

전파 천문 연구와 밀리미터파 측정 기술

이 정 원

한국천문연구원

I. 서 론

널리 알려져 있듯이 전파 천문학은 간섭 잡음을 없애려던 데서 시작되었다. 1920년대 15미터 파장의 대서양 횡단 무선 전화 서비스를 운영 중이던 벨(Bell) 전화 회사는 통화 도중 발생하는 잡음을 줄이기 위해 당시 이 회사에서 엔지니어로 일하던 칼 잔스키(Karl Jansky)에게 원인을 찾도록 한다. 잔스키는 포드 T 모델 자동차의 바퀴를 달아 방위각으로 움직일 수 있고, 지평선 방향으로 부채꼴 모양 안테나 패턴을 가진 20.5 MHz 안테나를 만들어 관측을 한다. 관측 결과, 대부분의 간섭 잡음은 번개로부터 기인함을 발견했는데, 특별히 하루를 주기로 변하는 잡음을 알아내고, 그 근원이 지구 바깥, 은하의 중심 방향임을 알아내었다. 그리고 이 결과를 ‘지구 바깥 기원의 전기적 교란’이라는 제목으로 세상에 알린다(‘Electrical Disturbances of Apparently Extraterrestrial Origin’ Proc. IRE, 21, 1387, 1933). 이 논문은 벨 전화 회사는 물론 천문학자들조차 관심을 두지 않았는데, 이때 관심을 보인 이는 전파 공학자이며 아마추어 무선 통신사였던 네덜란드계 미국인 그로테 레버(Grote Reber)였다. 그는 자기 집 뒷마당에 포물면경 안테나를 세우고, 우리 은하의 전파 지도를 최초로 만들어 그 결과를 천체 물리학 저널에 기고한다. 이후 우주로부터 오는 전파를 예측, 관측하기 위한 여러 시도들이 이어졌다. 1940년대 성간 공간에 퍼져 있는 수소 원자의 전자 스핀이 바뀌며 방출하는 1,420 MHz 중성 수소선이 예측되었고, 1951년에 발견되었다. 2차 대전을 거치며 급속히 발전한 레이더

기술로 말미암은 대형 안테나 시설들이 가능해짐에 따라 더욱 약한 신호원을 관측하는 것이 가능해지기 시작했다. 60년대에는 성간에 존재하는 분자들 중 가장 양이 많은 일산화탄소(110 GHz 대역)외에 여러 복합 분자의 선 스펙트럼이 관측되면서 밀리미터 대역 전파 천문학은 중흥기를 맞게 된다.

우주 전파의 세기는 그 크기가 아주 미약하다. 현대의 망원경과 수신기 시스템으로 측정 가능한 연속 전파원의 플럭스 최소 세기는 약 10 uJy 정도이다. 신호원의 플럭스 세기를 나타내는 단위로 Jy(잔스키)를 사용하는데, 그 크기는 $10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ 이다. 상온의 저항이 갖는 열잡음이 $4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz}$ 이므로 그 크기를 가늠해 볼 수 있다. 이렇게 미약한 신호를 수신하기 위해 수신기는 감도가 좋아야 하는데, 이를 위하여 전파 관측용 수신기는 초단(frontend)을 20 K 이하로 냉각시켜 사용한다. 주로 사용되어온 고전적인 수신기 소자는 쇼트키 믹서가 있고, 양자 소자는 초전도 터널링 믹서가 있다. 냉각을 함으로써 쇼트키 믹서는 열잡음만을 없앨 수 있지만, 초전도 소자는 초전도 터널링 현상을 이용하기 때문에 더 작은 양자 잡음의 영역에서 동작하게 된다. 70년대까지 밀리미터 대역 전파 수신기는 쇼트키 믹서를 사용했으나, 80년대 초반부터는 국부 발진 신호의 세기, 잡음을 획기적으로 낮춘 70년대 후반부터 발전되어온 초전도 터널링 믹서를 사용하기 시작했다. 전파 수신기의 초단 소자로는 믹서뿐만 아니라 HEMT를 이용한 초저잡음 증폭기도 사용되는데, 현재의 기술 수준으로는 115 GHz 대역 이하에 주로 사용된다.

천체로부터 방출되는 전파는 연속파(continuum)와

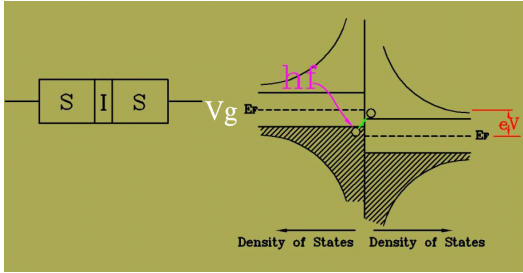
선 스펙트럼(line spectrum)으로 대별되는데, 그 기작을 살펴보면 열적인 것과 비열적인 과정으로 나뉠 수 있다. 뜨거운 영역에 존재하는 자유 전자의 제동 복사(bremsstrahlung)는 열적 연속파를 방출하고, 이와는 달리 자기장이 선을 따라 전자가 헬리칼 운동을 하며 방출하는 싱크로트론 복사는 비열적 연속파이다. 성간에 존재하는 원자나 분자가 양자화된 에너지 단계를 가지고 있을 때, 그 단계 사이의 천이 에너지가 전파 대역에 해당하는 복사를 방출하는 경우는 이온화된 전자가 재결합할 때 내는 재결합선, 분자의 회전, 진동 천이선 등의 열적인 기작의 경우와 메이저(maser)선 같은 비열적인 기작의 경우를 들 수 있다. 이와 같이 천체로부터 발생하는 전파 복사의 연속파나 선 스펙트럼을 측정하여 세기를 구함으로써 천체의 물리적인 상황, 즉 온도, 밀도, 운동 속도, 공간적 분포, 자기장 방향 등을 알아낼 수 있다. 온도나 밀도를 정확히 알아내기 위해서 수신기는 시간에 대해 안정적이어야 하고, 입력 신호의 전력에 선형적인 반응을 보여야 하며, 운동 속도를 알기 위해서는 수신기 시스템에 사용되는 기준 주파수 안정도가 뒷받침되어야 한다. 전파원의 공간적 분포를 알기 위해서 position switching 법 또는 on-the-fly 방법을 이용하는데, 이미지를 만들 때 시스템 전체 이득 드리프트나 날씨 등의 영향이 최소화되도록 한다. 신호원의 편광 방향을 알기 위해서 피드 단에 양직교 편광 성분만을 관측할 수 있도록 원형(또는 선형) 편광기를 두고, 뒷단에 각 직교 성분 출력의 복소 상관계수를 구할 수 있는 상관기(correlator)를 두게 된다. 전파 수신 시스템에서 사용되는 안테나는 단일경(single dish) 방식 이외에 간섭계(interferometer) 방식이 있다. 간섭계는 일정한 거리(기선 거리)만큼 떨어져 있는 단일경들이 동시에 전파원을 관측하고, 전파원 방향에 수직인 평면(uv 평면이라고 함)에 이 단일경들이 투영되었다 했을 때, 단일경들 출력 사이의 복소 상관계수를 구하면 전파 신호원에 의해

