

VLBI용 Q-band HEMT 수신기 개발
제도홍[†], 한석태, 김태성, 김현주, 김광동, 정문희, 이창훈, 노덕규
한국천문연구원 전파천문연구부

THE DEVELOPMENT OF Q-BAND HEMT RECEIVER FOR VLBI

**Do-Heung Je[†], Seog-Tae Han, Tae-Sung Kim, Hyun-Joo Kim,
Kang-Dong Kim, Moon-Hee Chung, Chang-Hoon Lee, and Duk-Goo Roh**
Division of Radio Astronomy, Korea Astronomy Observatory
36-1 Whaamdong, Yousunggu, Daejeon Korea, 305-348
E-mail: dhje@trao.re.kr

(Received October 10, 2003; Accepted December 24, 2003)

요 약

VLBI(Very Long Baseline Interferometer)에서 요구되는 고위상 안정도를 갖는 국부발진기를 사용하여 초저잡음 Q-band 우주 전파 수신기를 개발하였다. 냉각용 HEMT 증폭기를 사용하여, 관측 주파수 범위인 42GHz에서 44GHz까지의 대역폭에서는 65K 정도의 수신기 잡음 온도를 얻었으며, 39GHz - 46GHz의 대역폭에서는 100K 이하의 잡음 온도를 얻었다. SiO 분자선 관측이 주된 목적이며, 이 대역에서 얻어진 수신기 잡음온도는 독일·일본 전파천문대에서 개발된 수신기보다 우수한 성능을 나타낸다.

ABSTRACT

A ultra low noise Q-band HEMT receiver for VLBI has been developed using a local oscillator with a very high phase stability. The performance of receiver was verified by comparison with receivers which were developed at the other countries. The receiver noise temperature shows 65 K in the frequency range from 42 GHz to 44 GHz, less than 100 K from 39 GHz to 46 GHz, respectively. A receiver noise temperature at SiO major line of 43GHz which will be mainly observed by using this receiver has been optimized.

Keywords: low noise receiver, HEMT, VLBI

1. 서 론

한국천문연구원은 국내의 3개 관측소에 지름 20m의 첨단 밀리미터파 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 전용 전파망원경을 설치하여 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network)을 건설하는 사업을 추진하고 있다. 이러한 VLBI 시스템에 사용되는 우주전파 수신기는 일반적으로 천체들의 전파 강도가 0.1~10Jy인 매우 미약한 전파를 관측하여야 한다. 그러므로 단일 전파 망원경에 사용되는 우주전파 수신기보다 더욱 고감도·고안정도의 첨단 수신기가 필요하게 된다.

[†]corresponding author

100GHz 대역과 150GHz 대역의 수신기는 냉각 HEMT(High Electron Mobility Transistor)에 비하여 SIS(Superconductor Insulator Superconductor) 믹서가 우수한 잡음특성을 가지고 있으므로 주로 SIS 믹서를 이용하여 수신기를 제작한다. 그러나 40GHz 대역의 SIS 믹서는 양자 잡음온도가 매우 커서 이 대역에서는 주로 냉각 HEMT 증폭기를 이용하여 제작하고 있다.

미국 국립전파천문대(NRAO)에서는 1990년대 초반부터 VLBI 관측용 수신기 개발을 수행하고 있으며, 현재 세계적인 기술을 주도해 나가고 있다. NRAO에서는 독자적으로 밀리미터파 대역용 냉각용 저잡음 HEMT 증폭기를 개발하여 수신기를 자체 제작하고 있다. 최근 NRAO에서는 100GHz 대역용 초저잡음 HEMT 증폭기의 잡음온도가 약 50K 정도가 되는 매우 우수한 특성을 갖는 증폭기를 개발하였으며(Pospieszalski et al. 1997), 이 잡음온도는 SIS 믹서의 잡음온도와 상응하는 저잡음 특성을 가지고 있다. 또한 150GHz 대역용 HEMT 증폭기를 개발하고자 연구를 수행하고 있으며, 향후 10년 후에는 우수한 특성을 갖는 HEMT 소자의 개발에 힘입어 230GHz 대역까지도 저잡음 증폭기 개발이 가능한 추세로 발전될 것으로 전망된다.

