PUBLICATIONS OF THE KOREAN ASTRONOMICAL SOCIETY
14: 39 ~ 45, 1999

서울대학교 전파천문대 부근의 1.4GHz 대역 전파 환경
1.4GHz-BAND RADIO INTERFERENCES AT SEOUL RADIO ASTRONOMICAL OBSERVATORY

구본철, 이정원, 김창희
서울대학교 천문학과
BON-CHUL KOO, JUNG-WON LEE, AND CHANG-HEE KIM
DEPARTMENT OF ASTRONOMY, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY
Received Aug. 18, 1999; Accepted Sept. 14, 1999

ABSTRACT

We have carried out measurements of 1.2−1.6GHz radio interferences around Seoul Radio Astronomy Observatory located in the campus of Seoul National University. We received interference signals using a pyramidal horn antenna and measured its power using a spectrum analyzer with 1 MHz resolution after ~ 60dB amplification. In order to check the spatial characteristics, we made observations at every 30° in azimuth at elevation of 30° and 60°. Also, in order to check the temporal characteristics, we repeated the all-sky observations five times at every six hours. The results may be summarized as follows: (1) There are strong (≥ -20dBm) interferences between 1.2 and 1.4GHz. Particularly strong interferences are observed at 1.271 and 1.281GHz, which have maximum powers of −0.34dBm and −0.56dBm, respectively. (2) The characteristics of the interferences do not depend strongly on directions, although the interferences are in general weak at high elevation and in east-west direction. (3) The interferences appear for a very short ($\leq$0.01s) period of time, so that the average power is much smaller than the maximum power. Strong interferences with large (≤ -49.0dBm) average power have been observed at 1.271, 1.281, 1.339, and 1.576GHz. At these frequencies, the interferences appear repeatedly with a period of $\leq$0.1s. By analyzing the observed power, we find that, for the strongest 1.271GHz interference, the average intensity is -171dBW/m^2/Hz and that the maximum intensity is -122dBW/m^2/Hz. If this interference is delivered to the detector without any shielding, then its power would be much greater than the rms noise of a typical line spectrum. Therefore, it is important to shield all the parts of receiver carefully from radio interferences. Also, without appropriate shielding, the sensitivity of a receiver could be limited by the interference.

1. 서론

서울대학교는 〈서울대 전파천문대〉를 관악 캠퍼스에 건설 중이다. 2000년 초에 완공을 목표로 하고 있는 전파천문대에는 지름 6m의 70−270GHz 수신용 전파망원경이 설치될 예정이며, 현재 안테나 제작과 SIS 수신기, 자기상관 분광기 등의 개발이 이루어지고 있다.

우주 전파를 관측하기 위한 전파천문대는 지상의 전파에 의한 간섭으로부터 최대한 보호되어야 한다. 라디오, TV, 무선 통신, 상업용 및 군사용 레이다 등 각종 통신 및 레이다 기기들은 물론, 컴퓨터, 자동차, 마이크로웨이브 오븐에 이르기까지 거의 모든 전기전자 장비는 전파를 발생하며, 이러한 지상의 전파는 우주 전파에 비하여 매우 강하다. 특히 최근 들어 무선 통신에 사용되고 있는 주파수는 점차 높아지고 있으며, 이미 차량 충돌 방지 시스템, 구름 레이다, 고해상도 영상정보 서비스 등은 밀리미터파 대역의 전파를 이용함으로써 앞으로 밀리미터파 전파천문학에 심각한 지장이 우려되고 있다(오오히시 1998).

밀리미터파 전파망원경이라 하여 밀리미터파 대역의 전파 간섭만이 문제가 되는 것은 아니다. 밀리미터파 전파망원경은 수신된 전파를 1GHz 대역의 전파로 주파수를 변환하여 신호 처리한다. 따라서 1GHz 대역의 전파 간섭도 전선, 전선과 기기의 연결 부위, 혹은 수신기기 등을 통해 유입되어 우주전파의 검출을 방해할 수 있다. 아직까지 밀리미터파 대역에서는 전파 간섭원이 별로 없다는 점을 감안한다면, 현재 밀리미터파 전파망원경에 가장 위협적인 간섭은 이러한 중간 주파수 대역의 간섭이라 할 수 있다.

본 논문에서는 서울대 전파망원경의 중간 주파수 대역인 1.2−1.6GHz에서의 〈서울대 전파천문대〉 부근의 전파 환경을 조사하고, 그 영향을 분석하고자 한다.

