

논문 2005-42TC-11-6

YIG VCO를 이용한 밀리미터파 대역 수신기의 PLL 시스템 연구

(PLL System of a Millimeter-Wave Band Receiver using YIG VCO)

이 창 훈*, 정 문 희*, 김 광 동*, 김 효 령*

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

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 전파천문 관측용 수신시스템의 안정된 동작을 확보하기 위한 국부발진시스템을 제안하였다. 제안된 국부발진시스템은 26.5 ~ 40GHz를 발진하는 YIG 발진기를 VCO로 하여 개발하였다. 이러한 국부발진 시스템은 YIG VCO, 고조파 믹서, 및 아이솔레이터 등을 포함한 발진부, triplexer, limiter, 및 RF 판별 기능 등을 포함하는 RF 프로세싱 부분과 YIG PLL을 위한 모듈과 제어기를 포함한 PLL 시스템으로 구성되어 설계, 개발하였다. 본 연구에서는 개발된 국부발진시스템의 안정성을 확인하기위해서 온도변화에 따른 출력 주파수와 전력 안정도를 측정하였다. 이러한 실험결과로부터 개발된 국부발진시스템은 일정한 온도에서는 매우 안정된 출력 주파수와 전력특성이 확보됨을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose the PLL system of the local oscillator system for the millimeter wave band's radio astronomy receiving system. The development of the proposed local oscillator system based on the YIG oscillator VCO with 26.5 ~ 40GHz specification. This system consists of the oscillator part including the YIG VCO, the harmonic mixer, and the isolator, the RF processing part including the triplexer, limiter, and RF discrimination processor, and the PLL system including YIG modulator and controller. Based on this configuration, we verify the frequency and power stability of the developed local oscillator system according to some temperature variation. From this test results we confirm the stable output frequency and power characteristic performance of the developed LO system at constant temperature.

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

I. 서 론

밀리미터파 대역 수신시스템의 국부발진 시스템에서 핵심이 되는 발진기 원으로는 일반적으로 GUNN 다이오드를 사용하는 GUNN 발진기와 YIG(Yttrium Iron Garnet)를 사용하는 YIG 발진기가 주로 사용된다^[1,2]. 현재까지 밀리미터파 대역의 우주전파 관측에 사용되는

수신 시스템의 LO 시스템은 GUNN 혹은 YIG 발진기를 기본으로 하여, 주파수 및 위상의 안정도를 높이기 위한 PLL(Phase Locked Loop) 시스템을 구성하여 사용되어왔다. 전파천문 관측연구에서 안테나 온도가 0.1[K] 미만의 아주 미약한 선 스펙트럼 관측을 위해서는 수신기의 중간주파수와 전파분광기의 전력 안정성 확보와 기기 자체의 잡음이 최소화되어야 가능하다. 그 중에서도 수신기의 중간주파수 전력 안정도는 관측 데이터의 안정성에 매우 중요하며, 이 안정도를 최대한 확보하기 위해서 선진외국의 전파천문대에서는 수신기의 믹서로 공급되는 국부발진 주파수와 출력전력의 안정성을 확보하는 연구를 수행하고 있다^[3,4,5].

* 정희원, 한국천문연구원 대덕전파천문대
(Taeduk Radio Astronomy Observatory/Korea Astronomy and Space Science Institute)

※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구사업
(R01-2004-000-10294-0)지원으로 수행되었음
접수일자: 2005년9월9일, 수정완료일: 2005년11월8일

본 연구에서는 86 - 115GHz 대역의 우주전파수신시스템을 위한 안정한 국부발진 시스템을 12bits 디지털 드라이버를 갖고, 26.5- 40GHz 주파수를 발진하는 YIG 발진기를 VCO로 사용하여 설계하였다. 전체 시스템의 구성은 Ka 밴드 도파관 부품들로 구성되는 주파수 발진부와, 안정하고 정확한 국부발진 주파수를 믹서로 공급하기 위한 PLL 시스템으로 크게 구성하여 설계, 제작하였다.

본 논문에서 제작된 국부발진 시스템은 단일 휘드론을 사용하는 밀리미터파 수신기뿐만 아니고, Ka 밴드 증폭기를 추가 사용하면, 많은 LO 전력이 요구되는 어레이 수신시스템에서도 사용할 수 있다.

II. 국부발진 시스템 설계 및 제작

1. 시스템 구성

본 연구에서 설계, 제작될 밀리미터파 대역 우주전파수신기의 국부발진 시스템의 전체적인 구성을 그림 1에 보였다.

