

태양전파교란 실시간 모니터링 시스템구축: II. 2.8GHz 수신기 제작 및 전파환경측정

김용기^{1†}, 박사라¹, 이대영¹, 윤요나^{1,2}

¹충북대학교 천문우주학과

²한국천문연구원

A CONSTRUCTION OF THE REAL TIME MONITORING SYSTEM OF THE SOLAR RADIO DISTURBANCE: II. 2.8GHz RADIO RECEIVER AND RADIO ENVIRONMENT

Yonggi Kim^{1†}, Sara Park¹, Dae-Young Lee¹, and Joh-Na Yoon^{1,2}

¹Dept. of Astronomy and Space Science, Chungbuk National University Cheongju 361-763, Korea

²Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: ykkim153@chungbuk.ac.kr

(Received January 9, 2008; Accepted February 25, 2008)

요 약

태양전파교란 실시간 모니터링 시스템 구축의 일환으로 2.8GHz를 중심으로 500MHz 주파수 대역을 수신할수 있는 태양전파수신기를 제작하였다. 윤요나 등(2004)의 구동시스템을 이용하여 태양전파를 측정해본 결과 주변에 DMB방송및 청주국제공항 관제탑주파수등 태양전파측정을 방해하는 전파들을 발견하였다. 이 연구는 제작된 수신기의 성능을 점검하여 보고, 또 전파망원경이 설치된 충북 청주시의 충북대학교 주변의 2.8GHz 대역의 전파환경을 측정하는 실험을 수행하였다. 실제 2.649GHz와 2.874GHz에서 너무 강한 전파 신호가 존재하여 태양전파 플럭스를 측정하지 못하도록 하는 것을 확인하였다. 전파환경 측정자료를 분석해보고, 이 연구에서 제작한 수신기를 태양전파 교란 실시간 모니터링에 사용하기 위한 개선방안을 살펴보았다. 천문학적으로 중요한 주파수대역은 향후 잘 보호되어야 한다고 주장한다.

ABSTRACT

As the second step of the real time monitoring system of the solar radio disturbance, we constructed a 2.8 GHz radio receiver with 500 MHz bandwidth. Using the control and observing system (Yoon et al. 2004), we observed the Sun, and found some frequencies, which disturb the Solar radio flux to be observed. DMB and airport control frequencies are identified as responsible for this disturbance. As well as the testing the receiver, the measurment of the radio environment at 2.8 GHz with 500 MHz bandwidth are carried out around Chungbuk National University. In fact, the radio power of the two frequencies, 2.649 GHz and 2.874 GHz is so high that we can not observe the Solar radio signal at 2.8 GHz. We report some results of this measurment and suggest the method to overcome this problem. We conclude also that the freqeucies, which are important for the astronomy, should be protected in the future.

Keywords: radio telescope, radio receiver, radio environment

[†]corresponding author

1. 서 론

태양에서 나오는 여러 종류의 전파방출중에서 태양 활동의 지표로 사용되는 것은 천천히 강도가 변하는 방출(SVC, The Slowly Varying Component) 로서, 2 ~ 50cm 파장 범위에서 가장 잘 나타나고 그 중 10cm 주위의 파장은 흑점주기 동안 가장 큰 변화를 보여준다(Paul 2001). 이 방출의 발생 원인은 열적이고 활동 지역들에 갇힌 플라즈마 덩어리에서 나오는 자유-자유 방출(free-free emission)이라는 주장이 지배적이다. Covington(1969)은 2.8GHz(10.7cm) 태양 전파의 일별 세기가 태양 활동의 지표로서 광범위하게 사용될 수 있고, 태양의 흑점 수 또는 표면 위에 나타나는 흑점의 총 영역과도 관련이 있다고 밝혔다. 태양 활동이 지구에 많은 영향을 미치기 때문에 현재까지 흑점수와 2.8GHz(10.7cm)의 태양 전파 플럭스를 통하여 태양 활동을 예측하는 연구를 많이 하고 있다. 태양의 흑점 개수를 알기 위한 광학적 관측은 대기의 상태에 따라 많은 영향을 받게 되지만, 2.8GHz 대역에서 대기에 의한 감쇠계수(주로 산소에 의한)는 무시할 수 있을 정도의 양이다(정만영 등 1998). 빔방울도 전파의 파장에 견주어 크기가 훨씬 작기 때문에 강우감쇠 또한 문제가 되지 않는다. 또한 싸락눈에 의한 마이크로파대나 밀리미터파대의 감쇠도 보통은 문제가 되지 않을 정도의 작은 양이다. 그러므로 2.8GHz(10.7cm) 영역의 전파 관측은 흑점 수 관측과 비교하여 어떤 날씨에도 관측될 수 있다는 이점이 있다.

