

## VCS 상관블록의 TCP/IP 출력데이터의 무결성 검사 소프트웨어의 개발과 성능개선에 관한 연구

### A Study on Performance Improvement and Development of Integrity Verification Software of TCP/IP output data of VCS Correlation Block

염재환\*, 노덕규\*, 오충식\*, 정진승\*, 정동규\*, 오세진\*\*

Jae-Hwan Yeom\*, Duk-Gyoo Roh\*, Chung-Sik Oh\*, Jin-Seung Jung\*, Dong-Kyu Chung\*, Se-Jin Oh\*\*

#### 요약

본 논문에서는 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS)의 상관블록 TCP/IP 출력데이터의 무결성 검사를 위한 소프트웨어의 개발과 상관출력 데이터의 손실을 방지하기 위한 성능개선 방법에 대해 기술한다. VCS의 상관결과는 TCP/IP 패킷 통신으로 데이터아카이브(Data Archive)에 저장된다. 본 논문에서는 데이터아카이브에 저장된 상관결과의 무결성을 확인하기 위해 VCS의 TCP/IP 패킷 정보를 이용한 무결성 검사 소프트웨어를 개발하였다. 개발한 소프트웨어를 이용하여 3단계의 무결성 검사 과정을 제안하고, 상관처리 실험을 통하여 제안방법의 유효성을 확인하였다. 또한 VCS와 데이터아카이브 사이에는 최소 적분시간 이내에 TCP/IP 패킷 통신이 완료되어야 하지만, 짧은 적분시간에 다량의 패킷과 대용량 데이터로 인해 패킷 손실이 발생할 뿐만 아니라 상관결과의 무결성 문제에도 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 본 논문에서는 TCP/IP 패킷 손실의 원인을 분석하고 VCS의 FPGA(Field Programmable Gate Array) 설계에 대한 수정방법을 제시하여 상관결과의 무결성 문제를 해결하고자 한다.

#### Abstract

In this paper, we described the software development for verifying the integrity of output data of TCP/IP for VLBI Correlation Subsystem (VCS) correlation block and proposed the performance improvement method in order to prevent the data loss of correlation output. The VCS correlation results are saved at the Data Archive system through TCP/IP packet transmission. In this paper, the integrity verification software is developed so as to confirm the integrity of correlation result saved at the data archive system using TCP/IP packet information of VCS. The 3-step integrity verification process is proposed by using the developed software, its effectiveness was confirmed in consequence of correlation experiments. In addition, TCP/IP packet transmission must be completed within minimum integration period. However, there is not only TCP/IP packet loss occurred but also the problem of correlation result integrity affected in account of a large quantity of packets and data during short integration time. In this paper, the reason of TCP/IP packet loss is analyzed and the modified methods for FPGA(Field Programmable Gate Array) of VCS are proposed, the integrity problem of correlation results will be solved

**Keywords:** VCS, Data Archive, TCP/IP packet transmission, Integrity verification software

#### 1. 서론

한국천문연구원은 한국의 우주전파를 이용한 과학기술의 발전을 위하여 한일상관센터를 2010년에 개소하여 운영해

오고 있다. 한일공동VLBI상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC)는 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN) 3기의 전파망원경, 일본 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 4기의 전파망원경, 일본 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 관측망 및 중국의 VLBI 관측망을 연결한 동아시아VLBI관측망(East Asian VLBI Network, EAVN)과 같은 초장거리전파간섭계(VLBI)로 천체를 관측한 것을 상관처리하는 장치이다[1].

KJJVC는 관측소에서 기록된 저장매체를 재생하기 위한 Mark5B 재생기, VERA2000 재생기, 서로 다른 매체 간의 재생 동기를 수행하는 동기재생처리장치인 RVDB(Raw VLBI

\* 한국천문연구원

\*\* 한국천문연구원 (교신저자)

투고일자 : 2012. 9.17 수정완료 : 2012. 10. 29

계재확정일자 : 2012. 11. 3

Data Buffer), 상관처리를 위한 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS), 상관처리 완료된 데이터를 저장하기 위한 데이터아카이브(Data Archive), 그리고 상관 후 처리 소프트웨어를 위한 서버들로 구성된다. 재생기와 RVDB는 IVS (International VLBI Service)에 의해 표준화된 VSI (VLBI Standard Interface) 규격으로 설계된 연결단자로 연결되어 있다[2][7]. 그리고 VCS와 데이터아카이브는 10Gb 이더넷(Ethernet) 광케이블(Optical Fiber)을 이용한 TCP/IP 패킷 통신을 수행한다. 상관처리가 완료된 데이터는 짧은 시간에 많은 양의 패킷과 대용량 데이터를 송신하기 때문에 수신자인 데이터아카이브는 짧은 시간에 패킷 통신을 완료할 수 있어야 한다. 그러나 현재 도입한 데이터아카이브의 패킷 처리 능력의 한계로 인해 패킷 손실이 발생한다. 이는 상관처리 데이터의 무결성에 치명적인 영향을 미치기 때문에 반드시 해결되어야 한다. 고속신호처리 기술과 광통신 기술의 발전으로 다양한 신기술이 적용된 서버 시스템이 출현하고 있지만, 비용과 시간적인 측면에서 볼 때 현재 도입한 데이터아카이브에 근거하여 시스템을 최적으로 활용할 수 있도록 수정하는 것이 좋은 접근 방법이라고 생각된다.