유럽은 영국과 독일 전파천문대에서 밀리미터파 대역용 냉각용 저잡음 HEMT 증폭기를 개발하고 있으나, HEMT MMIC 모듈은 미국회사로부터 구입하여 수신기 제작에 활용하고 있다. 일본은 국립전파천문대에서 직접 HEMT 증폭기와 수신기를 제작하지 않고 사기업체로부터 제작을 의뢰하여 사용하고 있으나, 수신기 잡음온도와 성능은 미국과 유럽에 크게 못 미치는 실정이다. 호주는 1992년부터 VLBI 관측용 수신기로 마이크로파 대역 수신기를 자체적으로 제작하고 있었으나, 최근에는 밀리미터파 대역의 HEMT 수신기를 개발하고자 연구를 수행하고 있다.

따라서 한국우주전파관측망에 활용하고자 냉각용 HEMT 증폭기를 사용하여 Q-band VLBI용 수신기를 설계 및 제작하고, 성능을 측정하였다. 최종적으로 제작된 수신기의 잡음온도를 측정하여 기존에 개발된 수신기의 잡음온도와 비교하였다.

2. 수신기 시스템의 설계 및 제작

개발하려는 수신기는 한국우주전파관측망(KVN)에 활용할 수 있도록 KVN Q-band 수신기 규격에 따라, 중심 주파수 43GHz에서 2GHz의 대역폭을 갖고, 좌우원편파 동시 관측이 가능하도록 하였다. 예산상의 고려로 좌원편파만을 수신할 수 있는 시스템을 구성하였으며, 추후 우원편파의 수신이 가능하도록 하였다. 1차 중간주파수는 KVN 규격에 맞추어 8.5GHz로 결정되었다. 현재 KVN이 완성되지 않았기 때문에, 대덕전파망원경에서 시험 관측을 할 수 있도록 1.4GHz 대역 신호로의 변환을 위한 2차 중간주파수 변환부와, 한일간의 공동 VLBI 연구에 활용하기 위한 800MHz 대역 신호로의 변환부를 구성하였다. 각 변환부를 포함한 전체 시스템 구성은 그림 1과 같다.

전체 수신기 시스템은, 사용 주파수 대역에서 최소의 잡음 온도를 가지는 냉각용 HEMT 증폭기와 고위상 안정도를 갖는 국부발진부로 구성된 Front-end 및 1차 중간주파수 변환부, 2차 중간주파수 변환부, 기저대역 변환부로 구성된다.

2.1 Front-end 및 1차 중간주파수 변환부

Front-end는 수신기의 잡음 온도를 결정하는 부분이기 때문에 손실이 최소가 되도록 설계되어야 한다. 따라서 휘드혼(feedhorn)을 제외한 다른 소자들은 냉각 챔버 내부에 설치된다. Front-end와 1차 중간주파수 변환부를 설계하여 그림 2에 나타내었다. Front-end의 잡음 온도는 표 1과 같이 중심

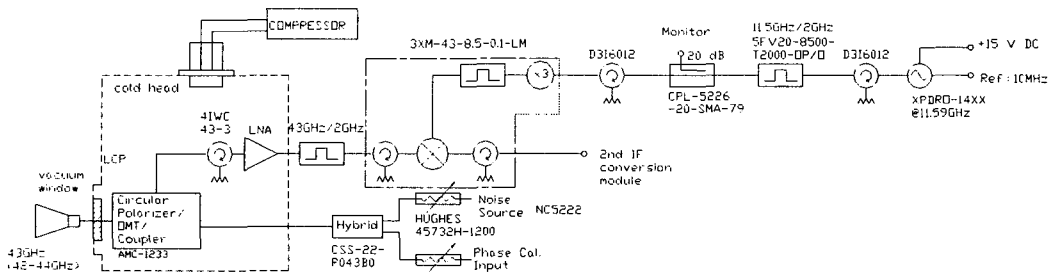


그림 2. Front-end 및 1차 중간주파수 변환부 구성도.

