

VLBI 상관서브시스템의 현장설치 및 시험결과 고찰
INSTALLATION AND PERFORMANCE VERIFICATION OF
VLBI CORRELATION SUBSYSTEM

오세진¹, 노덕규¹, 염재환¹, 박선엽^{1,4}, 강용우¹, 오충식¹,

Tomoaki Oyama², Noriyuki Kawaguchi², Hideyuki Kobayashi², Kazuyuki Kawakami³

¹한국천문연구원, ²일본국립천문대, ³Elecs Industry Co. Ltd., ⁴충북대학교

SE-JIN OH¹, DUK-GYOO ROH¹, JAE-HWAN YEOM¹, SUNYOUP PARK¹, YONGWOO KANG¹,

CHUNGSIK OH¹, TOMOAKI OYAMA², NORIYUKI KAWAGUCHI²,

HIDEYUKI KOBAYASHI², AND KAZUYUKI KAWAKAMI³

¹Korea Astronomy & Space Science Institute, 776 Daedukdaro, Yuseong, Daejeon 305-348, Korea

²National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

³Elecs Industry Co. Ltd., 1-22-23 Sinsaku, Takatu, Kawasaki 213-0014, Japan

⁴Chungbuk National University, 52 Naesungdong-ro, Heungdeok-gu, Cheongju, 361-763, Chungbuk, Korea

Email: sjoh@kasi.re.kr

(Received October 31, 2011; Accepted January 10, 2012)

ABSTRACT

In this paper, we describe the installation of VLBI Correlation Subsystem (VCS) main product and its performance at the Korea-Japan Correlation Center (KJCC). The VCS main product was installed at KJCC in August 2009. For the overall performance evaluation of VCS, playbacks, Raw VLBI Data Buffer (RVDB) system, and Data Archive (DA) system were installed together. The VCS main product was connected between RVDB and DA, and the correlation results were put into the DA to confirm the normal operation of VCS 16 station mode configuration. The evaluation test was first performed with 4 station mode, same as the factory test of VCS main product. Based on the results of 4 station mode, the same evaluation test was conducted for 16 station mode of VCS. We found that the correlation results of VCS were almost similarly compared to those of the Mitaka FX Correlator. Through the test results, we confirmed that the problems such as spectrum errors, delay parameter processing module and field programmable gate array errors in antenna unit, which were generated at the factory test of VCS main product, were clearly solved. And we verified the performance and connectivity of VCS by obtaining the expected correlation results and we also confirmed that the performance of VCS was sufficient for real VLBI observation data in both 4 and 16 station modes.

Key words: Korea-Japan Joint VLBI Correlator; VCS main product; field inspection

1. 서론

한국천문연구원(KASI)¹과 일본국립천문대(NAOJ)²가 2005년 7월 7일에 체결한 한일공동VLBI³상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC) 공동개발

MOU를 바탕으로 약 4년동안 연구개발(노덕규 등, 2008)을 진행하여 2009년 9월에 KJJVC의 핵심시스템인 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS)을 한일상관센터(Korea-Japan Correlation Center, KJCC)에 설치하게 되었다. KJJVC는 고속재생기(Mark5B, VERA2000), 동기재생처리장치(Raw VLBI Data Buffer, RVDB), VCS, 데이터 아카이브(Data Archive, DA) 시스템 등의 하드웨어 장치와 관련 제어 운영 소프트웨어로

¹ Korea Astronomy and Space Science Institute.

² National Astronomical Observatory of Japan.

³ Very Long Baseline Interferometer.

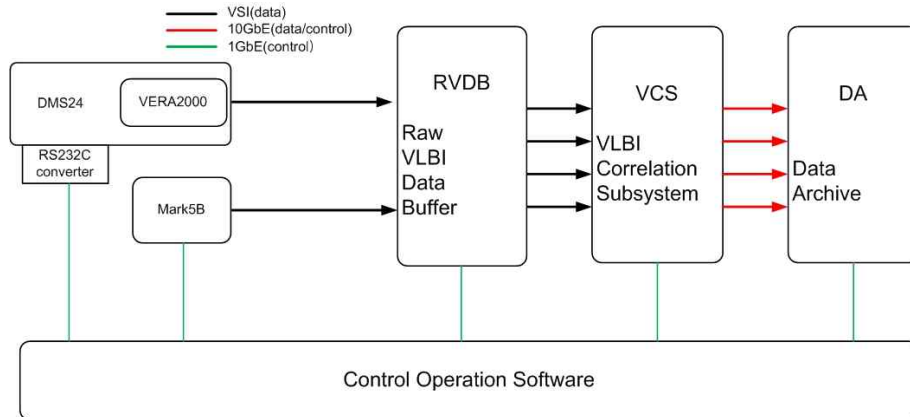


그림 1. 한일공동VLBI상관기의 구성도.

