

우주 전파 신호 처리용 가변 샘플링 고속 디지털 변환 장치 개발

강용우* · 송민규** · 김효령**

Development and Test Result of Fast Digital Conversion System with Variable Sampling Frequencies for Astronomical Radio Signal Processing

Yong-Woo Kang* · Min-Gyu Song** · Hyo-Ryoung Kim**

요약

한국우주전파관측망(KVN: Korea VLBI Network)을 이루는 각 망원경의 수신기에는 우주에서 오는 전파 신호를 디지털 신호로 바꾸는 샘플러가 있다. 이 샘플러의 성능(특히, 대역폭과 샘플링 주파수 그리고 샘플링 비트수)은, 대역폭을 n 배 증가시키면 관측감도는 \sqrt{n} 만큼 향상되고, 연속전파원의 경우 관측 가능한 천체의 수가 기하급수학적으로 증가하게 된다. 대역폭이 넓어지면, 전파원에서 동시에 모니터링 할 수 있는 스펙트럼의 선들도 많아진다. 이는 전파 관측에서 연구영역을 대폭 확장시킬 수 있게 된다. 이러한 이유로 고속 샘플러의 기술과 성능 향상을 독자적으로 확보하려는 것이다. 이에, 지금까지의 연구 경험과 기술 축적을 바탕으로, 샘플링 주파수를 가변할 수 있으며, 보다 광대역으로 관측을 할 수 있는 최대 3.5GHz 샘플링을 할 수 있는 장치를, 초기 시험용으로 설계·제작하였다. 본 연구에서는 개발된 가변 샘플링 시스템의 내용과 시험 측정 결과를 발표하고자 한다.

ABSTRACT

The receiver of each radio telescope of KVN, has a sampler that converts astronomical radio signal to digital data. The ability of this sampler (the bandwidth, sampling frequency, and sampling bits) is improved by \sqrt{n} , if the bandwidth is increased by n times, and the number of observable objects increases exponentially in the case of continuum spectrum radio sources. As the bandwidth increases, there are the more spectrum lines that can be simultaneously monitored in the radio source. This will greatly expand the research area in astronomical radio observation. For this reason, we are trying to independently develop the technology of the fast digital sampler. Therefore, based on the research experience and technology accumulated so far, An ability of sampling up to 3.5 GHz, that can vary the sampling frequency and can observe in a wider band, was designed and made for proto-type. In this study, we introduce the development details and test results for new sampling system.

키워드

Astronomical Radio Signal, Fast Digital Sampler, Variable Sampling Frequency
우주전파신호, 고속 디지털 샘플러, 가변 샘플링 주파수

**한국천문연구원 mksong@kasi.re.kr, hrkim@kasi.re.kr

* 교신저자 : 강용우(한국천문연구원, byulmaru@kasi.re.kr)

• 접수일 : 2021. 10. 24
• 수정완료일 : 2021. 11. 20
• 게재확정일 : 2021. 12. 17

• Received : Oct. 24, 2021, Revised : Nov. 20, 2021, Accepted : Dec. 17, 2021

• Corresponding Author : Yong-Woo Kang

Technology Center for Astronomy and Space Science, Korea Astronomy and Space Science Institute.

Email : byulmaru@kasi.re.kr

I. 서론

전파망원경의 수신기에는 우주로부터 오는 전파 신호를 디지털 신호로 바꾸는 샘플러가 있다. 샘플러의 성능(특히, 대역폭과 샘플링 주파수 그리고 샘플링 비트수)은 전파관측의 품질 뿐만 아니라 과학 연구의 영역에까지 많은 영향을 준다[1].