표 1. Front-end의 전력 및 잡음 온도 계산.

소자	G[dB]	G_{tot} [dB]	T_{ph} [K]	ΔT_{rx} [K]	T_{rx} [K]	T_{sys} [K]	Δf [GHz]	P_{out} [dBm]
휘드혼	-0.1	-0.1	295	7	7	37	7	-84.57
허큘러스 필름	-0.05	-0.15	295	3.36	10.36	40.36	7	-84.24
열 차단부	-0.25	-0.4	20	1.23	11.59	41.59	7	-84.36
편파 분리기	-0.15	-0.55	20	0.77	12.36	42.36	7	-84.43
아이슬레이터	-0.3	-0.85	20	1.65	14.01	44.01	7	-84.56
90°-bend도파관	-0.1	-0.95	20	0.57	14.58	44.58	7	-84.61
HEMT 증폭기	32	31.05	20	31.1	45.68	75.68	7	-50.31
Flexguide	-0.3	30.75	20	0.0011	45.68	75.68	7	-50.61
SS 도파관	-0.6	30.15	295	0.036	45.72	75.72	7	-51.20

주파수에서 50K의 잡음 온도가 얻어지도록 하였다. HEMT 증폭기의 이득이 30dB 이상이기 때문에 중간주파수 변환부는 수신기 잡음 온도에 거의 영향을 미치지 않는다. 표 1에서 G는 각 소자의 이득, G_{tot} 는 각 소자까지의 총이득, T_{ph} 는 각 소자의 실제 온도, ΔT_{rx} 는 각 소자에 의한 수신기 잡음 온도의 증가분, T_{rx} 는 각 소자까지의 수신기 잡음 온도, T_{sys} 는 안테나에 입력되는 잡음원의 등가 온도가 30K일 때의 각 소자까지의 잡음 온도, Δf 는 주파수 대역폭, P_{out} 는 각 소자의 출력 전력을 나타낸다. 표 1에 나타난 7GHz의 대역폭은 1차 중간주파수 변환부에 놓이는 대역통과필터에 의해 2GHz의 대역폭으로 제한된다.

좌우원편파를 동시에 관측하기 위해 수신기의 앞단에 휘드혼과 편파분리기를 설치하였다. Front-end에서 가장 앞에 놓이는 휘드혼은 대덕전파망원경의 빔 파라미터에 맞게 설계한 후, Thomas Keating 사에 의뢰하여 주문 제작하였다. 휘드혼의 형태는 가우시안 빔 특성과 저 부엽특성 및 E-면과 H-면의 대칭 복사특성이 우수한 켈러게이트 휘드혼으로 결정하였다. 휘드혼의 길이는 42cm이고, 직경이 10cm이며 혼에서의 반사 손실이 최소가 되도록 설계하였다. 휘드혼과 챔버 사이에는 허큘러스(hercules) 필름을 설치하여 챔버의 진공이 유지되도록 하였다. 상온의 휘드혼과 냉각 챔버의 20K단에 연결되는 편파분리기 사이에는 NRAO에서 제안된 틸새(gapped) 도파관 구조의 열 차단부(Norrod & Masterman 1991)를 설치하여 열 전달이 최소가 되도록 하였다.

