

전파 망원경 수신기 전단부용 극저온 22 GHz 대역 저잡음 증폭기 모듈 설계 및 제작

Design and Fabrication of the Cryogenically Cooled LNA Module for Radio Telescope Receiver Front-End

오현석 · 이경임** · 양승식 · 염경환 · 제도흥* · 한석태*

Hyun-Seok Oh · Kyung-Im Lee · Seong-Sik Yang · Kyung-Wan Yeom · Do-Heung Je · Seog-Tae Han

요 약

본 논문에서는 pHEMT(pseudo-morphic High Electron Mobility Transistor)로 구성된 저잡음 증폭기 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)를 이용하여 극저온에서 동작하는 전파 망원경 수신기 전단부용 22 GHz 대역 저잡음 증폭기 모듈을 설계, 제작하였다. pHEMT MMIC 선정에는, 극저온에서의 동작이 입증된 pHEMT 공정을 사용하여 제작된 저잡음 증폭기 MMIC를 선택하였다. 선정된 2개의 MMIC는 박막(thin film) 세라믹 기판에 장착하여 모듈화 하였다. 모듈화 시 하우징(housing)과 캐리어(carrier) 사이의 간극을 제거하고 전파 흡수체를 사용하여 불필요한 구조에 의한 발진을 제거하였다. 또한 커넥터와 기판 사이의 부정합으로 나타나는 잡음 및 이득의 열화를 리본 조정을 통해 개선시켜 상온에서 최적의 성능을 가지도록 했다. 제작된 증폭기 모듈은 상온에서 21.5~23.5 GHz 대역 내 이득 35 dB±1 dB, 잡음지수 2.37~2.57 dB를 보였다. 제작된 증폭기는 헬륨 냉각기를 이용하여 15 °K로 냉각 후 측정 결과, 대역 내에서 이득 35 dB 이상, 잡음온도 28~37 °K를 얻었다.

Abstract

In this paper, the cryogenically cooled low noise amplifier module for radio telescope receiver front-end using pHEMT MMIC is designed and fabricated. In the selection of MMIC, the MMIC fabricated with the pHEMTs providing successful cryogenic operation are chosen. They are mounted in the housing using the thin film substrate. In the design of the housing, the absorber and the elimination of the gap between the carrier and the housing as well removed the unnecessary oscillations by its structure. The mismatch is improved by ribbon-tuning to provide the best performance at room temperature. The fabricated module shows the gain of 35 dB±1 dB and the noise figure of 2.37~2.57 dB at room temperature over 21.5~23.5 GHz. In the cryogenic temperature of 15 °K cooled by He gas, the measured gain was above 35 dB and flatness ±2 dB and the noise temperatures of 28~37 °K.

Key words : Cryogenic LNA, pHEMT MMIC LNA Module

I. 서 론

천문 관측 장비인 전파 망원경은 우주의 전파 영역을 관측하기 위하여 전 주파수 대역의 연속 스펙

트럼과 특정 주파수의 선스펙트럼(line spectrum) 측정을 대상으로 한다. 그 중 주파수 22 GHz 대역 선스펙트럼에서는 H₂O 메이저(MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)에 의한

「본 연구는 충남대학교 전자파기술연구소를 통한 한국천문연구원의 연구비 지원으로 수행되었음.」

충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*한국천문연구원 KVN 사업본부(Korea Astronomy & Space Institute KVN Group)

**LG전자 MC 단말기 연구소(LG MC Company Electronics Handset Research Center)

· 논문 번호 : 20051109-125

· 수정완료일자 : 2006년 2월 8일

우주 내 에너지 방출이 관측된다. H₂O 메이저 주파수 대역의 선스펙트럼의 관측은 새로이 탄생한 별이나 외부 은하 내의 원시 별의 탄생을 예측하거나 외부 천체 위치 측정(astrometry)에 유용하게 활용되고 있다.

우주로부터 수신되는 전파는 그 세기가 매우 미약하여, 이러한 전파를 관측하기 위해 전파 천문 장비인 전파 망원경은 직경이 큰 안테나와 극히 낮은 잡음지수를 갖는 수신기를 필요로 한다. 그러나 상온에서는 전파 천문 수신기 전단부에 적합한 초저잡음 증폭기를 구현하는 것은 불가능하며, 이를 위해 증폭기를 냉각 용기(cryogenic dewar)내에 설치하여 15 °K의 극저온에서 동작시켜, 증폭기의 잡음지수를 최소로 줄여 구현하게 된다.

현재 22 GHz 대역에서 가장 낮은 잡음지수를 갖는 소자로는 FET를 사용한 냉각 증폭기와 냉각 메이저 증폭기(cooled maser amplifier)등이 있다. 냉각 메이저 증폭기는 좁은 대역폭과 진동에 대한 취약성, 비싼 가격 등의 단점을 가져, 22 GHz 대역에서는 냉각 FET 또는 이것을 개선한 HEMT 또는 pHEMT 증폭기가 전단부 저잡음 증폭기로 대체되고 있다^[1].

최근까지 이러한 극저온 저잡음 증폭기는 개별 소자를 이용 구성 개발되었고^{[2]~[4]}, 회로적으로는 원하는 극저온에서 개별소자의 잡음 파라미터를 추출하고 이를 이용해 일반적으로 알려진 저잡음 증폭기 설계 절차에 따라 설계하는 방법이다. 그러나 극저온에서 잡음 파라미터의 추출의 어려움 때문에, 종종 증폭소자들의 상온에서의 잡음 파라미터를 이용 저잡음 증폭기를 구성하고 극저온에서의 동작을 측정하게 된다. FET로 구성된 모듈의 22 GHz에서 극저온 잡음온도는 51 °K^[2]였으며, HEMT 모듈^[4]의 경우 32 GHz에서 약 40~50 °K의 잡음온도를 얻고 있다. 또한 이들의 이득은 보통 3단 이하로 구성, 냉각시 얻은 이득은 30 dB^[4] 미만으로 전파 망원경에 요구되는 30 dB 이상의 이득을 만족시키기 위해서는, 보다 많은 소자를 요구하게 된다.

