

YIG 발진기를 이용한 밀리미터파대역의 PLL 시스템 개발

Development of Millimeter-Wave band PLL System using YIG Oscillator

이창훈*, 김광동*, 정문희*, 김효령, 한석태*

*한국천문연구원/대덕전파천문대

Changhoon-Lee*, K.D.Kim*, M.H Chung*, H.R Kim*, S.T. Han*

Korea Astronomy and Science Space Institute/Taeduk Radio Astronomy Observatory

*chlee@trao.re.kr

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.

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

1. 서론

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].

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 국

부발진 주파수를 믹서로 공급하기 위한 PLL 시스템으로 크게 구성하여 설계, 제작하였다.

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

2. 시스템 구성 및 설계 제작

2.1. 시스템 구성

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

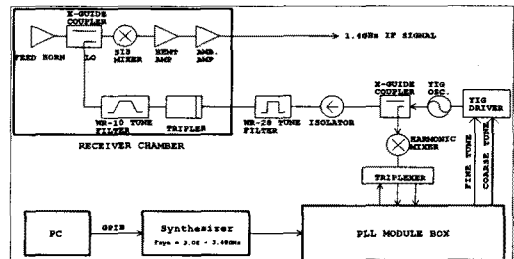


그림 1. 밀리미터파 대역 우주전파수신기의 국부발진 시스템 구성

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

저자 소개

*韓國天文研究院 大德電波天文臺 · 工博

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-10294-0)지원으로 수행되었음.

먼저 관측주파수 F_{line} 이 정해지면 국부발전 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 발전기의 주파수 F_{yig} 는 다음과 같이 계산된다.

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

다음으로 결정해야하는 것은 식 (2)로 계산된 F_{yig} 로부터 3.06 ~ 3.48GHz 사이의 신호 발전기로부터의 주파수를 결정하기 위한 1에서 20 사이의 정수 N 을 찾아야 한다. F_{yig} 와 PLL 회로에서의 기준발전 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 발전기에서 발전해야할 주파수가 결정된다.

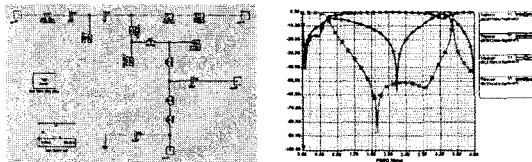
그림 1에서 PLL 시스템의 VCO로 사용될 YIG 발전기는 GUNN이나 IMPATT 다이오드를 이용한 발전기에 비해서 3 배 정도의 낮은 소비전력 특성을 갖고 있으며, 효율, 위상잡음, 온도특성, 튜닝의 선형성 및 스펙트럼의 purity의 특성이 우수하다^[6]. 본 논문에서 사용한 YIG 발전기는 26.5- 40GHz 주파수를 발전하는 12bits 디지털 드라이버와 함께 제공되는 AVANTEK 사의 ADD-2614 모델을 사용하였다.

2.2. 시스템 설계 및 제작

1. S-band Triplexer 설계 제작

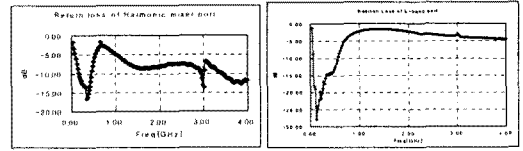
밀리미터파 주파수 소스인 YIG 발전기로부터의 현재 발전되는 주파수를 검출하고, 주파수 및 위상 PLL을 위해서는 고조파 믹서(Harmonic Mixer)와 triplexer를 그림 1과 같이 사용해야한다. 본 연구에서는 Pacific millimeter사의 고조파 믹서를 사용하였으며, triplexer는 유전율이 10.2이고 두께가 31 mils인 기판을 사용하여 그림 2와 같이 설계하였다. 여기서 S-band 신호는 PC에 의해 제어되는 주파수 발생기로부터의 신호이며, 관측주파수가 정해지면 자동으로 이 주파수와 YIG 주파수가 결정된다.

본 연구에서 설계, 제작된 triplexer의 기본적인 회로 구성은 사용하고자 하는 주파수에서 대역통과 필터와 저역필터의 조합으로 구성되며, 그림 2에 triplexer의 설계 회로도 및 시뮬레이션 결과를 보였다. 이 회로도에서 포트 1, 2, 3 과 4는 각각 Harmonic Mixer, S-band, IF signal, 그리고 DC 전류 단자에 해당한다. 그림 3은 제작된 triplexer의 측정결과이며, 각 포트별 특성이 이론적 시뮬레이션 결과와 유사함을 볼 수 있다. 제작된 triplexer의 모습을 그림 4에 보였다.