설계된 시스템에 사용된 편파분리기 모듈은 편파기(polarizer), 직교모드변환기(ortho-mode transducer), 방향성결합기(directional coupler) 등의 기능을 동시에 갖는 Atlantic Microwave사의 AMC

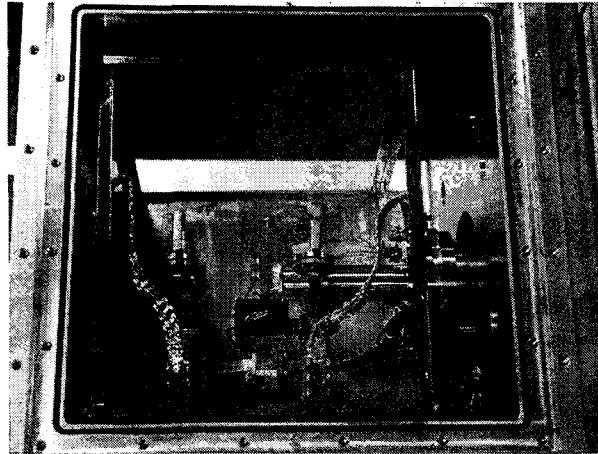


그림 3. 제작된 front-end.



그림 4. 제작된 국부발진부와 1차 중간주파수 변환부.

1233 모델을 사용하였다. 휘드혼에서 나온 신호는 먼저 편파분리기 모듈의 전단에 있는 편파기와 직교모드변환기를 거쳐서 좌우원편파 성분이 직교 모드로 변환되어 2개의 사각 도파관으로 진행하게 된다. 편파기의 후단에는 방향성결합기가 설치되어 있어서, 분리된 편파 성분과 함께 잡음 발생기의 출력 신호나 위상 교정 신호를 수신기 입력단에 주입시킬 수 있게 하였다.

편파 분리기와 HEMT 증폭기 사이에 아이솔레이터를 두어 두 부품의 입출력 단자의 임피던스 부정합에 의하여 발생하는 정재파가 최소가 되도록 하였다. 사용되는 냉각용 초단 저잡음 증폭기는 25K의 잡음온도 특성을 갖으며, 이득이 약 32dB 정도인 InP를 사용한 HEMT 증폭기이다. 제작된 수신기의 냉각 챔버는 그림 3과 같다. 냉각 챔버는 알루미늄 6061-T6를 사용하여, 340 x 340 x 340mm의 크기로 제작되었으며, 내부에는 복사 차폐부가 설치되었다. HEMT 증폭기의 바이어스 상태, 냉각 챔버 내부의 온도, 진공 정도를 모니터 할 수 있도록 각각의 센서와 모니터를 설치하였다. 초저온을 얻기 위해 1단계 온도가 70K이고, 2단계 온도가 20K인 CTI-350CP 냉각기를 사용하였다.

HEMT 증폭기의 출력 신호는 스테인리스 스틸 도파관을 거쳐서, 진공용 도파관 플랜지에 연결되어 챔버 밖으로 나오게 된다. 챔버에서 나온 신호는 중심주파수가 43GHz이고 대역폭이 2GHz인

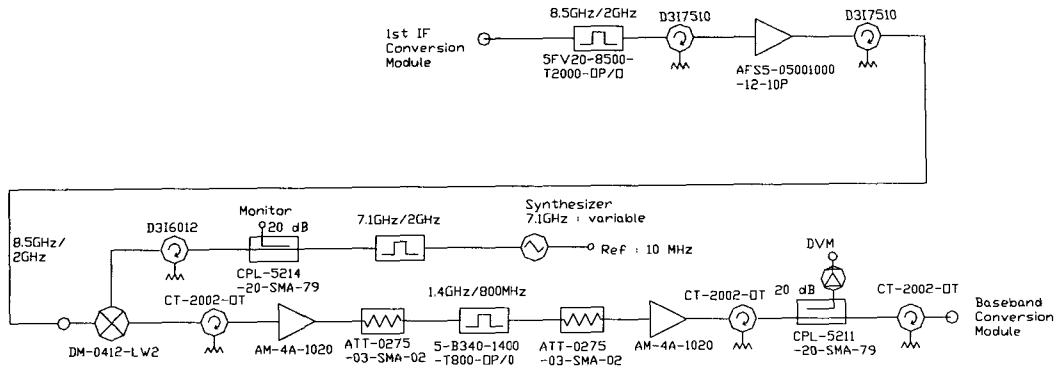


그림 5. 2차 중간주파수 변환부 구성도.