그러나 최근 전파 천문에서는 여러 장소에 전파 망원경을 설치 이를 간섭계(interferometer)로 사용하여 관측의 범위를 확장하는 데, 각 전파 망원경은 동일한 수신부의 잡음 특성이 요구되어진다. 이에 수신부의 잡음 특성을 좌우하는 전단부에 개별 소자를 사용한 저잡음 증폭기의 경우 최대의 성능을 얻

을 수 있으나, 주파수가 높아질 경우 조립 등의 문제를 야기하여 동일한 성능 유지를 어렵게 한다. 또한 이득이 필요할 경우 3단 이상의 다단으로 구성하게 되는데 이는 제작시 대역 내 응답의 평탄성을 유지하는데 어려움을 주게 된다. 또한 반도체 소자의 진화에 따른 성능 업그레이드와 유지, 보수를 어렵게 한다. 이러한 점을 고려 최근 일본 Nitsuki 사는^[5] MMIC를 이용한 극저온 저잡음 증폭기를 개발, 이를 전파 천문용으로 공급하고 있다.

본 논문에서는 이러한 면을 고려 상용 저잡음 증폭기 pHEMT 2단의 MMIC를 사용 구성하여 극저온 저잡음 증폭기 모듈을 구성하였다. 이때 극저온 냉각을 고려하지 않은 pHEMT 저잡음 증폭기 MMIC들은 극저온에서 DC 특성의 붕괴로 가끔 150 °K 아래의 냉각 온도에서는 이상 동작을 하므로^{[2],[4]} 극저온에서 동작이 검증된 개별 소자를 사용한 MMIC를 선정하였다. 또한 고 이득으로 인해 모듈화시 발전의 가능성이 있어 이를 규명하여 발전을 효율적으로 제거할 수 있게 모듈을 설계, 제작하였다. 제작된 모듈은 22 GHz에서 냉각시 30 dB 이상의 이득, 잡음 온도 약 40 °K로 이득은 30 dB 이상이며 잡음 온도 면에서는 개별 소자에 준한 성능을 보인다.

이와 병행하여 제작된 증폭기의 냉각 상태의 잡음지수를 평가하기 위해서는 극히 낮은 잡음 온도를 갖는 모듈의 잡음 평가 방법이 필요하다. 본 논문에서 제작된 증폭기의 냉각 상태의 잡음지수를 평가하기 위해 측정이 간편한 잡음지수 분석기(noise figure analyzer)^[6]를 사용했으며, 냉각 용기 내의 증폭기의 잡음지수를 추출하기 위해 측정값을 교정(calibration)을 하였다. 교정을 위해 냉각 용기 내의 잡음이 매우 적고 이득이 없는 전치 부품들의 기여를 빼내는 동시에 냉각감쇄기법^{[7]~[9]}을 이용하여 기존의 방법과 동일한 결과를 보다 간편하게 얻을 수 있었다. 본 논문의 측정 방법을 평가하기 위해 일본 Nitsuki사에서 재측정하였으며 그 결과가 동일한 것을 확인하였다.

II. 증폭기 모듈 설계

2-1 극저온 증폭기용 pHEMT MMIC 선정

극저온 동작하는 저잡음 증폭기 모듈 구성은 개별

소자(discrete device)를 사용하는 방법과 MMIC화된 소자를 사용하는 방법이 가능하다. 개별 소자를 사용할 경우 저잡음을 얻기 위한 정합 회로와 DC bias 회로를 설계하여 소자의 최소 잡음을 구현하는 장점을 얻을 수 있으나 주파수가 높아질 경우 특히 밀리미터파에서는 정밀한 조립을 요하며 조립 시 발생하는 기생 성분(parasitic)으로 인해 조정(tuning)문제를 야기한다. 극저온 상태 또한 여전히 미지의 상태가 되어 재조정 문제 등이 우려된다. 반면 pHEMT를 사용한 MMIC의 경우 개별 소자로 얻을 수 있는 최소 잡음지수보다 다소 열화된 잡음지수를 갖는 단점이 있으나, 상온에서는 이미 잡음지수가 검증된 상태이고 다수의 모듈에 대해 조정의 문제를 고려할 때 장점이 있다. 따라서 극저온 동작 여부를 문제시하는 본 논문에서는 이러한 개별 소자를 사용한 것보다 문제 발생의 여지가 적은 pHEMT로 구성된 MMIC를 사용하였다.

먼저 저잡음 증폭기 MMIC의 상온에서 잡음지수는 극저온에서 잡음지수와 밀접한 관계가 있는데 15 °K에서 수신기 전단부 최대 허용 잡음온도가 50 °K이기 때문에 이를 고려 상온에서 잡음지수를 선정하여야 한다. 이에 대해 이론적으로 정확히 알려진 바가 없어 그림 1과 같은 참고문헌^[4]을 참조하여 결정할 수 있었다. 즉 주파수 32 GHz, 상온에서 동작하는 저잡음 증폭기가 3 dB(잡음온도 298 °K)이하의 잡음지수를 가질 경우 극저온 냉각 시 원하는 목표인 50 °K를 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 상온

에서 3 dB의 잡음지수를 갖는 MMIC를 선정 대상으로 삼았다.