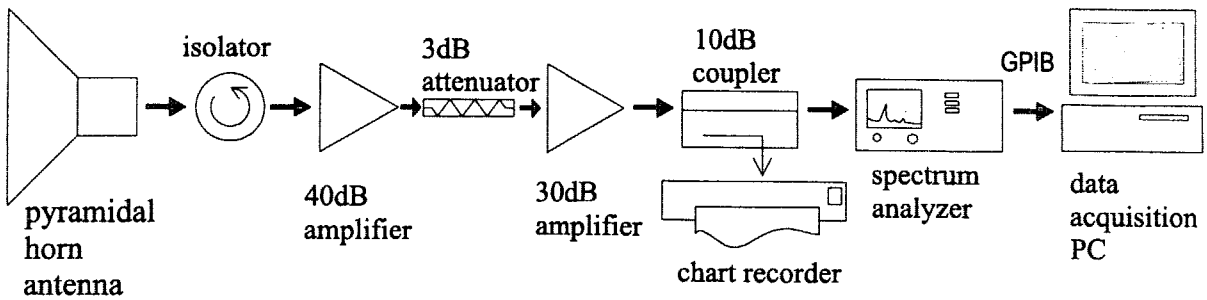

그림 1.— 전파 간섭 측정 장치의 구성도

표 1.— 전파 간섭 측정 장치의 사양

동작 주파수	1.2~1.6GHz
안테나 구경 효율[a]	~45%
RF 증폭도	~60dB
최소 검출 가능 신호 세기[b]	$-206\mathrm{dBW/m^2/Hz}$

[a]안테나 방향성 이득을 18dB로 가정했을 때, 파장 20cm에서의 이론치

[b]주파수 해상도 1MHz, 비디오 대역폭 10kHz인 경우의 수신기 감도

2. 잡음측정

2.1. 측정장치

전파 환경을 측정하기 위한 측정 장치는 공중 전파를 모으는 안테나부, RF 수신 전자부, 그리고 검출부 등 크게 세 부분으로 구성되어 있다(그림 1). 측정 장치 구성에 사용된 안테나는 김현주(1998)에 의해 제작된 것으로서, 현재 충북대학교 천문우주학과가 보유하고 있는 것을 빌려서 사용하였다. 각종 마이크로웨이브용 부품은 대덕 전파 천문대에서 제공받았으며, 스펙트럼 분석기는 서울대학교 천문학과가 보유하고 있는 제품을 사용하였다. 표 1은 제작된 측정 장치의 사양을 보여주고 있으며, 각 부의 특성은 아래와 같다.

2.1.1. 안테나부

1.4GHz의 공중 전파를 RF 수신장치에 전달하기 위하여 필요한 안테나는 피라미드형 혼안테나로서, 도파관의 크기(약 16.5cm×8.26cm)에 맞추어 가로 75cm, 세로 59cm의 크기로 제작되었다(김현주 1998). 설계치에 의하면 H면과 E면의 반치빔폭(FWHM)이 약 20°로 비슷하며, 혼의 플레어 영역과 도파관 영역은 상대적으로 가볍고 전기 전도율이 좋은 알루미늄으로 제작되었다. 도파관 안으로 진행하는 전파 신호는 도파관 영역에 설치된 탐침(가는 구리봉)에 전류를 발생시키며, 이 전류 성분은 뒤에 연결된 RF 수신 전자부에 의해 증폭된다. 이 탐침은 동작 주파수에 최적화 되도록 그 설치 위치와 길이가 결정되었다(박종애 등 1993). 또 안테나는 소형 광학 망원경의 고도-방위각식의 마운트에 설치할 수 있도록 하여 지향 편이성을 높였다.

2.1.2. RF 수신 전자부 및 검출부

이 부분은 전기적인 신호(전류, 전압)로 바뀐 미약한 전파 신호를 저잡음 증폭을 하는 마이크로 웨이브 증폭단과, 증폭된 신호의 세기를 누적하여 주파수별 세기를 보여주는 스펙트럼 분석기로 구성된다. 수신 전자부는 안테나와 초단 40dB 증폭기 사이에 놓여 정재파비를 좋게하는 아이솔레이터(isolator)로부터 시작된다. 마이크로웨이브 증폭기는 M/A COM사의 상용 증폭기를 사용하였으며, 총 증폭도는 두 개의 증폭기를 사용하여 70dB가 되도록 하였다. 그리고 두 증폭기 사이에 감쇠기를 두어 반사파 효과를 줄였다. 이어 모니터링용 차트 기록계를 위한 단자를 제공하는 방향성 커플러(coupler)가 놓였고, 주 검출 장비인 스펙트럼 분석기가 연결된다. 스펙트럼 분석기는 HP8596E가 사용되었다. 동작모드는 주파수 해상도 1MHz, 비디오 대역폭 10kHz (총 sweep time~120msec)로 하여 1.2~1.6GHz 대역을 관측하였다. 스펙트럼 분석기는 GPIB로 PC와 연결하여 관측 자료를 획득하도록 하였다.