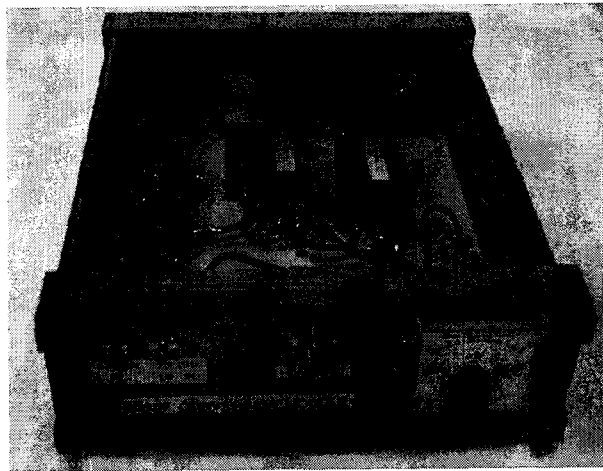


그림 6. 제작된 2차 중간주파수 변환부.

대역 통과 필터를 통과하게 된다. 43GHz 대역의 신호를 8.5GHz 대역의 1차 중간주파수 신호로 변환하기 위해 주파수 혼합기 모듈을 필터의 출력에 두었다. 이 주파수 혼합기 모듈은 41-45GHz 대역에서 7-8dB의 변환 손실을 갖는다.

주파수 혼합기의 국부 발진 신호의 주파수는 관측 주파수가 USB(Upper Side Band)가 되도록 선택되었다. 1차 중간주파수 신호를 만들기 위해 필요한 34.5GHz의 국부 발진 신호원은 위상안정도가 우수한 11.5GHz의 PDRO(Phase-locked Dielectric Resonator Oscillator)와 주파수 혼합기 모듈에 있는 3체배기를 사용하였다. 국부발진기는 발진 주파수에서 1kHz 떨어진 주파수에서 -90dBc/Hz의 위상잡음의 특성을 갖는다. PDRO의 출력에서 발생하는 고조파 성분을 제거하기 위하여 중심주파수가 11.5GHz이고 대역폭이 2GHz인 대역 통과 필터를 사용하였다. 주파수 혼합기 모듈의 3체배기의 출력에도 34.5GHz의 중심 주파수를 갖고 대역폭이 2GHz인 대역통과 필터를 설치하여 체배기에서 발생된 고조파 성분들의 영향이 최소가 되게 하였다. 제작된 국부발진부와 1차 중간주파수 변환부는 그림 4와 같다.

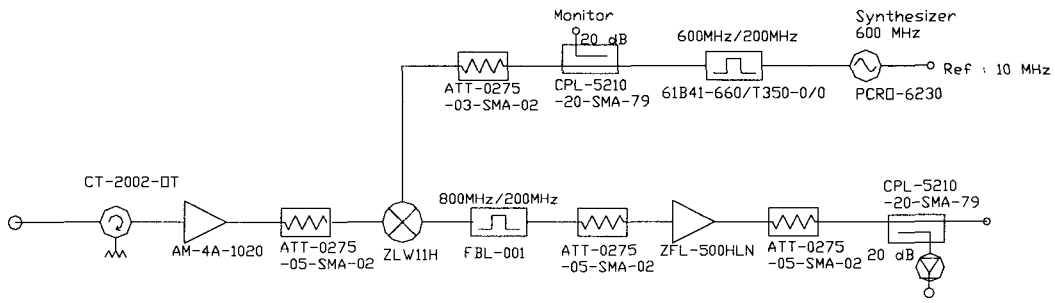


그림 7. 기저대역 변환부 구성도.