두 번째로 pHEMT의 경우 극저온에서의 동작시 DC 특성의 붕괴로 150 °K 아래의 냉각온도에서는 이상 동작을 하기도 한다. 이것은 pHEMT를 구성하는 도핑된 AlGaAs 층의 Al의 mole fraction 및 도핑 밀도와 밀접한 관계가 있고, DX center라고 불리는 donor trap의 영향으로 알려져 있다^{[2],[4]}. 그러나 일반적으로 저잡음 증폭기 MMIC 선정시, 이를 구성하는 pHEMT의 제조 공정은 알려져 있지 않아, 극저온에서 동작 여부가 알려진 pHEMT를 사용하여 구성된 MMIC를 선정하였다. 이와 같은 선정 기준에서 본 논문에서는 Fujitsu 사의 MMIC를 선택하였다. Fujitsu사의 pHEMT^{[2],[10]}의 경우 극저온에서 pHEMT의 잡음지수가 알려져 있으며, 이를 사용한 pHEMT MMIC는 극저온에서 정상적인 동작을 할 것으로 사료되기 때문이다. 이 때 사용된 pHEMT MMIC는 표 1에 나타난 MMIC-1^[11]이며 상온에서의 잡음지수는 동작 주파수에서 1.6 dB(129.18 °K)를 갖는 것으로 알려져 있다.

또한 전파 망원경 전단부로 사용하기 위해서는 신호처리를 위해서 이득이 30 dB 이상을 요구하고 있기 때문에 2개의 MMIC-1으로는 이득이 충분하지 않아 두 번째 단계 이득이 큰 MMIC로 같은 회사의 다른 MMIC-2^[12]를 선정하였다. 표 1은 선정된 MMIC의 특성을 요약한 것이다.

2-2 증폭기 모듈 설계

선정된 MMIC를 이용 극저온 저잡음 증폭기 모듈을 만들기 위해서는 모듈의 냉각 효율을 고려한 하우징을 설계하는 것이 중요하다. 냉각 효율을 위해 가공 시 어려움이 있으나, 열전도가 타 재질에 비해

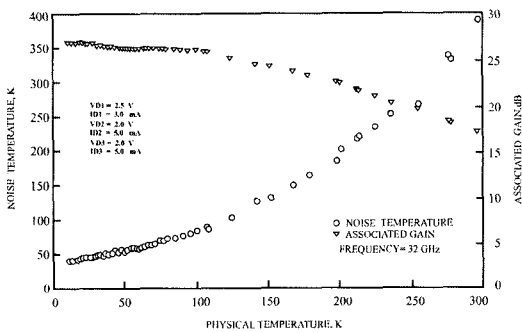


그림 1. 32 GHz pHEMT를 사용한 저잡음 증폭기의 온도에 따른 특성(참고문헌 [4]를 참조)
Fig. 1. The performance of the 32 GHz LNA for the temperature(Ref. [4]).

표 1. Fujitsu사의 pHEMT LNA MMIC의 특성
Table 1. The electrical characteristics of the Fujitsu pHEMT LNA MMIC.

MMIC	주파수[GHz]	잡음특성[dB]	이득[dB]
MMIC-1 (FMM5702X)	27~32	1.60(129.18 °K)	13.0
MMIC-2 (FMM5703X)	24~32	2.00(169.62 °K)	18.0

뛰어난 구리(copper)를 하우징의 재질로 하였으며, 금 도금을 통해 하우징 전도도(conductivity)의 변화를 배제하였다. 선정된 MMIC 및 세라믹 박막 기판은 조립 문제 상 하우징에 직접 장착될 수 없으며 캐리어를 통하여 별도로 조립되게 된다. 이러한 캐리어는 열 팽창도가 중요하게 되며, 1 mm 두께의 Kovar를 금도금하여 사용하였다. Kovar는 세라믹 기판의 열 팽창도와 비슷하여 냉각 시 발생할 수 있는 기계적 결함을 방지할 수 있으며, 열전도도 또한 양호하여 냉각 모듈의 캐리어로 적합하다. 캐리어 위에는 선정된 2종의 저잡음 증폭기 MMIC를 직렬로 부착하였다. 박막 기판은 각각의 MMIC를 연결하기 위한 thru 라인 및 초단 MMIC에 DC 바이어스를 공급하기 위해 제작되었다. 이들은 열전도도의 열화를 방지하기 위하여 epoxy가 아닌 Au/Sn preform을 사용 eutectic 방법으로 조립되었다. 조립된 MMIC와 마이크로스트립 세라믹 기판을 와이어 본딩으로 연결하였다.

그림 2에는 이와 같이 조립된 캐리어를 하우징에 장착한 사진을 보였다. 세라믹 기판과 입출력 포트에 사용된 동축 glass bead를 이용한 K-커넥터와는 리본(gold ribbon)을 이용하여 연결하였고, 2개의 MMIC를 바이어스하기 위해 2개의 DC 바이어스 feed-thru 커넥터를 사용하였으며, 이를 리본 본딩(ribbon bonding)으로 MMIC의 바이어스 단과 연결하였다.

주목할 것은 이러한 하우징에 MMIC와 세라믹 기판이 조립된 캐리어를 장착할 경우 필연적으로 하우징과 캐리어 사이에는 기계적 틈이 발생하게 되는데 이러한 틈은 동축 커넥터에서 기판으로 연결 시 삽

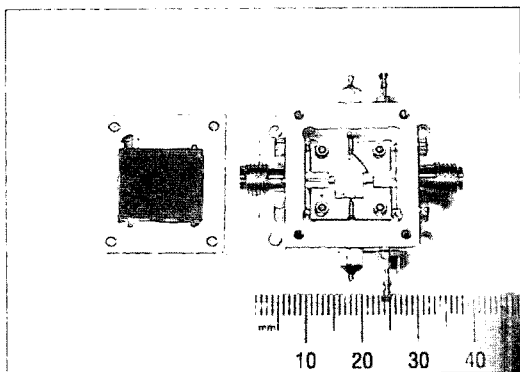


그림 2. Fujitsu MMIC를 이용한 제작된 LNA 모듈
Fig. 2. The assembly of the MMIC LNA module.