따라서 본 논문에서는 VCS로부터 출력된 상관결과와 무결성 상태를 확인하는 소프트웨어를 개발하고자 한다. 그리고 개발된 소프트웨어의 성능시험 결과를 바탕으로 VCS의 상관 모듈에서 출력을 담당하는 FPGA 구성을 수정함으로써 데이터 무결성 문제를 해결할 수 있도록 상관결과와 출력포트를 변경할 수 있는 방법과 상관결과를 누적하는 어큐뮬레이터(Accumulator)를 확장할 수 있는 2가지 방법을 제안한다. 본 논문에서는 2가지 제안방법의 유효성을 확인하기 위해 우선 개발한 무결성 검증 소프트웨어의 성능확인도 수행하고, 개발한 소프트웨어를 이용하여 3단계의 무결성 검사방법도 제안한다. 그리고 제안방법을 FPGA에 적용한 경우 현재 주어진 VCS의 FPGA 리소스 범위에서 적용할 수 있는지 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 KJJVC에 대해 간략히 기술하고, III장에서는 VCS에서의 TCP/IP 모듈의 구성에 대해 기술한다. IV장에서는 상관출력 데이터의 무결성 검사를 위한 소프트웨어의 개발과 성능시험에 대해 논의하고 VCS 상관블록의 데이터 무결성을 해결하기 위한 제안방법에 대해 기술한다. 그리고 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 한일공동VLBI상관기

### 2.1 한일공동VLBI상관기 규격

한국천문연구원과 일본국립천문대가 2006년부터 공동으로 개발한 KJJVC는 총 16기의 전파망원경 120기선(baseline)에 대해 기당 8192Mbps의 속도로 8192상관출력(분광채널)을 갖는 상관처리를 수행할 수 있다. 그림 1은 한일상관센터 내에 설치된 KJJVC를 보여준다.

우주 공간의 은하, 성운, 항성 등 전파원으로부터 나오는 전파신호는 KVN과 VERA 등과 같은 전파간섭계의 전파

망원경으로 수신되고 초고속샘플러에 의해 디지털 신호로 변환된다. 관측데이터는 고속기록기의 HDD나 마그네틱테이프와 같은 매체에 저장된 후 상관센터로 이송되고 HDD 매체를 재생할 수 있는 Mark5B와 테이프 매체를 재생할 수 있는 VERA2000 재생기에 의해 RVDB로 복사된다. 이렇게 복사한 여러 관측국의 관측데이터는 RVDB를 통하여 VCS로 재생된다.

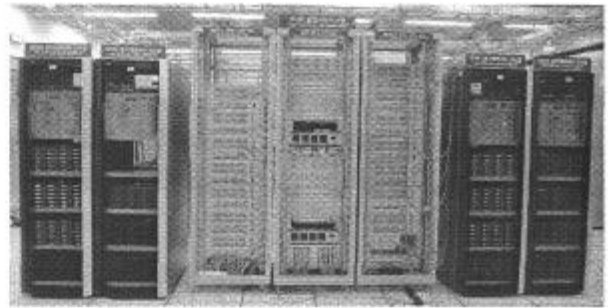


그림 1. 한일공동VLBI상관기의 설치모습.

Fig. 1. Korea-Japan Joint VLBI Correlator at Korea Japan Correlation Center.

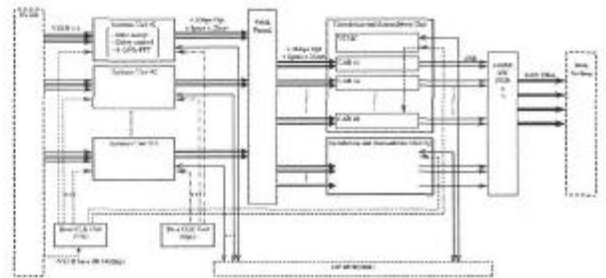


그림 2. 한일공동VLBI상관기의 구성.

Fig. 2. KJJVC Configuration.

VCS는 RVDB로부터 재생된 관측데이터를 IVS에 의해 표준화된 VSI-H 규격에서 정한 VSI 케이블로 전송받아서 상관처리를 수행한다. 그리고 VCS의 상관결과는 VCS의 출력포트와 10GbE의 광케이블 4개로 연결된 데이터아카이브에 저장된다. 그림 2는 한일공동VLBI상관기의 구성을 나타낸다.

그림 3은 VCS에서 처리하는 함수블록의 상세구성을 나타낸 것이다. 데이터 입력부, 지연제어부, FFT부, 상관부 및 적분부로 구분된다. 데이터 입력부는 KVN과 같이 4주파수 동시관측을 지원하기 위해 2Gbps속도의 4개의 입력 포트에 의해 8192Mbps를 지원한다. 입력 버퍼는 인공위성을 이용한 스페이스 VLBI 상관처리를 위해 최대 지연거리 36,000km, 최대 지연시간 0.12초의 메모리 공간을 지원한다. 지연추적부와 프린지 회전부는 기하학적 지연(Geometrical delay), 지연변화율(Delay rate), 비트점프(Bit jump), 위상과 위상변화율, 간차 지연보정을 수행하는  $\Delta W$  보정(delta W correction) 처리를 한다. FFT부는 16비

트 고정수소점 연산을 수행하고 실시간 데이터 처리를 위해 파이프라인(Pipeline)을 구성한다. 또한, 16비트 고정소수점 연산의 가장 큰 문제점인 오버플로우(Overflow)를 방지하기 위해 각 단계마다 데이터를 조정할 수 있는 스케일링(Scaling) 기능도 지원한다.  $\Delta W$  보정부는 지연 추적 연산과정에서 발생한 소수점 이하 값에 의한 오차를 보정한다. FFT부에서 출력되는 최대 데이터 속도는 약 16Gbps인데 이 데이터 량은 현재의 실제규격에서는 상관부로 전송할 수 없다. 이 데이터 전송 문제를 해결하고자 16비트의 데이터를 8비트로 재양자화하여 데이터의 양을 줄이게 된다[3].