일반적으로 디지털 샘플링을 한다면 비트수가 많은 해상도를 사용한다[2]. 전파관측에서는 해상도보다는 대역폭을 극대화시켜 샘플링을 한다. 이러한 고속 샘플러의 기본 기술 확보와 독자 개발을 위해, 이전 연구에서, 우리는 1GHz 샘플링을 할 수 있는 전파관측 데이터의 샘플링 장치를 설계·제작하였다[3]. 이에, 지금까지의 연구 경험과 기술 축적을 바탕으로, 샘플링 주파수를 가변할 수 있으며, 보다 광대역으로 관측을 할 수 있는 최대 3.5GHz 샘플링을 할 수 있는 장치를, 초기 시험용(Proto-Type)으로 설계·제작하였다. 본 연구에서는 새로 개발된 가변 샘플링 시스템에 대한 내용과 시험 측정 결과를 다루고자 한다.

본 서론에 이어 2장에서는 샘플링 주파수를 가변할 수 있는 고속 샘플러의 설계에 대하여 기술하고,

3장에서는 제작된 초기 시험용 샘플러를 시험한 결과를 서술하고, 마지막 4장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 가변 주파수 고속 샘플링 시스템 설계

가변 주파수 샘플러 시스템은, 크게 수신된 우주 전파 신호를 디지털화 시켜주는 A/D부, 이를 병렬화하여 VLBI 통신 규격인 VSI(VLBI Standard Interface) 규격으로 바꾸어 출력하는 디지털 부, 샘플링 동작을 제어하고 모니터링하는 제어부, 샘플링 주파수를 만들어 주는 주파수 발생기, 그리고 전원부의 5부분으로 되어 있다. 최대 3.5GHz까지 샘플링 주파수가 높아졌기 때문에, 회로기판 상에서의 배선 폭과 배선의 길이를 보다 정교하게 설계하고 배치하였다. 디지털부는, 이전 연구에 비해 자료처리량이 3.5배 늘었기 때문에, 병렬 연산처리부를 늘리고 최적화 작업을 하였다. 주파수 발생기는, 주파수가 높아졌기 때문에, 파의 위상의 흔들림을 잡아주는 기능을 추가하였으며, 기존 주파수를 가변할 수 있도록 하고, 프로그램이나 스위치 조작으로 바꿀 수 있게 설계하였다. 전체 블록선도는 그림 1과 같다.

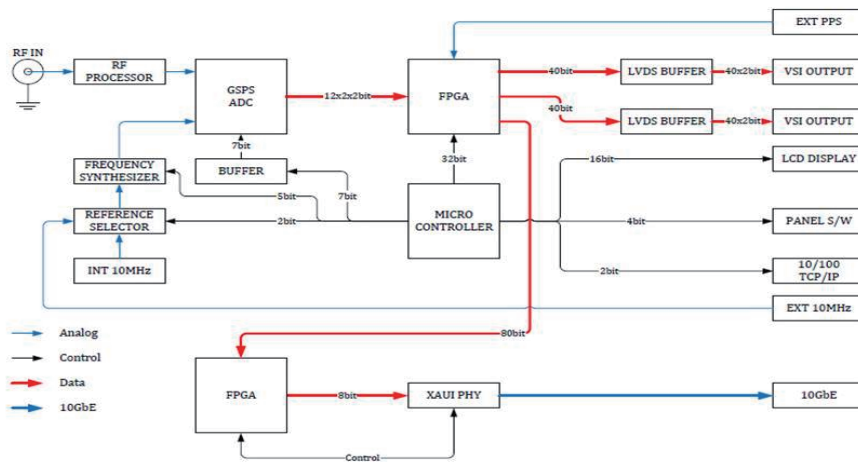


그림 1. 최대 3.5GHz 샘플링을 할 수 있는 시스템의 전체 블록선도

Fig. 1 Block diagram of signal flow for sampling up to 3.5 GHz

표 1. 가변 샘플링 제어

Table 1. Control Mode for sampler system

1. Reference Clock(MHz), 2bit/sample			
1024	2048	3584	
2. Reference Clock Setting Mode			
Manual	SW off : remote, SW on : local		
Remote Control	0 : remote, 1 : local		
3. Data Output Mode			
VSI Clock : 32MHz/ 1port : 512Mbps			
VSI Clock : 64MHz/ 1port : 2048Mbps			
VSI Clock : 64MHz/ 2port : 4096Mbps			
VSI Clock : 128MHz/ 2port : 7168Mbps			
4. Reference Clock			
1PPS		10MHz	
5. Internal Signal Test Clock Pattern			
ACQ	TVG	RAMP	SIN