구성된다. KJVC 구성 시스템의 핵심인 VCS는 2007년 7월부터 설계제작을 거쳐 2008년 8월에 VCS 시작품을 개발한 후 성능시험을 완료하였으며(오세진 등, 2009), 그 결과를 바탕으로 2009년 5월에 VCS 본제품의 개발이 완료되어 성능시험을 수행하였다(오세진 등, 2011). VCS의 개발과 더불어 다른 구성 시스템들의 개발도 진행하였는데, 특히 한일공동 개발이라는 MOU에 기초하여 NAOJ는 VERA2000 고속재생기와 RVDB 시스템을 개발하였다. 그리고 KASI에서 설계·제작한 VCS는 최대 16 관측국, 8192 Mbps/관측국, 8192 출력채널의 성능을 갖고 있으며, VCS의 상관결과를 저장하기 위해 DA 시스템도 구축하였다. DA 시스템은 VCS의 최대 출력속도가 25 ms 적분일 때, 최대 초당 1.4 GB의 속도로 상관결과를 분산처리하여 저장할 수 있다.

본 논문에서는 KJVC의 각 구성 시스템 중에서 핵심이 되는 VCS 본제품의 공장검증 결과(오세진 등, 2011)를 바탕으로 VCS 본제품과 함께 KJVC의 다른 구성 시스템을 현장에 설치하고 전체 시스템의 데이터 연결성 시험을 수행한다. 그리고 VCS 본제품의 공장검증에서 발견한 스펙트럼 오류, 지연 파라미터 모듈 오류, 안테나 유닛의 데이터 입력을 담당하는 FPGA 모듈 등의 문제 해결여부를 확인한다. 또한 이전의 공장시험에서 수행하지 못한 부분으로서 상관기 전체 시스템을 구성한 후 다양한 시스템 구성모드에 따라 실제 관측데이터를 대상으로 한 성능시험을 수행하여 상관기 전체 시스템의 정상동작 시험결과에 대해 기술하고자 한다.

2. KJVC 구성시스템

그림 1은 한일공동VLBI상관기의 구성도를 나타낸 것이다. 이하에서 각 시스템의 구성과 기능에 대해 간략히 기술한다.

2.1. 고속재생기(Mark5B, VERA2000)

KVN⁵에서는 Mark5B 시스템을 관측데이터의 기록과 재생에 사용한다. Mark5B 시스템은 VLBI표준 인터페이스인 VSI-H⁶ 규격을 가지며 최대 1024 Mbps로 기록과 재생을 수행할 수 있다(오세진 등, 2004). VERA에서는 1024 Mbps의 기록재생속도를 가지며 테이프를 미디어로 사용하는 DIR2000을 고속기록기로 활용하고 있다. 그러나 최근 DIR2000 시스템(Tony, 2002)의 생산 중단으로 인해 KJVC를 위한 고속재생기 시스템을 제공할 수 없어 기존의 128/256 Mbps급 시스템인 DIR1000H 시스템(Tony, 2002)을 1024 Mbps속도로 재생만 가능하도록 개량하였다.

2.2. 동기재생처리장치(RVDB)

동기재생처리장치인 RVDB 시스템(Oyama et al., 2008)은 Mark5B, VERA2000 등과 같이 공동 VLBI 관측망에서 사용될 다양한 VLBI 데이터 재생 시스템을 연결할 수 있도록 구성된다. Mark5B와 VERA2000 등이 하드디스크와 테이프를 미디어로 사용하고 있는데, 이들 시스템들이 VSI-H 호환 인터페이스를 채용하고 있지만, 미

⁴ VLBI Exploration of Radio Astrometry.

⁵ Korean VLBI Network.

⁶ <http://www.vlbi.org/vsi>.