2.2. 관측

관측은 1998년 3월 7일 14시 45분부터 3월 8일 16시 45분에 걸쳐 〈서울대 천문대〉 (45동) 옥상에서 수행하였다. 서울대 천문대의 경도 및 위도는 (126°57.′3E, 37°27.′1N)이다. 하늘에서의 방향에 따른 간섭의 특성을 조사하기 위하여, 고도 30°와 60°에서 방위 30°간격으로 구분된 24개 영역과 고도 90° 인 영역 등, 전 하늘을 모두 25개 영역으로 나누었다. 이중 건물에 가려 관측이 불가능한 4개 영역을 제외한 21개 영역에 대하여 간섭 측정을 실시하였다. 그림 2는 관측 영역의 분포를 보여주고 있다.

측정 방법은, 우선 각 영역에 대하여 연속적으로 100개의 스펙트럼을 얻었다. 하나의 스펙트럼을 얻는데 걸리는 시간은, 초기에는 1초 정도이나 횟수를 거듭할수록 길어져 2.3초정도까지 소요되었다. 기록 시간이 길어지는 이유는 하드 디스크에 기록할 수 있는 공간이 줄어들기 때문인 것

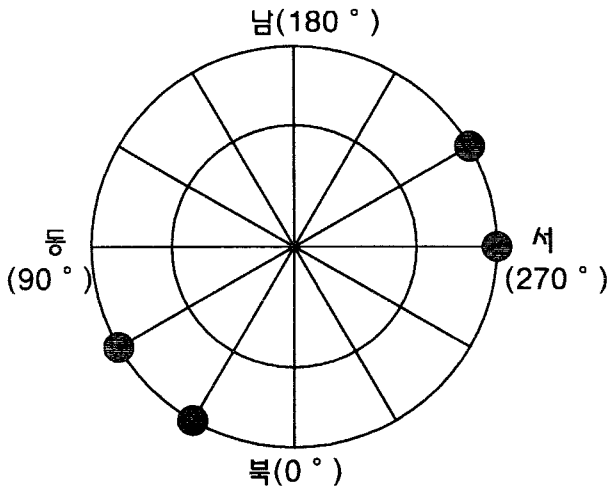

그림 2.— 하늘의 관측 영역. 고도 30° (바깥쪽 원)와 고도 60° (안쪽 원)에서 방위 30° 간격 으로 관측하였다. 까만 원으로 표시된 방향은 건물에 가려 관측이 불가능한 방향이다.

으로 생각된다. 21개 영역에 대하여 이러한 관측을 수행하는데 모두 2시간정도 소요되었다. 한편 시간에 따른 간섭의 특성을 조사하기 위하여 위 관측을 6시간마다 모두 5회 실시하였다.

수신 장치의 주파수에 따른 이득을 알아내기 위하여 'hot-cold load 실험을' 수행하였다. 즉 흑체로 근사할 수 있는 마이크로웨이브 흡수체(ECCOSORB$_{TM}$CV − 3)를 상온(290K)과 액체 질소(약 77K)에 담근 후 측정한 각각의 파워의 차이로부터 이득 계산을 시도하였다. 그러나 관측 결과에 의하면, 두 경우의 차이가 거의 없거나 심지어는 액체 질소에 담갔을 경우에 상대적으로 더 많은 파워가 관측되는 경우도 있었다. 이러한 결과는 흡수체가 관측 주파수에서 흑체의 역할을 하지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 실제로 제작 회사에 문의한 결과 CV-3는 밀리미터파 대역에서 사용되기 위한 목적으로 제작되었으며, 1.4GHz에서는 반사율이 ~10%일 것으로만 예상하고 있었다(Emerson& Cuming Microwave Products, Inc 1999). 따라서 'hot-cold load 실험' 은 성공하지 못하였다. 대신 빈 하늘을 보았을 때의 파워의 차이로부터 수신기의 잡음 온도를 300 − 400K로 추정할 수 있었다.

