

태양-지구 간 공간 전파 관측 시스템 설계 검증

정 철 오*, 박 재 우* 정회원

A Study on Design Verification of Radio Measurement System for Interplanetary Space

CheolOh Jeong*, JaeWoo Park* *Regular Members*

요 약

태양과 지구 간 공간인 행성 간 공간 (Interplanetary space)은 태양표면에서 발생하는 X선, 플레어, 코로나 물질 등이 태양풍에 의해 지구로 이동되는 공간으로, 태양에서부터 초음속의 태양풍이 불고 있다. 이러한 태양풍은 지구 자기권 및 이온층에 직접적인 영향을 미치며, 이로 인해 방송통신 장애, 위성운용 장애, 전력선 장애 등을 야기 시키게 된다. 이러한 행성 간 공간의 태양풍 흐름은 태양풍 배경이 되는 전파원이 태양풍을 통과하면서 발생하는 신틸레이션 값을 측정함으로써 태양풍 속도, 밀도 및 방향으로 관측된다. 태양풍 관측 정확도 및 정밀도는 유효집광 면적이 넓을수록 그리고 태양 배경 관측 소스 수가 많을수록 높아진다. 본 논문에서의 성능 검증은 시제품으로 제작한 3개의 타일을 이용하였으며, 관측 타일 수량의 제한으로 관측된 빔 패턴이 요구사항을 만족하는지 여부를 검증하는 시험을 수행하였다.

본 논문은 행성 간 공간에서 이동하는 태양풍 관측을 위해 디지털 데이터 처리 기능을 갖는 태양풍 지상 관측 시스템 설계 및 규격을 제시하고 또한 설계 시 제기된 기술적 이슈와 해결방안을 제시하고 있다. 아울러 제시된 규격에 따라 제작된 시제품을 이용하여 태양풍을 관측할 수 있는 성능이 구현되었는지에 대한 검증을 수행한 결과를 제시하고 있다. 시제품으로 제작한 3개의 타일을 이용하여 수행된 성능시험 결과 관측된 빔 패턴이 요구사항을 만족하고 있어 태양풍 관측이 수행될 수 있음을 확인하였다.

Key Words : 행성 간 공간; 태양풍, 전파원; 유효집광면적; 관측소스; 관측시스템

ABSTRACT

Interplanetary space between Sun and Earth is area of flowing very fast solar wind which is contained X ray, flare, corona mass, etc. occurred Sun surface to Earth. This solar wind is affected directly to Earth magnetosphere and ionosphere so that this bring out broadcasting and communication interruptions, satellite operation obstacles and power grid defects and etc..Solar wind flow in interplanetary space is measured as solar wind speed, density and direction by measuring scintillation value to be produced during radio source is passed through solar wind. The wider effective collective areas and the more radio sources, accuracy of solar wind measuring is got higher. Function test was performed using 3 tiles which was manufactured as prototype. Restriction of quantity of tiles, test was performed to confirm whether measured beam pattern is complied with requirement or not.

In this paper, it is shown design and their specification of ground interplanetary radio measurement system as well as technical issues and resolutions which were raised during design phase. Also result of function verification test using prototype is suggested. It is confirmed that measured beam pattern was met with requirement.

* 한국전자통신연구원 위성시스템연구팀 (cojeong@etri.re.kr)

* 본 논문의 일부 내용은 AOGS2011에서 발표 되었습니다.