그림 2. VCS 본제품의 현장설치 후 시험 사진.

디어의 동작 상태에 따라 정확한 시간을 맞추어 데이터를 재생하는 것은 어려움이 있다. 또한 광케이블을 통한 데이터를 전송하는 부분도 있으므로 앞에서 기술한 문제점을 해결하기 위해 고속재생기와 VCS시스템을 직접 연결하지 않고 중간에 버퍼 역할과 데이터의 형식변환, 동기재생 등을 수행할 수 있다.

2.3. VLBI 상관서브시스템(VCS)

그림 2에 나타낸 것과 같이 VCS는 최대 16 관측국의 최대 8192 Mbps급 데이터를 처리할 수 있다(노덕규 등, 2008; 염재환 등, 2009). 각 안테나에 입력된 데이터에 대해 안테나 유닛은 데이터 승낙, 지연 제어, 256 k - FFT⁷ 등의 기능을 수행한다. 데이터 승낙 모듈은 2 GB의 버퍼가 있으며 4 포트 입력 데이터는 1 Gpsps⁸ × 2 bit × 4-stream에서 4 Gpsps × 2 bit × 1-stream 데이터로 직렬화 된다. 지연제어 모듈에서는 지연추적과 프린지 회전(fringe rotation)을 수행한다(Takahashi et al., 2000; Thomson et al., 2001). 지연제어에서 부분 지연이 발생한 경우에는 FFT 처리 후에 지연잔차인 ΔW 보정을 수행한다(염재환 등, 2009). 이 과정을 상관처리 전에 수행하는 것은 프린지 회전이 안테나를 중심으로 수행되기 때문이다. FFT 모듈에서는 8k(8192) ~

256k(262144)-points의 FFT 처리를 수행한다. FFT 모듈에서의 사전처리로서 데이터는 16 bit로 확장되고, FFT 결과는 재양자화 과정을 수행한 후, 병렬 광전송으로 상관블록에 전송된다.

상관처리는 디바이스의 속도제한 때문에 32 병렬로 수행된다. 주파수 채널로 분리된 전체 16 안테나에 입력된 데이터는 각 상관 블록에 입력된다. 각 상관블록에는 136-상관 어레이와 상관출력 블록이 있다. 각 상관결과는 최종적으로 8192개 출력채널로 압축되어 출력되므로 1-블록에 대해 상관결과는 256-points가 된다. 상관출력은 Gbit Ethernet 패킷(TCP/IP)으로 136-상관 어레이의 결과를 출력한다. 여기서 상관결과는 102.4 ms 이상의 시간으로 적분된다. 만약 적분시간이 25.6 ms이면 출력 속도는 1 상관블록당 약 320 Mbps가 된다. 32-상관블록의 출력은 매번 8-블록으로 수집하며, 이 데이터는 4개의 10 Gbit Ethernet을 통하여 DA에 전송된다.

2.4. 데이터 아카이브(DA)

DA 시스템은 각각 4개의 코어를 가진 Intel Xeon 2.33 GHz 듀얼 CPU를 장착한 고속자료전송장치(Accelerator-x, 10 GbE X2) 5대, 1 TB 하드디스크 12개를 기본으로 하는 스토리지 단위인 노드 11개와 20 GbE Infiniband 스위치 2대로 연결된 실제 가용용량 119 TB의 스토리지로 구성된다(노덕규 등, 2008).

⁷ Fast Fourier Transform.

⁸ Giga Sample Per Second.

