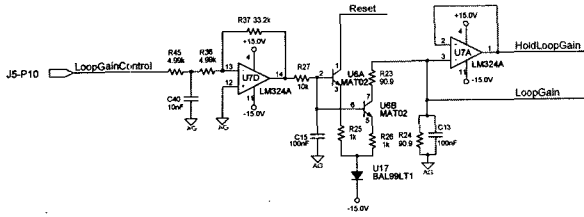


그림 4. 루프 이득 제어 및 피크 홀드 회로
Fig. 4. Loop Gain Control and Peak Hold Circuit.

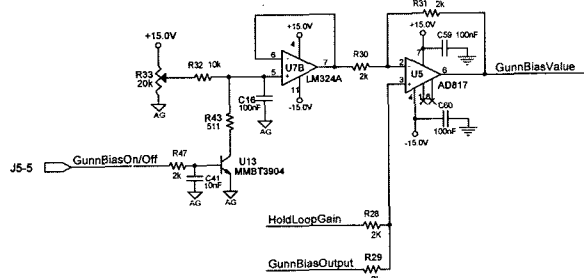


그림 5. Gunn 바이어스 On/Off 및 설정회로
Fig. 5. Gunn Bias Supply On/Off and Setting Circuit.

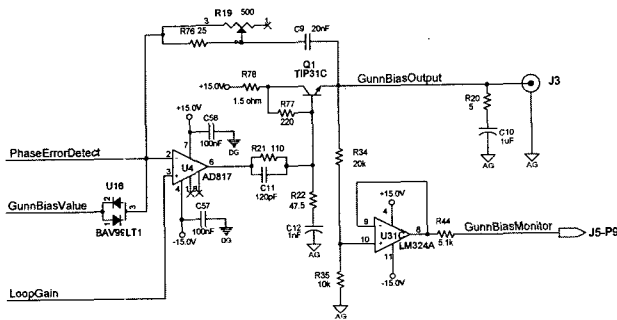


그림 6. 위상오차 증폭 및 Gunn 바이어스 구동회로
Fig. 6. Phase Error Amplifier and Gunn Bias Drive Circuit

(MMBT3904) 보호와 릴레이로 부터 발생하는 잡음을 제거하기 위해 사용하였다.

그림 4와 같이 PLL의 Loop Gain을 제어하고 Loop Gain을 Hold 하기 위한 회로를 설계하였다. 그리고 Gunn 바이어스 전원을 ON/OFF하고 전압 값을 세트하기 위한 회로는 그림 5에 보였다.

Gunn 발진기가 발진하는데 필요한 전압으로 변환하기 위한 구동회로와 원격으로 쉽게 Gunn Bias 전압을 모니터하기 위한 회로를 그림 6과 같이 설계하였다. 일반적으로 Gunn 바이어스 전압은 4VDC와 10VDC 두 가지 형태를 가지므로 모든 Gunn 발진기에 활용될 수 있도록 바이어스 조정 탭을 두어 설계하였다.

그림 7에서는 0~200MHz 대역의 중간주파수 신호가 109MHz 대역으로 정확하게 입력되어서 Lock이 되었는지를 대역통과 필터와 Notch 필터를 사용하여 확인할 수 있도록 하였다. 즉 코일 L7=10nH, C45=21pF,

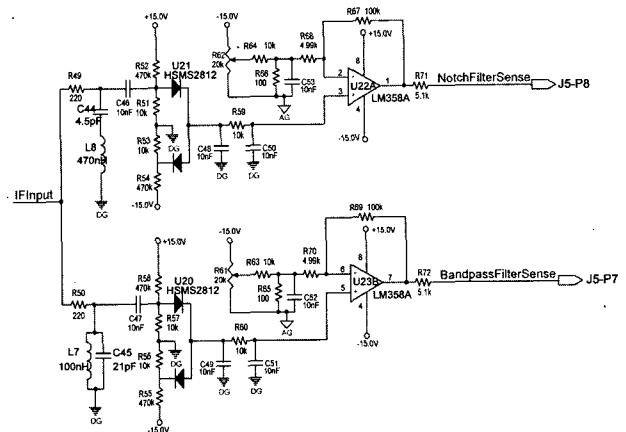


그림 7. Notch 및 대역통과 필터회로
Fig. 7. Notch and Band pass Filter Circuits.