그림 8. 제작된 기저대역 변환부.

2.2. 2차 중간주파수 변환부

제작된 Front-end와 1차 중간주파수 변환부를 대덕전파천문대의 필터뱅크에 연결하기 위해서는 8.5GHz의 1차 중간주파수 신호를 1.4GHz의 2차 중간주파수 신호로 변환시켜야 한다. 8.5GHz 대역에 39dB의 이득을 갖고, 잡음지수가 대략 1dB인 저잡음 고이득 증폭기를 사용하여, 2차 중간주파수 변환부의 잡음온도에 영향을 최소화 하도록 하였다. 8.5GHz 대역 증폭기의 출력 전력은 대략 -25dBm이다. 1.4GHz 대역에서는, 주파수 혼합기의 변환 손실과 정합회로의 손실을 보상하고 기저대역 변환부에 충분한 전력을 공급할 수 있도록, 40dB의 이득을 갖는 두 개의 증폭기를 고려하였다. 하지만, 측정시 과도한 이득으로 인한 출력 전력의 포화 현상이 발생하여 실제에서는 한 개의 증폭기만을 사용하고, 10dB의 감쇄기를 추가함으로써 2차 중간주파수부의 출력은 대략 -15dBm이 되었다. 7.1GHz 국부발진기로는 지구 자전을 고려한 주파수 가변을 위하여 에이질런트사의 83650B 신호원을 사용하였다. 2차 중간주파수 변환부의 구성도와 제작품을 각각 그림 5와 6에 나타내었다. 제작된 변환부의 전면에는 2차 중간주파수 신호를 모니터링하기 위한 전압계를 검출기와 함께 설치하였다.

2.3 기저대역 변환부

기저대역 변환부는 일본과의 공동 VLBI 관측을 위해, 관측 신호를 샘플러 입력으로 사용되는

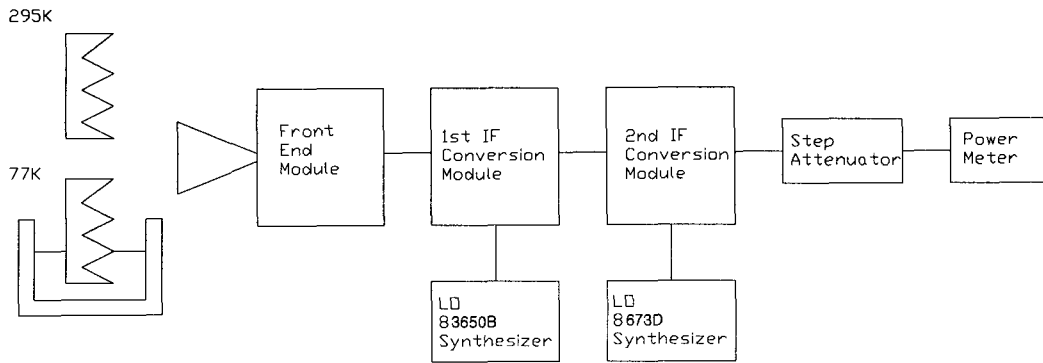


그림 9. 수신기 잡음 온도 측정을 위한 구성도.