개발한 샘플러의 입력신호는 512MHz, 1024MHz, 1792MHz의 주파수 대역폭을 선택할 수 있으며, 이를 위한 샘플링 주파수는 각각, 1024MHz, 2048MHz, 3584MHz이다. 각각의 경우, 샘플링된 데이터는 2bit/sample이고, 출력은 시각정보를 포함한 모든 VLBI(Very Long Baseline Interferometer) 시스템 사이의 호환성을 갖는 VSI규격을 채택하고 있다[4]. 샘플링된 데이터는 VSI 데이터 전송의 기준 클럭 64MHz를 사용할 경우 2048Mbps, 4096Mbps의 전송 속도가 나온다. 이 기준 클럭의 2배인 128MHz를 사용할 경우 7168Mbps의 전송 속도가 나온다. 이 데이터는 LVDS(Low Voltage Differential Signal)의 전기적 특성으로 출력된다.

디지털화된 신호 처리 내용은 이전 연구인 1GHz 샘플링을 할 수 있는 전파관측 데이터의 샘플링 장치에서 자세히 다루고 있다[3]. 가변 주파수 샘플링 샘플러에서도 호환성을 위하여 이전에 개발한 자료 처리 기술과 같은 규격을 채택하였지만[4-6], 3.5GHz 주파수의 샘플링에 대하여 추가적으로 2배속 모드를

개발하였다. 1024MHz 단일 샘플링 샘플러는 VSI규격의 데이터 구성은 32비트로 4가지 모드로 출력한다[3]. 본 연구에서는 새로 개발된 가변 주파수 샘플링 능력에 따라 새로운 데이터 출력 모드를 추가하였다. VSI 기준 출력 클럭 64MHz, 전송속도 2048Mbps, 듀얼 포트, 대역폭 512MHz, 채널 1개인 Mode와, 전송속도 4096Mbps, 듀얼포트 대역폭 512MHz, 채널 1개인 모드, 그리고 VSI 출력 클럭 128MHz, 전송속도 7168Mbps, 듀얼포트 대역폭 512MHz, 채널 1개인 모드를 추가하였다.

샘플링을 외부 시스템과 동기화시키기 위하여 1PPS와 10MHz의 Reference 클럭을 사용한다. 이 신호는 시스템 외부로부터 입력되지만, 내부조정을 위해서 자체적으로 클럭 생성기를 내장하였다. 개발 과정에서 샘플링 동작 성능 조정과 안정성을 자체 점검하기 위하여, TVG(test vector generator), RAMP(ramp function wave), 그리고 SIN(sine wave) 생성기를 내장하였다. 이 기능은 개발한 시스템을 현장에 사용할 때 성능 이상 유무를 점검하는 데에도 유용하게 사용된다. 실제 관측 시에는 ACQ(acquisition) 모드를 사용한다. 표 1에, 이밖에 개발한 가변 샘플링에 대한 내용을 정리하였다.

III. 가변 샘플링 주파수 고속 샘플링 시스템 제작

설계 제작된 모든 모듈을 통합하여 가변 샘플링 기능을 추가한 초기 시험용 샘플링 시스템을 제작하였다. 전체적인 제작 완료된 샘플러는 1GHz 샘플링을 할 수 있는 전파관측 데이터의 샘플링 장치와의 호환을 위하여 기본적인 인터페이스를 통일하였다. 그리고, 샘플러 동작을 모니터 및 제어 기능을 3.5Hz 까지 샘플링이 가능하게 하고 고속 신호처리에 맞게 최적화 작업을 하였다. 그림 2는, 초기 시험용 샘플링 시스템의 설계된 PCB(Printed Circuit Board)의 레이아웃 일부 모습이다. 그림 3과 그림 4는, 샘플링 주파수를 가변 할 수 있는 초기 시험용 샘플링 시스템의 제작된 모습들이다. 그림 3에서, 원형으로 보이는 IC가 A/D 변환 (Analog to Digital converter) 소자이고, 사각형 IC가 디지털 변환된 신호를 병렬