3. 결과

3.1. 간섭의 특성

그림 3의 위 그림은 관측된 모든 스펙트럼을 평균한 평균 스펙트럼이며, 아래 그림은 각 주파수에서 관측된 최대값들로 이루어진 최대 스펙트럼이다. 가로축은 주파수(GHz)이며, 세로축은 파워(dBm)을 나타낸다. 그림 3의 평균 스펙트럼으로부터 항상 강한(−53~−49dBm) 간섭이 관측되는

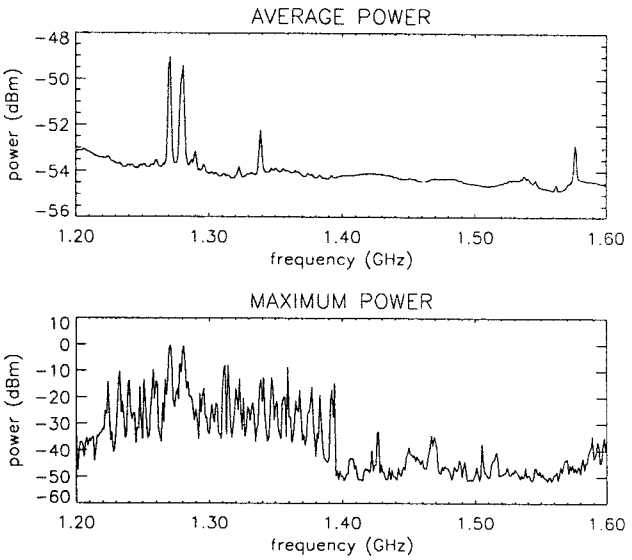

그림 3.— (위) 관측된 모든 스펙트럼을 평균한 평균 스펙트럼. (아래) 각 주파수에서 관측된 최대값들로 이루어진 최대 스펙트럼. 가로축은 주파수(GHz)이며, 세로축은 파워(dBm)을 나타낸다.

표 2.— 강한 간섭이 관측되는 주파수

주파수(GHz)	평균 파워(dBm)	최대 파워(dBm)
1.271	−49.0	−0.34
1.281	−49.4	−0.56
1.339	−52.2	−13.3
1.576	−52.9	−46.4

네 개의 주파수 대역이 있음을 알 수 있다. 이들의 주파수와 평균 파워와 최대 파워를 표 2에 실었다. 한편 그림 3의 최대 스펙트럼은 1.2−1.4GHz 대역에서 최대 −0.3dBm의 세기를 갖는 강한 간섭이 전반적으로 나타남을 보여주고 있다.

그림 4는 평균 스펙트럼의 방향에 따른 간섭의 특성을 보여준다. 간섭의 세기는 방향에 따라 크게(≤ 5배) 다르지 않으나, 동서 방향, 특히 서쪽 방향의 평균 세기가 남북 방향에 비하여 상대적으로 약하게 나타난다. 그리고 고도 30도에 비하여 고도 60도에서 항상 세기가 약함을 알 수 있다. 1.271GHz 간섭은 정북방향에서 가장 강하게 나타난 반면, 1.281GHz 간섭은 남동 방향에서 가장 강하게 나타난다. 최대 스펙트럼의 세기도 평균 스펙트럼의 세기와 비슷한 변화 양상을 보여준다.

한편 6시간 간격으로 측정한 5개의 스펙트럼에서는 간섭의 평균 세기가 각 영역별로 비슷하게 나타난다. 이는 간섭의 최대 세기가 평균 세기에 비하여 매우 크다는 점을 감안할 때, 간섭의 세기가 변화하는 시간 척도가 매우 짧음을 뜻한다. 이를 확인하기 위하여 정남 지점에서의 연속적