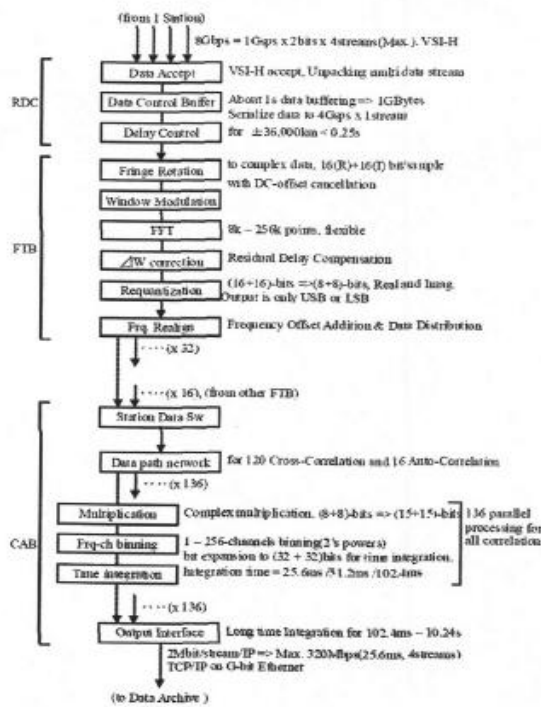


그림 3. VCS의 상세 함수 블록.

Fig. 3. Detail function block of VCS.

VCS는 16기의 전파망원경에 대해 16개의 자기상관과 120개의 상호상관 처리할 수 있으며 FX형의 복소상관시스템이다. F는 복소 푸리에 연산부를 의미하고 X는 복소 곱셈과 적분부를 의미한다. 곱셈 이후 연산 레지스터는 16비트 고정소수점이 되고 적분부에서 32비트 고정소수점으로 확장된다. 상관처리결과는 10GbE 광케이블 4개 회선을 이용하여 데이터아카이브 시스템으로 출력된다. VCS의 최대 출력속도는 11.2Gbps(=1.4Gbyte/sec)이다[4].

2.2 데이터아카이브 시스템

데이터아카이브는 1 Tbyte HDD 12개를 기본으로 구성하는 스토리지 노드(Node) 11대와 10Gb Ethernet 지원하는 고속자료전송장치(Accelerator-x) 5대로 구성되어 있다. 그림 4는 상관센터 내에 설치되어 있는 데이터아카이브를

보여준다.

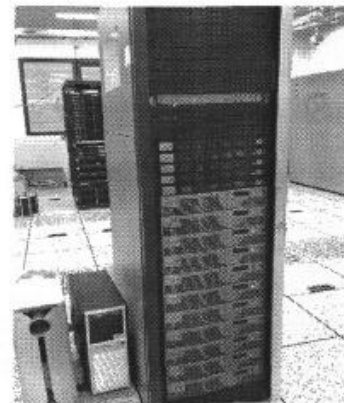


그림 4. 데이터아카이브 시스템.

Fig. 4. Data archive system.

고속자료전송장치와 스토리지 노드는 2대의 인피니밴드(Infiniband) 스위치로 연결되어 있으며 스토리지 노드의 총 용량은 119Tbyte이다. 스토리지 노드는 클러스터(Cluster)로 묶어 하나의 고성능 병렬처리 구조이다. 이런 방식은 스토리지 노드 수가 증가할수록 성능이 증가하고 여러 서버가 하나의 스토리지를 공유하여 대용량 파일을 동시에 읽을 수 있도록 지원한다. VCS의 출력은 각 스토리지 노드에 분산 저장되고 데이터 후처리 서버에서 동시에 접속하여 처리할 수 있다. 각 스토리지 노드는 4Gbyte 캐시와 512Mbyte NVRAM이 장착되어 있다[5].

III. VCS의 TCP/IP 전송 블록

VCS와 데이터아카이브는 4개의 10GbE 광케이블로 연결되어 있다. 그림 5는 VCS와 데이터아카이브 사이의 10GbE 연결 구성을 나타낸 것이다.

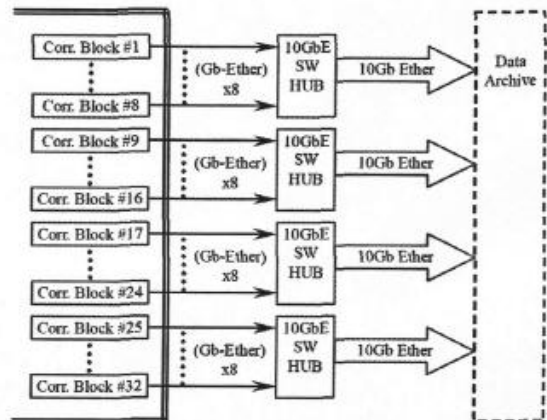


그림 5. VCS와 데이터아카이브의 10GbE 연결 구성.

Fig. 5. Configuration of 10Gb ethernet between VCS and data archive system.

그림 5에 나타낸 것과 같이 VCS의 각 상관블록 (Correlation Block)에서 출력된 32개의 1Gbps 데이터는 10:1로 데이터 패킷을 묶는 스위칭 허브를 사용하여 1Gbps 8개를 1개의 10GbE로 신호로 묶는다. 이것은 VCS가 FFT 부와 상관처리부에서는 데이터 처리를 고속으로 수행하기 위해 32개로 분할하여 병렬처리를 수행하기 때문이다. 그림 6은 VCS에 설치된 10:1 변환 10GbE 스위칭 허브를 나타낸 것이다.