화하여 VLBI 통신 규격인 VSI 규격으로 바꾸어 출력하는 FPGA(: Field Programmable Gate Array)소자이다. 출력부에 2개의 포트를 만들었는데, 1024Mbps와 2048Mbps 출력일 때는 2개의 포트에 각각 같은 신호를 내 보내고, 4096Mbps 이상의 출력을 내 보낼 때는 2개의 포트를 동시에 사용한다. 그림 4는, 최종 조립한 초기 시험용 샘플링 시스템의 모습이다.



그림 4. 케이스에 조립한 가변 주파수 샘플링 장치 모습

Fig. 4 Proto-type variable frequency sampling system assembled all modules

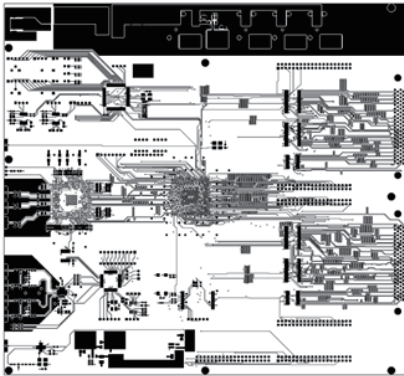


그림 2. 초기 시험용 가변 샘플링 시스템의 PCB 레이아웃

Fig. 2 PCB artwork of proto-type variable frequency sampling system



그림 3. 최종 조립 메인 보드

Fig. 3 Sampling system main board

IV. 가변 샘플링 주파수 고속 샘플링 시스템의 시험 결과

개발된 초기 시험용 샘플링 시스템으로 KVN의 전파 디지털 실험실과 KVN울산전파천문대에서 시험을 진행하였다. 시험에는 CW(: Continuous Wave) 신호를 만들어 주는 시그널 제너레이터, 직접 신호세기를 볼 수 있는 스펙트럼메터, KVN에 수신되는 전파신호와 유사하게 512MHz에서 1024MHz까지의 512MHz 대역폭과 우주전파와 유사한 신호세기를 가지는 신호를 만들어 주는 노이즈 제너레이터를 사용하였다. 출력되는 데이터를 기록하기 위해서, 우주전파신호 전용 기록기인 Mark5B+ 기록기, 그리고 기록 제어와 기록된 데이터를 점검하기 위한 시험환경과 소프트웨어 등을 이용하였다[7-10]. 그림 5는, 개발된 초기 시험용 샘플링 시스템의 성능 검증을 위한 시험 환경을 도식화 한 것이다.