R60=10kΩ에 의해 공진주파수가 109MHz인 대역통과 필터의 출력과 L8=470nH, C45=4.5pF, R59=10kΩ에 의해 공진주파수가 역시 109MHz인 Notch Filter의 출력을 모니터링하는 회로를 설계하였다.

이러한 DPLL 제어회로의 직류 전원은 ±18VDC를 외부로부터 받아서 제어회로에 필요한 ±15VDC, ±5VDC, 및 -2VDC를 공급하도록 하였다.

2. DPLL 보드 제작 및 시스템 성능측정

설계된 PCB는 그림 8과 같이 3층 PCB로 제작되어 에셋블 되었다. 이 PCB는 성능 검증단계에서 각종 RF 컨넥터와 바이어스 공급회로를 수정하여 다시 제작 중에 있다. 새로이 제작될 PCB 보드는 고조파 믹서, diplexer, 및 증폭기와 함께 하나의 박스에 분리하여 최종 제작될 예정이다.

이상과 같이 제작된 PLL 모듈의 성능을 확인하기 위해서 Calstrong Gunn 발진기를 VCO로 하고, 중간주파수 신호의 증폭은 30dBm 이득을 갖는 증폭기 2대를 이용하였으며, Pacific Millimeter 사의 고조파 믹서와 diplexer를 사용하여 전체 국부발진 시스템을 그림 9와 같이 구성하였다. 임시로 Gunn의 bias 전압 조정, PLL

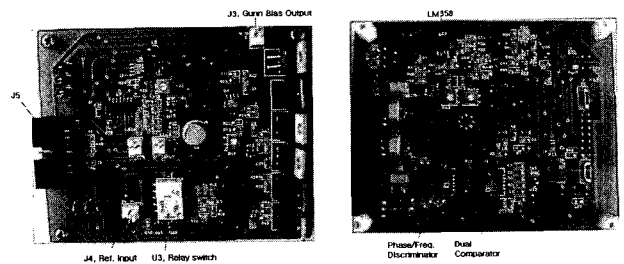


그림 8. 설계 제작된 디지털 PLL PCB의 앞과 뒷모습
Fig. 8. Front and Rear shape of developed DPLL PCB.