우리는 국내에서도 2.8GHz의 태양전파 플럭스를 상시관측하여 태양전파 교란모니터링을 하기 위한 시스템을 구축하는 연구를 시작하여 전파망원경의 구동시스템을 구축한바 있다(윤요나 등 2004). 이 연구는 그 두번째 단계로 이 구동시스템에 부착될 2.8GHz의 전파수신기를 제작하고, 수신기의 성능을 1차 점검하는 것을 주목표로 삼았다.

제작된 수신기의 성능을 점검하는 중에 충북대학교 주변의 2.8GHz 대역의 전파환경이 많은 간섭을 받고 있음을 확인하였다. 1.4GHz 대역 전파환경이 서울대학교 전파천문대 부근에서 측정되어 이미 보고된 바 있어(구본철 등 1999), 이 연구도 우선 충북대학교 주변의 전파환경을 측정해보기로 하였다. 이 논문은 그 측정결과를 논의하고 향후 수신기의 개선방향등을 논의하였다.

2. 2.8GHz 태양전파 관측 시스템 구축

2.1 안테나 및 구동시스템

안테나부는 안테나와 Feed Horn을 포함한다. 태양 전파 상시관측을 위한 안테나는 1998년 한국천문연구원에서 충북대학교로 이전한 1.8m 전파 망원경 2대중 1대를 사용하였다. 안테나의 직경은 1.8m이며 형태는 포물면형이고, 초점 방식은 prime focus 방식을 택하였다. 추정 구경효율은 0.57 정도이고, 안테나 이득은 32dB 정도이다(박사라 2006).

안테나는 CBNUART 프로그램에 의해 자동관측 및 수동관측 모드를 설정하여 상황에 맞게 관측을 수행할 수 있다. 자동관측모드가 설정되었을 때 일출 후 태양의 고도가 30도 이상이 되면 태양의 위치를 계산하여 계산된 위치로 망원경을 이동시킨다. 망원경의 이동이 완료되면 망원경이 15초 각/초의 속도로 태양을 추적하며 태양으로부터 방출되는 전파의 세기를 측정하여 그 값을 기록하고, 일몰 전 태양의 고도가 30도 이하가 되면 관측을 중단하고 망원경을 파킹(Parking) 위치로 옮기고 다음 일출 후 태양의 고도가 30도 이상이 될 때까지 대기한다. 망원경의 파킹위치는 시간각 0시 고도

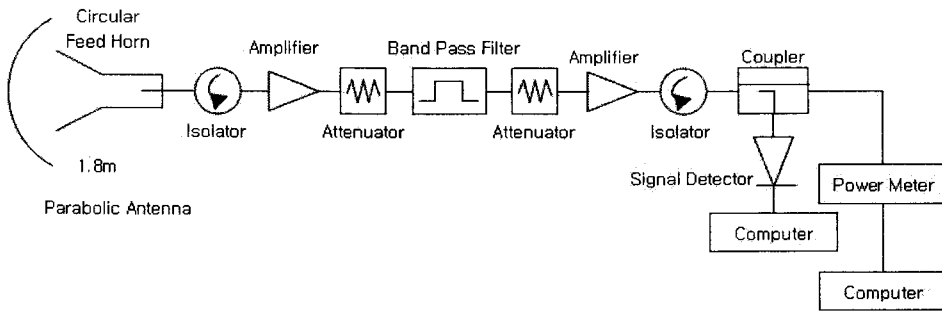


그림 1. 이 연구에서 제작된 2.8GHz 수신 시스템의 구조.

54도 근처로 하여 우천시에도 빗물이 안테나 안에 고이지 않도록 고려하였다(윤요나 등 2004). 구동 시스템의 추적 및 지향 정밀도에 대해서는 윤요나 등(2004)이 자세히 보고한 바 있다.