접수일자 : 2011년 11월 21일, 수정완료일자 : 2011년 12월 7일, 최종게재확정일자 : 2011년 12월 15일

I. 서론

행성 간 공간은 태양폭발 등에 의해서 발생하는 X-선, 플레어 및 코로나 물질 등 우주물질이 태양풍에 의해 전달되는 우주환경 공간이다. 태양에서 발생한 우주물질이 지구에 도달하면서 지구 자기권 및 이온층에 영향을 미치게 되며, 이로 인해 지구 자기권 및 이온층 변화가 발생하게 된다. 지구 자기권 및 이온층의 변화는 지상 및 우주 인프라에 영향을 미치게 되며, 이러한 영향은 위성 운용, GPS 정보, 장거리 전력선, 장거리 전화망, 전리층을 이용하는 HF 통신, 파이프 라인, 항공통신, 고위도 비행 등 여러 분야에 미치게 된다. 이러한 우주환경이 지구에 미치는 영향 정도를 분석하기 위해서는 태양, 태양과 지구간 공간 및 지구에 대한 관측이 필수적이며, 관측 결과를 이용한 영향분석 모델 개발 또한 필수적이다. 외국에서는 태양 및 지구에 대한 관측 및 영향 연구를 위해 우주 및 지상에 관측 시스템을 설치하여 지속적으로 관측을 수행하고 있다. 태양표면 활동과 지구자기장 및 이온층 변화에 대한 관측은 위성 및 지상 시스템을 이용하고 있으며, 관측 데이터를 상호 보완적으로 활용하고 있다. 반면 태양과 지구 사이 공간에 대한 태양풍 흐름에 대한 관측은 태양과 지구 중력이 서로 영향을 미치지 않는 L1 궤도에 배치한 위성을 통해서만 관측이 수행되고 있다.

표1 우주환경에 의한 장애 분야 [1]

| 구분 | 행성간 공간 현상 | | |
|---|-----------|---------|------------|
| | 지자기 | 태양전파 간섭 | 고에너지 태양 입자 |
| Aviation - Mid-latitude communication (VHF) - High-latitude communication (HF) - Navigation | ◆ | ◆ | ◆ |
| Satellite operations - Orbit variation - Abnormal of handling and control - Ground-Satellite communication | ◆ | ◆ | ◆ |
| Long-distance Power Grid | ◆ | | ◆ |
| Long-distance telephone network | ◆ | | |
| HF communication using ionosphere | ◆ | | ◆ |
| High-altitude flying (polar region) | | | ◆ |
| Pipe-line (Oil, Gas, etc.) | ◆ | | |
| Satellite & Rocket | ◆ | | ◆ |
| Geo-physics sensing | ◆ | | |

외국의 경우 이미 지상에서 태양과 지구간 공간의 태양풍 관측을 위해 일본, 멕시코, 인도, 러시아 및 ESA 등 국가에서 지상에서 관측할 수 있는 관측시스템을 구축하여 운영하고 있다. 현재 정상적으로 운용되고 있는 태양풍 지상 관측 시스템은 일본에서 운용하고 있는 SWIFT(Solar Wind Imaging Facility)가 유일하다. 그러나 SWIFT는 고정형 아날로그 타입 관측기로, 아날로그 타입 관측기의 경우 각도 분해능 미약 및 관측 시야 제한으로 인한 관측시간의 제한이 있다. 태양풍의 밀도, 속도 및 방향을 고 해상 및 고 정밀로 직접 관측하기 위해서는 이러한 제한사항이 극복되어야 한다.

본 논문은 태양-지구 간 공간의 태양풍 흐름을 지상에서 고 해상 및 고 정밀로 관측할 수 있도록 타일형 안테나 배치 및 디지털 데이터 처리 기능을 갖는 지상 관측 시스템 설계와 시제품 제작 및 시험을 통해 지상 관측시설의 기능 동작 여부를 확인하였다.

II. 태양-지구 간 전파관측 시스템 현황

태양풍 지상 관측시스템은 태양풍 배경 전파원이 태양풍을 통과하면서 발생하는 신호의 신틸레이션 값을 측정하는 것으로, 수신된 데이터 분석을 통해 태양풍의 방향, 속도 및 밀도를 산출할 수 있다.

태양풍 관측은 현재 7개국에서 수행하고 있으며, 유럽연합, 멕시코, 러시아, 호주, 인도, 중국 및 일본 등이 태양풍 관측기를 운용하고 있다. 각 국가에서 설치하여 운용하고 있는 태양풍 지상 관측기는 각 국가의 상황에 따라 설치된 태양풍 안테나 형태 및 관측 주파수 대역을 달리하고 있다. 현재 설치되어 있는 국외 태양풍 지상 관측기 현황은 다음과 같다.