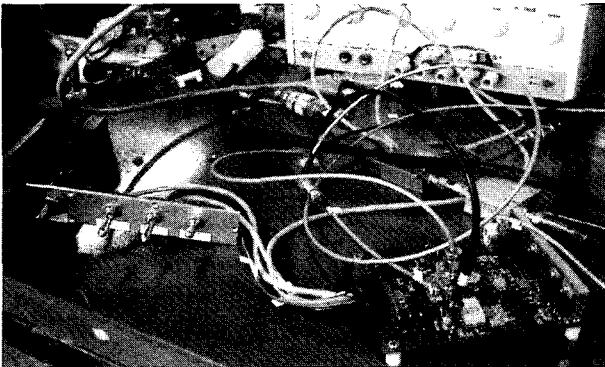


그림 9. 조립된 Gunn DPLL 모듈
Fig. 9. Integrated Gunn DPLL Module

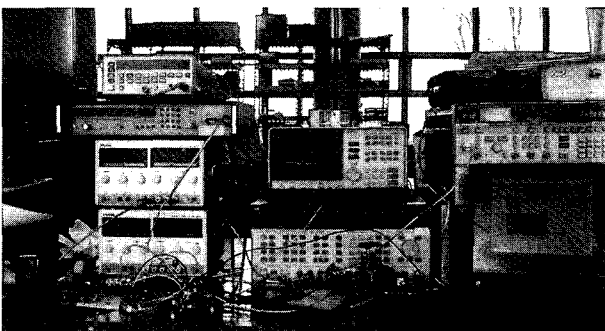


그림 10. 국부발진 시스템의 성능측정 실험모습
Fig. 10. Performance Test of configured LO System

ON/OFF, Sideband 선택, Gunn 바이어스 ON/OFF의 조작은 가변저항과 토글 스위치를 사용하였다. 이러한 제어 방식은 TTL 신호로 제어되므로 PC에 의해 간단히 제어가 가능하다.

그리고 전체 시스템의 주파수 및 출력전력의 안정도를 측정하기위해서 그림 10과 같이 구성하였다.

본 논문에서 사용하는 109MHz 기준 주파수는 HP 8665A 신호 발생기를 사용하였으며, 주어지는 국부발진 주파수에 따라 정해지는 6 - 8GHz의 제어 가능한 주파수는 HP 8673D 신호 발생기를 사용하였다. PLL된 국부발진 주파수의 안정도를 측정하기위해서 EIP 578B 주파수 카운터를 사용하였고, 출력전력의 안정도를 측정하기 위해서 HP 고조파 믹서 11970W를 이용해 Agilent E4440A 스펙트럼 분석기를 사용하였다. 물론 각 측정 장비는 GPIB에 의해 연결하였으며 Window LabView 프로그램을 이용해 노트북 PC에 의해 측정 데이터를 얻었다.

디지털 Gunn PLL 제어의 동작 순서는 다음과 같은 절차에 의해 작동시킨다.

- 1) DPLL 제어 PC로부터 Gunn 발진기에 바이어스 전압을 공급하도록 Off에서 On 시키고, Side Band의 선택을 Hi 나 Low로 세트시킨다.

- 2) 발진하고자 하는 f_{LO} Gunn 발진기의 발진주파수로 주파수 Backshort를 맞춘 후, HP 8673D 에서 아래와 같은 공식에 의해 계산된 F_{syn} 를 세트 시키고 출력전력을 약+8dBm으로 세트시켜 출력한다.

$$F_{syn} = (F_{LO} + F_{ref}) / N \quad (3)$$

여기서 F_{ref} 는 109MHz의 기준주파수이고, N 은 12에서 18까지의 고조파 정수이다.

- 3) Gunn 발진기의 발진주파수가 Phase Lock 범위에 있는지를 확인하기 위해, DPLL 제어기의 대역통과 필터 Sense의 출력전압을 측정하여 측정전압이 최대가 되도록 Gunn 발진기의 주파수 backshort과 전력 backshort을 돌려 미세하게 조정한다.
- 4) 대역통과 필터 Sense의 출력전압이 최대일 때, Notch 필터 Sense의 출력전압이 최소가 되도록 루프이득 전압을 조정한다.
- 5) 마지막으로 Phase Lock의 명령에 해당되는 Comparator On/Off 신호를 On 으로 출력 시킨다.