생긴 기선 거리를 구경으로 가진 등가 단일경의 구경면 입력 전력 분포가 얻어진다. 이 입력 분포를 푸리에 변환하면 전파원의 분포를 구할 수 있다. 곧 단일경들이 떨어진 거리 만큼에 해당하는 각 분해능을 가진 안테나를 구현할 수 있게 된다. 물론 여러 기선들로부터 uv 평면을 잘 채워야 향상된 각 분해능으로 전체 시야각에서 잡음이 적은 이미지를 얻을 수 있다. 간섭계 시스템은 각 단일경의 수신기로 부터 상관기까지 크기와 위상을 잘 보존하여야 하므로 안테나 수신 시스템들 간에 위상 안정도가 좋아야 한다. 이를 위해 대개 상관기가 설치된 간섭계 중앙 건물에 짧은 시간 스케일에서 시간 오차가 아주 작은 원자시계와 동기화된 발전기가 각 안테나까지 안정된 위상의 기준 신호를 전달한다.

위에서 비교적 짧은 전파 천문학의 역사와 관련 수신 시스템에 필요한 성능 지표들에 대해 설명하였다. 본고에서는 이러한 성능 지표들을 위해 밀리미터 대역 전파 수신 시스템 중 초단 수신기, 특히 초전도 터널링 믹서를 채용한 수신기 성능 측정에 필요한 여러 테스트들에 대해 소개하기로 한다. 앞서 밝혔듯 상용 무선 기술의 필요와 발전으로부터 전파 천문학이 태동하고 중흥기를 이뤄왔다. 이는 전파 천문학이 무선 공학 기술의 발전과 상호 관계에 있음을 말하며, 현재에도 이 관계는 유효하다. 전파 천문학은 밀리미터 대역에서 서브 밀리미터 대역으로 발전해왔고, 더 나아가 지구 대기 감쇠 때문에 지표에서 관측이 어려운 테라헤르츠 대역에서 동작하는 수신 시스템에 대한 개발을 90년대 이후 발전시켜 왔으며, 최근에 Herschel 위성과 항공기(SOFIA)로 우주 공간과 성층권 고도에서 관측 연구를 수행하고 있다.

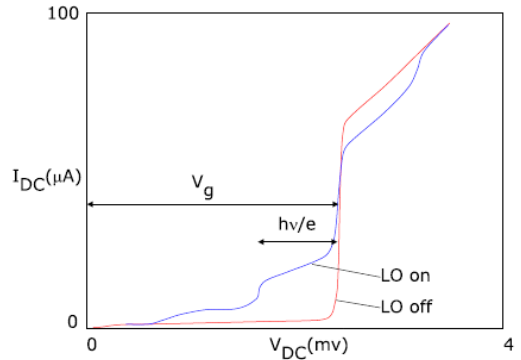
II. 초전도 터널링 믹서 수신기 개요

[그림 1]은 SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) 접합(junction)에 흐르는 전류를 이해하기 위해



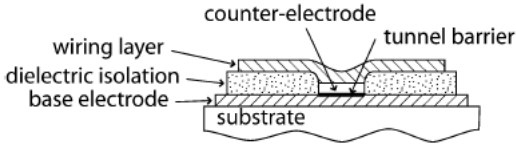
[그림 1] SIS 접합과 접합 준입자의 상태 밀도

우리에게 익숙한 반도체 밴드 다이어그램으로 모식화한 것이다. 초전도체는 일반 금속과 달리 페르미 전압 근처에 갭 전압이 존재하게 된다. 이 전압은 초전도 상태일 경우, 전자가 쿠퍼쌍(Cooper pair)으로 존재하므로 그를 분리하기 위해 필요한 결합 에너지이다. 그러므로 갭 전압 이상의 에너지가 인가되면 초전도 상태를 잃고 정상 상태의 금속으로 바뀐다. 갭 전압은 물질에 따라 다른데, 대개 납 합금은 2.5 mV, 나이오비움(Nb) 2.8 mV, 나이오비움나이트라이드(NbN)는 4~5 mV를 가진다. SIS 접합은 쿠퍼쌍이 어떤 에너지(주로 온도)에 의해 깨져 발생하는 준입자(quasiparticle)의 전류를 이용하는데, 그림에 빗금으로 표시된 상태 밀도는 이 준입자의 것이다. SIS 접합을 이루는 절연체의 두께(주로 산화알루미늄층)는 0.5~1 nm로 전자의 파동함수가 양 초전도체 모두에 존재하여 터널링할 수 있다. 이 때 초전도체의 가전자대 최상위 부분과 전도 전자대 각각의 최하위 부분의 상태 밀도가 높아, 한 쪽의 페르미 준위가 전압에 의해 바뀌면 전자 터널링이 가능해져 어떤 전압에서는 준입자 전류가 급격히 증가하게 된다([그림 2]). 인가되는 전압이 더 증가하면 접합에 흐르는 전류는 점근적으로 정상 상태의 저항의 전류와 유사하게 된다. 여기서 또 주의 깊게 봐야 할 것은 갭 전압 근처에서의 전류의 급격한 증가인데, 대개 그 전압 차는 수십에서 200 uV 정도로 작다. 여기까지 보면 SIS 접합이 전류-전압 곡선의 기울기가 급