그림 1에서 관측주파수가 결정되면 S-band 주파수는 PC에 의해서 다음과 같은 절차에 의해서 계산되어 주파수 발생기를 GPIB를 통해 제어하게 된다.

먼저 관측주파수 F_{line} 이 정해지면 국부발진 주파수 F_{lo} 는 다음 식으로 주어진다.

$$F_{lo} = F_{line} \pm F_{if} \quad (1)$$

여기서 F_{if} 는 수신기의 중간주파수이며, +/-는 각각 상측파대 혹은 하측파대를 나타낸다. 그리고 F_{lo} 는 그림 1의 수신기 챔버 내부에 설치된 3 체배기의 출력 주파수이다. 이제 식 (1)로부터 YIG 발진기의 주파수 F_{yig} 는 다음과 같이 계산된다.

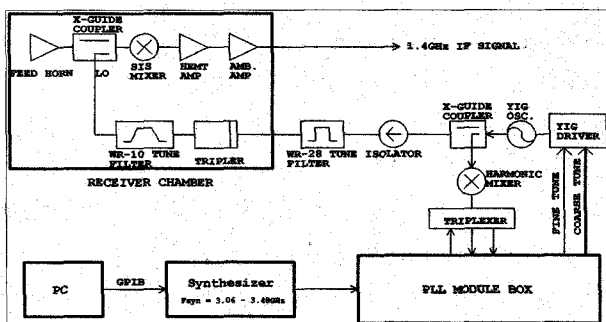


그림 1. 밀리미터파 대역 우주전파수신기의 국부발진 시스템 구성

Fig. 1. Local oscillator system configuration of mm-wave band cosmic radio receiver.

$$F_{yig} = F_{lo} / 3 \quad (2)$$

다음으로 결정해야하는 것은 식 (2)로 계산된 F_{yig} 로부터 3.06 ~ 3.48GHz 사이의 신호 발진기로부터의 주파수를 결정하기 위한 1에서 20 사이의 정수 N 을 찾아야 한다. F_{yig} 와 PLL 회로에서의 기준발진 주파수 F_{ref} (본 연구에서는 315 MHz)와의 합, 혹은 차를 정수 N 으로 나누어 그 값이 3.06 ~ 3.48GHz 사이의 값이 되는 N 값을 찾으면 된다. 이와 같이 N 값이 결정되면 신호 발진기에서 발진해야할 주파수가 결정된다.

그림 1에서 PLL 시스템의 VCO로 사용될 YIG 발진기는 GUNN이나 IMPATT 다이오드를 이용한 발진기에 비해서 3배 정도의 낮은 소비전력 특성을 갖고 있으며, 효율, 위상잡음, 온도특성, 튜닝의 선형성 및 스펙트럼의 purity의 특성이 우수하다^[6]. 본 논문에서 사용한 YIG 발진기는 26.5- 40GHz 주파수를 발진하는 12bits 디지털 드라이버와 함께 제공되는 그림 2에 보인 AVANTEK 사의 디지털 드라이버와 함께 제공되는 ADD-2614 모델^[7]을 사용하였다. YIG 발진기의 제원과

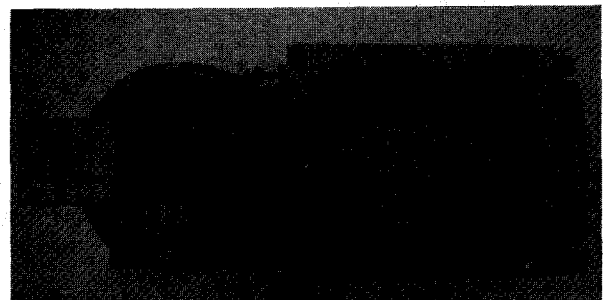


그림 2. AVANTEK 사의 YIG 발진기와 디지털 드라이버

Fig. 2. YIG Oscillator with digital driver by AVANTEC CO.

표 1. AVANTEK YIG 발진기의 제원

Table 1. Specification of AVANTEK YIG Oscillator.

