

밀리미터파 대역 국부발진 시스템 설계연구

이창훈, 김광동, 한석태, 정문희, 김효령, 제도홍, 김태성

한국천문연구원/ 대덕전파천문대

E-mail : chlee@trao.re.kr, kdkim@trao.re.kr, sthan@trao.re.kr

A Design Study of the Local Oscillator System for Millimeter Wave Band

Changhoon Lee, K.D. Kim, S.T. Han, M.H. Chung, H.R. Kim, D.H. Jae, T.S. Kim
Korea Astronomy Observatory/Taeduk Radio Astronomy Observatory

Abstract

We design the local oscillator system of the 100 GHz band radio receiving system for a cosmic radio observation. We use the YIG oscillator with digital driver which is the main oscillator. This oscillator has a good frequency and phase stability at some temperature variation, and the easy computer aided control characteristics. This total system designed to two subsystem, first is the oscillator system include YIG oscillator, tripler, harmonic mixer and triplexer etc., second is the PLL system to supply the precise and stable local oscillator frequency to mixer. The proposed local oscillator system in this paper can be use a single or multi pixel receiver because this system can be lock the local oscillator frequency automatically using PC.

I. 서론

밀리미터파 대역의 우주전파 관측을 위한 수신시스템에서 초단 광-대역 저잡음 냉각 증폭기를 사용하고 후단에 믹서를 위치시키는 방식이나, 쇼트키 믹서나 SIS(Superconductor Insulator Superconductor) 초전도 믹서를 초단에 사용하는 헤테로다인 수신방식에서 국부발진 주파수원으로 국부발진기(Local Oscillator)의 사용은 필수적이다^[1]. 밀리미터파 대역의 국부발진 시스템에서 핵심이 되는 발진기 원으로는 일반적으로 GUNN 다이오드를 사용하는 GUNN 발진기와 YIG(Yttrium Iron Garnet)를 사용하는 YIG 발진기가 사용된다. 현재까지 밀리미터파 대역의 우주전파 관측에 사용되는 수신 시스템의 LO 시스템은 GUNN 혹은 YIG 발진기를 기본으로 하여, 주파수 및 위상의 안정

도를 높이기 위한 PLL(Phase Locked Loop) 시스템을 구성하여 사용되어왔다^[2].

전파천문 관측연구에서 안테나 온도가 0.1[K] 미만의 스펙트럼 선 관측을 위해서는 수신기의 중간주파수와 전파분광기의 전력 안정성 확보와 기기 자체의 잡음이 최소화되어야 가능하다. 그 중에서도 수신기의 중간주파수 전력 안정도는 매우 중요하며, 이 안정도를 최대한 확보하기 위해서는 믹서로 공급되는 국부발진 주파수의 안정성을 확보하는 일이 우선적으로 선행되어야한다^[3]. 현재 대덕전파천문대의 14미터 안테나에 설치 활용되고 있는 이중채널 SIS 수신시스템에서는 국부발진 주파수 원으로 68-115GHz 광-대역을 커버하는 Carlstrong GUNN 발진기와 XL- μ wave사의 PLL 모듈을 사용하여 SIS 믹서에 국부발진 주파수를 공급하고 있다^[4].

일반적으로 GUNN 발진기 자체의 온도변화에 따른 주파수 및 전력 안정도가 YIG 발진기의 특성보다는 떨어지는 특성을 갖고 있다. 따라서 국부발진 주파수의 주파수 및 전력 안정도가 특히 요구되는 SIS 믹서를 사용하는 수신시스템에서는 이러한 안정도 면에서 좀더 우수한 특성을 갖고 있는 YIG 발진기를 사용한 PLL 시스템이 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 29-38GHz YIG 발진기를 기본으로 하는 PLL 시스템과 전체의 국부발진 시스템을 설계하고자한다. 기본 설계 원칙은 가능한 한 기계적인 조정 포인트를 최소화하며, 관측 주파수 설정에 대해 높은 신뢰성을 갖는 시스템을 설계하는 것이다.