[그림 2] SIS 믹서의 RF 전력 on/off시 전류-전압 곡선

격한 다이오드라고 생각할 수 있겠다. 한편, 접합에 RF를 인가하면 [그림 2]의 LO ON 곡선과 같이 전류 계단이 생겨나는데, 이 현상을 광자 도움 터널링이라고 한다. 즉, 인가된 RF의 에너지에 해당하는 전압인 $\frac{h\nu}{e}$ 아래에서도 국부적으로 전류가 증가하는 상태 밀도가 생겨나는 것으로 생각하면 쉽다. 만약 접합의 바이어스 전압을 갭 전압으로부터 한 개의 광자 전압 아래에 두면(첫 번째 광자 계단이라고 부름) 광자 하나가 입사하면 하나의 준입자가 생기고 터널링하게 된다. 그러므로 이 경우 SIS 접합의 양자 효율($\frac{e}{h\nu}$)은 1이다. 이러한 현상들을 미시적으로 설명을 해내는 이론이 Tucker의 양자 믹서 이론이다^[1]. 초전도 접합의 전류 전압 곡선이 비선형이기 때문에 이 접합을 믹서로 사용할 수가 있다. 이 초전도 믹서는 변환 이득을 가질 수 있음이 일찍이 알려졌는데, 믹서의 RF, IF의 어드미턴스가 같지 않기 때문이다. 초전도 믹서의 IF 출력 어드미턴스는 음수일 수도 있어 이득을 가질 수도 있으며, 이 때 대개는 스펙트럼의 편평도가 좋지 않기 때문에 변환 손실을 갖도록 설계한다. 믹서로 동작하는 경우 예상되는 잡음을 추정하면 다음과 같다. 국부 발진 신호(LO)의 전력은 입력 신호 전력보다 아주 크기 때문에 광자의 흡수에



[그림 3] 실제 기판 상에 구현된 SIS 접합의 단면 모식도

의해 발생하는 전류는 shot 잡음이 주로 차지하고, 그 분포는 포아송 분포를 따르게 되므로 전류 rms의 제곱은 국부 발진 신호에 의해 흐르는 전류를 i_{LO} 수신시스템의 대역폭을 B 라고 할 때 $2ei_{LO}B$ 로 주어진다. 한편, 믹서 IF 출력 어드미턴스를 G_D , 전력-전류 변환 효율을 R_I 라 하면 믹서의 최대 변환 이득은

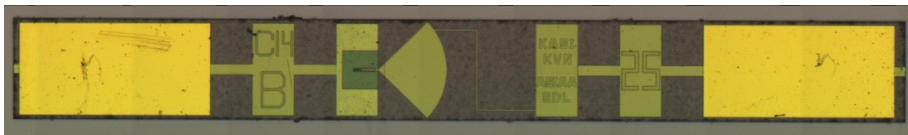
$$\frac{R_I^2 P_{LO}}{G_D}$$

이다. i_{LO} 는 $R_I P_{LO}$ 이므로 믹서의 입력단의 잡음 전력은

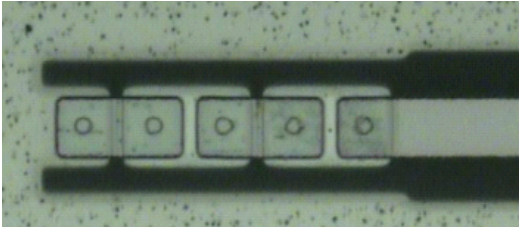
$$\frac{e R_I P_{LO} B}{G_D} \approx, \frac{h\nu B}{\eta} \frac{R_I^2 P_{LO}}{G_D}$$

이다. 양자 효율을 1로 하고 전력을 온도 스케일로 바꾸면 초전도 믹서는 $\frac{h\nu}{k}$ ($= 0.05 \text{ K/GHz}$)의 잡음 온도를 가지게 된다. 여기서 믹서의 잡음 온도는 IF 어드미턴스에 의존하지 않고, 그 크기는 동작 주파수가 갖는 양자 잡음에 불과함을 눈여겨 보아야 한