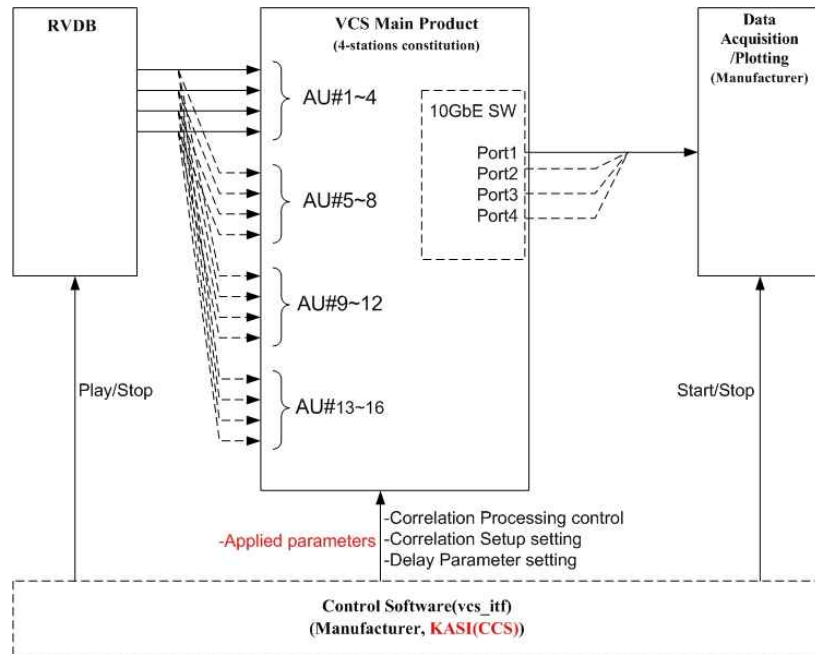


그림 3. VCS의 4 관측국 모드 구성도. 그림에서 AU#1 ~ 4, AU#5 ~ 8, AU#9 ~ 12, AU#13 ~ 16의 안테나 유닛을 각각 4 관측국으로 설정한 후 RVDB로부터 4 포트의 관측 데이터를 재생하여 각 안테나 유닛에 대응하는 VCS에 대해 4회의 실험을 수행하도록 구성한 방법이다. 그리고 상관출력은 DA 시스템에 광케이블 1개만 연결되어 있다.

표 1. 4 관측국 모드에 사용된 제어 프로그램들

- Optical Cable Connection	4-stations 구성
- RVDB Control	제작사 프로그램
- Correlation Process Control	제작사 프로그램
- Correlation Setup Setting	제작사 프로그램
- Delay Parameter Setting	제작사 프로그램
- Data Acquisition/Plotting	제작사 프로그램

3. 성능시험 및 결과

본 논문에서는 KJVC의 핵심인 VCS 본제품의 현장설치 및 성능평가를 위해 다른 구성 시스템들과 함께 현장에 설치하고, 관측 데이터를 이용한 전체 구성 시스템의 연결성 시험과 VCS 본제품의 공장검증에서 발견된 문제점의 해결여부 및 전체 모드에서 상관처리 성능 시험을 수행한다. 그림 2와 같이 VCS 본제품의 현장설치 후 시험은 제작사의 공장시험과 다르게 다음의 2단계로 성능시험을 수행하였다. 우선 VCS 본제품은 16 관측국까지 처리할 수 있지만, 4 관측국 모드로 설정한 후 제작사의 VCS 제어 소프트웨어와 KASI에서 개발한 VCS 제어 소프트웨어를 이용하여 2초 및 2분 분량의 실제 관측데이터를 대상으로 VCS 성능시험을 수행하고, NAOJ의 미타카 FX 상관기 결과와 비교한다.

그리고 VCS 본제품을 16 관측국 모드로 설정하여 제작사의 VCS 제어 소프트웨어와 KASI에서 개발한 VCS 제어 소프트웨어를 이용하여 RVDB, VCS, DA 시스템을 모두 연결하여 2분 분량의 실제 관측데이터를 대상으로 VCS 성능시험을 수행한다.

3.1. 4 관측국 모드 성능시험(제작사 소프트웨어 사용)

4 관측국 모드의 성능시험은 VCS 본제품을 DA 시스템과 연결하여 VCS 본제품의 공장시험(오세진 등, 2011)과 시험환경이 달라진 상황에서 동일한 결과가 재현되는 확인하기 위해 수행하였다. 즉, 그림 3과 표 1에 나타난 구성을 사용한 이 시험은 VCS의 안테나 유닛(Antenna Unit, AU)과 상관 유닛(Correlation Unit, CU) 사이에 있는 패치패널의 광케이블 구성을 조정하여 전

표 2. VCS의 4 관측국 모드 설정에 대한 연결성 시험 결과

RVDB Output		Combination of Stations			
		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
C-port 1	MIZUSAWA	AU#1	AU#5	AU#9	AU#13
C-port 2	IRIKI	AU#2	AU#6	AU#10	AU#14
C-port 3	ISHIGAKI	AU#3	AU#7	AU#11	AU#15
C-port 4	OGASAWARA	AU#4	AU#8	AU#12	AU#16
Result		OK	OK	OK	OK