II. 국부발진 시스템의 구성

본 연구에서 설계하고자 하는 100GHz 대역의 국부발진 시스템은 YIG 발진기를 기본으로 하는 Ka 밴드

도파관 부품으로 구성되는 주파수 발진부와, 안정하고 정확한 국부발진 주파수를 믹서로 공급하기 위한 PLL 시스템으로 크게 구성된다. 주파수 발진부의 전체적인 구성은 그림 1과 같다.

본 연구에서 설계되는 국부발진 시스템은 단일 휘드혼을 사용하는 수신기뿐만 아니라 어레이 수신시스템에서도 사용할 수 있도록 가능한 한 기계적인 조정부분을 최소화 하면서 주파수 설정 면에서 최대한의 신뢰성을 갖도록 설계하고, 모든 제어가 PC에 의해 가능하도록 하는데 초점을 맞추었다.

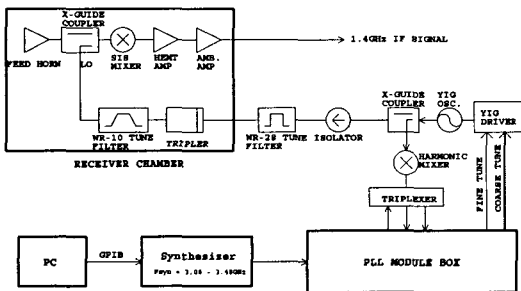


그림 1. 밀리미터파 전파수신기의 국부발진시스템 구성

먼저 YIG 발진기와 PLL 모듈에 의해서 lock된 29-38GHz 사이의 발진주파수를 3채배하는 3채배기를 그림 2와 같은 튜너가 없는 varactor 다이오드 ($C_j(0)=29\text{fF}$, $R_s=10\Omega$, $V_b=21\text{V}$)^[5]를 사용하는 고정형의 3채배기를 사용하였다. 본 연구에서는 수신기 성능향상, 즉 채배기의 출력전력을 높이기위해서 이 채배기를 그림 1에서 알 수 있듯이 20K의 냉각 챔버 내부에 설치하도록 설계하였다.

이 채배기의 출력 매칭이 아주 광-대역을 커버하므로 출력 주파수 양 끝 쪽에서 원하지 않는 제 4고조파가 발생하게 된다. 특히 높은 주파수 즉, 120-130GHz에서의 고조파가 SIS 혹은 쇼트키 믹서의 성능에 영향을 주게 된다. 이러한 고조파를 제거하기 위해서 채배기의 출력 단 다음에 WR-10 tunable 필터를 사용하도록 하였다. 또한 그림 1에서 볼 수 있듯이 이 필터와 함께 이러한 잡음을 제거하기 위해서 채배기 입력 단, 즉 챔버 외부에 또 하나의 tunable 잡음 제거용 필터를 사용하였다. 이 필터는 PLL 회로로부터의 잡음이나 단일 피드혼 수신기가 아닌 어레이 수신시스템의 국부발진 시스템 설계에서 WR-28의 Ka 밴드 대역의 전력 증폭기를 사용하는 경우 이 증폭기로부터 발생하는 자체 잡음을 필터링하기위한 것이다.

YIG 발진기로부터의 발진 주파수를 믹서로 공급하도록 하고 발진 주파수를 PLL 회로에 공급하는 역할을 하기위해 WR-28 도파관 형태의 X-guide 커플러를 사용해야하며, 3채배기와 YIG 발진기 사이의 임피던스 강제정합과 YIG 발진기의 보호를 위해서 WR-28 도파관 형태의 아이솔레이터를 WR-28 필터와 X-guide 커플러 사이에 두었다.

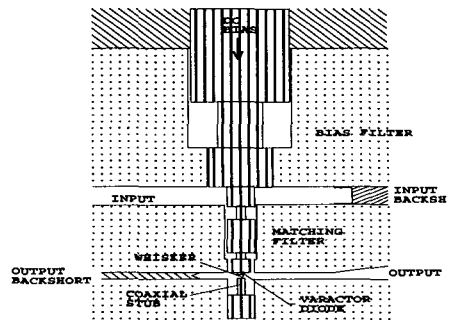


그림 2. Whisker냉각용 3채배기의 단면도

밀리미터파 주파수 소스인 YIG 발진기로부터의 주파수 PLL을 위해서는 고조파 믹서(Harmonic Mixer)와 triplexer를 사용해야한다. 여기에서 triplexer 매칭회로는 유전율이 10.2이고 두께가 31mils인 기판을 기준으로 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, 관측주파수가 정해지면 자동으로 이 주파수와 YIG 주파수가 결정되어 다음 장에서 설계되는 PLL회로에 의해서 PLL된 밀리미터파 믹서의 국부발진 주파수로 입력되게 된다.