Description	Specification	Description	Specification
Frequency Range	26.5 - 40 GHz	Operating Temp. Range	-54 ~ 85 °C
Output Power into 50Ω Load, Min. at 25°C	20mW/+13dBm	Power Output Variation vs. Frequency, Max.	+19 dBm
Frequency Drift over operating Temp., Max.	60 MHz	Pulling Figure (12dB return loss), Typ.	0.5 MHz
Pushing Figure, +15VDC Supply, Typ.	0.1 MHz/V	Magnetic Susceptibility @60Hz, Typ.	50 kHz/Gauss
Main Port Characteristic		FM Port Characteristic	
- Sensitivity	30±1.5MHz/mA	- Sensitivity	400kHz/mA
- 3dB Bandwidth	2kHz	- 3dB Bandwidth	50 kHz
- Linearity	±0.1%	- Deviation at 400kHz rate	100 MHz
- Hysteresis	40 MHz	- Input impedance	0.3Ω in series with 0.5pH
- Input impedance @1kHz	6Ω in series with 90mH		
DC Circuit Power, Max.	+8.0/+15.5V Min/Max.		

표 2. YIG 디지털드라이버의 DB-25 컨넥터 핀 사양

Table 2. Pin assignment of YIG digital driver's connector.

pin No.	Description	pin No.	Description	pin No.	Description
1	bit 1(LSB)	10	+FM	19	bit 12
2	bit 3	11	+15V GND	20	nc
3	bit 5	12	+15V	21	FM shield GND
4	bit 7	13	+15V to +30V	22	Heater(20-28V)
5	bit 9	14	bit 2	23	Heater
6	bit 11	15	bit 4	24	-15V GND
7	nc	16	bit 6	25	-15V
8	nc	17	bit 8		
9	-FM	18	bit 10		

YIG 발진기의 제어를 위한 디지털 드라이버의 DB-25 컨넥터의 핀 사양은 각각 표 1과 2에 보였다.

다음에는 본 연구의 핵심인 S-밴드 triplexer와 YIG 주파수 PLL 시스템의 설계와 제작에 대해 다룬다.

2. S-band Triplexer 설계 제작

밀리미터파 주파수 소스인 YIG 발진기로부터의 현재 발전되는 주파수를 검출하고, 주파수 및 위상 PLL을 위해서는 고조파 믹서(Harmonic Mixer)와 triplexer를 그림 1과 같이 사용해야한다. 본 연구에서는 Pacific millimeter사의 고조파 믹서^[8]를 사용하였으며, triplexer는 유전율이 10.2이고 두께가 31 mils인 기판을 사용하여 그림 3과 같이 설계하였다. 이 회로의 입력은 믹서로부터의 IF 신호와 주파수 PLL의 기준 주파수인 S-band 신호이고, 출력은 고조파 믹서의 IF 신호와 이 믹서의 전류신호가 된다. 여기서 S-band 신호는 PC에 의해 제어되는 주파수 발생기로부터의 신호이며, 관측 주파수가 정해지면 자동으로 이 주파수와 YIG 주파수가 결정되어 다음에서 설계되는 PLL회로에 의해서 PLL된 밀리미터파 믹서의 국부발진 주파수로 입력되게 된다.

본 연구에서 설계, 제작된 triplexer의 기본적인 회로

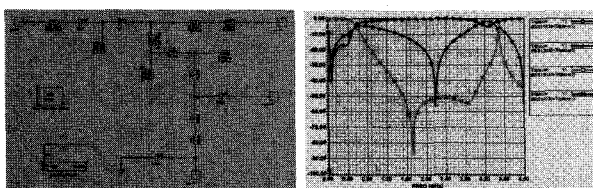
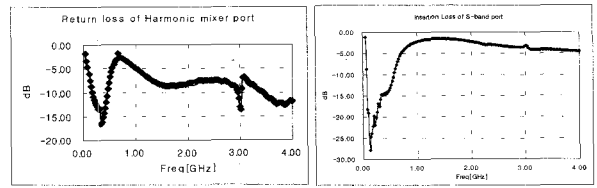
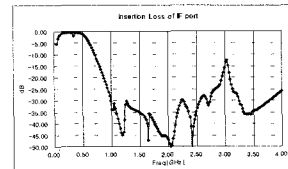


그림 3. Triplexer의 설계회로도 및 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Triplexer circuit diagram and simulation result.



(a) H.M 포트 반사 손실 (b) S-band 포트 삽입 손실



(c) IF signal 포트의 삽입 손실

그림 4. 제작된 triplexer의 측정결과
Fig. 4. Test results of the developed triplexer.

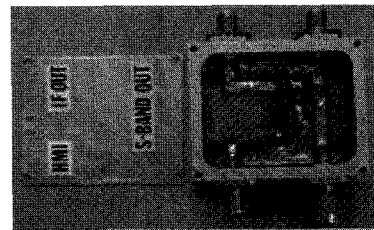


그림 5. 제작된 Triplexer의 모습
Fig. 5. Photo of the developed triplexer.