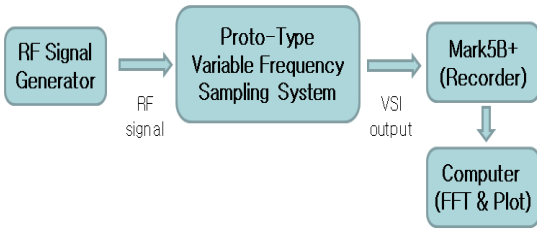


그림 5. 제작된 초기 시험용 샘플링 시스템의 성능 검증을 위한 시험 환경

Fig. 5 Test condition to confirm the performance of the sampling system



그림 6. 초기 시험용 샘플링 시스템의 성능을 확인하기 위한 실험 모습

Fig. 6 Performance test for the developed sampler

그림 6은, 개발된 초기 시험용 샘플링 시스템을 시험하는 모습이다. 제작된 초기 시험용 샘플링 시스템의 기능 작동 여부를 검증하기 위한 기능 시험을 진행하였다. 먼저 안정적인 샘플링을 하는지를 알아보았다. 84MHz Sine파를 RF 입력으로 하고, 각 샘플링 클럭에서의 샘플링된 최종 VSI 포트에 나오는 비트 0과 비트 1의 상태값을 오실로스코프로 모니터링 하였다. 일반적으로, 샘플링 주파수가 올라가면 PCB 보드상에서의 신호 처리량이 급격히 증가하여, 디지털 변환 과정에서 병목 현상이 일어나거나, 신호의 비트 동기가 시간이 지날수록 어긋나는 경향이 있다. 시행착오를 반복하면서 정밀 조율과

프로그램 수정을 반복하여, 우리는 그림 7에서 보듯이 모든 모드에서 2개의 비트가 정확하게 일치된 결과를 얻었다.

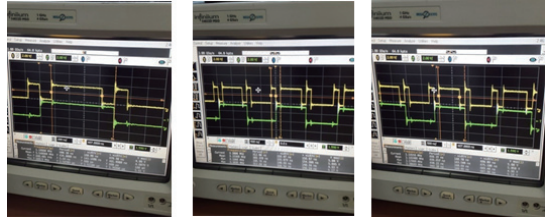


그림 7. 시험 결과 :1024MHz, 2048MHz, 및 3584MHz 샘플링 모드(왼쪽부터), VSI 출력

Fig. 7 Test Result: 1024MHz, 2048MHz, and 3584MHz sampling mode (Output: VSI port)

다음으로 실제 관측과 비슷한 환경을 만들어 스펙트럼을 얻는 시험을 한 결과, 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 현재, 제작된 샘플러는 VSI 출력 모드로 되어 있는데, 2048MHz 이상의 클럭에서의 VSI 출력을 저장할 수 있는 환경이 구축되지 않아, KVN에 구축되어 있는 1024MHz 모드에서 작동 시험을 하였다. 앞서의 시험에서 보듯이, VSI 포트에 2개의 비트가 모든 모드에서 안정적이므로, 1024MHz로 구성된 시스템에서 안정적인 결과가 나오면, 다른 모드에서도 같은 결과가 나오게 된다. 512MHz 대역폭을 갖는 RF(: Radio Frequency) 노이즈 제너레이터와 836MHz CW 전파 신호를 제작된 초기 시험용 샘플링 시스템으로 디지털화 하여, Mark5B+ 기록기로 샘플링 데이터를 기록하였다. 기록된 데이터로부터 컴퓨터를 이용하여 스펙트럼을 계산하였다. 그림 8에 그 결과를 보였다. x축은 대역폭 MHz 단위이고, y축은 양자화된 sine파를 주파수 영역으로 바꾸기 위하여 FFT(: Fast Fourier transform)한 Normalized intensity이다. 그림 8에서 보듯이, 평탄한 잡음 패턴과 깨끗한 CW 신호를 보여 준다.

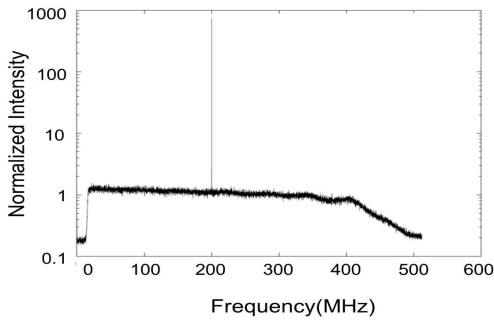


그림 8. 512MHz 대역폭(512MHz~1024MHz)을 갖는 노이즈 제너레이터와 836MHz CW 전파 신호를 합하여, 제작된 초기 시험용 샘플링 시스템으로 디지털화하여 기록한 데이터를, 컴퓨터로 분석한 스펙트럼.

Fig. 8 The digital conversion data from 836MHz CW signal and 512MHz BW (512MHz ~ 1024MHz) noise signal generated from noise generator with the developed sampler.