2.2 수신기

수신기는 연속 전파인 태양 전파 중 태양의 흑점과 밀접한 연관이 있는 2.8GHz대를 상시 관측 하기 위한 것이므로 그에 맞추어 태양 전파를 충분히 받아들이기 위해 주파수 대역을 2.5 ~ 3.05GHz로 하였다. 그림 1과 같이 수신기는 60dB 사양에 맞추기 위하여 30dB 이득을 갖는 증폭기 두 개를 두었고, 증폭기의 정제과 발생을 최소화하기 위하여 앞단과 뒷단에 아이솔레이터와 감쇠기(attenuator)를 두었다. 또한 대역폭을 500MHz로 제한시키기 위한 대역통과여파기(band pass filter)를 두었고 항상 신호의 특징을 모니터링 하기 위한 10dB 커플러를 두었다(박사라 2006).

각 기기들의 특성들을 회로망분석기를 이용하여 측정하였고, 그 측정값들을 이용, Meclaning & Vito(2000)과 Cheung & Leven(1985)가 제시한 방법에 의거하여 수신기 잡음온도를 계산하였다. 그 결과를 표 1에 제시하였다. 표에서 G 는 이득을 나타내고, G_{tot} 은 각 기기들을 거치면서 얻는 총이득이며, T_{phs} 은 상온의 온도, N.F.는 잡음지수를 나타낸다. T_{amp} 는 증폭기의 잡음온도이며, T_{eq} 는 각 기기들의 등가잡음온도이다. B 는 주파수 대역폭이며, T_{rx} 는 안테나의 잡음온도를 제외한 수신기 전체 잡음온도인데, 이 연구에서는 ΔT_{rx} 값을 두어 수신기의 각 기기가 가지는 잡음온도를 구하여 합산하는 방식으로 결정하였다. T_{sys} 은 T_{rx} 에 하늘에서 들어오는 온도까지 합한 값이다. P_{out} 은 각 기기를 통과했을 때 나오는 전력이다.

2.3 기록계

전파 망원경을 통해서 들어온 전파가 수신기에서 2.55GHz부터 3.05GHz까지 500MHz 대역폭만 통과시켜 나온 전파를 스펙트럼 분석기로 주파수에 따른 신호의 세기를 측정하거나, 파워메타로 500MHz 대역폭으로 들어오는 모든 신호의 세기가 합쳐진 전력을 측정할 수 있다. 이 연구에서는 충북대학교 43동 주변에서 2.8GHz대 태양 전파관측을 방해하는 전파가 어떠한 것들이 있는지, 어느 위치에서 얼마만큼의 세기를 갖는 지를 알아보기 위해 스펙트럼 분석기를 이용하여 관측하였다. 향후 태양전파를 실시간 모니터링 관측을 할 때, 자료의 저장은 자동관측프로그램인 CBNUART를 이용하여 파워메타를 제어하고, 관측이 시작되는 시각을 yymmdd[hmmss].txt 의 형태로 이름을 정하여

표 1. 태양 전파교란 실시간 모니터링을 위해 제작된 2.8GHz 수신기 잡음온도.

	G	G_{Tot}	T_{phy}	N.F.	T_{amp}	T_{eq}	B	ΔT_{rx}	T_{rx}	T_{sys}	P_{out}	P1dB
	[dB]	[dB]	[K]	[dB]	[K]	[K]	[MHz]	[K]	[K]	[dBm]	[dBm]	
sky						3						
horn	-0.1	-0.1	300			7	500	7.0	7.0	10.0	-101.7	
cable	-0.63	-0.73	300			47	500	47.9	54.9	57.9	-94.7	
isolater	-0.3	-1.03	300			21	500	25.4	80.3	83.3	-93.4	
amplifier	28.02	26.99	300	0.63	45.27	45	500	57.4	137.7	140.7	-63.1	9.17
attenuator	-2.9	24.09	300			285	500	0.6	138.3	141.3	-66.0	
BPF	-4.2	19.86	300			489	500	1.9	140.2	143.2	-70.2	
attenuator	-2.9	16.99	300			285	500	2.9	143.1	146.1	-73.0	
amplifier	28.14	45.13	300	0.65	46.82	47	500	0.9	144.0	147.0	-44.8	8.94
isolater	-0.28	44.85	300			20	500	0	144.0	147.0	-45.1	

표 2. 태양 전파교란 실시간 모니터링을 위해 제작된 2.8GHz 수신 시스템 사양.