표 3. 관측 천체의 정보

Observation Name	Radio Source	Observation Mode	Observation Frequency & Time	Telescope & Baseline
R07323c	W49N(S)	VERA1, 128 MHz - 2 ch A beam	22.2271 GHz, UT 02 ^h 12 ^m 00 ^s ~ 14 ^h 27 ^m 49 ^s	VERA, max. 2300 km
	OH43(S)	VERA1, 128 MHz - 2 ch B beam		
	3C446(C)	VERA1, 128 MHz - 2 ch A beam		
R08077a	SgrB2(S)	VERA7, 16 MHz - 16 ch A beam	22.226 GHz, UT 15 ^h 25 ^m 00 ^s ~ 02 ^h 08 ^m 16 ^s	
	RCW142(S)	VERA7, 16 MHz - 16 ch A beam		

S : Spectral Line, C : Continuum

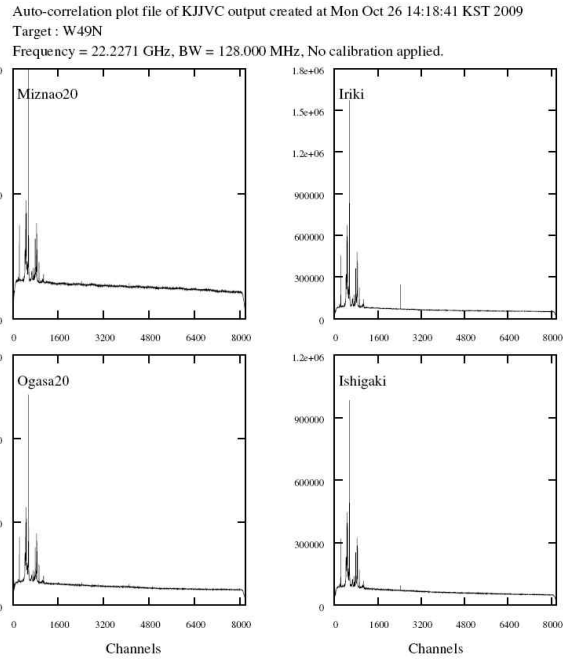
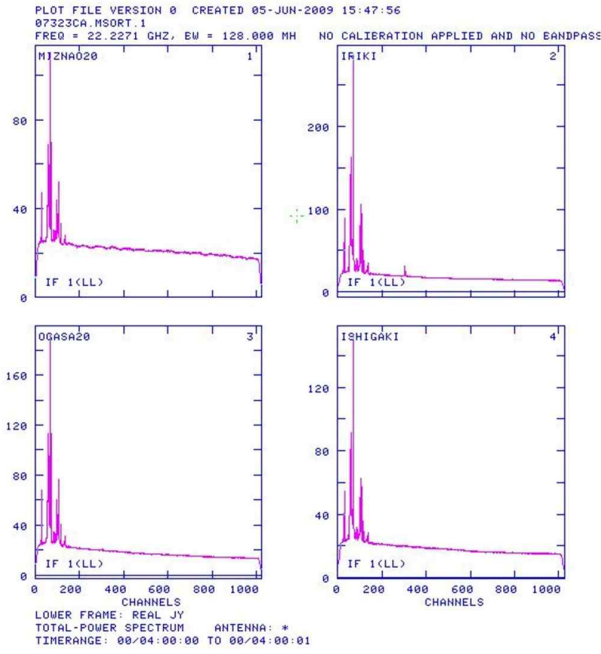
체 안테나 유닛 중에서 4개씩 묶어서 4 관측국만 동작하도록 설정하고 그 결과는 10 GbE 1 포트만을 이용하여 DA 시스템에 저장할 수 있도록 설정하였다. 표 2와 같이 VCS의 4 관측국 모드 설정에 대해 데이터, 기준 클럭, 광케이블 등의 연결성 시험을 수행하였다. 표 3은 성능시험에 사용한 관측데이터에 대한 정보를 나타내었다. 관측데이터는 NAOJ의 VERA 관측망으로 2007년과 2008년에 각각 관측한 것이다. 표 3에 나타낸 것과 같이 관측데이터는 VERA 관측망의 특징인 2-빔 시스템에 의해 R07323c 관측명의 경우 VERA1 관측모드 즉, 128 MHz 대역폭으로 관측한 것이고, R08077a 관측명의 경우 VERA7 관측모드 즉, 16 MHz 대역폭으로 관측한 것이다. VERA 관측망은 최대 2300 km의 기선길이를 갖는다.