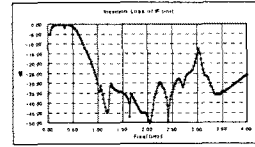


(a) 설계 회로도 (b) 시뮬레이션 결과

그림 2. Triplexer의 설계회로도 및 시뮬레이션 결과



(a) H.M 포트 반사 손실 (b) S-band 포트 삽입 손실



(c) IF signal 포트의 삽입 손실

그림 3. 제작된 triplexer의 성능측정결과

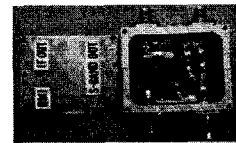


그림 4. 제작된 Triplexer의 모습

2. YIG 주파수 PLL 시스템 개발

YIG 발전기가 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 5에 보였다.

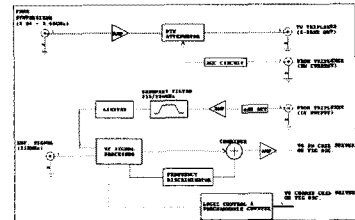


그림 5. 설계된 YIG PLL 모듈의 블록선도

그림 5에서 RF 프로세서로 입력되는 IF 신호의 전력을 제한하기 위한 Limiter 모듈과 IF 신호의 위상과 주파수의 검출을 위한 RF 프로세서 모듈의 설계를 그림 6과 같이 설계하였으며, YIG 발전기의 주파수 Fine 튜닝을 위한 드라이버, 입력 신호의 위상, 주파수, 및 고주파 믹서 전류의 모니터링을 위한 드라이버 역시 설계를 하였다.

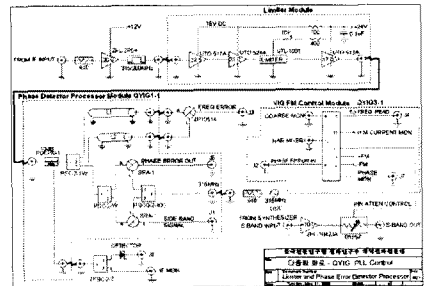
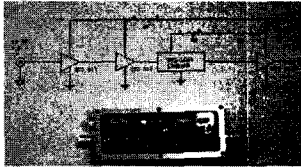


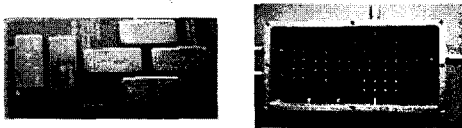
그림 6. Limiter와 RF 프로세서 설계

그림 6에서 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. 이 모듈에서 검출된 주파수와 위상 오차 신호는 YIG 발진기의 FM 코일을 구동하기 위한 신호를 만들기 위해 제작된 그림 7-c의 YIG FM 구동부로 입력된다.

이상과 같이 설계된 각 부분을 그림 7에 보였다.



(a) 제작된 limiter의 모습



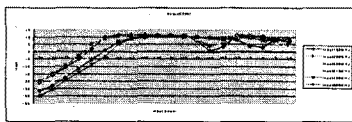
(b) RF 프로세서(좌 : 앞면, 우 : 뒷면)



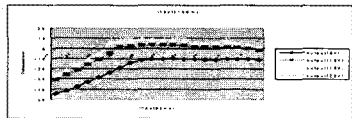
(c) 제작된 FM 및 모니터링 드라이버

그림 7. Limiter, RF 프로세서 및 FM 과 모니터링 드라이버

전체적인 PLL 회로의 정상적인 동작을 위해서는 일정한 신호 전력을 RF 프로세서로 공급해주는 것이 매우 중요하다. 따라서 그림 7-(a)와 같이 제작된 Limiter의 성능을 확인하기 위해서 입력 주파수와 전력 및 바이어스를 바꾸어가면서 출력 전력의 변화를 측정하였다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 입력 주파수 변화 및 bias 변화에 따른 limiter 특성을 측정할 결과 제작된 limiter는 50 - 600MHz 사이의 IF 신호에 대해서 -50dBm에서 0dBm까지 일정한 출력전력을 나타내고 있다.



(a) 입력주파수 변화에 따른 입력과 출력 전력의 특성



(b) 315MHz 에서 바이어스 전압에 따른 입력 과 출력 전력의 특성
그림 8. 제작된 Limiter의 성능실험 결과

이러한 실험결과로부터 limiter의 바이어스 전압은 20V로 정하였다. 본 논문에서는 limiter의 입력신호, 즉 IF 신호의 중심 주파수를 315MHz, 대역폭이 400MHz를 사용하므로 중

분한 자유도를 갖고 제작된 limiter를 활용할 수 있음을 확인하였다.