구성은 사용하고자 하는 주파수에서 대역통과 필터와 저역필터의 조합으로 구성되며, 그림 3-(a)에 설계 및 해석 시뮬레이션에 사용된 triplexer의 회로도도를 보였다.

이 회로도에서 포트 1, 2, 3 과 4는 각각 Harmonic Mixer, S-band, IF signal, 그리고 DC 전류 단자에 해당한다. 그림 3-(b)는 그 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4는 제작된 triplexer의 측정결과이며, 각 포트별 특성이 이론적 시뮬레이션 결과와 유사함을 볼 수 있다. 제작된 triplexer의 모습을 그림 5에 보였다.

3. YIG 주파수 PLL 시스템 개발

YIG 발진기가 원하는 주파수로 정확하고 안정하게 발전할 수 있도록 해주는 그림 1의 PLL 모듈 박스의 설계와 제작에 관한 내용을 서술한다. PLL 박스의 내부에 위치하게 될 각 부품간의 신호 흐름도를 그림 6에 보였다.

그림 6에서 RF 프로세서로 입력되는 IF 신호의 전력을 제한하기위한 Limiter 모듈과 IF 신호의 위상과 주파수의 검출을 위한 RF 프로세서 모듈의 설계를 그림 7과 같이 설계하였으며, YIG 발진기의 주파수 Fine 튜

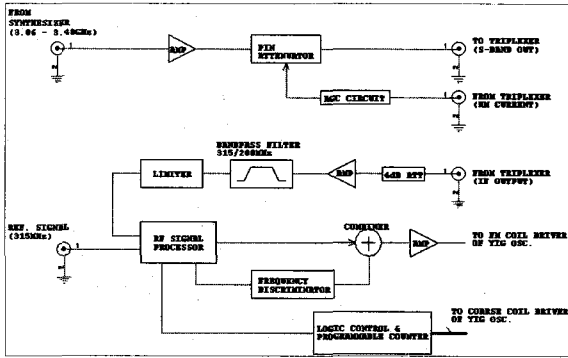


그림 6. 설계된 YIG PLL 모듈의 블록선도
Fig. 6. Block diagram of the designed YIG PLL module.

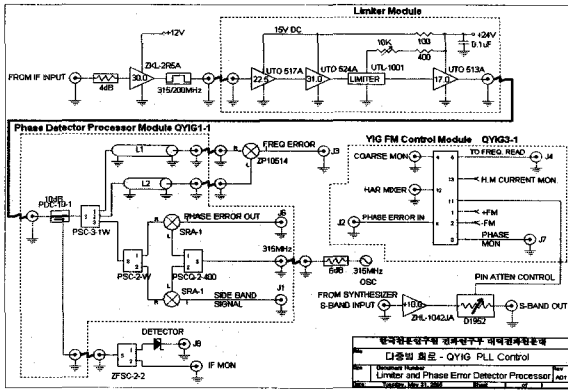


그림 7. Limiter와 RF 프로세서 설계
Fig. 7. Circuit design of Limiter and RF processor.

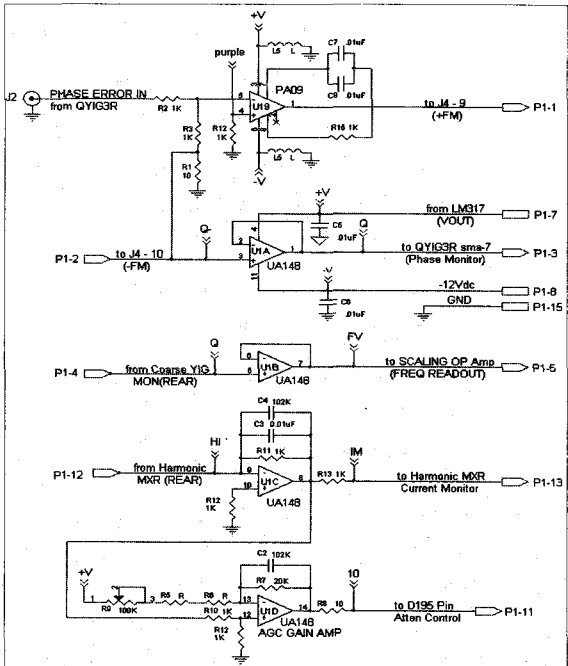
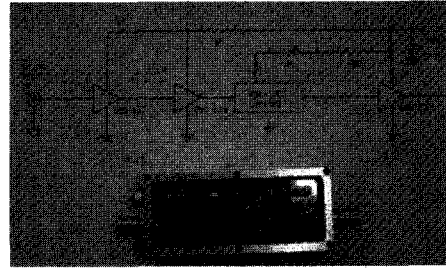
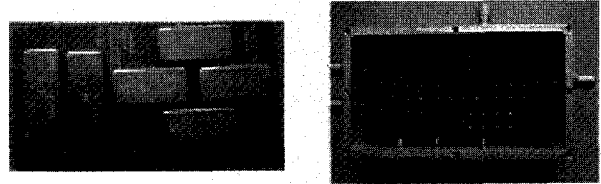