표 2의 VCS 관측국 모드에 따라 VCS의 공장시험에서도 사용한 NAOJ의 VERA 관측망으로 관측한 표 3의 관측 데이터(W49N, OH43, 3C446)를 대상으로 자기상관과 교차상관 시험을 수행하였으며, 그 결과는 미타카 FX 상관기의 상관결과와 비교하였다. 이하에 상관처리 비교 결과를 그림으로 나타내었다. 미타카 FX 상관기의 규격 중에 상관결과의 출력 채널은 1024 채널이며, VCS 본제품은 8192 출력채널이다. 그리고 지연 파라미터는 미타카 FX 상관기의 경우 0.8초 단위로 적용되고 있는데 반해, VCS의 경우 2배속 상관처리가 가능하여

2.048초 단위로 지연 파라미터를 적용하기 때문에 미타카 FX 상관기에 사용된 지연 파라미터를 보강하여 사용하였다. 또한 VCS 규격(염재환 등, 2009)은 τ'' 까지 적용할 수 있도록 설계되어 있기 때문에, 특히 VCS의 교차상관결과에서 미타카 FX 상관기의 결과와 cross-power spectrum의 모양이 일치하지 않을 수도 있다. 미타카 FX 상관기의 상관출력은 자료처리 프로그램인 AIPS(Astronomical Image Processing System)의 스펙트럼 분석을 수행한 후에 출력한 것으로 이와 비교를 위해 VCS 본제품의 상관결과 그림을 유사하게 표시한 것이다. 따라서 x축과 y축의 값이 각 상관기의 규격에 따라 다르기 때문에 이번 결과 비교에서는 상관결과의 스펙트럼 모양으로 정상출력 동작 여부를 판단 하였다.

먼저 W49N과 OH43의 스펙트럼 라인 관측데이터에 대해 미타카 FX 상관기와 비교한 결과를 그림 4, 5, 6, 7에 각각 나타내었다. VERA의 경우 2-빔 동시관측이 가능한 관측 시스템(Kobayashi et al., 2003)이므로 관측데이터의 A-빔에는 W49N, B-빔에는 OH43을 각각 동시에 관측한 것이다.

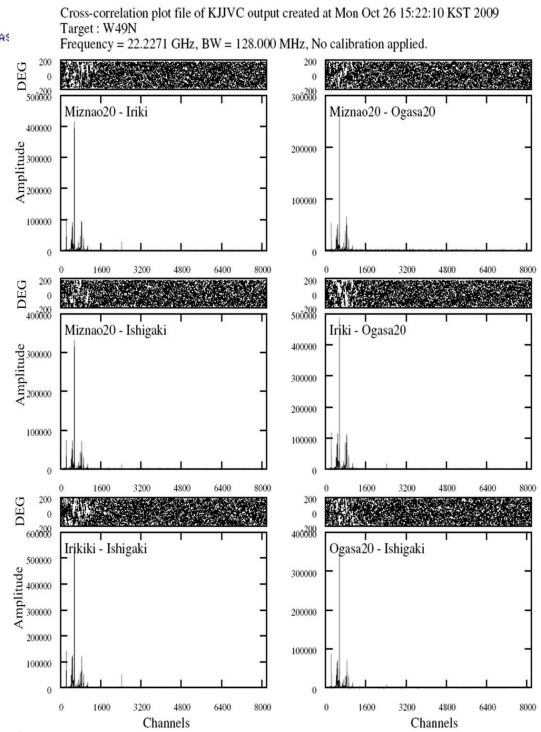
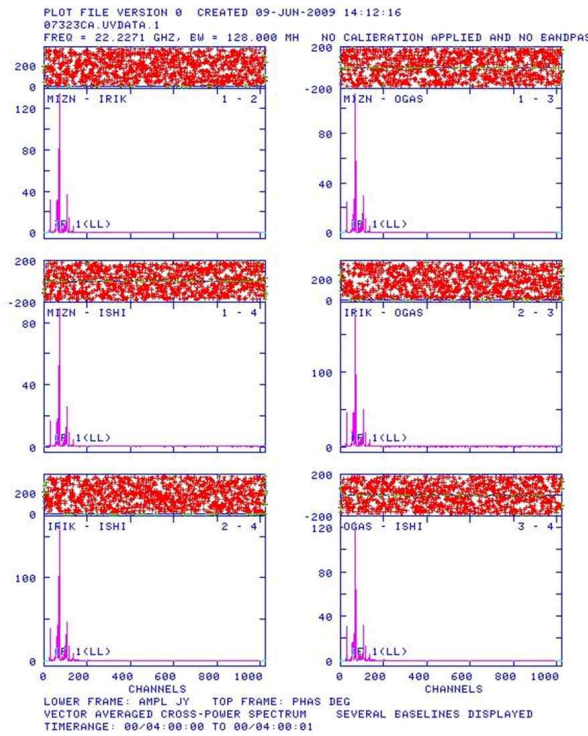
그림 4와 5에 나타낸 것과 같이 VCS의 W49N 스펙트럼 라인 천체의 상관결과는 미타카 FX 상관기의 자기상관 및 교차상관결과가 유사함을 알 수 있다. 이 천체의 경우 세기가 매우 강하기 때문에 VCS의 교차상관