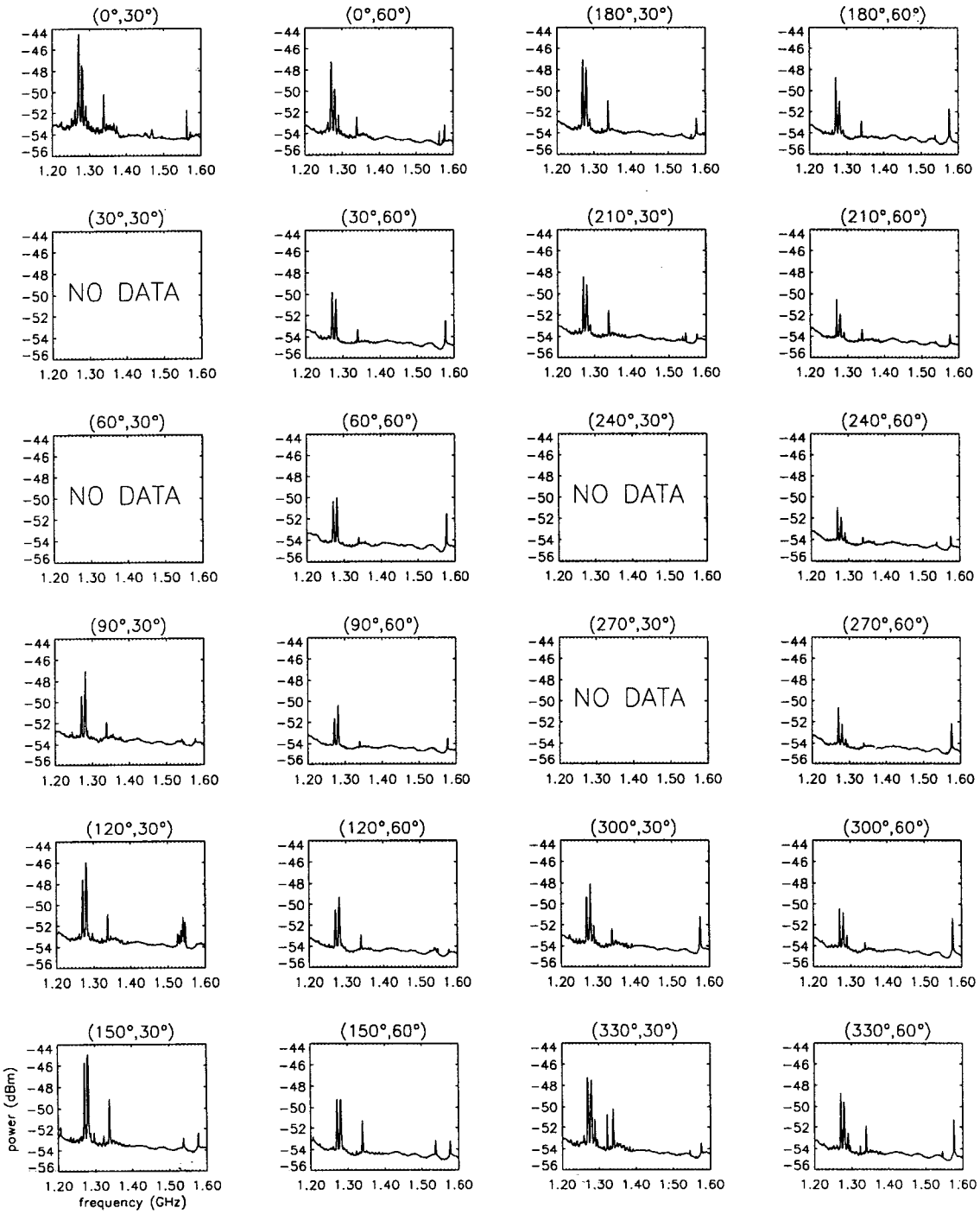

그림 4.— 평균 스펙트럼의 방향에 따른 세기 변화. 각 지점의 방위각과 고도를 스펙트럼 위에 기록하였다. 방위각 0° 는 정북 방향을 나타내며, 동쪽으로 방위각이 증가한다.

으로 측정한 100개의 스펙트럼 자료를 그림 5에 비교하여 보았다. 그림 5로부터, 강한 간섭의 경우 대략 0.1초의 주기를 갖고 순간적(≤0.01초)으로 나타났다 사라짐을 볼 수 있다.

4. 토의

4.1. 간섭의 특성

본 연구 결과에 의하면 서울대 전파천문대 부지의 전파 간섭의 특성은 다음과 같은 몇 가지로 요약할 수 있다. (1) 1.2−1.4GHz 대역에서 강한(≤ −20dBm)간섭이 관측되며, 특히 1.271GHz와 1.281GHz에서 최대 파워가 각각 −0.34dBm 및 −0.56dBm인 매우 강한 간섭이 관측된다. (2) 이러한 간섭의 주파수 특성은 방향에 거의 의존하지 않는다. 단 고도 30° 에 비하여 고도 60° 에서 간섭의 세기가 일반적으로 약하며, 동서 방향, 특히 서쪽 방향의 간섭의 세기가 남북 방향에 비하여 약하게 관측된다. (3) 간섭은 매우 짧은(≤0.01초) 시간 동안 나타났다 사라지므로, 평균 파워는 최대 파워에 비하여 매우 작다. 1.271, 1.281, 1.339 및 1.576GHz에서 강한(≤ −49.0dBm) 평균 파워를 가진 간섭이 관측되었으며, 이들 주파수에서는 간섭이 약 0.1초의 주기성을 가지고 반복적으로 나타나는 것으로 관측되었다.