다. 초전도 믹서가 광다이오드 믹서처럼 동작한다고 가정해 간단히 설명했지만, 이론적으로 초전도 믹서는 입력 전자기장이 갖는 영점 잡음(zero-point quantum fluctuation)만이 그 배경 잡음이 되는 초저잡음 믹서이다. 실제 초전도 믹서를 70~1,000 GHz 대역의 수신기에 사용할 때는 입력 광학계의 손실과 IF 단의 잡음 기여분 때문에 잡음이 늘어나는데 수신기 전체가 가지는 잡음(수신기 잡음온도라 함)은 크게 보더라도 $10 \frac{h\nu}{k}$ 보다 작다. 잡음과 관련하여 하나 더 언급하고 싶은 것은 암전류라고 부를 수 있는, 그림 2에서 갭 전압 아래 전압에서 흐르는 subgap 전류이다. 대개 10 uA 미만의 전류가 흐르는데, 잡음에 그대로 반영되므로 접합 제작 시 누설 전류가 가능한 작게 하는 주의가 필요하다. 우선 나이오비움은 다른 물질에 비해 안정적이고, 제작 면에서 용이하여 1985년 이후로 밀리미터 대역에서 초전도 믹서의 주류로 자리 잡게 된다. 나이오비움 믹서의 주파수 한계는 쿠퍼쌍을 깨뜨리는 에너지의 주파수까지이다. 파장 3 mm 복사의 등가 전압 값은 0.4 mV이므로, 나이오비움의 갭 전압인 2.8 mV로는 700 GHz 복사까지 검출 가능하나, 이 주파수의 에너지는 초전도체의 쿠퍼쌍을 깨뜨려서 신호 손실을 크게 만들어 더 이상 초저잡음 믹서로 동작하지 않게 된다. 즉, 믹서 접합 자체는 저잡음으로 구동하나, 접합까지의 신호 전파 이동 때 손실이 증가하는 것이다. 그러므로 700 GHz 이상 동작하는 믹서는 더 높은 갭 전압을 가진 나이오비움 화합물(NbTiN~4.5 mV)을 접합을 위한 프로브 안테나 및 튜닝 회로에 사용한다. 이론적으로 NbTiN 접합과 NbTiN 회로를 이용하면 1.2



[그림 4] 한국 우주 전파 관측망의 120~165 GHz 초전도 믹서^[2] 칩 사진 (크기: 5 mm×0.5 mm×120 um)



[그림 5] 직렬 연결된 5개의 Nb SIS 접합(접합 지름: 1.6 um)

THz까지 동작이 가능하나, 수율이 안정적이지 않아서 현재까지는 Nb 접합과 NbTiN 튜닝회로를 섞어 사용해 1 THz에서 동작하는 믹서를 만들고 있다. 다음 장에 이러한 초전도 접합을 이용한 믹서 및 수신기의 성능을 측정하는 방법들에 대해 소개한다.

III. 초전도 수신기의 성능 측정

3-1 수신기 잡음 온도

전파 천문학에서는 주로 잡음 전력 P_N 을 온도로 등가적으로 표현한다. 즉, 열역학적 온도 T_p 를 갖는 복사원의 등가 잡음 온도 T 는

$$\frac{P_N}{kB} = \frac{\frac{hv}{k}}{(e^{\frac{hv}{kT_p}} - 1)}$$

이다. 이렇게 하면 천문학에서 다루는 복사 전달에 들어가는 세기(intensity)도 밝기 온도로 표시했을 때 복사원의 열역학적 온도를 복사 전달식에 그대로 사용할 수 있다. 대개 수신 시스템의 잡음을 알아낼 때도 흑체 복사에 가까운 온도원을 사용하기 때문에 잡음을 표시하기 위해 온도를 사용하는 것은 여러 측면에서 유리하다. 수신기의 잡음 온도를 구하기 위해 우선 우리는 시스템의 입력 전력에 대해 선형적으로 반응한다고 가정을 한다. 이 경우, 입력 전력

을 알고 있는 서로 다른 온도 기준원을 이용해 2번 수신기의 출력 측정을 한다. 선형 시스템을 가정하면 우리는 입력 온도에 대해 출력의 기울기와 절편(입력=0 K)을 구할 수 있다. 기울기는 전체 수신기의 이득이고, 절편은 이득이 곱해진 수신기의 잡음온도이다. 수신기 잡음온도는 수신기가 얼마나 감도가 좋은지를 나타내므로 수신기 이득으로 나누어 입력 등가 잡음 온도(input-referred noise)로 나타낸다.

온도 기준원은 대개 전파 흡수체를 사용하는데, 상온과 액체질소(1기압 기화 온도~77 K)에 담긴 흡수체를 사용한다. 주변의 온도가 빠르게 변하여 오차가 예상되는 경우에는 히터를 내장하여 상온 흑체의 온도를 상온보다 더 높게 유지하는 방법이 사용되기도 한다. 대개의 흡수체는 그 반사도(reflectivity)가 0.2% 이하보다 더 좋다. 그러나 관측되는 신호의 세기가 더 약하므로 이 정도의 반사에도 스펙트럼 상에 리플을 보이기도 한다. 수신기의 출력을 상용 마이크로파 전력 미터로 측정할 경우, 센서와 미터의 오차가 2% 정도인데, 이 오차는 온도원을 이용한 방법으로 구한 잡음온도에 10% 미만의 오차를 준다. 여기서 한 가지 더 주의할 것은 온도 기준원의 실제 입력 전력을 정확히 아는 것이 가장 중요하다. 즉, 기준원과 수신기의 입력 매칭이 잘 되어 있지 않은 경우는 반드시 반사되는 전력을 고려하여야 한다. 결론적으로 우리는 잘 만들어진 흡수체와 액체질소만 있으면 100 GHz~1 THz 대역에서 동작하는 비교적 정확한 잡음원을 갖고 있는 셈이다. 끝으로 온도원을 수신기에 입력시키는 방법에 대해 언급한다. 지금까지는 광학적 방법으로 수신기의 안테나 빔이 온도 기준원을 모두 채우며 바라보는 것을 가정했다. 최근에는 500 GHz까지 동작하는 회로망 분석기가 측정 장비로 나와 있어, 여러 전송선로의 특성을 구하는 것을 쉽게 할 수 있으므로 도파관이나 동축 전송로를 입력 인터페이스로 가지는 수신기의 경우는 전송 선로에 의한 입력단의 손실과