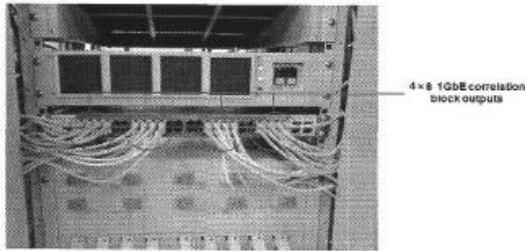


그림 6. VCS의 10Gb 이더넷 스위치.

Fig. 6. 10Gb ethernet switching hub on VCS.

그림 7은 VCS의 상관출력이 10GbE 4개와 데이터아카이브와의 연결관계를 나타낸 것이다. VCS는 16관측국 모드에서 1개의 포트(Port), 1개의 스트림의 경우 265,264바이트의 데이터를 출력한다. TCP 패킷은 257개가 발생하고 헤더 정보를 포함해서 281,198바이트이다. 표 1은 VCS의 TCP/IP 패킷 구조[6][8]를 나타낸다.

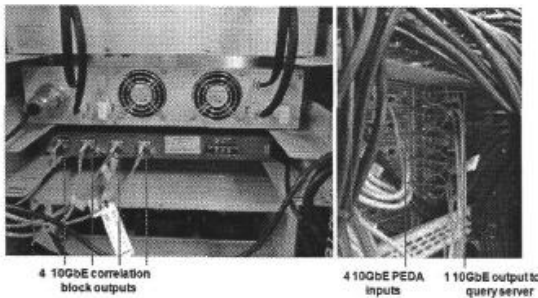


그림 7. VCS와 데이터아카이브의 10GbE 케이블.

Fig. 7. 10Gbit ethernet cable between VCS and data archive system.

그림 8에 나타낸 것과 같이 32개의 상관블록 중에서 각각 1개의 상관블록은 1개의 헤더 패킷, 16개의 자기상관 패킷 및 240개의 상호상관 패킷을 데이터아카이브로 출력한다. 데이터아카이브는 적분 시간 동안(Integration Period, IP) 257개의 패킷을 수신하여 처리해야 한다.

표 2는 TCP 헤더 패킷의 구조를 나타낸다. 헤더패킷 데이터는 자기상관 패킷의 헤더정보 및 상호상관 패킷의 헤더정보와 더불어 데이터 무결성 검사나 후처리 소프트웨어에서 중요하게 참조된다[8].

표 1. VCS TCP/IP 패킷 구조.

Table 1. TCP/IP packet format of VCS.

	16 관측국 모드	비 고
1상관 블록 상관출력 크기	265,264바이트	헤더 - 패킷×1 자기상관 - 패킷×16 상호상관 - 패킷×240
TCP 패킷수	257패킷	
패킷오버헤드	15,934바이트	1패킷 오버헤드 Preamble(4바이트) ETHER(14바이트) IP HEAD(20바이트) TCP HEAD (20바이트) FCS(4바이트)
1상관블록 데이터 량 (1포트분)	281,198바이트	265,264+15,934 바이트 (TCP Payload 데이터포함)
4 포트	1,124,792바이트	281,198×4 (4PORT)
합계(32상관블록)	35,993,344바이트	1,124,792×32

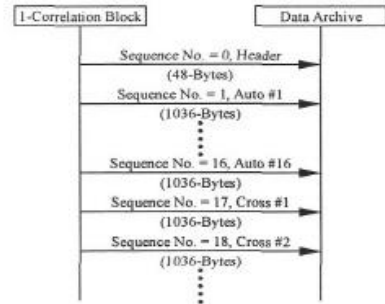


그림 8. 1개 상관블록에서 출력되는 패킷.

Fig. 8. Packet output from 1 correlation block.

모든 데이터처리는 HEADMARK의 “HEAD” 문자열 동기(Synchronization)로부터 시작한다. 데이터 무결성 검사는 HEADMARK를 검색하여 패킷의 데이터에 손실이 있는지를 검사하는 것이다.

표 2. TCP 헤더 패킷의 구조.

Table 2. TCP header packet structure.

Name	크기 [byte]	내 용	합계
HEADMARK	4	“HEAD”(String)	48byte
TotalSeqnum	4	0x00000000 ~ 0xFFFFFFFF	
Seqnum	4	항상 0	
Correlation Block #	1	(1 - 32)	
Array Mode	1	0:16/1-8+8/ 2:12+4	
FFT length	2	8 - 256 (×1024-points)	
Binning start ch	4	0 - 0x3FFFF (256k-1)	
Binning factor	16	0-255(Setting value - 1), (8-bits) × 16	
Stream No.	4	Serial No. of streams. (0 - 63)	
IP length	4	256 - 102400 (×0.1ms)	
IP count	4	0 - 0xFFFFFFFF	

표 3은 적분시간(IP), 그리고 스트림 별로 데이터 출력속도를 나타낸 것이다. VCS의 적분시간은 최소 25.6ms에서 최대 10.24s를 지원한다. 표 3에서 회색 부분은 VCS의 설계규격을 지원하지 않는 것을 나타내며, VCS의 최고출력 속도는 1.41Gbyte/sec이다.

표 3. 적분 시간에 따른 출력 데이터 속도.  
Table 3. Output data rate per integration period.