입 손실의 증가를 가져오며 또한 공진 현상을 유기하여 발진을 일으키게 된다.

이러한 캐리어와 하우징의 기계적인 틈과 하우징 시 뚜껑으로 인한 발진을 조사하기 위하여 Ansoft사의 3차원 구조 RF 시뮬레이션인 HFSS로 하우징 구조를 분석하여 보았다. 그림 3에는 HFSS 시뮬레이션 구조를 보였다. 먼저 모멘텀(momentum)에 의해 50 dB이상의 격리도를 보장하는(저잡음 증폭기 이득이 30 dB여서 30 dB보다 작은 투과 손실을 가져야 발진을 하지 않기 때문에 이와 같이 선정하였다.) 끊어진 마이크로스트립 라인을 하우징에 넣어 실제 상황과 같은 하우징 구조를 구성하였다.

그 결과는 그림 4에 보였다. 전달 특성의 격리도가 측정대역 내에서 23 GHz 부근에서 거의 0 dB까지 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 뚜껑으로 밀폐되어진 하우징은 대역 내에서 도파관 공진기와 등가적인 구조가 되어 공진 현상을 보이기 때문이다. 이것은 증폭기 MMIC와 쉽게 발진을 일으키게 된다. 이것을 제거하기 위하여 상용으로 사용하는 전파 흡수체(absorber)를 부착하고 시뮬레이션하였다. 그러나 여전히 투과 손실은 30 dB보다 큰 값이 되어 발진을 일으킬 가능성이 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 동축과 마이크로스트립 사이에 발생한 기계적인 틈은 동축 내심과 접지면 사이의 거리를 멀게 하여 전자파가 복사되게 되고 이것이 틈 측벽을 통하여 전달되기 때문이라고 사료된다.

따라서 충분한 투과 손실을 주기 위하여 동축 내심

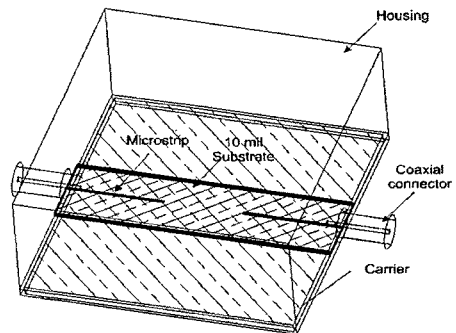


그림 3. 하우징으로 인한 케환 특성을 시뮬레이션하기 위한 구조도

Fig. 3. The structure of the housing for the simulation of feedback.

과 마이크로스트립 연결 시 발생한 기계적인 틈 위로 기관을 그림 5와 같이 덮었다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 역시 그림 4에 나타내었다. 그림 4로부터 투과손실이 30 dB 이상 충분히 감쇄되어 궤환(feedback)에 의한 발진이 없어질 것을 예상할 수 있다. 따라서 단순한 전파 흡수체만으로는 이득이 충분히 큰 경우 발진을 제거할 수 없으며 동축에서 마이크로스트립 연결 시 발생하는 불연속 효과를 최소화하여야 할 것이다.

또한 MMIC-1 자체의 입력 반사 손실이 낮아^[11], 동축 커넥터와 마이크로스트립 연결은 부정합과 손실로 인해 잡음지수의 증대와 이득의 감소를 가져오게 된다. 따라서 모듈이 가지는 잡음을 최소로 줄

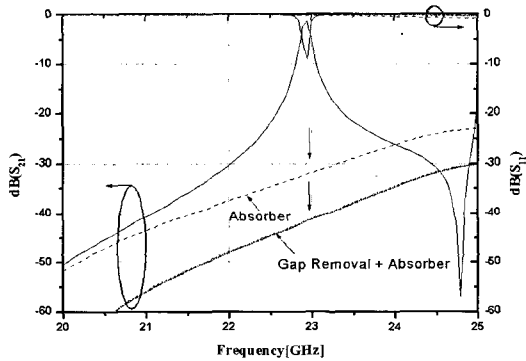


그림 4. 하우스 내의 끊어진 마이크로스트립 라인을 HFSS 시뮬레이션 결과
Fig. 4. HFSS simulation result for the microstrip gap in the housing.

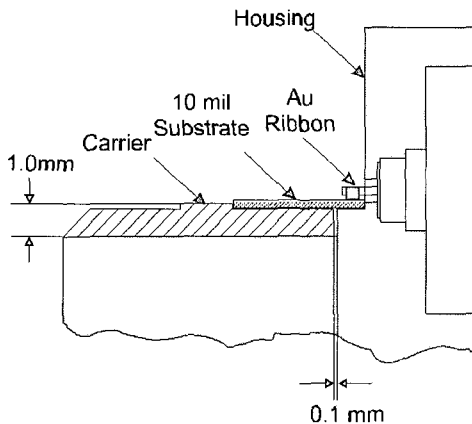


그림 5. 기관을 이용한 기계적 틈의 제거
Fig. 5. Gap removal using the substrate overlap.

이기 위해 정합에 관한 추가적인 조정이 필요하다. 이와 같은 조정을 위해 50 Ω 패턴보다 두꺼운 폭을 가지는 리본 패치를 붙여 추가적인 커패시턴스를 부가하였다. 그러나 최적의 값을 갖는 패치의 크기와 위치를 모든 모듈에서 동일하지 않으므로 크기와 위치를 바꾸어 가며 적절한 위치를 찾아내었다. 조정용 리본의 부착 위치와 방법은 그림 6에 나타내었으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

조정 전 잡음지수는 2.45~3.17 dB로 대역 내 편차 0.82 dB를 보이는 반면, 조정 후 잡음지수는 2.37~2.55 dB로 편차 0.18 dB로 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 입력 단 패턴의 조정 외에 중간 단과 출력 단의 조정을 추가적으로 행하였으나, 더 이상의 상온에서의 잡음 특성의 향상을 얻을 수 없었다.