안테나 직경 [m]	수신기 이득 [dB]	분해능 [°]	중심주파수 [GHz]	대역폭 [MHz]
1.8	45	1.2	2.8	500

자료정리를 효과적으로 할 수 있게 하였다(윤요나 등 2004).

이 연구에서 제작된 태양 전파교란 실시간 모니터링을 위한 전파 관측시스템의 안테나부와 수신기부의 사양을 표 2에 정리하였다.

3. 청주지역 전파환경 시험관측 및 분석

이 연구에서 제작된 수신기는 전파망원경에 부착되어, 윤요나 등(2004)가 구축한 전파망원경 구동시스템을 이용 태양의 전파를 자동으로 관측할 수 있게 되었다. 실제 수신기를 2.8GHz 태양전파 플럭스를 실시간으로 관측하는데 이용하기 전에 우리는 전파망원경이 설치된 충북대학교 인근의 전파환경을 측정하면서 수신기의 성능을 점검하여 보았다. 시험 관측은 2005년 4월 26일과 2005년 4월 30일 2회에 걸쳐 충북대학교 43동 옥상에서 수행하였다. 청주의 경도 및 위도는(127°27' 22"E, 36°37' 32"N)이다. 하늘에서의 방향에 따른 교란의 특성을 조사하기 위해 그림 2와 같이 고도 30°(바깥쪽 원)와 60°(안쪽 원)에서 방위 30° 간격으로 24방향과 고도 90° 방향으로 나누었다(구본철 등 1999). 방위각 0°는 정북 방향을 나타내며, 동쪽으로 방위각이 증가한다. 총 25방향을 관측하였다.

관측은 윤요나 등(2004)이 개발한 CBNUART란 제어프로그램이 사용되었고, 스펙트럼분석기는 HP 8593E가 사용되었다. 동작모드는 주파수 해상도를 3MHz, 비디오 대역폭을 1MHz로 하였다. 매 관측을 시작할때마다 reset하고 기계가 안정화되기까지 3초간 여유를 두고 자료를 얻기 시작했는데, 2.4214GHz부터 2.9214GHz까지 주파수대를 401등분하여 년, 월, 일, 시, 분, 초, 파워세기[dBm]로 저장하는 방법을 사용하였다. 이렇게 측정된 관측결과로 평균 스펙트럼의 방향에 따른 세기 변화를 그림 3에 제시하였다. 2회에 걸쳐 관측한 관측점의 자료값을 각 방향에서 주파수 별로 모두 평균하여 나타내었다. 그림 3을 보면 2.6430GHz대의 DMB 방송 주파수의 신호의 세기가 전 영역에서 크게 나타남을 알 수 있고, 청주 국제공항관제탑의 신호의 세기는 전 영역에서 상대적으로 크게 나타났다.

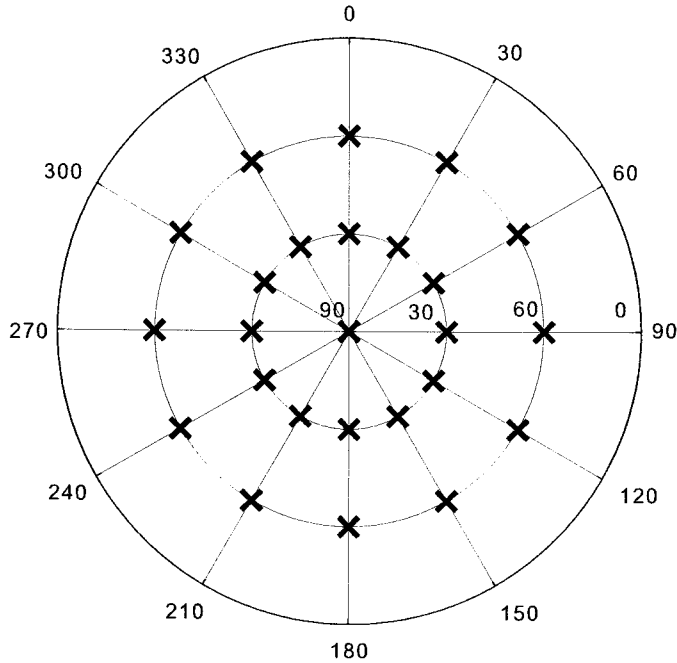


그림 2. 하늘의 관측 영역. 고도 30°(바깥쪽 원)와 60°(안쪽 원)에서 방위 30° 간격으로 관측하였다.