800MHz 대역 신호로 전환하고 샘플러에서 요구하는 전력의 크기를 얻기 위한 것이다. 각 증폭기와 주파수 혼합기의 안정된 선형성을 위하여 1dB 포화점에 비해서 충분히 작은 출력 전력이 발생하도록 해야 한다(Rawson et al. 1992). 2차 중간주파수 변환부는 안테나의 수신기실에 설치되지만 기저대역 변환부는 관측실에 설치되기 때문에, 두 변환부를 연결하는 긴 동축선의 손실을 보상하기 위해 주파수 혼합기 앞단에 40dB의 이득을 갖는 증폭기가 놓았다. 주파수 혼합기 뒷단에는 30dB의 이득을 갖는 증폭기를 두어 주파수 혼합기와 정합을 위한 감쇄기의 손실을 보상하도록 하였다. 기저대역 변환을 위한 600MHz 국부발진기로, 발진 주파수에서 1kHz 떨어진 주파수에서 -90dBc/Hz 의 잡음 특성을 갖는 CTI사의 PCRO-6230 모델을 사용하였다. 설계된 구성도와 제작품은 각각 그림 7과 8에 제시하였다. 제작된 기저대역 변환부의 전면에는 기저대역의 출력 신호를 모니터링하기 위한 전압계와 600MHz 국부발진기의 출력을 모니터링하기 위한 N형 커넥터를 설치하였다.

3. 수신기 시스템의 측정

완성된 전체 수신기 시스템의 성능을 측정하기 위해, 먼저 냉각 챔버의 각 단계의 온도를 확인하였다. 각 소자를 냉각기의 각 단계에 설치하였을 때의 온도는 제 1단계의 경우, 50K 이하로 나타났으나, 제 2단계의 경우, 39K 정도로, 예상 온도보다 19K 높았다. 온도의 상승은 제 2단계 온도의 소자들이 설치되는 지지대의 두께를 얇게 만들어, 냉각기부터 HEMT 증폭기 사이의 열전달이 제대로 이루어지지 않은 것이다. 지지대의 두께를 0.5mm에서 1mm로 바꿈으로써, 제 2단계의 온도가 5K 정도 감소하였다.

수신기 시스템의 잡음 온도 측정은, 그림 9와 같이 가장 보편적으로 사용하고 있는 Y-인자 방법(Pozar 1990)에 의하여 수행하였다. Front-end와 1차 중간주파수 변환부, 2차 중간주파수 변환부를 연결하고, 출력부에 전력계(power meter)를 사용하여 출력 전력을 측정하였다. 원래의 설계에서는 11.5GHz의 PDRO를 사용하도록 되었으나, 더 넓은 주파수 대역에서 수신기 잡음 온도를 측정하기 위해, 설계할 때 제시된 PDRO 대신에 에이질런트사의 83650B 신호원을 제1 중간주파수를 위한 국부발진기로 사용하여, 국부발진기의 주파수를 가변할 수 있게 하였다. 또한 1차 중간주파수 변환부에 설치되는 43GHz의 중심 주파수를 갖는 대역 통과 필터를 제거하였고, 제2 중간주파수를 위한

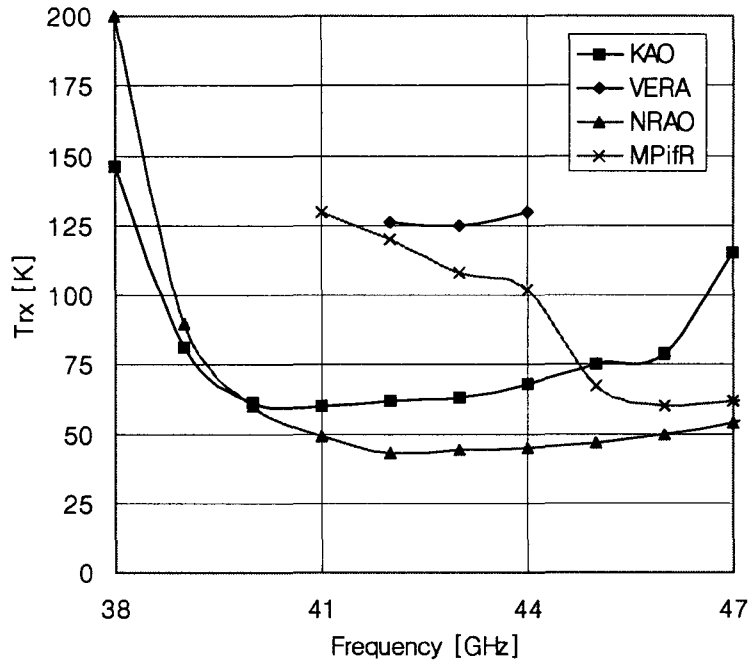


그림 10. 개발된 수신기의 잡음 온도와 외국 전파천 문대에서 개발된 Q-band 수신기의 잡음 온도와 비교.