간섭원으로는 위성, 아마추어 중계기, 항공 및 군용 레이다 등을 생각할 수 있다. 1.26−1.3GHz대역은 정부통신부고시(1998)에 의하여 아마추어국이 운영할 수 있는 주파수 대역으로 지정되어 있다. 따라서 이 주파수 대역의 간섭은 군용 레이다 혹은 아마추어 위성, 중계기, ATV 등에 의한 것으로 추정된다. 그러나 가장 강한 간섭이 관측된 1.271GHz와 1.281GHz의 간섭원이 구체적으로 무엇인지는 확인할 수 없었다. 단지 주기성을 갖고 모든 방향에서 나타나는 것으로 보아, 군 방공 레이다일 가능성이 높은 것으로 추정된다.

4.2. 간섭의 영향

관측된 1.2−1.6GHz 대역의 간섭 신호는 서울대 전파망원경의 중간 주파수 단을 통하여 수신기로 유입될 수 있다. 가능한 유입 경로로는 안테나와 건물 사이의 동축선, 연결소자, 안테나의 수신기실 혹은 건물 안에 위치한 수신기기 내부의 기판 등을 생각할 수 있다. 간섭 신호가 수신기 혹은 관측 결과에 어떠한 영향을 미치는 가는 신호의 파워와 관측 방법에 따라 다르다. 우선 그 파워에 따라 간섭을 다음과 같이 세 종류로 분류할 수 있다(CCIR 1982): (1) 수신기의 반응을 비선형화 하거나 혹은 소자를 파손시킬 수 있을 정도의 아주 강한 간섭: 증폭기, 믹서 등의 수신기 소자는 대부분 10−100dBm보다 강한 파워가 입력할 경우 파손되거나 혹은 비선형적인 반응을 하게 된다. (2) 분별할 수 있을 정도의 강한 간섭: 시스템의 잡음보다 큰 간섭 신호로서 쉽게 구별할 수 있다. (3) 분별할 수 없을 정도의 아주 미약한 간섭: 시스템 잡음보다 미약한 간섭은 그 유무를 쉽게 분별할 수 없으며, 따라서 특히 해롭다. 정량적으로는 시스템 잡음의 1/10 보다 강한 파워를 가진 간섭을 '해로운 간섭(harmful interference)' 으로 분류한다.

서울대 전파천문내 부근의 간섭의 세기는 관측된 평균 파워와 최대 파워로부터 구할 수 있다. 여기에서는 가장 강한 1.271GHz 간섭을 예로 들어 그 세기를 구해보고자 한다. 우선 안테나를 통하여 수신된 간섭은 수신기를 통과하면서 약 60dB 증폭되었다. 따라서 수신기에 의하여 증폭되기 전, 안테나 단에서 관측된 간섭의 평균 파워는 −109dBm, 최대 파워는 −60.3dBm 이다(표 2). 일반적으로 안테나에 의해 수신된 파워 P와 안테나에 도달한 신호의 세기 S_ν 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$P = \frac{1}{2} S_\nu \Delta\nu A_{\rm eff}(\theta,\phi) = \frac{1}{2} S_\nu \Delta\nu \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta,\phi) \quad (1)$$

단 $A_{\rm eff}(\theta,\phi)$ 는 (θ,ϕ) 방향의 안테나의 유효 면적을, $\Delta\nu$는 검출기의 대역폭을, 그리고 $G(\theta,\phi)$는 안테나의 지향 이득을 나타내고, $\frac{\lambda}{4\pi}$는 등방 안테나의 유효면적이다. 위 식은 신호가 편광되어 있지 않을 경우, 혹은 편광 방향이 무작위로 변할 경우를 가정하고 있다. 지상 간섭의 경우 편광의 특성이 어떻게 되는 지는 명확하지 않으나, 간섭원의 다양하고 각각 다른 편광 방향을 가지고 있다고 가정하면 위 식을 적용하는데 무리가 없을 것으로 판단한다. 본 연구에서 수행된 관측의 경우 $\lambda \sim 20$cm, $\Delta\nu = 1$MHz이므로 식 (1)은 아래와 같이 주어진다.

$$\log P({\rm dBW}) = \log S_\nu({\rm dBW/m^2/Hz}) + \log G({\rm dB}) + 32 \quad (2)$$

관측된 간섭이 안테나의 지향성에 의하여 얼마나 증폭(혹은 감쇄) 되었는가는 명확하지 않다. 그러나 관측이 고도 30° 와 60° 를 지향하여 이루어졌고 사용한 안테나의 반치빔폭이 20° 인 점을 고려한다면, 지상의 간섭 신호는 안테나의 부빔을 통하여 수신되었다고 보는 것이 타당할 것이다. 대략 G=1(=0dB)로 가정한다면, 식 (2)로부터 서울대 전파 천문대 부지의 간섭의 세기 S_ν는 평균 −171dBW/m^2/Hz, 최대 −122dBW/m^2/Hz임을 알 수 있다.