그림 8. YIG FM 제어를 위한 구동 모듈
Fig. 8. Driver module for YIG FM coil control.

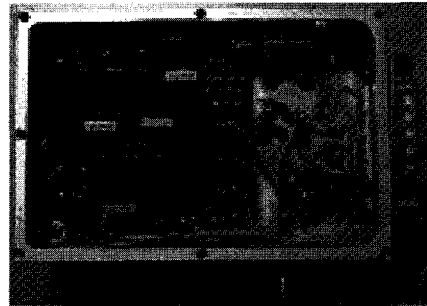
를 위한 드라이버, 입력신호의 위상, 주파수, 및 고주파 믹서 전류의 모니터링을 위한 드라이버 역시 설계



(a) 제작된 limiter의 모습
(a) Photo of the developed limiter



(b) RF 프로세서(좌 : 앞면, 우 : 뒷면)
(b) RF processor(Left: front side, Right: back side)



(c) 제작된 FM 및 모니터링 드라이버
(c) Developed FM and monitoring driver

그림 9. Limiter, RF 프로세서 및 FM 과 모니터드라이버
Fig. 9. Limiter, RF processor, and FM & monitor driver.

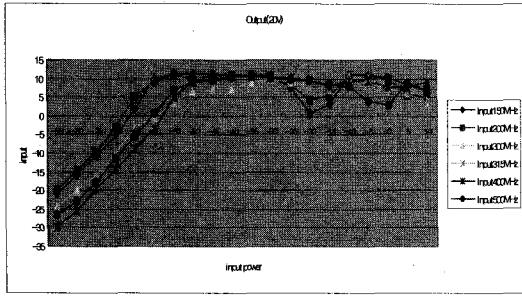
를 하였다.

그림 7에서 RF 프로세서 모듈은 방향성 커플러 (PDC-10-1), 3-way 0° 전력 분리기(PSC-3-1W), 2-way 0° 전력 분리기(PSC-2-1W), 위상오차 및 측파대 신호를 검출하기 위한 주파수 믹서(SRA-1), 2-way 90° 전력 분리기(PSCQ-2-400)와 주파수 오차를 검출하기 위한 믹서(ZP10514)를 사용하여 설계하였다^[9].

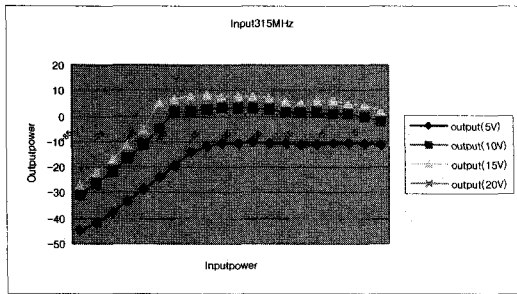
이 모듈에서 검출된 주파수와 위상오차 신호는 YIG 발진기의 FM 코일을 구동하기 위한 신호를 만들기 위해 그림 8과 같이 설계된 YIG FM 구동부로 입력된다.

이상과 같이 설계된 각 부품은 다음 그림 9와 같이 제작되었다.

전체적인 PLL 회로의 정상적인 동작을 위해서는 일정한 신호 전력을 RF 프로세서로 공급해주는 것이 매우 중요하다. 따라서 그림 9-(a)와 같이 제작된 Limiter



(a) 20V 바이어스에서 입력주파수 변화에 따른 입력과 출력 전력의 특성
 (a) Input-output power characteristic according to input frequency at 20V bias



(b) 315MHz 입력주파수에서 바이어스 전압에 따른 입력과 출력 전력의 특성
 (b) Input-output power characteristic according to bias at 315MHz input

그림 10. 제작된 Limiter의 성능실험 결과
 Fig. 10. Performance test results of the developed limiter.