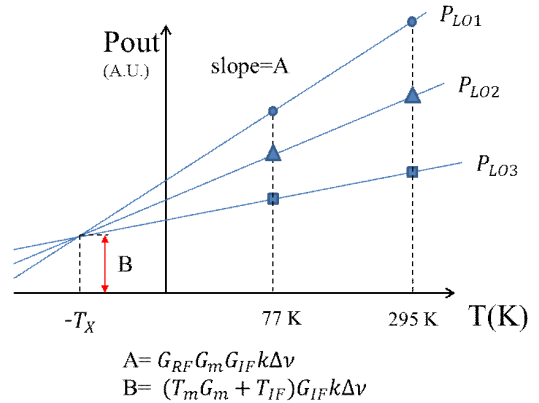
선로 간의 온도 분포를 고려하여 DUT 측정 기준면에서 입력 전력 값이 얼마인지를 결정하여야 한다.

3-2 RF 입력단 잡음 측정

위에서 구한 수신기 잡음 온도는 수신기를 구성하는 입력부, 믹서, IF 단 모든 잡음의 총합을 입력단에서 등가 잡음 온도로 표시한 것이다. 만약 수신기를 구성하는 각 부분에 대한 S parameter를 측정했다면 그것으로부터 각 부분의 잡음 기여분을 산정해볼 수 있을 것이다. 그런데 이런 측정 방법을 사용하지 못하는 경우가 초저온 수신기에서는 흔히 발생한다. 이러한 경우를 위해 흡수체 잡음원과 초전도 믹서의 성질을 이용하여 수신기를 이루는 각 부분의 잡음 기여분을 추출해 낼 수 있다. 입력단의 이득, 믹서의 이득, IF단의 이득을 각각 G_{RF} , G_m , G_{IF} 라 하고, 각 부분의 입력측 등가 잡음을 T_X , T_m , T_{IF} 라 하면 수신기에 T인 신호가 입력될 때 대역폭 Δv 를 가진 수신기의 출력측 전력은 다음과 같다.

$$P_{out} = [(T + T_X)G_{RF}G_m + T_mG_m + T_{IF}]G_{IF}k\Delta v$$

이 때 P_{out} 대 T 의 관계는 한 LO 전력에 대해 선형 관계를 보인다. 입력 전력은 앞서 설명한 흡수체를 상온과 액체 질소에 담긴 77 K, 295 K의 잡음원 (cold, hot이라 흔히 부름)을 사용한다. 만약 믹서를 다른 LO 전력으로 구동하면 G_m , T_m 각각은 달라지지만, 낮은 LO 전력에 대해서 그 곱인 T_mG_m 은 일정함이 알려져 있다. 그러므로 다른 온도의 잡음원과 몇 개의 다른 LO 전력으로 구동한 수신기의 출력을 측정하여 선들을 그렸을 때, 각 선들의 교차점의 온도 축 값이 믹서 전단에 놓인 부분의 잡음 기여분이다. 다른 관계로 T_R 대 변환 손실을 그리면 T_X 가 절편으로 표시된다. 이 때 T_X 는 변환 손실이 변할 때 변하지 않는 수신기 잡음분으로 해석된다. 즉, 여러 LO 전력에 대해 단 하나의 선을 그리기 때문에 LO



[그림 6] 믹서 입력 단의 잡음 T_X 를 구하는 방법

전력이 낮을 때 가정했던 성질인 일정한 T_mG_m 대신 변환 손실이 변할 때 이 곱이 변하도록 고려할 수도 있다. 이 경우에는 손실에 대해 변하지 않는 믹서 잡음을 $T_{m,o}$ 라 하면,

$$T_X = \left(\frac{1}{G_{RF}} - 1\right) T_{loss} + \frac{T_{m,o}}{G_{RF}}$$

로 표현할 수 있다.

3-3 IF 입력단 잡음 측정

다음은 IF 입력단으로 주의를 돌려 그 지점에서 IF 잡음 기여분을 구하는 방법에 대해 설명한다. IF 입력단에 수신기 전체 잡음을 옮겨 보면, 믹서의 열 잡음 (T_m 과 다른 $T_{m,t}$ 로 표시)과 수신기 입력 잡음은 믹서의 IF 출력 임피던스인 R_{out} (DC I-V 곡선 바이어스 점에서 기울기)에 대해서 전류 잡음원 $\langle i_t^2 \rangle$ 으로 표현되고, 믹서에 흐르는 DC 전류에 의한 shot 잡음은 $\langle i_s^2 \rangle$ 로, 그리고 IF 단쪽 잡음 기여분에 해당하는 전류 잡음원 $\langle i_{IF}^2 \rangle$ 로 표현된다. 이 잡음 전류원에 의한 출력단의 잡음 전력은 다음과 같다.

$$P_{out} = [\langle i_t^2 \rangle + \langle i_s^2 \rangle + \langle i_{IF}^2 \rangle] \left(\frac{R_{in} R_{out}}{R_{in} + R_{out}} \right)^2 \frac{G_{IF} \Delta v}{R_{in}}$$

이 식에 전류 잡음원 값을 대입하면 아래 식을 얻는다. 식의 우변 첫째 항(믹서 잡음)과 둘째 항(shot 잡음)의 잡음을 출력 매칭($1-|r|^2, |r|=|(R_{out}-R_{in})/(R_{out}+R_{in})|$)을 고려한 이득인

$$G'_m = G_m \frac{4R_{in}R_{out}}{(R_{in} + R_{out})^2}$$

로 묶으면 익숙한 출력 잡음식 $kG_{IF}\Delta v\{G'_m(T_m+T_{in})+T_{IF}\}$ 을 얻을 수 있다(T_m 에 주의).