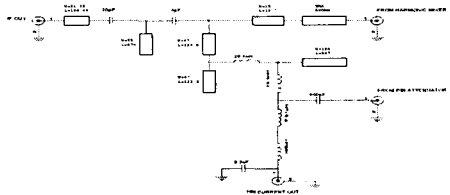


그림 3. Triplexer의 설계회로

YIG는 yttrium과 iron($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)을 포함하는 합성 결정체 페라이트로서, YIG 단일 결정구가 어떤 자계 내부에 존재하면, RF 에너지는 자계에 의해서 이 결정구에 결합되며 이결정은 자계의 세기에 선형적으로 비례하는 주파수에서 공진하게 된다. 이와 같은 YIG를 이용한 밀리미터파 대역의 발진기는 GUNN이나 IMPATT 다이오드를 이용한 발진기에 비해서 3배 정도의 낮은 소비전력 특성을 갖고 있으며, 효율, 위상잡음, 온도특성, 튜닝의 선형성 및 스펙트럼의 purity의 특성이 우수하므로 전파천문관측 수신기의 국부발진기로 많이 사용된다.

밀리미터파 대역의 국부발진 시스템으로 제안된 그림 1에서 가장 중요한 부분인 29 - 39GHz 주파수를 발진하는 YIG 발진기는 12bits 디지털 드라이버와 함께 제공되는 그림 4에 보인 AVANTEK 사의 ADD-2614 모델을 사용하였다.

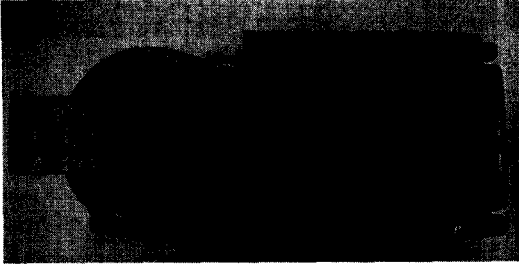


그림 4. AVANTEK 사의 YIG 발진기와 디지털 드라이버 모습

III. PLL 시스템의 설계

앞 장에서는 그림 1에서 PLL 회로를 제외한 국부발진 시스템의 구성과 설계를 다루었다. 본 장에서는 밀리미터파 수신시스템의 국부발진 시스템 중에서 가장 핵심적인 PLL 시스템을 설계하였다. 이 시스템에서 가장 중요한 기능은 YIG 발진기가 원하는 발진주파수를 정확히 발진하도록 해주기 위한 YIG 발진기의 Fine 코일을 구동하는 신호를 만들어내는 것이다. 이러한 기능을 하도록 하는 PLL 시스템을 그림 5와 같이 구성하였다.

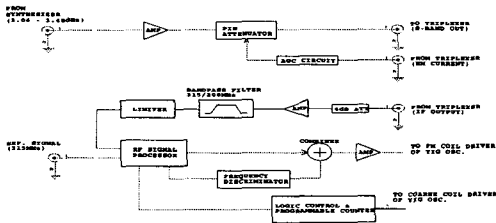


그림 5. YIG PLL 시스템 구성도

그림 5에서 위 부분은 관측주파수에 따라 다음과 같은 방법으로 결정되는 3.06 - 3.48GHz 사이의 주파수 발생기 출력과 triplexer로부터의 고조파 믹서전류를 피드백 받아서 AGC(Auto Gain Control) 회로를 통해 일정한 S-band의 주파수가 triplexer로 공급되도록 하는 회로이다. 본 연구에서 설계된 국부발진 시스템에서의 S-band 주파수와 YIG 발진기의 주파수 계산은 다음과 같은 방법에 의해 이루어진다. 먼저 관측주파수 F_{line} 이 정해지면 국부발진 주파수 F_{lo} 는 다음 식으로 주어진다.

$$F_{lo} = F_{line} + /- F_{if} \quad (1)$$

여기서 F_{if} 는 수신기의 중간주파수이며, +/-는 각각 상측파대 혹은 하측파대를 나타낸다. 그리고 F_{lo} 는 앞 장에서 언급된 3 체배기의 출력 주파수이다. 이제 식 (1)로부터 YIG 발진기의 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 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.