Ⅲ. 냉각 측정

3-1 냉각 측정

극저온으로 냉각시키기 위해 냉각 용기 내 냉각판 위에 앞서 냉각 효율을 높인 증폭기 모듈과 냉각 용기 외부로의 입출력을 위한 부품을 조립하여 장착한다. 그림 8은 용기 내에 모듈이 정착된 구성된 모습을 나타내었다.

이 때 사용한 부품은 입력과 출력에 동축 feed-thru adapter(그림 8의 IN과 OUT 부위)와 스테인레스(stainless) 동축선(그림 8-A), ENR(Excess Noise Ratio) 보정을 위해 사용한 증폭기 앞단의 냉각용 감쇄기(그

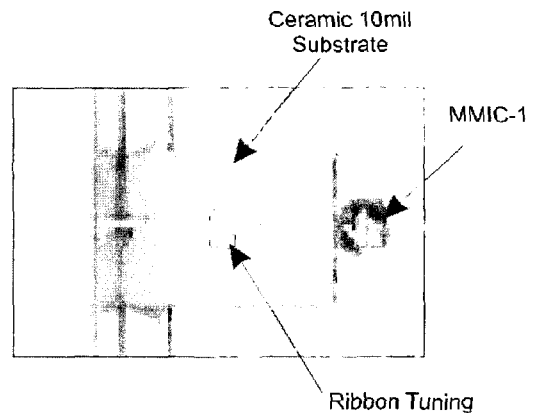
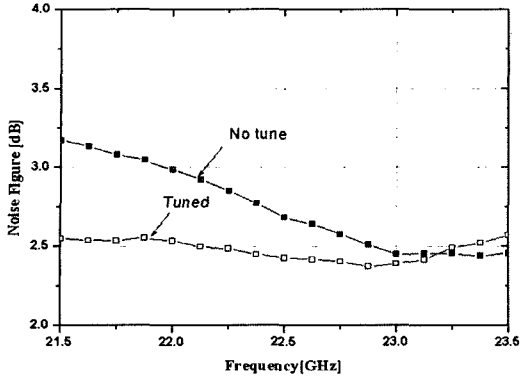
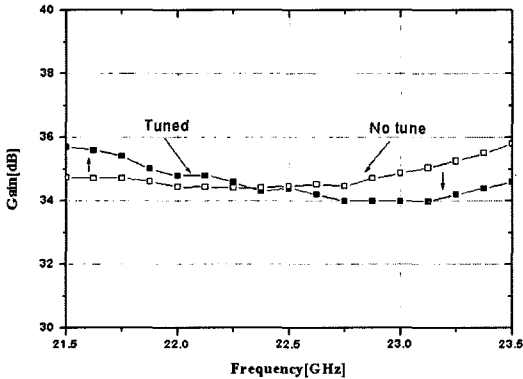


그림 6. 모듈의 조정 사진
Fig. 6. The photograph of the tuned module.



(a) 잡음지수
(a) Noise figure



(b) 이득
(b) Gain

그림 7. 조정 전후의 증폭기 특성 비교
Fig. 7. The comparison of the performances before and after tuning.

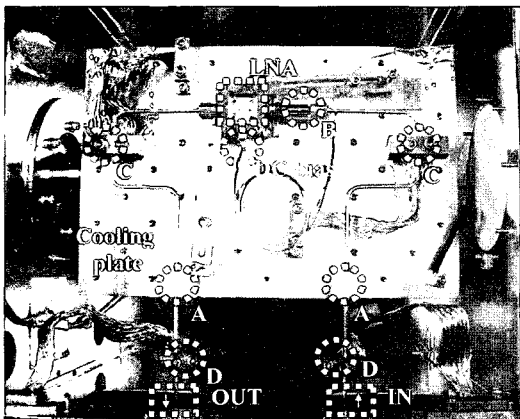


그림 8. 냉각 용기 내부의 연결 사진
Fig. 8. The photograph of the connection inside the cooling dewar.

림 8-B)가 있다. 동축 feed-thru adapter는 용기 내부를 냉각 시 진공으로 구성하게 되는데 외부 공기의 용기로의 누설 흡입을 방지하기 위한 것이고, 스테인레스 동축선은 동축선 내부의 절연체와 외피가 열팽창이 비슷하게 되어 동축선의 냉각으로 인한 기계적 열화를 막기 위한 것이다. 그리고 냉각 감쇄기(cryogenic attenuator)는 감쇄기중 냉각 온도에서 성능이 입증된 감쇄기이다. 이를 통해 잡음원으로부터 인가된 잡음원의 ENR이 작아지도록 보정된다. 즉 잡음지수 분석기 측정용 잡음원의 ENR은 약 15 dB로 극저온에서 평가하고자 하는 0.5 dB(잡음 온도 40 °K)를 측정하기에는 너무 변화가 커서, 정확한 측정을 어렵게 한다. 따라서 ENR을 줄여주기 위해 증폭기 모듈 입력에 냉각 감쇄기를 넣어 증폭기 앞단에서 새롭게 정의되어지는 감쇄된 ENR로 측정하여 보다 정밀하게 잡음 온도를 측정할 수 있게 한다^{[7]~[9]}.