Stream Number	IP길이[ms]								
	25.6	51.2	102.4	204.8	409.6	512	1024	2048	10240
1stream [GB/s]	1.41	0.703	0.351	0.175	0.087	0.070	0.035	0.017	0.003
2stream [GB/s]	2.81	1.41	0.703	0.351	0.175	0.140	0.070	0.035	0.007
4stream [GB/s]	5.62	2.81	1.41	0.703	0.351	0.281	0.140	0.070	0.014
8stream [GB/s]	11.25	5.62	2.81	1.41	0.703	0.562	0.281	0.140	0.028
16stream [GB/s]	22.50	11.2	5.62	2.81	1.41	1.12	0.562	0.281	0.056

#### IV. 무결성 검사 소프트웨어 개발과 성능시험

##### 4.1 무결성 검사 소프트웨어 개발

표 3에서 나타낸 것과 같이 VCS의 최고속도는 16스트림에서 409.6ms의 적분시간에서 1.41GB/s이다. 현재 도입한 데이터아카이브 시스템은 입력되는 데이터가 Network File System(NFS)으로 관리되고 로드 밸런싱(Load balancing) 기능에 의해 데이터를 분산배치하는 것이 특징이다. 2.2절에 기술한 것과 같이 고속자료전송을 담당하는 Accelerator-x 시스템은 10GbE로 VCS 상관결과를 저장하는데, VCS에서 상관결과를 출력할 때 일정한 속도로 데이터를 출력하지 않는다. 그리고 데이터아카이브 시스템에는 OneFS라는 임베디드 리눅스 OS를 사용하고 있는데, 상관결과를 수신하는 사용자 소프트웨어를 적용할 수 있도록 전체 시스템에 대해 허용하지 않고 있다. 따라서 현재 개발한 VCS와 데이터아카이브 시스템 사이에서 4스트림 이상의 상관출력 데이터의 경우 표 3에 나타낸 VCS의 규격에서의 출력속도를 데이터아카이브 시스템이 수신하지 못하고 상관결과에서 데이터 손실이 발생하고 있다. 서론에서도 기술하였지만 도입한 데이터아카이브 시스템을 대체하기 위해서는 시간과 비용적인 면에서 어려운 부분이 있다. 이를 해결하기 위해 우선 현재의 시스템 구성에서 데이터아카이브 시스템에 저장된 상관출력 데이터의 무결성을 검사하는 소프트웨어를 개발하였다.

무결성 검사 소프트웨어는 그림 9에 나타낸 것과 같이 VCS의 32개의 상관블록에 대한 상관결과 파일을 읽은 후 표 2에 나타낸 TCP 패킷정보를 대상으로 출력데이터의 헤더 패킷, 자기상관 패킷 및 상호상관 패킷의 헤더정보를 분석하는 것이다. 이때 각 헤더 정보에 이상이 없는 경우에는 상관처리된 주파수 데이터를 도시하여 헤더정보가 아닌 데

이터의 무결성 검사를 실시한다. 또한, 최종적으로는 후처리 소프트웨어를 이용하여 FITS(Flexible Image Transport System) 형식으로 변환한 후 천문학에서 대중화되어 있는 AIPS(Astronomical Image Processing Software)를 이용하여 무결성 검사를 진행한다.

상관출력 데이터의 무결성 검사는 실제 관측 기록된 데이터를 이용하여 9시간 이상 상관처리를 수행하고 각 적분 시간별, 그리고 스트림 별로 진행한다.

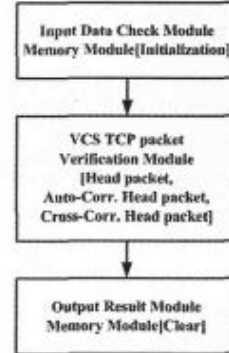


그림 9. 무결성 검사 소프트웨어의 구성.

Fig. 9. Configuration of Integrity verification software.

```

sh-8.28 ~/bin/fix_vcsout_rev_r11027b c5 YS.US.TN -sel 10 10
./out10.dat : fileSize 31648055296 bytes
@ ignored the remnants, 203248 bytes.
Last TotalSeqNum checked = 119307
# of HEADERS found = 119308

Information for the correlated data
-----
CorrOut Directory :
Expnr Name : r11027b
Composition Mode : 5

About the structure of corr-out-files ....
ArrayNdb = 0
n_stations = 16 (16*0)
n_baselines = 120 (120*0)
n_streams = 64 (4 ports * 16 substreams)
BLOCK SIZE = 265264 bytes
About the actual data in the corr-out-files ....
m_stations = 16 (16*0)
m_baselines = 120 (120*0)
m_streams = 16 (4 ports * 4 substreams)
block_size = 265264 bytes

#_Integrations = 7456
    
```

그림 10. 헤더 패킷, 자기상관 패킷 및 상호상관 패킷 헤더 무결성 검사.

Fig. 10. Integrity verification of header packet, auto packet header and cross packet header.

그림 10은 데이터아카이브에 저장된 상관출력 데이터의 헤더 패킷, 자기상관 패킷 및 상호상관 패킷 헤더 정보에 대해 본 연구에서 개발한 소프트웨어의 무결성 검사 결과를 보여준다. 헤더의 총 개수와 손실 데이터를 %로 표시한다. 무결성 검사 소프트웨어를 통하여 데이터아카이브에 저장된 각 상관블록의 상관결과에 문제가 없으면 전체 상관블록 데이터를 스펙트럼과 위상정보를 갖는 이미지로 변환하여 무결성 검사를 한 번 더 수행하게 된다. 그림 11은 헤더 정보에 이상이 없을 경우에 32개 상관블록 전체 데이터

에 대한 무결성 검사와 함께 이미지 파일로 변환하여 상관 출력된 주파수 데이터에 대한 무결성 검사를 보여준다. 무결성 검사에 사용한 관측데이터는 KVN과 VERA의 7기 전파망원경으로 관측한 것으로서 일부분을 그림 12에 나타낸 것이다.

```
# Auto Correlation result #005
TotSes 0 500 5 CorFBIack 1 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 2 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 3 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 4 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 5 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 6 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 7 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 8 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 9 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 10 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 11 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 12 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 13 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 14 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 15 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 16 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 17 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 18 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 19 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 20 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 21 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 22 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 23 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 24 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 25 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 26 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 27 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 28 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 29 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 30 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 31 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
TotSes 0 500 5 CorFBIack 32 Xis 4 Yis 4 217m 2 0K150 0 ValSep 1500 IPCount 0
```



그림 11. 상관결과를 그림으로 변환하여 무결성 검사.  
Fig. 11. Integrity verification converting to image of correlation result.