표2. 국외 태양풍지상관측기 현황 [2]

| 국가 | 태양풍 지상 관측기 명칭 | 관측 중심 주파수 | 소요 부지 | 비고 |
|------|---------------|------------------|--------------------------|--------------------|
| 멕시코 | MEXART | 140MHz | 70m × 140m | 아날로그 수신기 |
| 러시아 | Pushchino | 110MHz | 70,000m ² | |
| 호주 | MWA | 80-300MHz | 4.28m ² /tile | 현재 32개 설치 추가설치 예정임 |
| 인도 | Ooty | 327MHz | 30m × 60m | 경사면 설치 |
| 일본 | SWIFT | 327MHz | 135m × 40m | |
| 유럽연합 | EISCAT | 900MHz & 1420MHz | | 접시형 |

각 국가에서 설치하여 운용하고 있는 태양풍 지상 관측기 형태는 크게 3가지 형태로 구분될 수 있다. 일본, 멕시코, 러시아 및 인도에서 설치하여 활용하고 있는 거대한 단일 구조의 고정형 아날로그 수신기 방식 형태와 하나의 거대한 단일 구조가 아닌 타일형태의 조각들을 여러 곳에 배치하여 전체적으로 거대한 단일 안테나 효과를 보이는 호주 태양풍 지상 관측시설 형태가 있다. 또한 중국의 경우는 일반 전파망원경 형태로 배경 전파원을 구동부 모터를 이용하여 옮겨가면서 측정하는 방식으로, 직경 수 십미터 정도의 매우 큰 규모의 접시안테나가 필요하다.



그림1 일본 태양풍 관측 시설



그림2 호주 태양풍 관측 시설



그림3 중국 태양풍 관측 시설

그림1~그림 3에서 보여준 3가지 형태의 태양풍 관측시설 특성은 다음과 같다.

표3 국외 태양풍 지상 관측기 특성 [2]

| 구분 | 일본 | 호주 | 중국 |
|---------|------------------|-------------|-------------|
| 주파수 | 단일주파수 | 광대역 가능 | 다 대역 가능 |
| 용도 | 태양전파 관측 | 우주전파 및 태양전파 | 태양전파 및 위성신호 |
| 빔 스티어링 | 사용가능 | 사용가능 | 사용가능 |
| 설계 및 제작 | 용이 | 용이 | 용이 |
| 확장성 | 없음 | 있음 | 없음 |
| 유지보수 | 어려움 (Wire 파손) | 간단함 | 간단함 |

본 고에서는 국외 태양풍 지상 관측기 형태의 장단점을 분석 및 종합하여 국내실정에 맞는 관측기의 요구사항 및 규격 도출을 통해 새로운 형태의 태양풍 지상 관측시설을 제안하였다.

III. 태양-지구 간 전파관측 시스템 설계 및 성능검증

국외의 태양풍 지상 관측시설 현황 분석을 통해 국내 태양풍 지상 관측 시설의 요구사항 및 규격이 도출하였다.

- Digital phased array 및 interferometer 기능
- 안정적 운용 및 적절한 구축 비용
- 전자 빔 조향 기능
- 보다 넓은 관측 시야 (기존 관측기 대비)

- 복수 관측 모드 기능 (태양풍 및 우주전파 관측)

새로운 관측시설 요구사항을 근거로 태양풍 지상 관측기 설계를 위한 규격 분석이 수행되었고, 규격은 최대 128개 tile이 설치되는 경우에 대해 도출하였다. [3]