위와 같은 세기의 간섭이 얼마만한 파워를 수신기에 전달할 수 있는가를 계산하기 위해서는 구체적인 조건이 주어져야 한다. 최악의 경우로서 아무런 차폐없이 PCB 기판 위의 회로를 통하여 유입되는 경우를 생각할 수 있다. 이 경우 기판 위의 회로를, 파장보다 매우 작은 루프 안테나로 근사하여 그 효과를 추정할 수 있다 (William 1992). 작은 루프 안테나의 경우, 그 복사 패턴은 작은 쌍극자 안테나와 동일하며, 따라서 최대 유효면적은 $(3/8\pi)\lambda^2 \simeq 5\times$

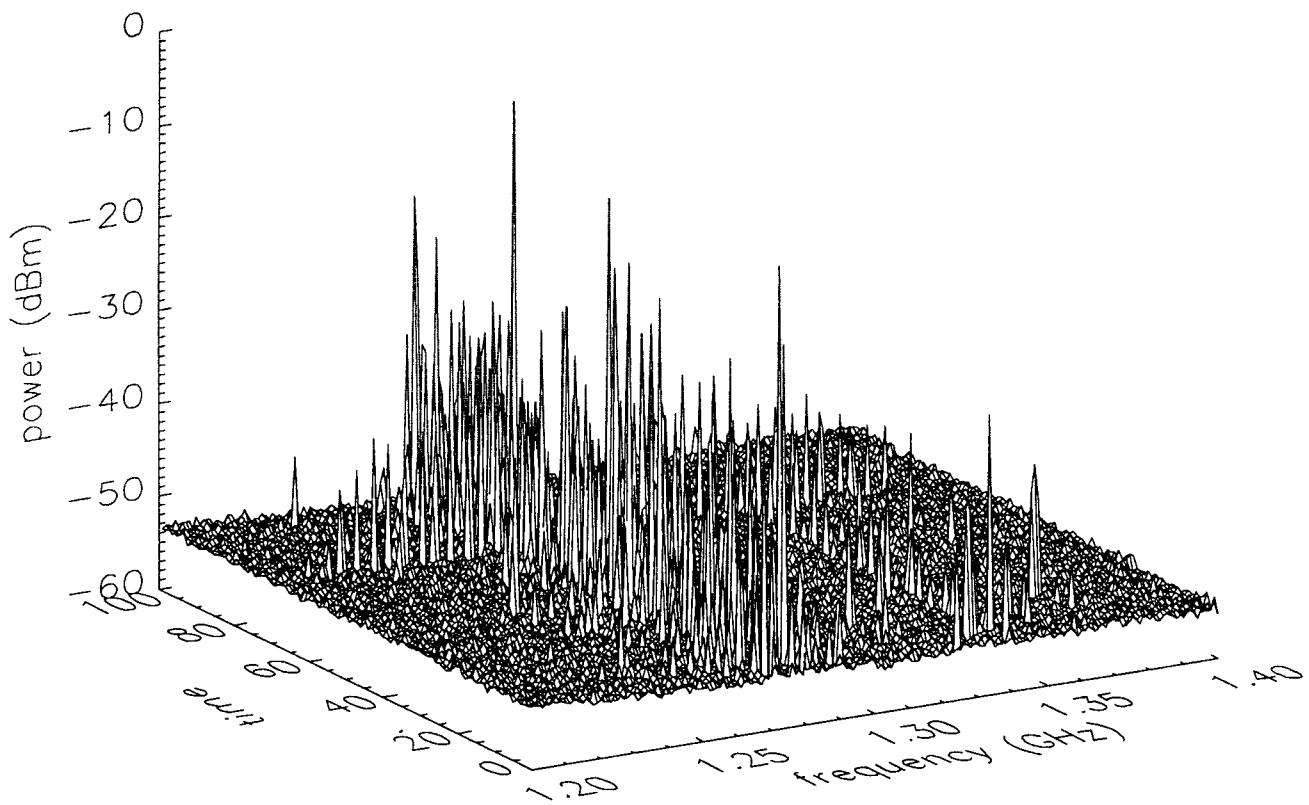

그림 5.— 정남 지점에서 연속적으로 측정한 100개의 스펙트럼 자료. 시간의 단위는 대략 0.01초임.