의 성능을 확인하기 위해서 입력 주파수와 전력 및 바이어스를 바꾸어가면서 출력의 변화를 측정하였다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 입력 주파수 변화 및 bias 변화에 따른 limiter 특성을 측정한 결과 제작된 limiter는 50 - 600MHz 사이의 IF 신호에 대해서 -50dBm에서 0dBm 까지 일정한 출력전력을 나타내고 있다.

이러한 실험결과로부터 limiter의 바이어스 전압은 20V로 정하였다. 본 논문에서는 limiter의 입력신호, 즉 IF 신호의 중심 주파수를 315MHz, 대역폭이 400MHz를 사용하므로 충분한 자유도를 갖고 제작된 limiter를 활용할 수 있음을 확인하였다.

4. PLL 제어회로 개발

PLL 제어회로는 YIG 발진기의 coarse 주파수를 제어용 PC로부터 12비트의 신호를 입력받아 디지털 YIG 드라이버로 출력하는 coarse 주파수 세팅부, 그림 7의 J3와 J1 으로 부터의 FREQ. error와 SIDEBAND error 신호를 받아 PHASE error를 생성하는 회로, PLL 제어

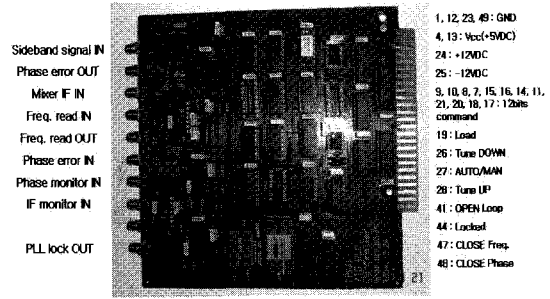


그림 11. 개발된 YIG PLL 모듈 PCB
 Fig. 11. The developed YIG PLL module PCB.

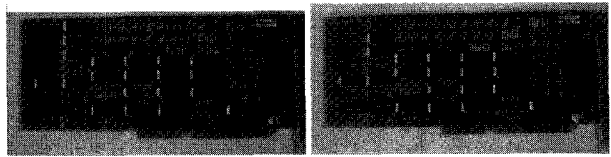


그림 12. 개발된 YIG PLL용 I/O 보드
 (좌 : 16bit IN 24bit OUT, 우 : 16bit IN only)
 Fig. 12. The developed I/O board for YIG PLL.
 (Left : 16bit IN 24bit OUT, Right : 16bit IN only)

를 위한 신호를 생성하는 회로, PLL lock 상태를 검출하는 회로, YIG 발진기의 발진 주파수를 모니터링하기 위한 주파수 모니터링 회로, lock 주파수로 자동튜닝하기 위한 클럭의 TUNE UP/DOWN 회로, 및 주파수와 위상을 고정시키기 위한 회로 등으로 설계 개발하였다. 개발된 제어회로 PCB와 I/O 보드를 그림 11과 12에 보였다.

III. 시스템 조립 및 성능시험

앞 장에서 설계 제작된 각 부분품을 발진부와 PLL 시스템부로 나누어 그림 13과 같이 조립하였다.

제작된 PLL 시스템의 온도변화에 따른 주파수 안정도 및 전력 안정도 시험과 locking dynamic 범위를 테스트하기 위해서 그림 14와 같은 테스트 환경을 구축하

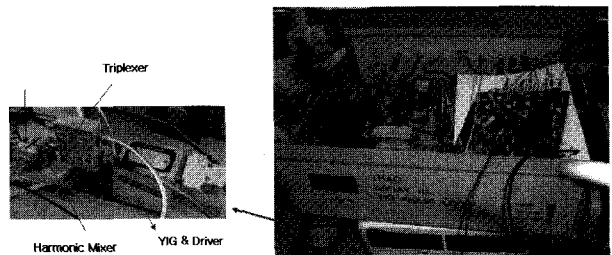


그림 13. 조립 완성된 YIG LO PLL 시스템의 모습
 (좌: 발진부, 우: PLL 시스템부)
 Fig. 13. The completely assembled YIG LO PLL system.
 (Left : oscillator parts, Right : PLL system)



그림 14. PLL 시스템 성능을 측정하기 위한 시스템
Fig. 14. System configuration for the PLL performance test.