표4 새로운 태양풍 지상 관측기 규격 도출 결과

| 구분 | 규격 | 비고 |
|---------------------------|---|---------------------------|
| # of Tiles | 최대 128 tiles | 24 dipole antennas/tile |
| Frequency range | 300~370 MHz | |
| Bandwidth | 10~20 MHz | |
| Mode | Continuum & spectrum modes | |
| Polarization | Dual polarization | |
| Field of view | ~(1 rad) ² 또는 (10 deg.) ² | 관측모드에 따라 적용 ¹⁾ |
| Beam size | ~15' | 각도 분해능 |
| Effective collecting area | ~1500 m ² | 단일 접시안테나 50m와 유사 |
| Receiver temperature | ~100 K | |
| Point source sensitivity | 10 mJy | @ 100 seconds integration |
| Time resolution | 1ms 이하 | |
| 관측모드 ¹⁾ | - Phased array mode (태양풍 관측) - Interferometer mode (천체 관측) | |

표4의 규격을 근거로 태양풍 지상 관측 시설 설계가 진행 되었으며, 관측 시설은 크게 안테나 타일부, 노드부 및 데이터 처리부로 구성되었다. 안테나 타일부는 dipole type의 배열 안테나, 저잡음 증폭기(LNA), beam former, digital receiver로 구성되며, 노드부는 Digitizer, PC 및 GPS 수신기로 구성된다. 또한 데이터 분석부는 중앙처리 및 제어, combiner/correlator, 자료처리 SW 및 태양풍 예측 모델로 구성된다. 태양풍 관측 정밀도 및 정확도 확보를 위해 안테나 및 노드 구성에 대한 분석이 수행되었으며, 분석결과 안테나는 16개의 dipole type 배열 안테나가 1개의 tile로 구성하여 최대 128개 tile까지 확장할 수 있는 구조와 1개의 노드가 4개의 tile을 관리하는 구조가 최적으로 분석되었다.

이에 따라 관측시설 설계가 수행되었으며, 설계 결과 데이터 관측에서부터 처리에 이르기까지의 지상 관측기 HW 블록도 및 데이터 흐름 블록도가 다음과 같이 도출되었다.