$$P_{out} = [G'_m \frac{4R_{in}R_{out}}{(R_{in} + R_{out})^2} k(T_{m,t} + T_{in}) + \frac{4R_{in}R_{out}}{(R_{in} + R_{out})^2} \frac{eV}{2} + kT_{IF}] G_{IF} \Delta v$$

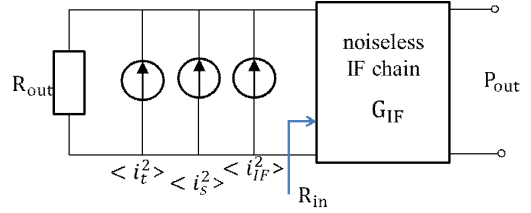
이 때, LO 전력이 인가되지 않았을 때는

$$\frac{4R_{in}R_{out}}{(R_{in} + R_{out})^2} \frac{eV}{2} = 0$$

이므로 출력 잡음은 shot 잡음과 IF 입력 잡음만 존재하게 된다. Shot 잡음은 바이어스 전류에 의존하므로 DC 전류가 0인 점에서는 shot 노이즈는 사라진다. 그러므로 이 경우에는 출력 전력에는 전력이 모두 IF 단 잡음에 의한 성분만 남게 된다. 출력 전력(P) 대 바이어스 전압(V)의 그래프를 그렸을 때 갭 전압보다 큰 전압에서 출력 전력은 IF 단과 믹서 shot 잡음의 합이며 직선으로 증가한다. 직선의 기울기는

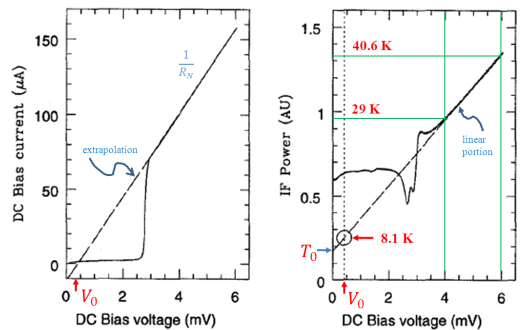
$$\frac{4R_{in}R_{out}}{(R_{in} + R_{out})^2} \frac{e}{2k}$$

로서 5.8 K/mV이다. 이 기울기는 P-V 그래프의 출력 전력 값을 IF 입력 단의 잡음 온도로 바꾸는 비율을 제공한다. 이 직선 관계의 절편만 구하면 영점을 구



[그림 7] 믹서 수신기 잡음을 IF 입력 기준 등가 잡음으로 표현

하게 되므로 y축에 해당하는 출력 전력을 모두 IF 입력단의 잡음 온도로 환산할 수 있다. Shot 잡음의 기여분은 갭 전압보다 큰 전압 영역에서 준입자 전류에 비례하므로 DC I-V 곡선에서 갭 전압 이상 영역 직선 부위를 외삽하여 이 직선을 전압이 줄어드는 방향으로 연장했을 때 준입자 전류가 0인 전압 V_0 를 찾는다. V_0 라는 가상의 전압에서 shot 잡음의 기여분은 없으므로 P-V 그래프를 외삽하여 읽은 잡음 전력은 IF 단의 잡음 기여분이 된다. 그림 8에 이 방법을 사용하여 IF 단의 잡음을 결정하였다. 같은 스케일로 두 잡음원을 이용한 수신기 출력을 P-V 곡선 상에 표시하면 믹서의 양측파대(DSB) 변환 손실과 믹



$$\frac{1.33}{0.95} = \frac{5.8 \cdot 6 + T_0}{5.8 \cdot 4 + T_0} \rightarrow T_0 = 5.8 K$$

$$T_{IF} = 5.8 \cdot V_0 + 5.8$$

$$T_{IF} = 5.8 \cdot 0.4 + 5.8 = 8.1 K$$

[그림 8] 초전도 믹서 I-V, P-V 곡선을 이용한 IF port의 잡음 결정

서 잡음을 얻어낼 수 있다^[3].

3-4 Saturation 측정

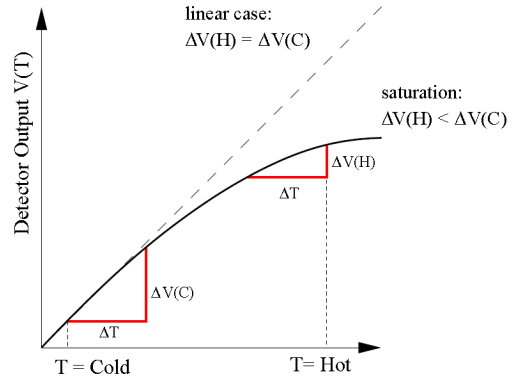
초전도 믹서가 요구하는 LO 전력은 다이오드 믹서에 비해 아주 작다. 어떤 경우에는 필요 전력이 수 nW에 불과하다. 이를 바꾸어 말하면 입력 전력에 의해 믹서 출력이 쉽게 포화될 수 있음을 뜻한다. 포화하는 수신기 캘리브레이션을 어렵게 하므로 실제 측정하고자 하는 입력 전력에 맞추어 접합을 직렬 연결한 믹서를 사용한다. 이 경우 각 접합이 이상적이라면 믹서가 보이는 이득과 잡음은 한 개의 접합이 보이는 성능과 같다. 대신 직렬 접합에 필요한 LO 전력은 접합 개수의 제곱에 비례해 증가한다. 믹서 수신기가 비선형 반응을 한다고 가정하면 그 출력과 입력 잡음 간의 관계를 다음과 같이 2차식으로 나타낼 수 있다.