그리고 각각의 방위각 60°, 90°, 120°에서 2.7GHz부터 2.77GHz대에서 신호가 들어오는 것을 볼 수 있었는데 이것은 대한민국 주파수 분배표(정보통신부 고시 2005)에서 항공무선항해업무에 의한 지상에 설치한 레이더 및 이 주파수만을 송신하는 항공기상의 트랜스폰더로 확인되었으나 이 방향은 태양을 관측할때는 관계없는 지역이다.

그림 4에 전 방향에서 각 주파수당 관측된 모든 스펙트럼을 평균한 결과를 제시하였다. 평균 스펙트럼으로부터 2.6289GHz에서 2.6564GHz 대역의 DMB 방송 주파수가 전 영역에서 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 최대값 스펙트럼으로부터 DMB 방송 주파수 대역 중 2.6489GHz대에서 -28.999dBm으로 가장 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이들이 태양전파플럭스를 얼마나 간섭하는지 알아보기 위해, 수신기에 입력되는 전파신호의 세기 P와 안테나 온도 사이에

$$P = GkTB = AT \tag{1}$$

이 성립한다(변도영 1996). 여기서 T는 온도(K)이며, G는 수신기의 이득(Gain), B는 대역폭(Band width)으로 Hz 단위이고, k는 볼츠만 상수이며, A = GkB로 정의한다. 수신기의 잡음온도를 무시하고, 방해전파원에 대해 구해진 전파온도를 온도에 따른 플럭스 변환 공식

$$S_0 = \frac{2kT}{A_e} [Wm^{-2}Hz^{-1}] \tag{2}$$

을 사용하면(Kraus 1986), 2.8GHz 영역의 전파환경에 영향을 주는 전파세기를 SFU(Solar Flux Unit,

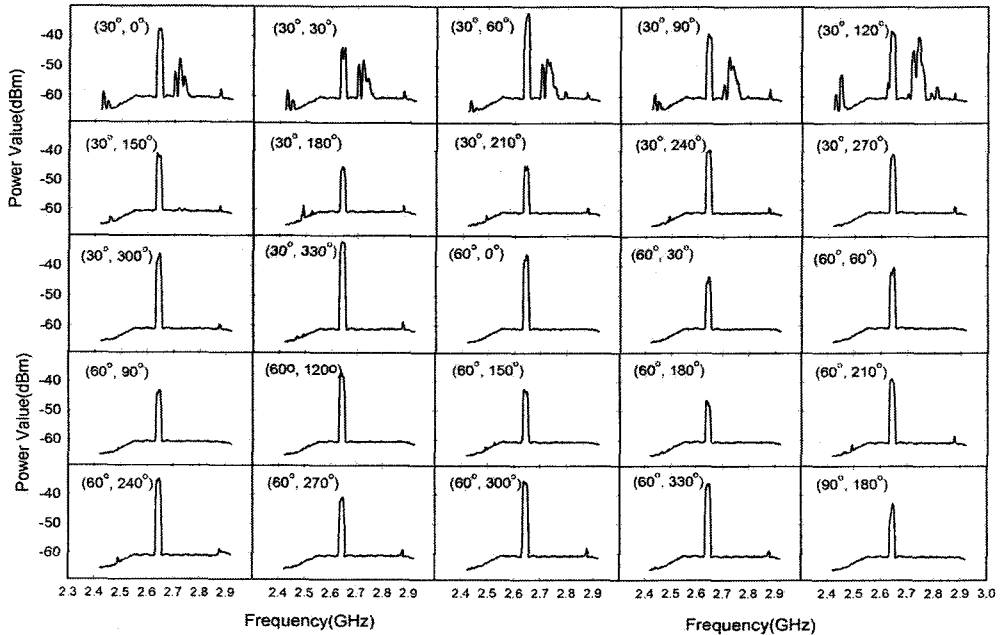


그림 3. 평균 스펙트럼의 방향에 따른 세기 변화. 각 지점의 방위각과 고도를 스펙트럼 위에 기록하였다. 방위각 0°는 정북 방향을 나타내며, 동쪽으로 방위각이 증가한다.

표 3. 2.8GHz 태양전파관측에 영향을 주는 주파수.