III. 실험

86GHz에서부터 115GHz까지 Phase Loop Lock 각 주

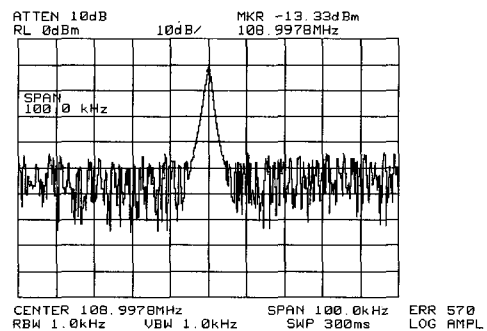


그림 11. 86GHz에서 Lock된 IF 신호 모습
Fig. 11. locked IF signal shape at 86GHz

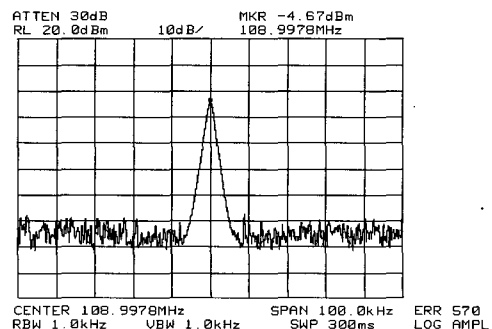


그림 12. 114.89GHz에서 Lock된 IF 신호 모습
Fig. 12. locked IF signal shape at 114.89GHz

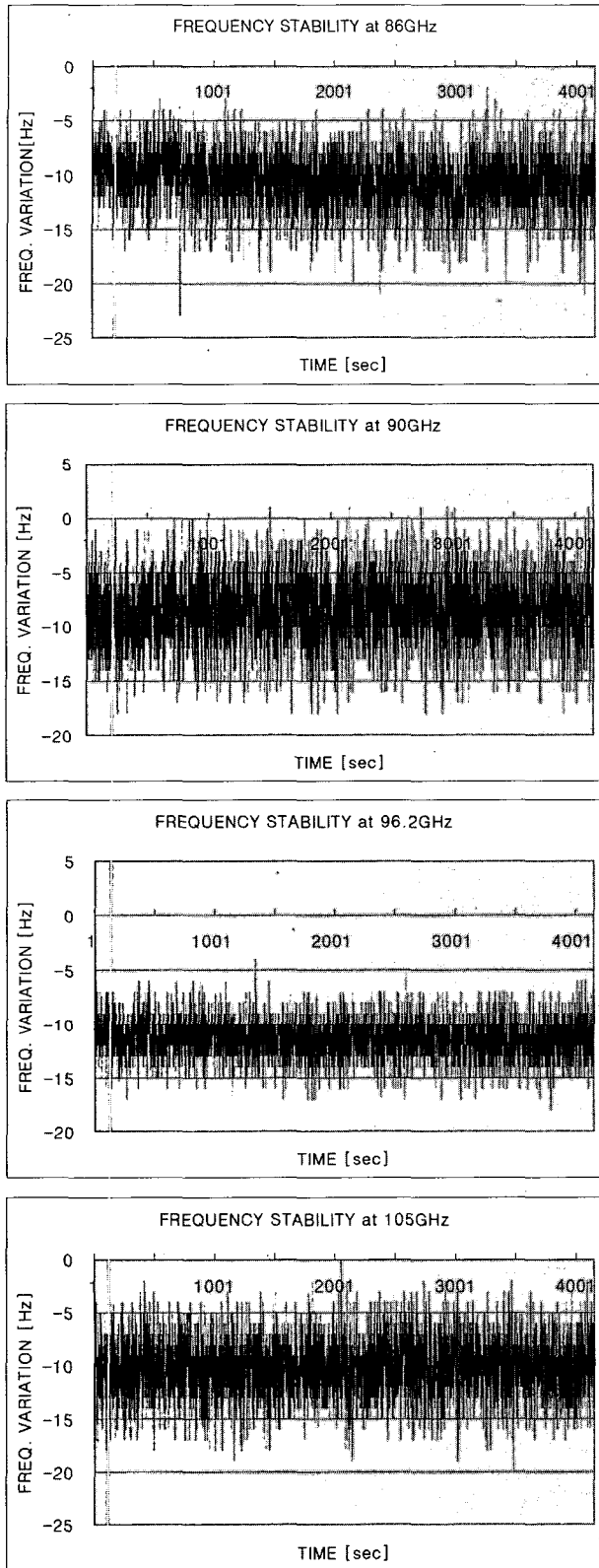


그림 13. 측정된 PLL된 LO 주파수의 안정도 특성
 Fig. 13. Measured LO frequency stability at several frequency.