그리고 냉각판(cooling plate)의 3곳(LNA 모듈 바닥, 그림 8-C) 및 스테인레스 동축선의 입출력 부위에 각각 2곳(그림 8-D)에 heat-trap이 설치되어 지정된 온도가 될 때까지 냉각되게 된다. 이와 같이 연결한 후 냉각하고 잡음 지수 분석기를 통하여 잡음지수를 측정하게 된다. 그림 8의 연결을 블록도로 그림 9에 나타내었다. 그리고 이때 OUT에는 잡음 지수 분석기 입력에 연결하기 위하여 Micro-coax사의 동축선로 ($T_{Microcoax}$)를 사용하였다. 이때 각 단의 이득(또는 감쇄도) 및 잡음온도를 그림 9와 같이 정의하고 종속 접속된 전체의 잡음온도(T_{meas})를 구하면 식 (1)이 된다.

$$T_{meas} = T_F + \frac{T_{ATTN}}{G_F} + \frac{T_{AMP}}{G_F G_{ATTN}} + \frac{T_B}{G_F G_{ATTN} G_{AMP}} + \frac{T_{Microcoax}}{G_F G_{ATTN} G_{AMP} G_B} \quad (1)$$

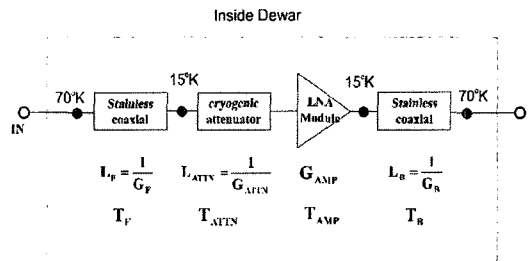


그림 9. 냉각 용기 내부의 등가 블록도
Fig. 9. Block diagram inside the cooling dewar.

여기서 원하는 증폭기만의 이득과 잡음 온도를 측정하기 위해서는, 그림 9와 같이 연결을 위하여 삽입된 부품들의 잡음 온도를 전체 잡음지수에서 빼내는 교정을 해야 한다. 이들은 주변 온도에 따라 이득과 잡음 온도가 변화하게 되어, 교정을 위해서는 증폭기를 제외한 이들의 잡음지수를 측정하여야 하는데 이들은 이득이 없고, 냉각 상태에서는 잡음 온도가 작아서 정확한 잡음 온도는 잡음지수 분석기를 통하여 측정될 수 없다. 즉 교정을 통하여 잡음지수 분석기 잡음지수는 F_{NFA} 로 알려져 있을 때 이것의 정확도는 약 ± 0.5 dB^{[6],[13]}가 되는데 이때 측정된 잡음지수와 DUT의 잡음지수를 각각 F_{meas} , F_{DUT} 라고 하면 측정된 잡음지수가 정확하다고 하여도 DUT의 이득으로 인해 측정된 잡음지수의 정확도는 떨어지게 된다. 즉 이들은 아래와 같이 표현된다.

$$F_{meas} = F_{DUT} + \frac{F_{NFA} - 1}{G_{DUT}} \quad (2)$$

이외에 여러 가지 측정 오차가 발생할 수 있으나 이들은 측정에 있어서 DUT에 무관한 상수이며 따라서 잡음지수의 오차를 DUT의 이득과 DUT의 잡음지수에 대하여 나타내면 그림 10과 같게 된다.

그런데 10 dB 이상의 감쇄기의 경우, 냉각 시 잡음온도는 0 °K에 가까워서 잡음지수 분석기를 통한 냉각 용기 속의 부품들은 본질적으로 잡음지수 분석기를 통하여 교정할 수 없게 된다. 따라서 입력과 출력에 사용되어진 스테인레스 동축선은 발생하는 열 분

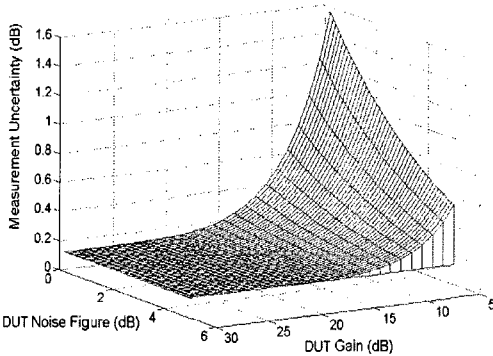


그림 10. DUT의 이득과 잡음지수에 따른 측정 불확실도(참고문헌 [6] 참조)

Fig. 10. The measurement uncertainty for the gain and the noise figure of DUT(Ref. [6]).

포의 불균일을 고려하여 잡음 온도를 계산하였다. 즉 동축선이 선로 방향에 대해 선형적인 온도 분포를 가진다고 고려하고^[15], 설치된 외측 70 °K heat-trap(그림 8-D)에 의하여 외측 온도를 70 °K 그리고, 주냉각이 이루어지는 내측은 설치된 15 °K heat trap(그림 8-C)에 의해 15 °K로 두고 잡음 온도를 계산하였다.

감쇄기의 온도는 교정 시 극저온에서의 증폭기의 잡음지수에 큰 영향을 준다. 식 (1)에서 보는 것처럼 감쇄기의 손실이 타 손실성 소자에 비해 크고 증폭기 앞단에 위치함에 따라 교정시 온도에 따른 감쇄기의 효과 크기 때문에 실제 감쇄기의 온도에 따라 증폭기의 잡음 온도 평가에 크게 영향을 준다. 본 측정의 경우 냉각 판 자체는 15 °K까지 냉각이 되었으나 사용된 감쇄기는 표면 온도가 22 °K로 측정되었다. 교정 시 감쇄기의 온도를 22 °K하여 증폭기 잡음지수를 보정하였다. 또한 냉각 감쇄기의 경우 상온의 감쇄 값이 냉각 상태에서 유지되므로 상온에서 네트워크분석기(network analyzer)로 측정된 이득을 손실로 사용하였다.

이와 같이 하면 각 부품의 잡음 온도와 이득을 알게 되므로 식 (1)에서 DUT 증폭기의 잡음 온도 T_{AMP} 를 계산하면 식 (3)처럼 정의된다.

$$T_{AMP} = G_F G_{ATTN} \left(T_{meas} - T_F - \frac{T_{ATTN}}{G_F} - \frac{T_B}{G_F G_{ATTN} G_{AMP}} - \frac{T_{Microcoax}}{G_F G_{ATTN} G_{AMP} G_B} \right) \quad (3)$$

증폭기 모듈을 제외한 각 부품은 손실성 소자로 각 손실은 부품의 실제 온도에 비례하여 잡음지수로 전환이 가능하다. 각 손실을 냉각상태에서 측정하여 증폭기를 제외한 부품의 잡음 특성을 식 (3)에 넣어 잡음지수 분석기로 측정한 증폭단의 전체 잡음지수에서 빼내는 교정을 통해 냉각된 증폭기만의 잡음 특성을 추출할 수 있다.