국부발진기도 에이질런트사의 8673D로 대체하였다.

관측 주파수 범위인 42GHz에서 44GHz까지의 대역폭에서는 그림 10의 KAO로 표시된 그래프에 서처럼 65K 정도의 잡음 온도를 나타내었다. 이는 2장에서 예상한 수신기 잡음 온도인 50K보다 15K 높은 값이다. 39GHz-46GHz의 대역폭에서는 100K 이하의 잡음 온도를 나타낸다. 냉각기의 제 2단계 지지대를 포함한 열전달을 개선하여, 더 낮은 수신기 잡음 온도를 얻을 수 있을 것이다.

개발된 수신기의 잡음 온도(KAO)와 외국 전파 천파천문대에서 개발된 같은 주파수 대역 수신기의 잡음 온도를 비교하여 그림 10에 보였다. 미국 NRAO의 수신기 잡음온도는 EVLA(Expanded Very Long Array)를 위해 개발된 여러 수신기들의 잡음 온도의 평균값이고, 일본 국립천문대의 VERA 시스템용 수신기와 독일 전파천문대(MPiFR)의 수신기는 각각의 망원경에서 사용중인 수신기의 잡음 온도를 나타내었다. 독일 전파천문대의 수신기 잡음온도는 45GHz 이상과 이하의 주파수 대역에서 각각 다른 수신기를 사용하기 때문에 45GHz에서 급격한 차이를 보인다. 제작된 수신기의 잡음온도는 NRAO의 수신기를 제외한 독일·일본 국립천문대에서 제작된 수신기에 비해서, 특히 일본의 VERA 수신기에 비해서 절반 정도의 잡음 온도를 얻어 매우 우수한 성능을 나타냈다.

4. 결 론

냉각용 저잡음 HEMT 증폭기를 사용하여 Q-band VLBI용 수신기를 설계 및 제작하였다. 전체 수신기 시스템은 고위상 안정도를 갖는 국부발진부, HEMT 증폭기를 포함하는 Front-end와 3개의 주파수 변환부로 구성되었다. 제작된 수신기의 잡음온도를 측정하여 기존에 개발된 수신기의 잡음

온도와 비교하여 수신기의 성능을 검증하였다. 관측 주파수 범위인 42GHz에서 44GHz까지의 대역폭에서는 65K 정도의 잡음 온도를 나타내고, 39GHz-46GHz의 대역폭에서는 100K 이하의 잡음 온도를 나타내었다. SiO 분자선 관측 대역에서의 수신기 잡음온도는 독일·일본 전파천문대에서 개발된 수신기 보다 우수한 성능을 나타냈다. 40GHz 대역 우주전파 수신기를 자체 제작함으로써 우선 향후 건설될 KVN용 수신기로 활용함은 물론, 제작하는 과정에서 얻어지는 여러 가지 기술력을 VLBI에서 요구되는 각종 수신기 제작 연구에도 활용하고자 한다.

참고문헌

- Pospieszalski, M. W., Lakatos, W. J., & Wollack, E. 1997, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Denver, p.1285
- Pozar, D. M. 1990, Microwave Engineering (Reading: Addison-Wesley), p.588
- Norrod, R., & Masterman, M. 1991, NRAO VLBA Technical Report No.11, 32
- Rawson, S. A., McDonald, P. C., & Edwards, M. W. 1992, ESA/ESOC Contract No. 9799/92/D/DK(SC),