3. PLL 제어회로 개발

PLL 제어회로는 YIG 발진기의 coarse 주파수를 제어용 PC로부터 12비트의 신호를 입력받아 디지털 YIG 드라이버로 출력하는 coarse 주파수 세팅부, 그림 6의 J3와 J1 으로부터의 FREQ. error와 SIDEBAND error 신호를 받아 PHASE error를 생성하는 회로, PLL 제어를 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 PCB 보드를 그림 9에 보였다.

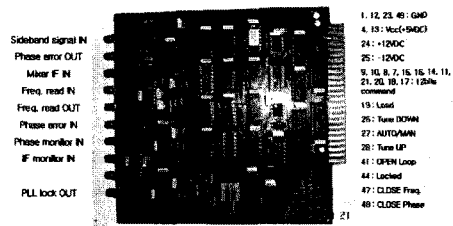


그림 9. 개발된 YIG PLL 모듈 PCB

3. 시스템 조립 및 성능시험

앞 장에서 설계 제작된 각 부분품을 발진부와 PLL 시스템부로 나누어 그림 10과 같이 조립하였다.

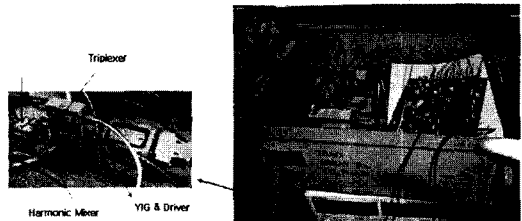


그림 10. 조립 완성된 YIG LO PLL 시스템의 모습
(좌: 발진부, 우: PLL 시스템부)

제작된 PLL 시스템의 온도변화에 따른 주파수 안정도 및 전력 안정도 시험과 locking dynamic 범위를 테스트하기 위해서 그림 11과 같은 테스트 환경을 구축하였다.

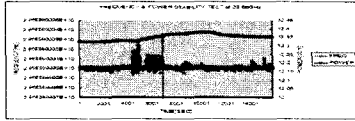


그림 11. PLL 시스템 성능을 측정하기 위한 시스템

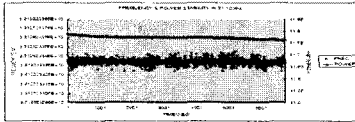
먼저 YIG 발진기의 발열로 인한 온도상승이 최소화되도록 YIG 발진기에 DC 팬을 설치한 후 2시간 이상 PLL 상태와 출력전력 및 주파수의 변화를 측정하였다. 이 실험은 대표적으로 29.6859GHz, 33.123GHz 및 37.363GHz에서 수행하였다.

이 결과 그림 12에서 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.

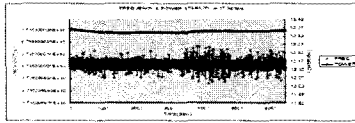
또한 S-밴드의 주파수를 변화시켜 가면서 locking 상태를 측정할 결과 $\pm 40\text{MHz}$ 의 주파수 변화에도 locking 상태를 유지하는 매우 광범위하고, 안정된 특성을 보였다.



(a) 29.6859GHz에서 출력주파수와 전력 특성



(b) 33.1230GHz에서 출력주파수와 전력 특성



(c) 37.3630GHz에서 출력주파수와 전력 특성

그림 12. 각 주파수별 PLL 시스템의 성능

마지막으로 주변온도의 변화에 따른 PLL 시스템의 상태를 확인하기 위해서, YIG 발진기에 일정온도를 유지하기 위해 설치되었던 DC 팬을 제거한 후 2시간 이상 PLL 상태와 출력 전력 및 주파수의 변화를 측정하였다. 이 결과를 그림 13에 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 실험 시작 후 약 40분까지는 출력전력의 변화만이 0.4dBm 정도 변화하고, 이후에는 안정됨을 알 수 있었다.

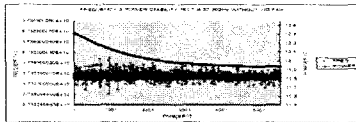


그림 13 온도변화에 따른 PLL 시스템의 성능

IV. 결론

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

참고 문헌

- [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, 한석태, 제도홍, 김태성, "YIG 발진기를 이용한 100GHz 대역 국부발진 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