$$P = P_0 + mT - \alpha T^2$$

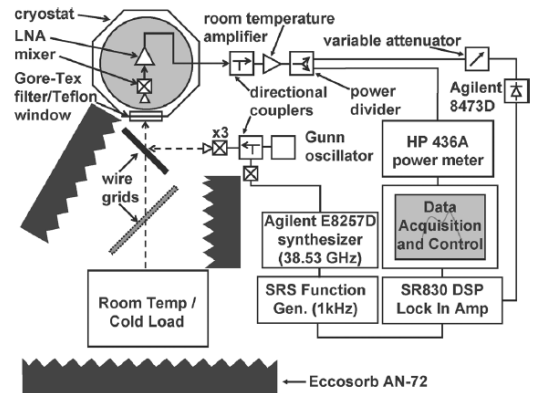
이를 바탕으로 포화(이득 축소)도를 ρ 라 하면 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\alpha T}{m}$$

포화를 측정할 때 사용하는 신호원이 CW인 경우와 잡음원의 경우가 포화도가 다르게 나온다. 잡음원의 경우 순간적인 신호 피크 값은 CW 경우보다 클 수 있기 때문이다. 전파 천문 관측용 수신기는 상온 잡음원을 사용하여 아주 약한 스펙트럼선의 온도를 측정하므로, 포화를 측정하기 위해서 잡음원을 배정으로 하고, 약한 CW 신호(또는 약한 잡음원)를 인가하는 방법을 사용한다. 사용하는 CW 신호의 정확한 전력을 모르기 때문에 증분 이득(incremental gain)을 구하기 위해 lockin amplifier를 사용하고 비율을 구한다. 상온과 액체질소 잡음원 출력 값의 비



[그림 9] 증분 이득을 이용한 포화도 측정^[4]



[그림 10] 증분 이득을 통한 포화도 측정 셋업^[5]

율을 구하면

$$R = \frac{m - 2\alpha T_{cold}}{m - 2\alpha T_{amb}}$$

이고, 이 비율은 아래와 같이 근사된다.

$$R - 1 = 2 \frac{T_{amb} - T_{cold}}{T_{load}} \frac{\rho}{100}$$

그러므로 R만 구하면 두 잡음원 T_{load} (295 K 또는

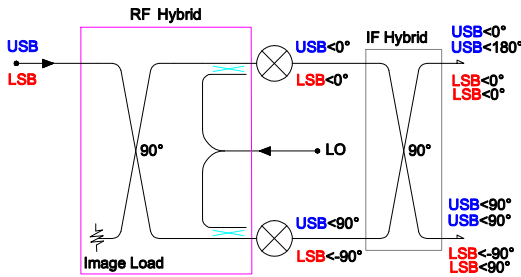
77 K)에 대한 포화도 ρ 를 따로 구할 수 있다.

3-5 Sideband Rejection 측정

믹서는 LO 주파수에 대해 양측파대 모두 반응을 하게 된다. 고전적으로 양 측파대 중 한쪽만 IF 단으로 출력되도록 하는 여러 방법들이 시도되었다. 밀리미터 대역에서 사용되는 방법은 백 쇼트를 이용하여 믹서의 한 측파대에서 매칭이 나빠지도록 하는 방법, 준광학적 측파대 제거 필터를 이용하는 법 등이 사용되어 왔으나, 1990년대 후반부터 고전적인 개념의 측파대 분리 믹서를 사용하기 시작하였다(그림 11). 이 형태의 믹서는 RF 단과 IF 단에서 90도 위상차를 주면 믹서를 거치며 그 위상차가 각 측파대에 따라 부호가 반대로 작용하여 IF 단에서 합하면 결

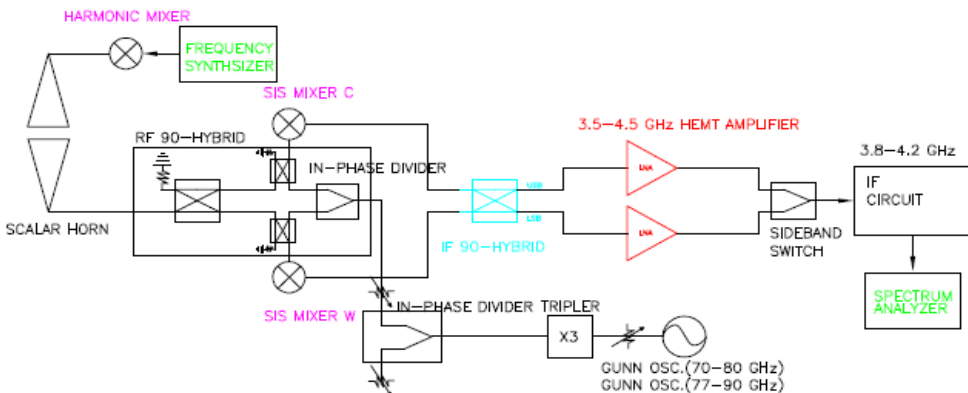
국 180도 위상차에 의해 측파대가 분리가 된다. RF hybrid의 isolation 포트에 termination을 둘 수 있어 저온 동작하는 초전도 믹서를 이용할 경우 열잡음을 줄일 수 있고, IF 단이 동시에 두 측파대를 모두 관측할 수 있어 광대역 스펙트럼 서베이 등의 관측에 유리한 믹서이다. 다만 측파대 분리가 잘 되기 위해 사용되는 믹서의 성질이 비슷해야 하며, 위상차를 주는 RF hybrid 내에 반사된 LO 전력이 가능한 낮도록 해야 한다. 측정 시 필요한 조건들을 살펴보기 위해 우선 측파대 제거비의 정의를 살펴본다. 예를 들어 IF 단이 상측파대의 출력을 나타내면 RF 단에서 상측파대 입력과 하측파대 입력 시 IF 출력의 비가 상측파대의 측파대 제거비이다. IF 출력이 하측파대의 경우도 마찬가지이다.