파수에서 lock이 걸린 경우 전형적인 IF monitor 신호는 정확하게 109MHz 중심주파수에서 그림 11과 12와 같이

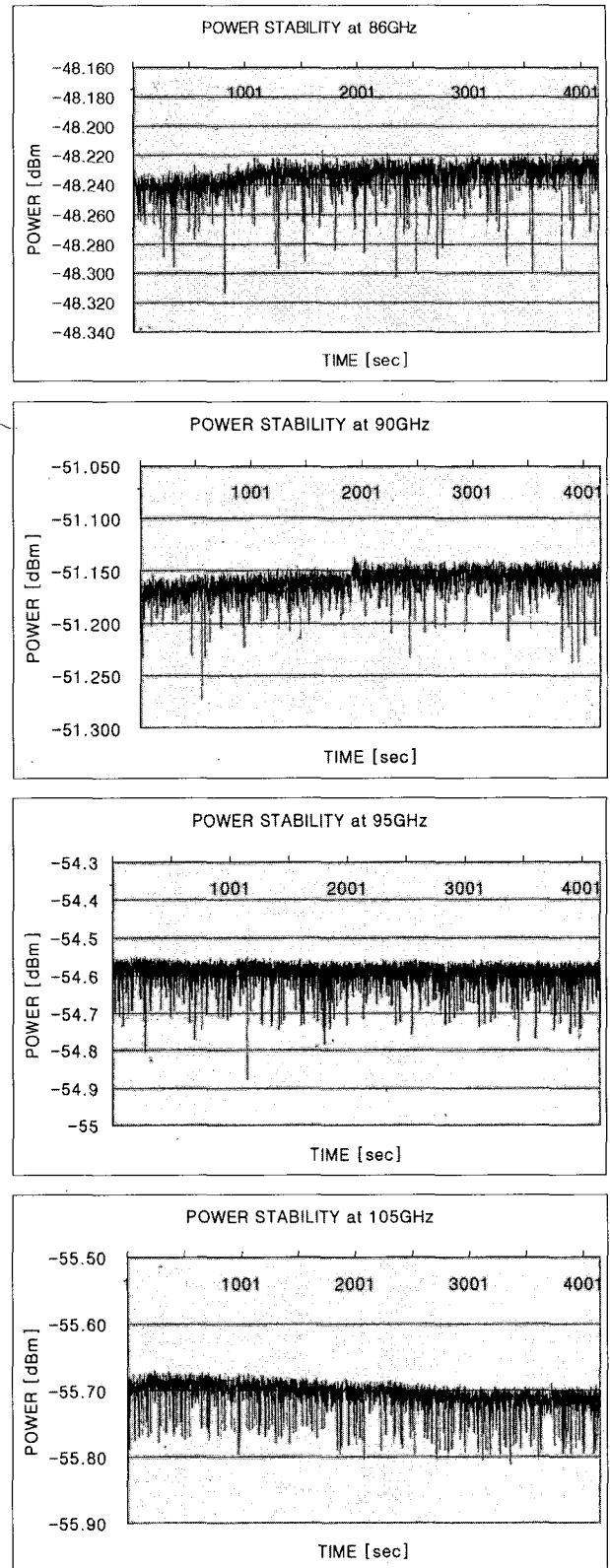


그림 14. 측정된 PLL된 LO 신호의 전력 안정도 특성
 Fig. 14. Measured LO power stability at several frequency.

정확하게 일치함을 알 수 있다.

다음에는 EIP 578B 주파수 카운터로 4000초 이상 여

러 개의 주파수에 대하여 lock을 시킨 후 각각의 주파수 안정도를 측정하였다. 그리고 외부 고조파 믹서 HP 11970W와 함께 Agilent E4440A 스펙트럼 분석기로 각각의 주파수에서의 출력전력의 안정도를 측정하였다. 그림 13과 14에서는 86, 90, 96.2, 및 105GHz에서의 주파수 및 전력 안정도를 보였다. 여기서 전력 측정 시 고조파 믹서 자체가 갖고 있는 변환손실이 40dBm와 본 실험에서 사용한 방향성 결합기가 20dBm의 손실을 갖고 있으므로, 그림 14의 Y-축의 스케일에서 60dBm의 손실을 고려해야한다. 즉, 손실을 고려한 값이 최종의 국부발진주파수가 갖는 전력 값이다.