3-2 측정 결과

3-1절에서 말한 측정 방법을 이용하여 냉각 용기의 냉각 판 위에 장착된 모듈 바닥으로부터 서서히 냉각시켜 모듈의 온도를 냉각 판의 온도인 15 °K로 유지시켰다. 증폭 소자인 LNA MMIC는 냉각 시 DC 특성의 붕괴 없이 일정한 전류를 소모하였다.

그림 11에는 저잡음 증폭기의 측정된 결과를 보였다. 제작한 모듈은 15 °K로 냉각하여 측정된 결과, 별도의 조정 없이 28~37 °K의 잡음 특성을 나타내었다. 이득은 30 dB 이상을 만족하였으며 평탄 도는 ±2 dB 이내의 결과를 보여, 잡음과 이득 면에서 전파 망원경의 수신기의 전단부로 운용할 수 있는 초저잡음 증폭기로 적절한 특성을 보였다. 일본 Nitsuki사에서 같은 본 논문과 동일한 잡음지수 분석기 방법으로 재 측정되었다.

본 논문에서 이용한 측정 방법은 부정합, 손실값, 감쇄기 온도, ENR, 잡음원 온도, 잡음지수 분석기의 잡음지수 등에 의해 오차가 기인한다. 각각의 오차를 평균적으로 RSS(Root Sum of the Square) 방법^[6]으로 합하여 계산하면 전체 오차는 약 3.70 °K이 된다. Nitsuki사 측정 시 동일한 오차가 발생하는 것으로 고려하면, 최대 7 °K 오차를 가지게 된다. Nitsuki사에서 측정된 잡음 온도는 22.8~36.4 °K로 오차 범위 내에 있는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 잡음 특성을 보였다.

이와 같이 계산에 의해 측정된 잡음지수는 보다 일반적인 잡음 지수 측정 방법인 horn 안테나와 함께 수신기를 구성하고 수신기의 특성을 측정하여 추출된 잡음지수와 비교해 그 정확도를 확인할 수 있다. 즉 수신기 전면에 상온과 77 °K의 온도를 갖는 전파 흡수체를 번갈아 두면서 수신된 잡음의 Y-factor를 전력 측정기(power meter)로 측정하여 잡음지수를 추출하는 것으로, 수신기가 이미 구축된 일본 Nitsuki사

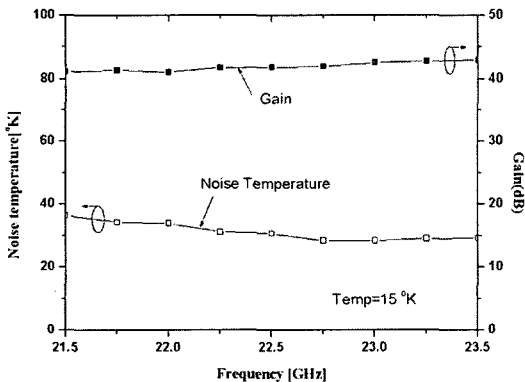


그림 11. 냉각 온도 15 °K에서 잡음 특성 및 이득
Fig. 11. The noise and the gain of the LNA module at 15 °K.

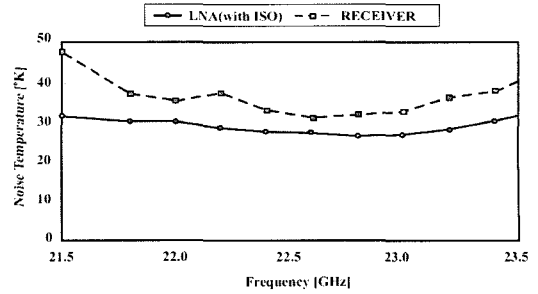


그림 12. Nitsuki사 수신기 잡음 온도와 아이솔레이터(ISO)를 장착한 저잡음 증폭기 잡음 온도 비교(참고문헌 [16] 참조)
Fig. 12. The comparison of the noise temperature of the receiver and Nitsuki LNA with isolator (ISO)(Ref. [16]).

는 수신기에 대한 잡음지수가 측정되었으며, 잡음지수 분석기의 저잡음 증폭기 측정과 값 비교가 가능하였다.

그림 12에는 Nitsuki사에서 제작 측정된 저잡음 증폭기 모듈에 대해 잡음지수 분석기를 통하여 측정된 잡음 온도와 이를 이용 구성한 수신기의 잡음 온도를 나타내었다. 이때 수신기 전단에 존재하는 상온의 horn 안테나가 대략 0.1 dB 이하의 손실(잡음온도 약 8 °K)을 가지며, 기타 전자 부품들의 손실이 합쳐져 대략 10~15 °K 이하의 잡음온도가 부가된다. 따라서 수신기를 구성할 경우 극저온 저잡음 증폭기에 의한 잡음 온도보다 높은 잡음을 보이게 된다. 그림 12의 결과를 볼 때 이와 같이 잡음지수 분석기로 측정된 저잡음 증폭기 잡음지수는 수신기로 측정된 잡음지수와 약 5~15 °K의 잡음 온도 차이를 보이며 이 결과로 볼 때 본 논문의 잡음지수 분석기 측정값은 Nitsuki사의 측정 오차를 고려할 때에 신뢰할 수 있는 결과로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 극저온에서 동작하는 pHEMT M-MIC를 이용한 저잡음 증폭기 모듈의 설계, 제작을 보였다. pHEMT는 극저온에서 DC 특성이 붕괴가 되는 경우가 있어 이를 피하기 위한 MMIC의 선정이 필요하다. 따라서 본 논문에서 극저온에서 동작이 검증된 pHEMT를 사용하여 구성된 pHEMT 저잡음

증폭기 MMIC를 선정하였다. 또한 이러한 MMIC를 이용한 증폭기 모듈화는 이득의 증가로 여러 가지 문제가 발생하게 되는데 이를 효과적으로 제거하는 방법과 절차를 기술하였다. 하우징 시 전파 흡수체 만으로는 충분하지 않아 동축 커넥터에서 기관으로 인가되는 천이 부분을 기관으로 덮는 방법으로 제거하였다.