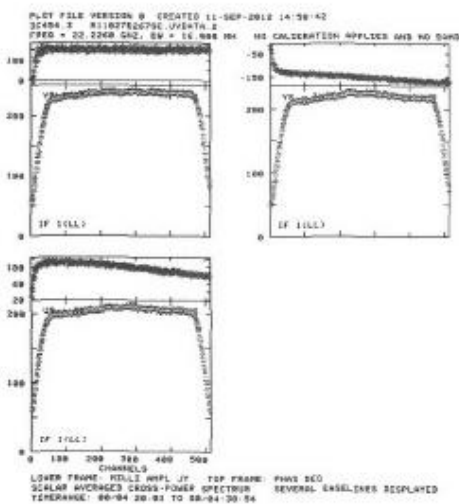


그림 12. 상관 후처리 소프트웨어에 의해 FITS 형식으로 변환한 후 AIPS의 분석과 무결성 검사.  
Fig. 12. Analysis and integrity verification of AIPS after converting FITS format by correlation post processing software.

그림 11에 나타낸 이미지 변환을 통한 상관결과와 무결성 검사에서도 문제가 없으면 마지막으로 상관후처리 소프트웨어를 통하여 천체 관측데이터의 과학적 분석을 수행할 수 있는 FITS 형식으로 변환한다. 그리고 최종적으로 FITS 형식으로 변환된 상관결과를 AIPS에서 읽은 후 상관센터에서 수행하는 기본적인 무결성 검사를 수행하게 된다. 그림 12는 최종적으로 상관 후처리 소프트웨어를 이용하여 FITS 파일로 변환한 후에 AIPS를 이용하여 분석 및 무결성 검사 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 KVN+VERA의 7관측국 데이터 중에서 KVN 3관측국 데이터의 스트림 9번에 대한 결과만을 나타낸 것이다.

4.2 소프트웨어의 성능시험

표 4. 상관출력속도에 따른 무결성 검사 결과  
Table 4. Integrity verification result according to the output data rate.

Stream Number	IP길이[ms]								
	25.6	51.2	102.4	204.8	409.6	512	1024	2048	10240
1stream [GB/s]	1.41	0.703	0.351	0.175	0.087	0.070	0.035	0.017	0.003
2stream [GB/s]	2.81	1.41	0.703	0.351	0.175	0.140	0.070	0.035	0.007
4stream [GB/s]	5.62	2.81	1.41	0.703	0.351	0.281	0.140	0.070	0.014
8stream [GB/s]	11.25	5.62	2.81	1.41	0.703	0.562	0.281	0.140	0.028
16stream [GB/s]	22.50	11.2	5.62	2.81	1.41	1.12	0.562	0.281	0.056

본 논문에서 개발한 무결성 검사 소프트웨어의 유효성을 확인하기 위해 표 3에 나타낸 모든 적분시간과 모든 스트림에 관한 상관결과와 무결성 검사를 수행하였으며, 실험결과를 표 4에 나타내었다. 표 4의 붉은 실선으로 표시한 부분은 상관결과에 대해 모두 무결성 검사에서 실패한 것이다. 표 4에 나타낸 시험결과와 실패 원인을 분석한 결과, 데이터아카이브 및 고성능의 서버는 초당 TCP 패킷 수신율은 VCS의 설계규격인 출력 속도를 수신할 수 있는 성능을 갖고 있지만, 도입한 데이터아카이브 시스템은 일정한 데이터 입력속도를 유지하면서 네트워크로 파일시스템을 통합 관리하는 것은 성능이 우수하지만, 짧은 시간에 대량의 패킷을 처리하는 데는 시스템의 성능에 한계가 있음을 파악하였다. 즉, 적분시간이 25.6ms인 경우 사용할 수 있는 스트림은 1개로 각각의 상관블록마다 1,028개의 패킷이 발생하고 1.06Mbyte의 데이터 크기를 갖는다. 25.6ms마다 1,028개의 패킷이 발생하기 때문에 초당 환산하면 약 40,156개의 패킷이 발생함을 알 수 있다. TCP/IP는 수신 패킷이 정상적이지 않을 경우에 송신자에게 재전송을 요청하는 특성이 있다. 따라서 데이터아카이브 시스템이 수신자이므로 적분시간 25.6ms 내에 수신하지 못하는 패킷에 대해서 송신자인 VCS에 지속적으로 데이터 전송을 다시 요청하게 되어서 짧은 시간에 패킷 처리를 하지 못함으로써 패킷 상실과 함께 데이터에 손실이 발생하는 것이다. 적분

시간이 길어지면 그만큼 대기 시간이 길어지기 때문에 충분히 데이터카이드에서 상관결과를 받을 수 있어야 하지만, 표 4에 나타난 16스트림의 실험결과에서는 패킷 손실이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 VCS의 기본적인 출력속도가 항상 최고속도로 설정되어 있기 때문이다. 또한, 409.6ms 적분시간 이후의 적분시간은 최소 적분 단위인 409.6ms로 설정되어 있고 스트림의 수가 늘어나기 때문이다.