$10^{-3}m^2$이 된다(Balanis 1982). 따라서, 만약 회로에 수직한 방향에서 간섭이 유입된다면, 평균 −194dBW/Hz, 최대 −145dBW/Hz가 수신기에 입력된다.

관측된 간섭이 관측 결과에 어떠한 영향을 미치는 가를 판단하기 위해서는, 그 세기를 관측 시스템의 잡음과 비교하여야 한다. 서울대 전파망원경을 이용하여 주로 수행될 관측은 선스펙트럼 관측이므로, 여기에서는 전형적인 'position-switching' 을 이용한 선스펙트럼의 잡음과 비교하겠다. 구체적으로 서울대 전파망원경은 $\Delta\nu_{\rm BW}$ = 50MHz의 대역폭을 가진 N=1024 채널 자기상관기를 갖출 계획이다. 이 자기상관기를 이용하여 3-level sampling으로 1분 동안 적분할 경우, 시스템 잡음은 다음과 같이 주어진다.

$$\delta P_\nu = \frac{1.23kT_{\rm sys}}{\sqrt{\Delta\nu_{\rm BW}{\rm t/N}}} \simeq -232{\rm dBW/Hz} \qquad (3)$$

시스템 온도로서 700K를 가정하였으며, 스펙트럼은 해닝 평탄화(Hanning smoothing)하였다고 가정하였다. III장에서 보았듯이 간섭은 매우 짧은(≤0.01초) 동안만 나타나므로, 관측 스펙트럼에는 평균 파워가 유입된다. 앞에서 계산한 결과에 의하면 평균 파워는 −194dBW/Hz로서 시스템 잡음에 비하여 상당히 크다. 따라서 이 결과만을 본다면, 서울대 전파천문대 부근의 간섭은 CCIR 분류의 '분별할 수 있을 정도의 강한 간섭' 에 해당한다.

그러나 위의 평균 파워는 PCB 기판위의 회로를 통하여 아무런 차폐없이 가장 효율적으로 유입되는 것을 가정한 경우이므로, 기판이 있는 기기의 차폐를 효율적으로 할 경우 실제로 수신기에 입력되는 파워는 위의 값보다 훨씬 적을 것으로 예상된다. 하지만 기기의 경우 통풍 및 각종 케이블 입력을 위한 구멍, 계기판, 뚜껑 혹은 바닥과 옆면의 틈 등은 차폐가 어려운 부위이므로 각별한 주의가 요구된다 (Williams 1992 참조). 한편 주파수로 사용할 동축선이나 SMA 커넥터와 같은 연결 소자의 경우, 일반적으로 70dB 이상 외부 간섭을 차폐하기 때문에 간섭 효과는 무시할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 또 한편으로는 장시간 적분하여 아주 잡음이 적은 스펙트럼을 얻고자 할 경우에, 궁극적으로 간섭에 의하여 그 한계가 결정될 수도 있음을 알 수 있다. 〈서울대 전파천문대〉 주변의 간섭이 시스템의 감도에 영향을 줄 정도의 '해로운 간섭' 에 속하는 가 아닌가는, 시스템이 완성된 후 실험을 통하여 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구를 위해 안테나를 빌려주신 충북대학교의 김용기 교수와 각종 마이크로파 부품을 빌려주신 한국천문연구원의 한석태 박사께 감사를 드립니다. 또한 유익한 토의를 함께 한 변도영, 자료 분석을 도와준 이정은, 그리고 그림

의 틀린 점을 지적해준 심사자께 감사 드립니다. 본 연구의 일부는 과학기술부 특정연구개발사업의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

김현주 1998, 학사학위논문 (충북대학교)
박용선, 남욱원, 공경남, 성현일, 정재훈 1996, 천문학 논총, 11, 221
박종애, 양종만, 한석태, 박용선 1993, 천문학 논총, 8, 1
오오히시 1998, 전파천문학이 직면한 생존의 위기, 일본 천문월보 98년 5월호 게재 (정현수 역)
Balanis, C. 1982, Antenna Theory (John Wiley & Sons, Inc; New York)
CCIR, 1982, Recommendations and Reports, Vol II, Rep. 224-5, 497
Crane, P. C. 1991, in Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series, vol 17, 258
Emerson & Cuming Microwave Products, Inc 1999, private communication
Williams, T. 1992, EMC for Product Designers (Butterworth-Heinemann Ltd: Oxford)