또한 측정에서 잡음지수 분석기를 이용하여 잡음 지수를 측정하게 되는데, 잡음지수 분석기와 연결하는 부품의 냉각으로 정확한 교정을 기할 수 없어 측정된 냉각 온도와 상온에서의 네트워크 분석기로 측정된 이득을 이용하여 각 부품의 잡음 온도를 계산하여 측정값을 교정하여 결과를 얻을 수 있었다. 헬륨 냉각기를 이용하여 15 °K로 냉각 후 측정 결과 제작된 증폭기는 대역 내에서 이득 35 dB 이상, 평탄도는 ± 2 dB 이내, 잡음온도 28~37 °K를 얻었다. 이 결과는 잡음과 이득 면에서 냉각으로 인한 열화 없이 전파 망원경의 수신기의 전단부로 운용할 수 있는 초저잡음 증폭기로 적절한 특성이라고 사료된다. 잡음온도 측정 결과는 수신기를 구성하여 검증할 수 있는데 Nitsuki사의 재 측정 결과와 Nitsuki사의 그림 12의 결과를 볼 때 약 5 °K의 오차를 갖는 본 논문의 측정방법임을 검증할 수 있었다.

참 고 문 헌

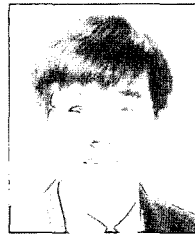
- [1] J. C. Webber, M. W. Pospieszalski, "Microwave instrumentation for radio astronomy", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 986-995, 2002.
- [2] M. W. Pospieszalski, S. Weinreb, "FET's and HEMT's at cryogenic temperatures their properties and use in low-noise amplifiers", *Microwave Symposium Digest IEEE MTT-S International*, vol. 87, pp. 955-958, Jun. 1987.
- [3] C. A. Liechti, R. B. Larrick, "Performance of GaAs MESET's at low temperature", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, pp. 376-381, 1976.
- [4] K. H. Gorege Duh et al., "32 GHz cryogenically cooled low noise amplifiers", *IEEE Trans on Electron Devices*, vol. 38, no. 8, Aug. 1989.
- [5] 日本通信機株式会社(Nitsuki), MMICを用いた冷却増幅器の開発, 2004.
- [6] Agilent Technologies, *Noise Figure Measurement Accuracy-The Y-factor Method*, Application note 57-2(5952-3706E), Feb. 2001.
- [7] J. D. Gallego, M. W. Pospieszalski, "Accuracy of noise temperature measurement of cryogenic amplifiers", *National Radio Astronomy Observatory Electronics Division Internal Report*, Virginia, no. 285, Feb. 1990.
- [8] T. Kasuga, R. Kawabe, M. Ishiguro, K. Yamada, H. Kurihara, M. Niori and Y. Hirachi, "Cryogenically cooled K band HEMT receiver for radio astronomical observation", *Nobeyama Radio Observatory Report*, no. 110.
- [9] J. E. Fernandez, "A noise-temperature measurement system using a cryogenic attenuator", *TMO Progress Report 42-135*, Nov. 1998.
- [10] Fujitsu, *FHX13LG, FHX14LG Super Low Noise HEMT*, Edition 1.1, Jul. 1999.
- [11] Eudyna Devices, *FMM5702X 27-32 GHz LNA MMIC*, Edition 1.1, Sep. 2004.
- [12] Eudyna Devices, *FMM5703X 24-32 GHz LNA MMIC*, Edition 1.1, Sep. 2004.
- [13] Agilent Technologies, *Non-zero Noise Figure after Calibration*, Application note 1484, Jan. 2004.
- [14] Agilent Technologies, *Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements(5952-8255E)*, Mar. 2004.
- [15] C. T. Stelzevried, "Microwave thermal noise standards", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 16, no. 9, Sep. 1968.
- [16] VERA, 小笠原局(Ogaswara)#1 K-band Receiver, Jun. 2003.

오 현 석



2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2005년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 설계

염 경 환



1980년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)
 1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)
 1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)
 1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원
 1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원
 1991년 8월: (주)LTI
 1995년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템

이 경 입



회로

2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: LG전자 MC 단말기연구소 연구원
 [주 관심분야] 마이크로파 및 RF

제 도 흥



1992년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2002년 6월~현재: 한국천문연구원 KVN 사업본부 선임연구원
 [주 관심분야] 밀리미터파 초저잡음 수신 시스템 및 초고주파 안테나

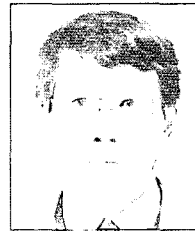
양 승 식



시스템

2003년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템

한 석 태



1979년 2월: 한양대학교 무선통신학과 (공학사)
 1986년 8월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1987년 3월~1989년 3월: 미국 Massachusetts대학 천문학과 객원연구원
 2004년~현재: 한국전자과학회 학술이사
 1986년~현재: 한국천문연구원 KVN 사업본부 책임연구원
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능·수동소자 및 밀리미터파 초저잡음 수신기 시스템 설계·제작