주파수 [GHz]	전파세기 [dBm]	전파세기 [SFU]	전파원
2.649	-28.99	1.01×10^4	DMB 방송
2.874	-14.56	2.80×10^5	청주국제공항 관제탑 주파수

$10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)으로 환산할 수 있다. 여기서 A_e 는 안테나의 면적에 구경효율이 곱해진 유효면적(m^2)이다. 표 3에 제시된 환산 결과에서 볼 수 있듯이 이 연구에서 제작한 500MHz 대역폭의 2.8GHz 수신기로 관측한 청주지역 2.8GHz 영역 전파환경은 DMB 방송과 청주국제공항 관제탑 주파수 등의 방해가 많이 받고 있어서, 이들 전파원의 주파수는 태양전파 모니터링 관측에서 제외되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결과 및 토의

태양 흑점과 밀접한 관계를 보여주고 있는 태양에서 나오는 2.8GHz 전파를 이용하여 태양전파 교란 실시간 모니터링 시스템을 구축하였다. 2.8GHz 수신기를 제작하여 태양전파를 수신하여 보았으나 태양에서 관측되는 전파의 파워값이 일정하지 않고 수시로 변하는 것을 확인하였다. 스펙트럼 분석기를 이용하여 2.8GHz 영역에서 전파환경을 측정해본 결과의 한 예를 그림 5에 제시하였다.

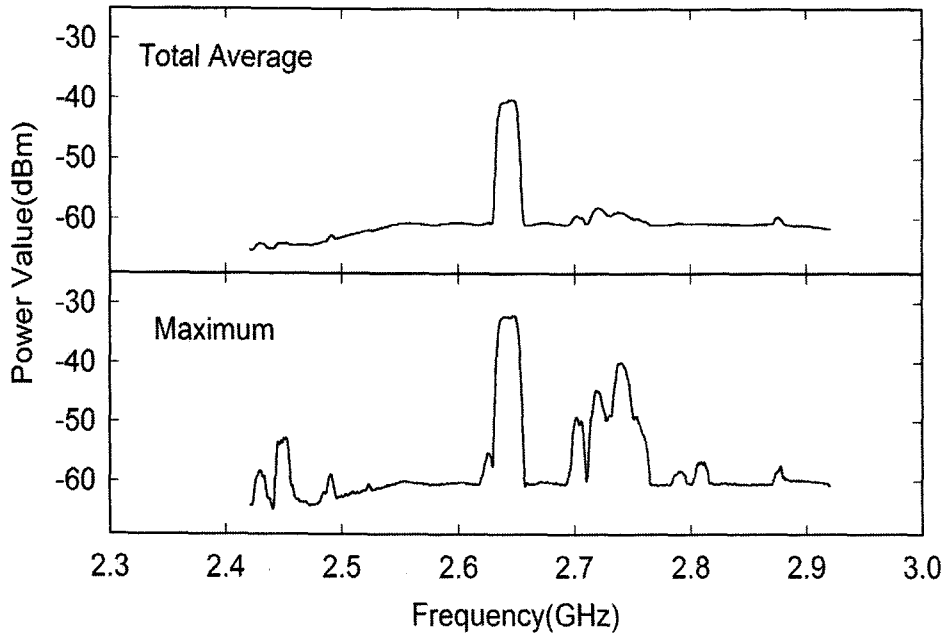


그림 4. 전 방향 파워세기의 평균값과 최대값. 관측된 모든 스펙트럼을 평균한 평균 스펙트럼(위), 각 주파수에서 관측된 최대값들로 이루어진 최대 스펙트럼(아래)

이 예는 방위각 60° , 고도 30° 에서의 전파환경을 보여주고 있는데, 그림에서 볼 수 있는 바와같이 2.649GHz에서 DMB 방송의 주파수와 2.874GHz 영역에서 청주국제공항 관제탑 주파수에서 강한 전파 간섭이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 2.4 - 2.5GHz 영역, 2.690 - 2.710GHz 영역, 그리고 2.710 - 2.765GHz 영역에서 강한 전파간섭이 일어나고 있음을 알 수 있다. 정보통신부고시(2005)의 주파수분배표를 보면, DMB 방송주파수 이외에 2.655 - 2.670GHz도 고정 및 이동용으로 허가되어 있다. 따라서 이들 주파수 영역의 간섭은 항공통신 및 레이다주파수에서 기인된 것으로 판단된다. 다행히도 이들 전파는 그림 4에서 본바와 같이 평균을 하면 사라지는 것으로 보아 짧은 시간에 걸쳐 사용되며, 또 태양전파가 관측되는 방향에서는 크게 나타나지 않는 것을 확인하였기에 태양전파 실시간 모니터링 하는 데는 큰 지장을 주지 않을 것이다. 또한 간헐적으로 피크를 보이는 전파는 충북대학교 주변, 특히 자연과학대학과 공과대학의 각종 실험장비에서 나오는 전파의 잡음으로 판단되지만 이들에 대한 정량적인 분석은 현재 불가능하다. 또한 이 연구에 사용된 안테나의 분해능이 너무 작아 전체 하늘의 전파환경을 완전히 측정하기 위해서는 관측점들을 더 늘려서 측정을 해야 한다. 그러나 이 논문의 목적이 태양에서 나오는 2.8GHz 영역의 전파를 측정하는 수신기의 개발인만큼, 주변 전파 환경이 방해받고 있음을 보고하는 차원에서 그림 2와 같은 하늘영역의 전파잡음을 측정하였다.