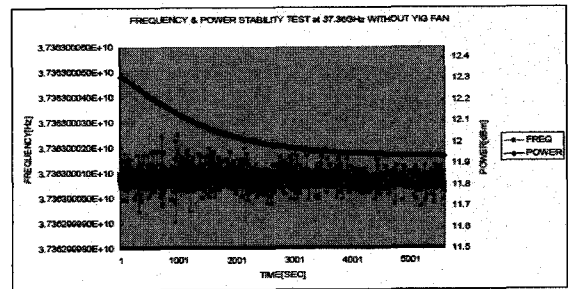
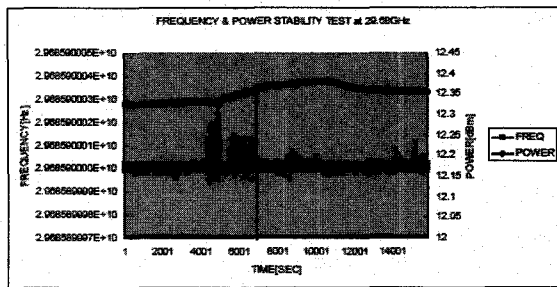
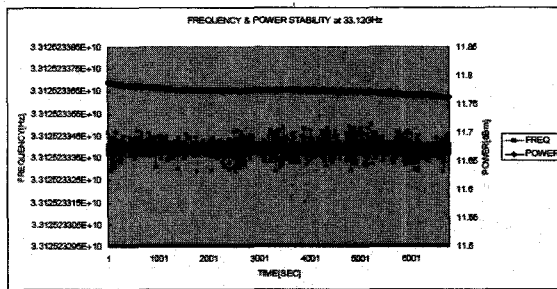


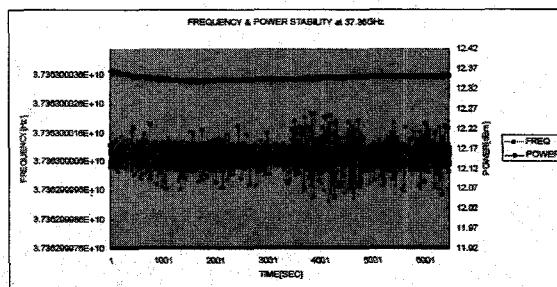
그림 16. 온도변화에 따른 PLL 시스템의 성능
Fig. 16. PLL system performance under temperature variation at 37.363GHz.



(a) 29.6859GHz에서 출력주파수와 전력 특성
(a) Output frequency & power characteristic at 29.6859GHz



(b) 33.1230GHz에서 출력주파수와 전력 특성
(b) Output frequency and power characteristic at 33.123GHz



(c) 37.3630GHz에서 출력주파수와 전력 특성
(c) Output frequency and power characteristic at 37.363GHz

그림 15. 각 주파수별 PLL 시스템의 성능
Fig. 15. Performance of the PLL system at 3 frequencies.

였다.

먼저 YIG 발진기의 발열로 인한 온도상승이 최소화

되도록 YIG 발진기에 DC 팬을 설치한 후 2시간 이상 PLL 상태와 출력전력 및 주파수의 변화를 측정하였다. 이 실험은 대표적으로 29.6859GHz, 33.123GHz 및 37.363GHz에서 수행하였다. 이 결과 그림 15에서 알 수 있듯이 출력전력 및 주파수의 drift는 거의 없음을 알았다. 출력전력의 변화는 최대 0.05dBm, 출력 주파수의 변화는 최대 10Hz 미만으로 변화함을 알 수 있었다.

또한 S-밴드의 주파수를 변화시켜 가면서 locking 상태를 측정한 결과 ± 40 MHz의 주파수 변화에도 locking 상태를 유지하는 매우 광범위하고, 안정된 특성을 보였다.

마지막으로 주변온도의 변화에 따른 PLL 시스템의 상태를 확인하기위해서, YIG 발진기에 일정온도를 유지하기위해 설치되었던 DC 팬을 제거한 후 2시간 이상 PLL 상태와 출력전력 및 주파수의 변화를 측정하였다. 이 결과를 그림 16에 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 실험 시작 후 약 40분까지는 출력전력의 변화만이 0.4dBm 정도 변화하고, 이후에는 안정됨을 알 수 있었다.

이상의 실험결과로부터 본 논문에서 개발된 PLL 시스템의 안정된 동작을 위해서는 YIG 발진기 주변의 온도를 일정하게 유지하는 것이 바람직하다.