이와 같이 결정된 주파수는 핀 다이오드 감쇠기와 AGC 회로에 의해서 일정한 전력레벨 값으로 조정되어 triplexer로 출력된다. 여기서 핀 다이오드 감쇠기는 최대 100nsec 정도의 고속 스위칭 특성을 갖는 부품을 선정해야한다. 본 설계에서는 General Microwave사의 D195 series를 사용하였다. 그리고 이 감쇠기를 제어하기 위한 AGC 회로는 그림 6과 같이 설계하였다.

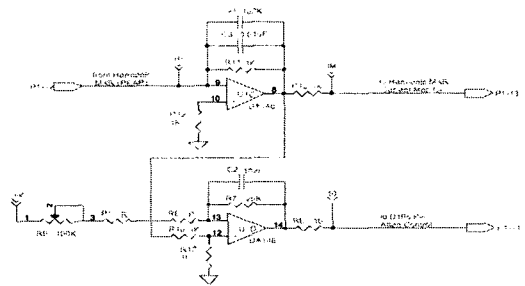


그림 6. D195 감쇠기 제어를 위한 AGC 회로

그림 5에서 triplexer로부터의 IF 신호는 증폭기와 중심주파수가 315MHz이고 대역폭이 200MHz인 대역 통과 필터를 거친 후 신호 출력의 제어를 위해 그림 7과 같이 UTL-1001 전압제어용 신호 limiter 칩을 기본으로 설계된 limiter 모듈의 입력으로 인가된다. 이 모듈에 사용된 RF 증폭기는 초단에 thin-film 고-이득 저-잡음 증폭기 2개와 thin-film bipolar 증폭기를 사용하였다.

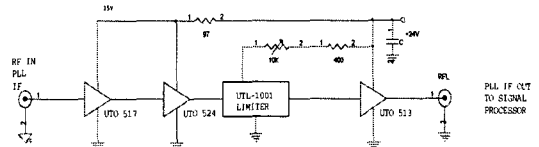


그림 7. Limiter 모듈 설계 회로

Limiter 모듈의 PLL IF 신호는 주파수 오차와 위상오차를 구하기 위한 그림 8과 같은 RF 프로세서로 입력된다. 이 RF 프로세서 모듈은 방향성 결합기, 3 way 0° 전력 분배기, 2 way 0° 전력 분배기, 위상오차 검출과 측파대 신호 검출을 위한 믹서, 및 2 way 90° 전력 분배기로 구성하였으며, 주파수 오차의 검출을

위해서 서로 길이가 다른 동축 케이블 L1과 L2와 믹서로 구성하였다. 이 모듈에서는 사용되는 부품은 Mini-Circuits 사의 제품을 사용하여 설계하였다.

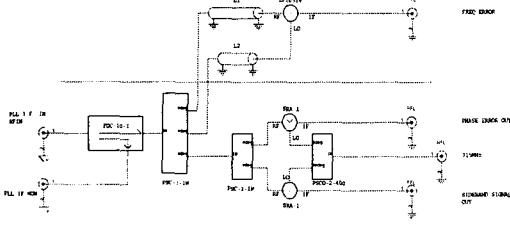


그림 8. RF 프로세서의 구성과 설계

그림 8의 RF 프로세서의 출력인 주파수와 위상의 오차는 combine된 후 그림 9와 같이 설계된 YIG Fine 신호 드라이버 회로로 입력된다. 이 출력이 최종의 YIG 발전기의 FM 단자로 입력된다.