(a) 미타카 FX 상관기의 자기상관결과.

(b) VCS의 자기상관결과.

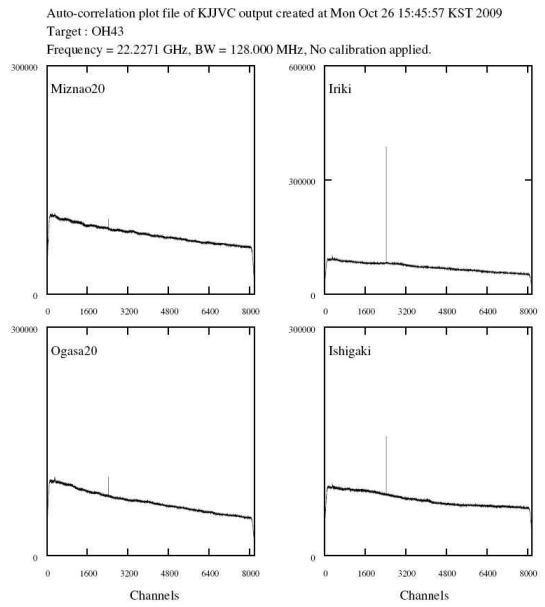
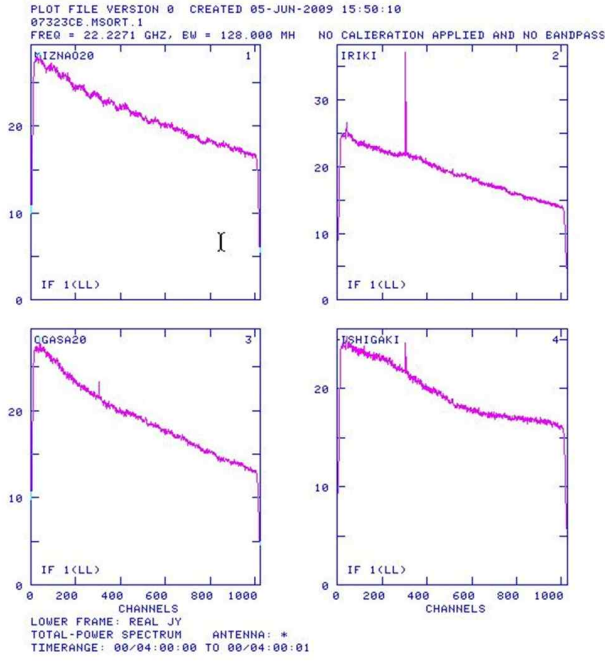
그림 4. W49N의 자기상관결과(x축: channel, y축: amplitude).



(a) 미타카 FX 상관기의 교차상관결과.

(b) VCS의 교차상관결과.