그러나 특징적으로 강한 전파간섭을 일으키는 DMB 방송의 주파수와 2.874GHz 영역에서 청주

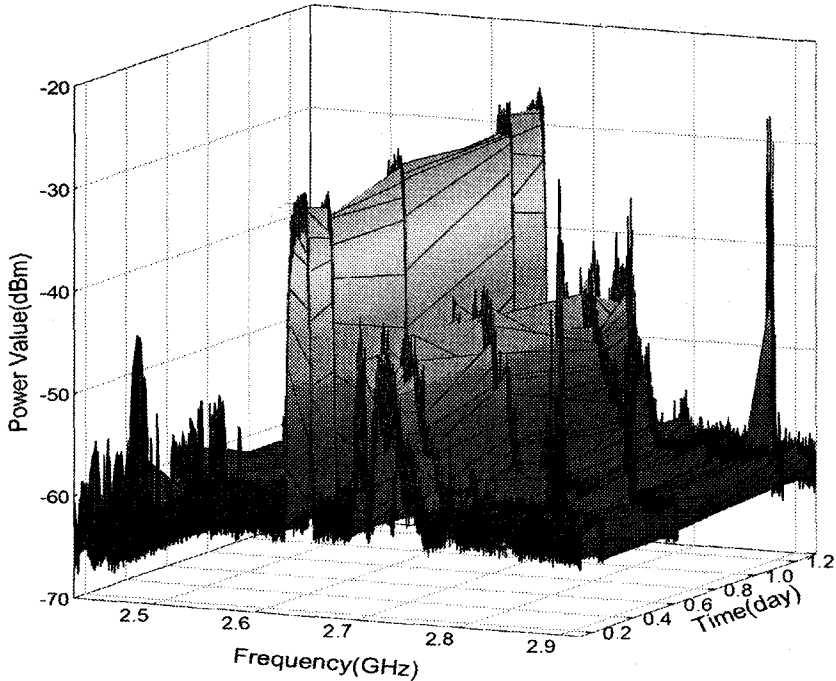


그림 5. 방위각 60도, 고도 30도에서 전파환경관측결과. 2005년 4월 26일과 27일에 걸쳐 5회 측정하였다.

국제공항 관제탑 주파수는 2.8GHz, 대역폭 500MHz의 주파수 대역에서 태양 전파의 세기보다 더 큰 신호가 들어오는 주파수로서, 태양 전파가 관측되는 방향에도 무시할 수 없는 영향을 주고 있는 것을 알게 되었다. 그러므로 2.8GHz 전파 태양 관측을 위해서는 영향을 주는 주파수 영역을 피하거나, 그런 영향요소를 반드시 제거해야만 한다. 태양전파 교란 실시간 모니터링에 사용되는 파워메타는 대역폭에 해당하는 각 주파수의 파워값을 모두 합산하여 측정하므로 태양에서 오는 전파를 분리해 낼 수 없기 때문에 측정된 파워값의 변화가 태양 활동에 의한 변화인지 DMB 방송과 같은 강한 신호에 의한 것인지 알 수가 없다. 그러므로 태양활동을 모니터링하기 위해서는 2.8GHz 주파수 대역에서 태양 전파 이외에 신호들을 제거해야 한다. 이 신호들을 제거하기 위해서 취할 수 있는 방법은 첫째 DMB 방송 주파수에서 들어오는 신호와 청주국제공항의 관제탑에서 나오는 주파수의 신호를 관측 후에 제거하는 것이고, 둘째 방법으로는, 대역폭을 줄여서 처음부터 두 주파수 대역을 모두 제거한다.