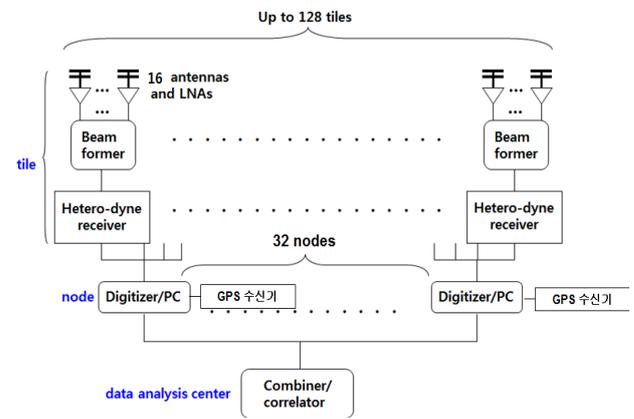


그림4 시스템 HW 구성도

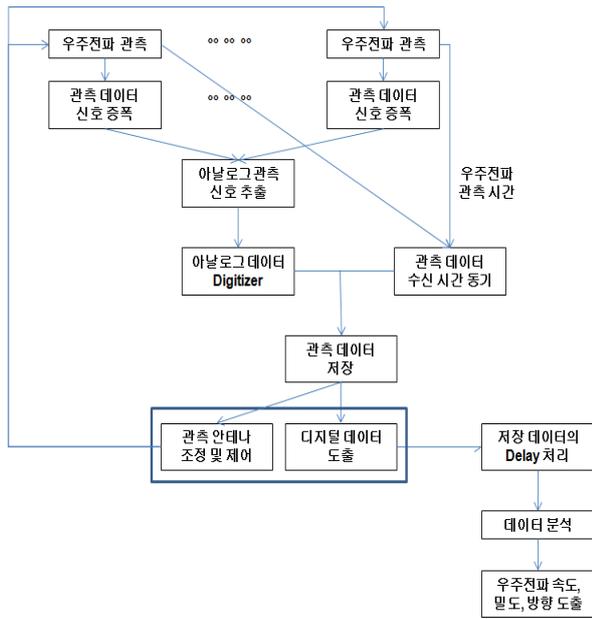


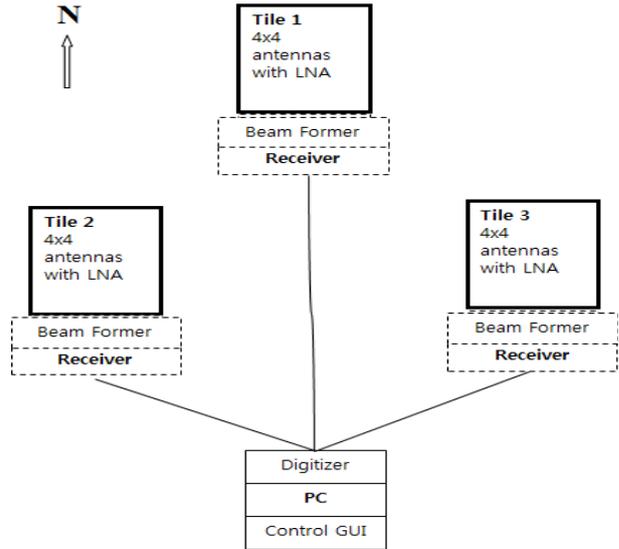
그림5 데이터 흐름 블록도

지상 관측시설 설계 중 제기된 3가지 기술적 이슈에 대해 다음과 같이 처리하여 해결한 후 설계에 반영하였다.

- Radio Frequency Interference (RFI)
 - 관측시설 설치 예정지역에 대해 RFI field test를 수행하여 노이즈 영향이 없는 주파수 대역 확인 (327MHz)
- Phase control 및 electronic beam steering
 - 1개 타일의 24개 안테나로부터 들어오는 electronic beam steering 신호의 지연 조정은 빔 포머를 이용하며, 각 tile에서 들어오는 신호의 지연 조정은 소프트웨어를 이용
- Clock synchronization
 - 각 node에 GPS 수신기를 설치하여 각 tile에서부터 수신되는 데이터의 시각 동기화 일치

설계 완료된 후 지상 관측기 설계결과에 대한 기능 확인을 위해 시제품 제작과 이를 이용한 기능시험을 수행하였다. 시제품 시험은 1) beam forming 기능 확인, 2) beam steering 기능 확인, 3) 우주전파 신호 감지 기능 확인을 목적으로 하여 제주도에 위치한 전파연구원의 우주전파센터에서 수행되었다. 시제품을 확인하기 위한 기능 시험환경 및 구성도는 다음과 같다.

- 시험환경
 - Tile 및 안테나 (16 dipole antenna/tile)
 - LNA 및 Filter
 - Beam former
 - Heterodyne receiver
 - Digitizer
 - Control PC
 - SW : Control 및 데이터 수집/처리 프로그램
- 시험 구성도



시제품 기능시험은 당초 계획했던 7개의 시험 항목에 대해 수행되었으며, 시험 결과 요구했던 기능이 모두 수행됨이 확인되었다.

표5 시제품 시험항목 및 시험결과

| 시험항목 | 시험결과 |
|--|------|
| Beam size | Pass |
| Beam forming function | Pass |
| Data taking program의 time series 및 spectrum display function | Pass |
| Cross correlation display 및 auto-save function | Pass |
| Astronomical signal detection function | Pass |
| Cross correlation peak가 나타나는 위치의 lag 표시 | Pass |
| GUI 및 delay calculation function | Pass |

다음 그림은 시제품 시험을 통해 확인된 시험항목 결과 중 beam pattern 생성 결과와 control 및 data acquisition 용 GUI 화면 구동결과를 보여주고 있다.