IV. 결론

본 연구에서는 밀리미터파 대역의 수신시스템의 안정도에 가장 영향을 미치는 국부발진 시스템을 26.5-40GHz의 주파수를 발진하는 YIG VCO를 기본으로 하여 설계 개발하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 모든 주파수에서 본 연구에서 개발된 국부발진 시스템의 출력전력과 출력 주파수의 안정도가 출력전력의 변화는 최대 0.05dBm, 출력 주파수의 변화는 최대 10Hz 미만

으로 매우 안정됨을 확인하였다. 그리고 PLL capture 범위도 $\pm 40\text{MHz}$ 로 매우 광범위한 특성을 갖고 있으므로 본 연구에서 개발된 시스템은 최근의 전파천문관측 기술인 on the fly 관측모드 및 주파수 스위칭 관측모드를 지원할 수 있는 밀리미터파 대역의 국부발진시스템이 될 것이다. 그리고 전체 시스템의 모든 PLL의 제어와 모니터링 기능을 PC에 의해 수행하도록 설계되어 있으므로 수신기의 튜닝이 복잡하게 되는 다중빔 어레이 수신기의 국부발진 시스템으로 매우 적합하다.

참 고 문 헌

- [1] W. H. Haydl, "Fundamental and Harmonic Operation of Millimeter-Wave Gunn Diodes". *IEEE MTT-31*, No.11, Nov., pp. 879-889, 1983.
- [2] 이창훈, 김광동, 김효령, 정문희, 한식태, 제도홍, 김태성, "YIG 발진기를 이용한 100GHz 대역 국부 발진 시스템 설계연구", *한국우주과학회지*, Vol.20, No.3, pp. 185-196, 2003.
- [3] B. Lazareff, H. Hein, "Baseline ripples(30-MHz component)", *IRAM Technical Report*, Dec., 1998.
- [4] R. D. Norrod, "Receiver Stability for Radio Astronomy", *GBT Technical Report*, Dec., 1995.
- [5] J.W. Kooi, G. Chattopadhyay, M. Thieman, and T.G. Phillips, "Noise Stability of SIS Receivers", *Int. J. IR and MM Waves*, Vol. 21, No. 5, May, 2000.
- [6] E. W. Bryerton, D. L. Thacker, K. S. Saini, and R. F. Bradley, "Noise Measurements of YIG-Tuned Oscillator Sources for the ALMA LO", *ALMA Memo*, No. 311, Aug. 2000.
- [7] "Modular and Oscillator Components Data Book", Avantek, pp. 485, 1989.
- [8] <http://www.pacificmillimeter.com/Mixers.html>,
- [9] "RF/IF Designer's Guide", Mini-Circuits Ltd., <http://www.minicircuits.com>, 2004.

저자 소개

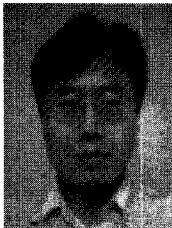


이 창 훈(정회원)
 1979년 충남대학교
 전기공학과 학사
 1981년 고려대학교
 전기공학과 석사
 1987년 고려대학교
 전기공학과 박사

1987년~현재 한국천문연구원 대덕전파천문대
 책임연구원

1997년~1998년 과학기술부 우수연구원 선정,
 미국 FCRAO 근무

<주관심분야: mm파 통신 및 부품개발, 망원경
 제어, 전파분광기 및 신호처리>



정 문 희(정회원)
 1990년 서울대학교
 천문학과 학사
 1993년 서울대학교
 전자과 석사
 2000년 프랑스 Paris 6 대학
 천체물리 및 관측기기
 (이학박사)

1993년~1995년 대우전자 영상연구소 연구원

2001년~현재 한국천문연구원 대덕전파천문대
 선임연구원

<주관심분야 : SIS 믹서, mm파 수신기 및 준광
 학계 시스템, Reflector 안테나>



김 광 동(정회원)
 1973년 영남대학교
 전기공학과 학사
 1993년 4월~현재 한국천문
 연구원 대덕전파천문대
 책임연구원

<주관심분야: 망원경 제어, 전파분광기 및 신호처
 리>



김 효 령(정회원)
 1990년 서울대학교
 천문학과 학사
 1996년 부산대학교
 지구과학과 석사
 2003년 부산대학교
 지구과학과 박사

1990년~현재 한국천문연구원 대덕전파천문대
 선임연구원

<주관심분야: 전파천문학, 외부은하, 실시간 제어
 알고리즘>