측파대 제거비를 구하기 위해서는 앞에 소개한 포화도 측정과 마찬가지로 두 잡음원을 사용하고, 각 측파대에 약한 CW 신호를 인가할 때, 신호의 크기를 모르기 때문에 양 측파대에서 출력을 상대적으로 측정하는 것이 필요하다⁶⁾. 이 때 필요한 측정은 다음과 같다(USB: 상측파대, LSB: 하측파대). 측정은 쌍으로 묶어진 좌측의 입력에 대해 우측의 출력을 측정하는 것이다.



[그림 11] Sideband separation mixer의 원리

(i) CW(USB) 입력 - IF(USB) 출력, CW(USB) 입력



[그림 12] 측파대 제거를 위한 테스트 셋업

- IF(LSB) 출력
- (ii) CW(LSB)입력 - IF(USB) 출력, CW(LSB)입력 - IF(LSB) 출력
- (iii) 잡음원(295K) - IF(USB) 출력, 잡음원(77K) 입력 - IF(USB) 출력
- (iv) 잡음원(295K) - IF(LSB) 출력, 잡음원(77K) 입력 - IF(LSB) 출력

여기서 CW는 측파대 신호이고, 잡음원은 흡수체이다. 초전도 믹서는 아주 감도가 좋기 때문에 CW를 위하여 상용 신호 발생기에 하모닉 믹서를 연결하고, 피드백을 사용하여 인가한다. 측정은 YIG 튜닝 필터와 검출기를 사용하여 IF 대역 내에서 신호를 해석하는 방법과 상용 스펙트럼 분석기를 사용할 수도 있다. 상용 스펙트럼 분석기를 사용할 때는 분석기의 잡음 마루(noise floor) 근처의 CW 신호의 크기 값은 보상이 필요한데 선형적이지 않기 때문에 CW 신호 세기를 조절하여 잡음 마루로부터 3 dB 이상 충분한 신호대 잡음비를 갖도록 해야 한다. 이러한 방법으로 측정해 보면 [그림 11]의 방법으로 서브밀리미터 대역까지 10 dB 이상의 측파대 제거비를 얻을 수 있다.

IV. 맺음말

전파 천문학 특히 밀리미터, 서브 밀리미터 대역에서 추종을 불허하는 감도를 가진 초전도 믹서 수신기의 원리 소개와 수신기의 성능을 측정하는 방법들을 소개하였다. 초전도 믹서가 천문학계에 소개된 것이 1980년대 초반이었으므로 지금 같은 밀리미터 대역 신호원, 측정 장비들이 많지 않았다. 이러한 이유로 성능 측정 시 흡수체를 이용한 광대역 잡음원을 주로 사용하고, CW 신호의 경우, 절대 크기를 모르기 때문에 상대적인 측정을 이용해 왔다.

초전도 믹서는 1 THz 이상에서는 그 지위를 Hot Electron Bolometer(HEB) 믹서라고 부르는 디바이스

에게 넘겨주는데, 볼로미터의 특성상 IF 대역폭이 초전도 믹서에 비해 좋지 않다. 광대역 IF 대역폭은 한 번에 많은 천이선들을 관측하고, 더 큰 속도 폭을 가진 천체들을 관측할 수 있기 때문에 천문 관측에서 여러모로 유리하다. 초전도 믹서의 관측 주파수 한계를 뛰어 넘기 위해 세계 각 그룹들은 지금도 노력하고 있다.

처음 우리 은하 전파 지도를 작성했던 그로테 레버는 무선 통신에 흠뻑 빠져 있었는데, 당시 이미 60개국의 무선사들과 통신을 해보아서 지구는 무선 통신으로 그가 더 나아갈 데가 없는 곳이었다고 회고한다. 칼 잔스키의 발견에 영감을 받아 자비로 뒷마당에 10미터 안테나를 세워 지구에서 우주로 눈을 돌렸던 그의 열정을 본받아 전파 천문학자과 엔지니어들은 30년 전에 시작한 논의를 바탕으로 10년 동안 칠레 5,000미터 고지에 30~950 GHz에서 동작하는 54대의 12미터 안테나와 12대의 7미터 안테나로 아타카마 거대 어레이^[7]를 세우고 2013년 3월 가동에 들어갔다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Tucker, M. J. Feldman, "Quantum detection at millimeter wavelengths", *Rev. Mod. Phys.*, vol. 57, pp. 1055-1113, 1985.
- [2] J. W. Lee et al., *129 GHz SIS Mixer Receiver for Korean VLBI Network*. Publication of Korean Astronomical Society, vol. 27, pp. 71-80, 2012.
- [3] D. P. Woody et al., "85-115 GHz receivers for radio astronomy", *IEEE MTT-33*, no. 2, pp. 90-95, 1985.
- [4] A. Murk et al., "Linearity measurements of 640 GHz SIS mixer for JEM/SMILES", *16th International Symposium on Space Terahertz Technology*, pp. 161-164, 2005.
- [5] E. Tong et al., "Gain expansion and compression of

SIS mixers", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 309-312, 2009.

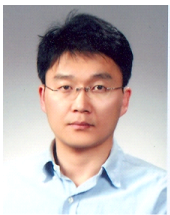
[6] A. R. Kerr et al., "Sideband calibration of millime-

terwave receivers", *Atacama Large Millimeter Array Memo no. 357*, 2001.

[7] <http://www.almaobservatory.org>

≡ 필자소개 ≡

이 정 원



1998년: 서울대학교 천문학과 (이학석사)

2008년: 서울대학교 천문학과 (이학박사 (전파 천문학 전공))

2010년 12월~현재: 한국천문연구원 선임연구원

[주 관심분야] THz 초전도 믹서 개발, 별

탄생 영역의 전파 연구