4.3 TCP/IP 데이터 무결성 개선 방법 제안

VCS의 TCP/IP 블록은 FPGA로 구성되어 있으며, 그림 13에 나타내었다. 그림 13의 상관블록에서 어큐물레이터(Accumulator)의 데이터는 최소 적분시간 이내에 FIFO(First In First Out)를 통해 TCP/IP 블록의 패킷 메모리에 저장되어야 한다. FIFO 최대 전송속도는 1Gbps이지만, FPGA로 합성한 결과는 350Mbps의 전송속도를 갖는다. TCP/IP 블록이 최소적분시간 이내에 패킷 메모리를 비우지 못할 경우에 FIFO는 'FIFO full'을 레지스터에 설정하면서 뒤따르는 어큐물레이터의 데이터는 상실된다. 즉, 상실된 데이터만큼의 패킷 손실이 발생한 것을 의미한다. 이러한 패킷의 손실은 4장에서 수행한 무결성 검사에서 상관결과 손실이 발생하는 것이다. 이와 같은 패킷 손실의 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 상관출력포트를 설정하는 방법과 어큐물레이터를 확장하는 방법 등을 제안한다.

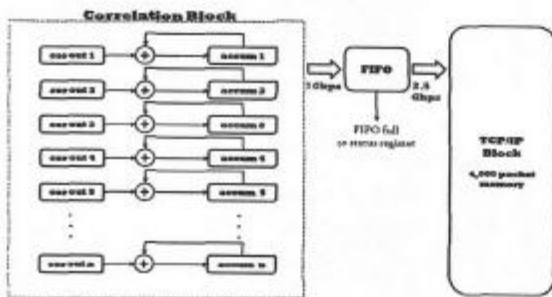


그림 13. VCS TCP/IP 블록의 FPGA 구성.

Fig. 13. FPGA configuration of VCS TCP/IP block.

본 논문에서는 데이터 무결성을 개선하기 위한 첫 번째 방법으로 상관출력 포트를 선택하는 방법을 제안한다. VCS의 안테나 유닛(Antenna Unit)은 2Gbps VSI 데이터를 수신할 수 있는 연결 포트를 각각 4개씩 가지고 있다. 현재 VCS는 4개의 상관입력 포트 중에서 1개만을 사용하고 있다. 향후 8Gbps의 데이터를 모두 사용할 경우엔 모든 포트를 사용할 예정이지만, 현재 VCS의 상관블록에서는 사용하지 않는 포트의 상관결과도 출력하고 있다. 따라서 의미없는 데이터를 출력하고 있기 때문에 FPGA에 설정된 TCP/IP 블록의 메모리가 더욱 모자라게 되는 현상이 발생하고 있다. 따라서 제안 방법은 현재 상관처리에 사용하지 않는 포트를 사용하지 않도록 설정하여

패킷 발생량을 줄이는 것이다. 상관처리를 하는 포트는 'Port Selection' 신호로 'Enable'하고 상관처리에 사용되지 않는 포트의 데이터는 'Disable' 신호로 선택적으로 출력하도록 한다. 이렇게 함으로써 VCS의 상관블록에서의 패킷 발생량과 데이터량을 최대 1/4까지 줄일 수 있다. 제안방법의 FPGA 구성을 그림 14에 나타내었다.

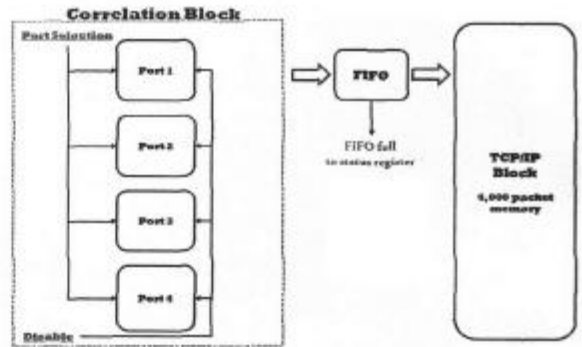


그림 14. 포트선택에 의한 패킷 감소 방법.

Fig. 14. Packet reduction method by port selection.

본 논문에서는 데이터 무결성을 개선하기 위한 두 번째 방법으로 어큐물레이터 메모리의 확장 방법을 제안한다. 그림 13과 같이 FPGA에 구성되어 있는 어큐물레이터의 데이터는 각각의 적분시간마다 최소 적분시간 이내에 FIFO를 거쳐 TCP/IP 블록의 패킷 메모리로 전송되어야 한다. 최소 적분시간의 범위가 25.6ms로부터 409.6ms로 1개의 FIFO를 거쳐 많은 양의 패킷을 전송하기에는 무리가 있는 시간이다. 이러한 최소 적분시간의 영향을 받지 않고 적분시간을 최대한 활용하기 위해서는 어큐물레이터의 값을 저장할 수 있는 새로운 메모리를 두는 것이다. 어큐물레이터의 값은 최소 적분시간마다 입력되는 값을 더해져 자신의 값을 갱신해야 하지만, 새로운 저장 메모리는 최소 적분시간과는 상관없이 사용자가 원하는 적분시간마다 갱신을 요구하기 때문에 시간의 제약을 받지 않게 되어 데이터의 손실을 방지할 것으로 기대된다. 제안방법의 FPGA 구성방법을 그림 15에 나타내었다.

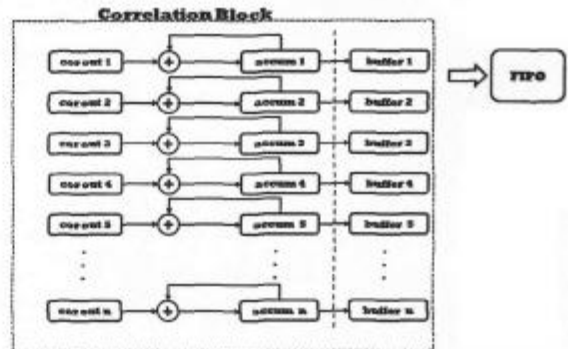


그림 15. 무결성 개선을 위한 어큐물레이터의 확장.