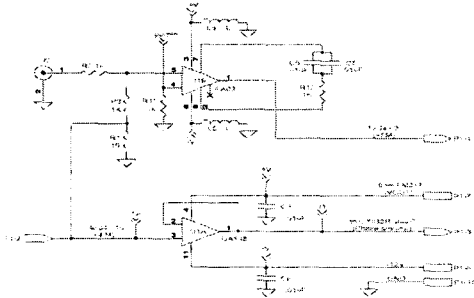


그림 9. YIG 발전기 FM 코일 드라이버 회로도

마지막으로 설계되어야 할 부분은 그림 8로부터의 주파수와 위상오차를 더하여 그림 9의 FM 코일 드라이버 회로로 보내주는 기능과 YIG 발전기의 디지털 드라이버를 제어하여 coarse 주파수를 세팅해주는 프로그램 카운터 부분, 및 그림 1에서 PLL 모듈 박스를 제어하여 PC에서 식 1과 같이 정해지는 국부발전주파수를 입력할 때 자동으로 PLL회로가 동작해서 PLL된 국부발전주파수가 3 체배기를 통해서 믹서로 입력되도록 하는 모듈의 설계이다. 이 모듈의 전체적인 구성을 그림 10에 보였다.

그림 10의 위쪽 부분이 주파수와 위상오차를 더하여 FM 코일 드라이버 회로로 보내주는 회로이며, 아래쪽 부분은 자동 혹은 수동으로 YIG 발전기의 디지털 드라이버에 12비트(D0 - D11)의 신호를 UP/DOWN 카운터를 통해 보내는 기능을 하는 회로이다. 데이터 라인의 구성은 제어 PC로 입력되는 PLL 제어기의 상태신호, 디지털 YIG 드라이버로 입력되는 12bit의 데이터 및 제어 PC로부터 PLL 제어를 제어하기 위한 제어명령 데이터들로 구성하였다.

이 회로설계에는 부가적으로 국부발전기의 PLL 상태를 표시해주고, 현재 YIG 발전기의 발전주파수와 고조파 믹서의 전류를 모니터링할 수 있도록 하여 전체 PLL 시스템의 유지보수가 쉽도록 하였다.

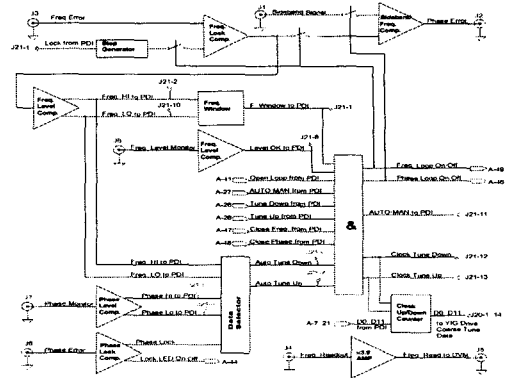


그림 10. YIG 발전기의 fine 및 coarse 코일 구동을 위한 블록선도

IV. 결론

본 논문에서는 86 ~ 115GHz 밀리미터파 대역 우주전파 수신기의 국부발전시스템을 26.5 ~ 40GHz 까지 발전하는 YIG 발전기를 기본으로 하는 발전부와 자동으로 PC에 의해서 제어될 수 있는 PLL 시스템을 설계하였다. 본 논문에서 설계된 국부발전 시스템은 GUNN 발전기를 기본으로 하는 시스템보다 주파수 및 위상 안정도 면에서 이론적으로 우수하므로 특별히 안정된 국부발전주파수를 요구하는 SIS 수신시스템에 훨씬 유리한 시스템이다. 이와 같은 안정된 국부발전주파수의 입력은 관측 데이터의 질을 향상시켜 극히 미약한 신호를 관측하는데 많은 기여를 할 것이다. 그리고 국부발전주파수 튜닝 및 PLL이 자동화됨으로서 전체 우주전파 수신시스템의 튜닝 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

참고문헌

- [1] Emerson, D. T. & Payne, J. M., "Multi-Feed Systems for Radio Telescopes", A.S.P. Con. Series, San Francisco, CA, p.189-257, 1995
- [2] 한석태, 이창훈, 외, "YIG 발전기를 이용한 100GHz대 수신기의 국부발전부 제작연구", 과학기술처, 1992
- [3] Rohlf, K., "Tools of Radio Astronomy", Springer-Verlag Press, p.132, 1986
- [4] 민영철, 이창훈, 외, "천파천문연구 및 운영보고서", 한국천문연구원, 2002
- [5] Erickson, N.R., IEEE-MTTS Microwave Sym., Dallas, p.1301, 1990

[Note] This work was supported by Strategic R&D program of KISTEP.