첫 번째 방안은 두 방해 신호가 시간별로 계속 변화하므로 실시간으로 얼마만큼의 잡음신호가 들어왔는지 정확히 알 수 없기에 우리는 두 번째 방안을 채택하였다. 이를 위해서는 두 신호 대역을 제

거해야 하므로 대역통과여파기를 두어 500MHz 대역폭을 80MHz 대역폭으로 줄여 보았다. 그렇게 하면 문제되는 전파원의 주파수는 피할 수 있지만, 파워메타가 측정하는 적분영역이 줄어들어, 파워메타로 관측되는 전파의 세기가 낮아져서 효과적으로 태양전파를 수신할수 없으므로 30dB 증폭기를 추가 장착하였다. 그렇게 구성된 수신기는 2.8GHz 영역에서 80MHz의 대역폭을 지니고 태양전파를 수신하기 때문에 태양전파의 정보를 제공해 줄 수 있는데, 이렇게 구성된 수신기의 정밀도 및 성능에 대한 보고와 실제 태양 플럭스의 실시간 모니터링 분석에 대해서는 다음에 자세히 보고할 예정이다(김용기 등 2008).

우주전파를 관측하기 위해 사용되는 천문학적으로 사용되는 전파가 라디오, TV, 무선통신, 상업용 및 군사용 레이더등 각종 통신및 레이더 장비들에서 사용하는 전파들의 방해를 받지않아야 한다. 우주에 가장 많이 존재하고 있는 원소중 하나인 수소에서 나오는 1.4GHz(21cm)영역 전파도 아마추어무선국과 이동통신에서 사용하는 주파수때문에 막대한 지장을 받을 우려가 있다(구본철 1999). 이 연구에서 제작된 수신기로 측정된 충북대학교 주변의 2.8GHz 전파환경은 현재 DMB 방송과 청주국제공항 관제탑주파수 등에 의해 상당한 영향을 받고 있는 것으로 확인되었다. 태양활동의 실시간 모니터링은 지구 상층대기와 이온층에 영향을 주는 태양활동의 변화를 예측하는데 중요한 역할을 한다. 그런데 상용 전파주파수에 의해 천문학적으로 의미있는 주파수영역이 방해를 받는다는 것은 안타까운 사실이다. 향후 천문학적으로 유용한 자료를 제공하는 전파영역에 대한 간섭을 체계적으로 연구하여 이런 주파수영역을 보호해야할 필요성이 심각하게 대두되고 있다 하겠다.

앞으로 2.8GHz 주변 태양전파환경 측정을 방해하는 이들 주파수를 피해서 관측하는 시스템으로 태양의 2.8GHz 전파플럭스를 측정하여 얻어낸 값과 전리층 F2층의 임계주파수사이의 상관관계 등을 연구할 계획이다. 이런 계속되는 연구를 통하여 태양활동의 지표로 사용되는 2.8GHz 태양전파 플럭스의 변화예측도 가능하게 되어 우주환경예보에도 활용될 전망이다.

감사의 글: 이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. 심사과정에서 중요한 점들을 지적해주시고 토론해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 구본철, 이정원, 김창희 1999, 천문학논총, 14, 39
 김용기, 윤요나, 이대영 2008, 준비중
 박사라 2006, 석사학위논문, 충북대학교
 변도영 1996, 석사학위논문, 서울대학교
 윤요나, 이충욱, 차상목, 김용기 2004, 한국우주과학회지, 21, 121
 정만영, 정현수, 한석태, 이창훈 1998, 밀리미터파 공학 (서울: 문은당), pp.5-17
 정보통신부 2005, 대한민국 주파수 분배표
 Cheung, W. D. & Leven, F. H. 1985, Microwave Made Simple: Principle and Applications (Dedham: Artech House)
 Covington, A. E. 1969, Journal of Royal Astronomical Society of Canada, 63, 125
 Kraus, J. D. 1986, Radio Astronomy, 2nd ed (Ohio: Cugnus-Quasar Books)
 Meclaning, K. & Vito, T. 2000, Radio Receiver Design (Atlanta: Noble Publishing)

70 *KIM et al.*

Paul, M. 2001, *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics Vol.3* (Hong Kong: Institute of Physics publishing), pp.2470-2475