Fig. 15. Accumulator expansion to improve the Integrity.

상관출력의 무결성 검사와 함께 데이터 손실을 방지하기 위해 본 논문에서 제안한 2가지 방법의 실현을 위해 VCS의 상관블록에서 FPGA의 설계를 진행하고 있다. 향후 FPGA의 설계가 완료되면 이를 설치하여 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위한 상관시험을 수행한 후 그 결과를 보고할 예정이다.

## V. 결론

본 논문에서는 KJJVC의 핵심 구성시스템인 VCS와 데이터아카이브 시스템사이의 TCP/IP 패킷 통신을 통하여 데이터아카이브 시스템에 기록한 상관결과의 무결성 검사를 위한 소프트웨어를 개발하였으며, 모두 3단계의 무결성 검사과정을 수행한 후 상관결과의 무결성 여부를 확인하였다. 또한 상관처리 후 1단계 무결성 검사를 위해 본 논문에서 개발한 소프트웨어의 유효성을 상관시험을 통하여 확인하였다. 그리고 VCS와 데이터아카이브 시스템사이의 TCP/IP 패킷 통신에서 발생하는 데이터 손실의 원인을 분석하였으며, VCS의 설계규격과 데이터아카이브 시스템에서 수신할 수 있는 스트림과 적분시간에 대해 상관시험을 수행하였다. 이 시험을 통하여 데이터아카이브 시스템이 짧은 최소 적분시간에서 발생하는 대량의 상관결과가 전송될 때 정상적으로 동작하지 못하는 것을 발견하였다. 또한 VCS에서도 최소 적분시간의 출력속도로 상관결과가 출력되고 있는 것을 확인하였다.

이상의 실험결과를 바탕으로 짧은 최소 적분시간에 대량의 데이터를 전송하면서 발생하는 데이터 무결성 문제에 관해서 VCS의 FPGA 구성을 1) 포트 출력 설정을 이용한 개선 방법과 2) 어큐뮬레이터를 확장한 개선 방법으로 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 제안한 2가지 방법을 VCS의 FPGA에 합성하여 TCP/IP 패킷 손실에 따른 데이터 무결성 문제를 개선할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] 노덕규 외 15명, "2008년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서," 한국천문연구원, pp. 3-5, 2008.
- [2] VLBI Standard Interface Specification, <http://vlbi.org/vsi/>
- [3] 염재환, 오세진, 노덕규, 강용우, 박선엽, 이창훈, 정현수, "한일공동VLBI상관기를 위한 소프트웨어 상관기의 개발," 한국우주과학회, 제26권 4호, pp. 567-588. 2009.
- [4] VLBI Correlation Subsystem Execution Specification, Elecs Industry Co., Ltd.
- [5] 노덕규 외 15명, "2009년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서," 한국천문연구원, pp. 267-270, 2009.
- [6] VCS TCP/PT Specification, Elecs Industry Co., Ltd.
- [7] 정구영, 노덕규, 오세진, 염재환, 강용우, 이창훈, 정현수, 김광동, "FPGA를 이용한 전파천문용 디지털 필터

설계의 기본연구," 신호처리시스템학회 논문지, 제9권 제1호, pp. 62-74, 2008.

- [8] 오세진, 노덕규, 염재환 외 6명, "VLBI 상관서브시스템 본제품의 제작현장 성능시험," 신호처리시스템학회 논문지 제12권 제4호, pp. 333-340, 2011.



염 재 환 (Jae-Hwan Yeom)

2005년 8월 한양대 정밀기계공(공학석사)  
2005년 10월 ~ 현재 한국천문연구원 선임  
연구원

※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상  
관기 개발, DSP & FPGA응용, 천문  
관측기기 개발



오 세 진 (Se-Jin Oh)

正會員

1996년 2월 영남대 전자공학과(공학사)  
1998년 2월 영남대 전자공학과(공학석사)  
2002년 2월 영남대 전자공학과(공학박사)  
2001년 9월 ~ 2002년 12월 대구과학대학교 교수  
2002년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원

2010년 6월 ~ 2011년 5월 한국천문연구원 그룹장  
※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상  
관기 개발, 천문관측기기개발



노 덕 규 (Duk-Gyoo Roh)

1985년 2월 서울대 천문학과(이학사)  
1994년 8월 동경대 천문학과(이학석사)  
1997년 8월 동경대 천문학과(박사수료)  
1985년 4월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원  
2005년 11월 ~ 2009년 3월 한국천문연구원 그룹장

※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관처리

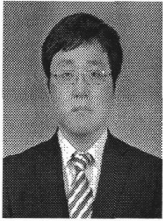


오 충 식 (ChungSik Oh)

2002년 2월 서울대 천문학과(이학사)  
2006년 3월 동경대 천문학과(이학석사)  
2009년 3월 동경대 천문학과(이학박사)  
2009년 4월-2010년 11월 한국천문연구원  
박사후연수원

2010년 12월 - 현재 한국천문연구원 선임연구원  
※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관처리





정진승 (JinSeung Jung)

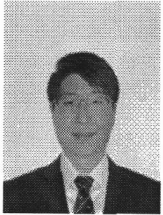
正會員

2008년 2월 경남대 전자공학과(공학사)

2010년 2월 경남대 전자공학과(공학석사)

2010년 8월 ~ 현재 한국천문연구원 연구원

※주관심분야 : 디지털신호처리, FPGA 설계,  
천문관측기기 개발



정동규 (Dong-Kyu Jung)

2004년 8월 충남대 천문학과(이학사)

2006년 8월 충남대 천문학과(석사수료)

2012년 1월 ~ 현재 한국천문연구원 연구원

※주관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발

---