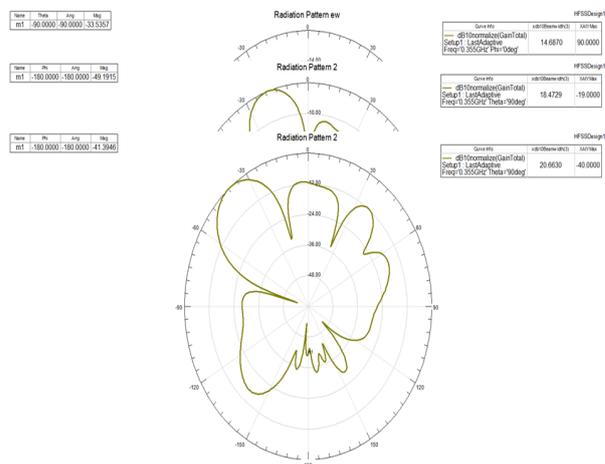


그림6 beam pattern 생성 결과

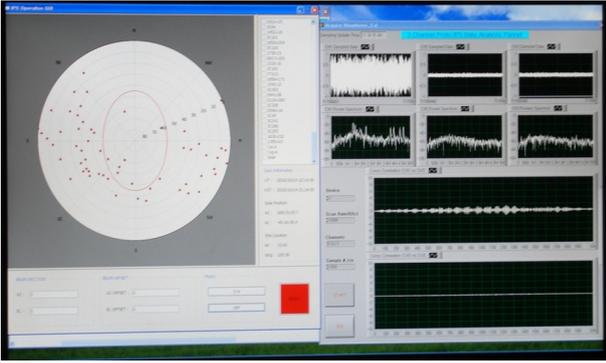


그림7 Control 및 data acquisition용 GUI 화면

시제품 시험을 통해 당초 계획했던 시제품 시험목적 달성과 동시에 관측목적에 따른 관측시설 확장이 가능한 지상 관측시설 설계 검증이 수행되었다.

IV. 결 론

본 논문은 태양-지구 간 공간의 태양풍 흐름을 지상에서 고 해상 및 고 정밀 관측을 위한 타일형 안테나 및 디지털 데이터 처리 기능을 갖는 지상 관측 시설 설계 및 관련 규격을 제시하였고, 아울러 태양풍 지상 관측 시설 시제품 제작 및 시험 수행을 위한 시험환경 및 구성을 제시하였다. 시제품 시험을 통해 당초 요구된 기능이 모두 만족하는 시험결과가 확인됨에 따라 태양풍 지상 관측 시설의 설계 검증이 완료되었다.

본 설계결과는 관측 해상도 및 정밀도를 본 설계에서 제시한 규격보다 높게 은 수준의 결과물을 얻기 위해서는 Tile 당 설치 안테나 수량을 증가하는 것을 제안할 수 있다.

관측시간을 확대할 수 있는 활용도를 높일 수 있는 방안

참 고 문 헌

- [1] JaeWoo Park, CheolOh Jeong, JinHo Jo, "Impact on Solar Storm on Navaid's System", The 1st Korea-Japan CNS/ATM System Semina, 2011.
- [2] 정철오, 박재우, "예경보시스템 및 ACE 위성 수신국 설계 용역 보고서", 전파연구원, 2010.12.
- [3] CheolOh Jeong, JungHoon Kim, JaeWoo Park, etc. "Design & Implementation of the Korean IPS Array", AOGS 2011, 2011.08.
- [4] Mejia, "MAXART IPS Observations", AOGS 2011, 2011.08.
- [5] I.V. Chashei, V.I. Shishov, S.A. Tyul'bashev, V.V.Oreshko, "IPS Observations Using the Big Scanning Array of the Lebedev Physical Institute: Recent Results and Future Prospects" AOGS 2011, 2011.08.

- [6] P.K. Manoharan, "Ooty IPS Measurements 3-D Reconstruction of Solar Wind", AOGS 2011, 2011.08.
- [7] M. Tokumar, K. Kujiki, T. Iju, M. Hirota, etc., "Global Observation of the Solar Wind with STEL IPS Array", AOGS 2011, 2011.08.

저 자

정 철 오 (Cheol Oh Jeong)

정회원



1988년 2월 : 동국대학교 통계학 석사
1988년 4월~현재 : ETRI 책임연구원

<관심분야> 우주전파 영향분석,
통신탐지체 제품보증

박 재 우 (Jae Woo Park)

정회원



1997년 7월 : 러시아 우주연구소 박사
2000년 4월~현재 : ETRI 책임연구원

<관심분야> 우주전파환경연구, 위성
임무해석