V. 결 론

본 연구에서 광대역 전파 관측을 위하여, 최대 3.5GHz까지 가변 샘플링을 할 수 있는 초기 시험용 샘플링 시스템을 제작하였고, 제작된 Proto-type 시스템으로 RF Noise Source 및 CW Source를 사용하여 실험실에서 성능을 검증하였다. 모든 1024MHz, 2048MHz, 및 3584MHz 샘플링 모드에서 안정적으로 RF신호를 2비트 디지털 신호로 변환되었다., 그리고, 변환된 디지털 신호가 VSI 출력 모드에서의 정확하게 출력됨을, 이를 기록한 데이터로부터 확인하였다. 후속 연구로, 고속 자료 전송을 위한 10G 통신 모듈을 개발 진행하였는데, 이 모듈은 VSI 규격으로 병렬로 출력되는 데이터를 Ethernet 통신 규격에 실어 UDP로 전송을 할 수 있도록 해 주는 기능을 가지고 있다. 이 모듈과 연결하여, UDP 전송 및 저장, 그리고 스펙트럼 획득 시험 등을 진행할 예정이다. 이러한 시스템이 구현되면, 원격지로의 실시간 전파자료 전송이 가능해지므로 전파자료의 실시간 처리를 기대할 수 있다.

References

- [1] F. Takahashi, T. Kondo, Y. Takahashi, and Y. Koyama, "Very Long Baseline Interferometer." Tokyo, Ohamsha Press, 1997.
- [2] Y. Chae, "Development of a SHA with 100 MS/s for High-Speed ADC Circuits," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 295-301.
- [3] Y. Kang, M. Song, S. Wi, D. Je, S. Lee, S. Kim, "Development and Observation Result of High speed digital conversion system of Astronomical Radio signal," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 1009-1018.
- [4] "VLBI Standard Interface specification," <http://www.haystack.edu/tech/vlbi/vsi/index.html>
- [5] "KVN Data Acquisition System Specification, Korea Astronomy & Space Science Institute," Elecs Industry Co. Dec. 2007
- [6] "ADS-1000 Operating Manual," Digitallink Corporation LTD., 2002
- [7] M. Song, Y. Kang, and H. Kim, "The Study on the Design and Optimization of Storage for the Recording of High Speed Astronomical Data," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 1, 2017, pp. 75-84.
- [8] M. Song, Y. Kang, and H. Kim, "Performance Evaluation of Big Stream based High Speed Data Storage," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 5, 2017, pp. 817-828.
- [9] M. Song, Y. Kang, H. Kim, J. Kim, D. Byun, J. Yeom, S. Wi, J. Jung, S. Lee, and S. Han, "Implementation and Upgrade of Record System for the Transfer of Wideband VLBI Data," *J. of the Korean Institute of Plant Engineering*, vol. 18, no. 4, 2013, pp. 103-114

- [10] H. Kim, and M. Song, "Development and Application of HDD I/O Measurement Utility," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 6, 2020, pp. 1151-1158.

저자 소개



강용우(Yong-Woo Kang)

1988년 부산대학교 기계설계학과 졸업(공학사)

1990년 부산대학교 대학원 지구과학과 졸업(이학석사)

2000년 부산대학교 대학원 지구과학과 졸업(이학박사)

2006년 ~현재 한국천문연구원 연구원

※ 관심분야 : 전파백엔드시스템, 관측천문학



송민규(Gyu-Min Song)

2001년 강원대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2003년 강원대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2002년 ~현재 한국천문연구원 연구원

※ 관심분야 : 대용량 데이터 처리, 초고속 네트워크, 병렬 시스템



김호령(Hyo-Reong Kim)

1990년 서울대학교 천문학과 졸업(이학사)

1996년 부산대학교 대학원 천문학과 졸업(이학석사)

2003년 부산대학교 대학원 천문학과 졸업(이학박사)

1990년 ~현재 한국천문연구원 연구원

※ 관심분야 : 전파천문, 외부우하, 클러스터