이러한 실험결과 주파수의 안정도는 86~115GHz 주파수에서 $\pm 10\text{Hz}$ 이내에서 매우 안정된 국부발진주파수가 발진됨을 확인하였다. 그리고 전력의 안정도 면에서도 그림 14의 측정결과로부터 0.2~0.3dBm의 매우 우수한 드리프트 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 이상의 안정도 특성은 YIG 발진기를 VCO로 한 국부발진 시스템을 구성한 경우[]의 특성을 비교해보면 본 논문에서 개발된 DPLL 시스템을 사용한 경우가 10배 이상의 안정도 특성을 갖고 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 밀리미터파 대역의 국부발진주파수를 발진하는 Gunn 발진기를 VCO로 한 국부발진시스템을 디지털 PLL 모듈을 개발하여 구성하였으며, 그 성능을 확인하기위해서 주파수의 안정도와 출력전력의 안정도를 측정하였다. 실험결과 주파수의 안정도는 86 ~ 115GHz 사이의 모든 주파수에서 $\pm 10\text{Hz}$ 이내에서 매우 안정된 특성을 얻었다. 그리고 전력의 안정도 면에서도 0.2~0.3dBm의 매우 우수한 드리프트 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 측정된 Locking 범위 역시 200MHz 정도로 매우 넓다는 것을 알았다. 또한 Locking 시간도 일주일 이상 주위온도가 변하지 않는 경우 계속 유지함을 확인하였다. 이러한 성능은 이제까지 대덕전파천문대에서 사용해왔던 다른 방식의 시스템 특성보다도 훨씬 우수한 특성을 갖는 것이다.

본 논문에서 개발된 DPLL 제어기는 단일 전파망원경의 단일 피이드-혼 수신기 및 어레이 수신기와 어레이 안테나의 수신기용 국부발진시스템에 적극 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이창훈, "100GHz 대역 초점면 어레이 수신시스템 연구", 우수연구원 해외연구과제보고서, 한국천문연구원, 1987.
- [2] J. E. Carlstrom, R. L. Plambeck, and D. D. Thornton, "A continuously tunable 65-115GHz Gunn oscillator," *IEEE MTT-33*, pp. 610-619, 1985.
- [3] R. G. Davis, M. J. Leeson, H. D. G. Lennon, M. J. Lazarus, "Phase-locked millimeter-wave two-port Second-harmonic Gunn oscillators," *IEEE MTT*, vol.39, pp. 1746 - 1753, 1991.
- [4] 이창훈, 정문희, 김광동, 김효령, "YIG VCO를 이용한 밀리미터파 대역 수신기의 PLL 시스템 연구," *전자공학회 논문지*, 제42권 TC편, 제11호, 45-52, 2005.
- [5] E. Roland, "Phase-locked loops Theory, Design, and Applications," *McGraw-Hill*, 1984.
- [6] T. R. Hunter, R. Kimberk and R. W. Wilson, *SMA Technical Memo #143*, 2003.
- [7] K. Jacobs, B. Vowinkel, "Solid state mm-wave oscillators with large tuning range", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 863 - 866, 1987
- [8] M. J. Lazarus, F. R. Pantoja, S. Novak, M. G. Somekh, "Wideband tunable mm-wave Gunn oscillator design," *Electronics Letters*, Vol. 17, pp. 739-741, 1981.

저 자 소 개

이 창 훈(정회원)

2005년 제 42권 TC편 제 11호 참조

김 광 동(정회원)

2005년 제 42권 TC편 제 11호 참조

정 문 희(정회원)

2005년 제 42권 TC편 제 11호 참조

김 효 령(정회원)

2005년 제 42권 TC편 제 11호 참조