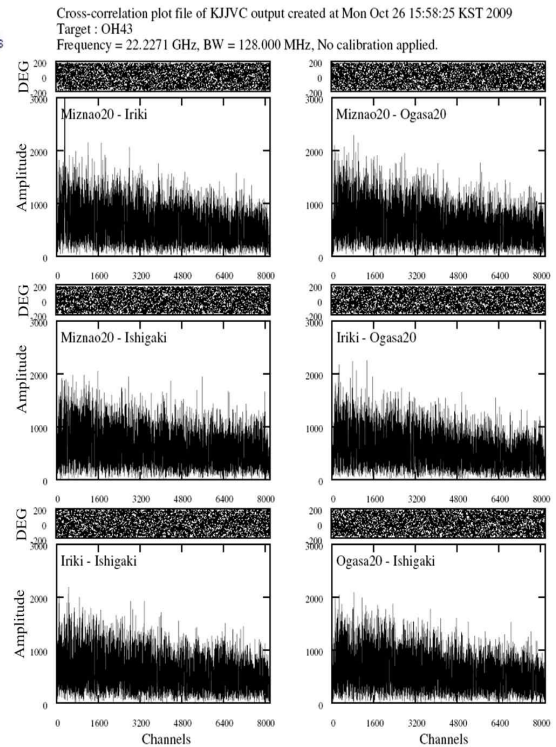
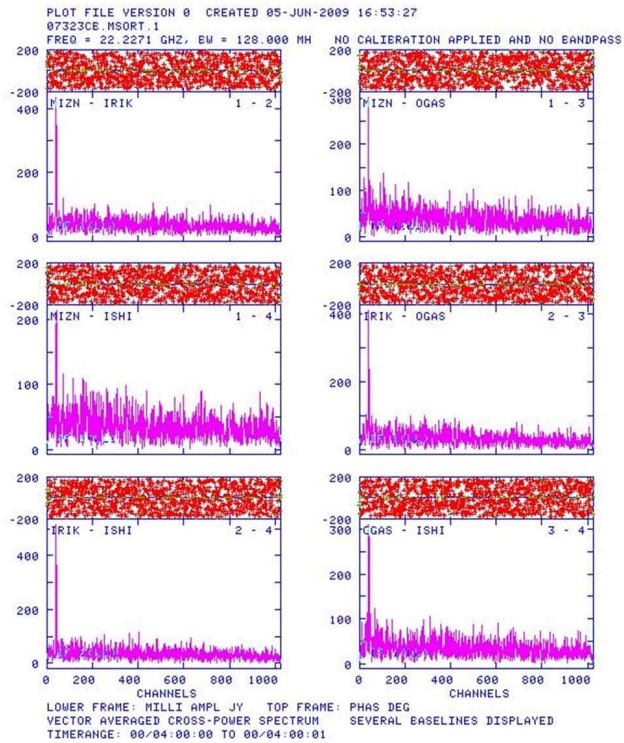
그림 5. W49N의 교차상관결과.



(a) 미타카 FX 상관기의 자기상관결과.

(b) VCS의 자기상관결과.

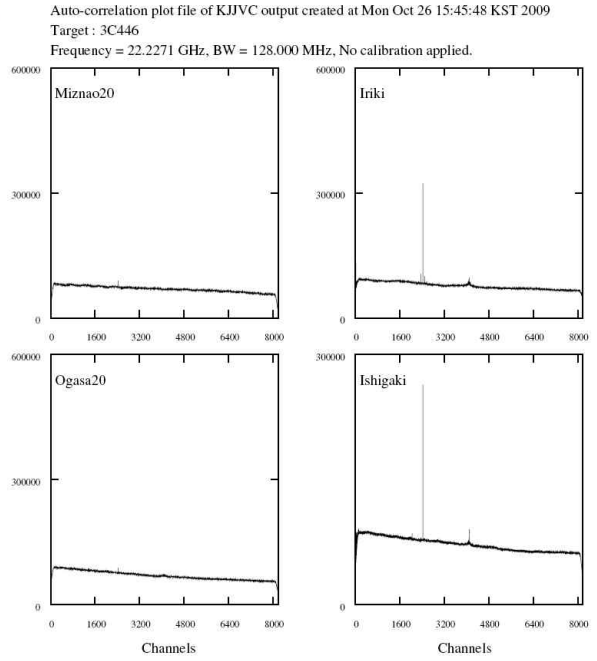
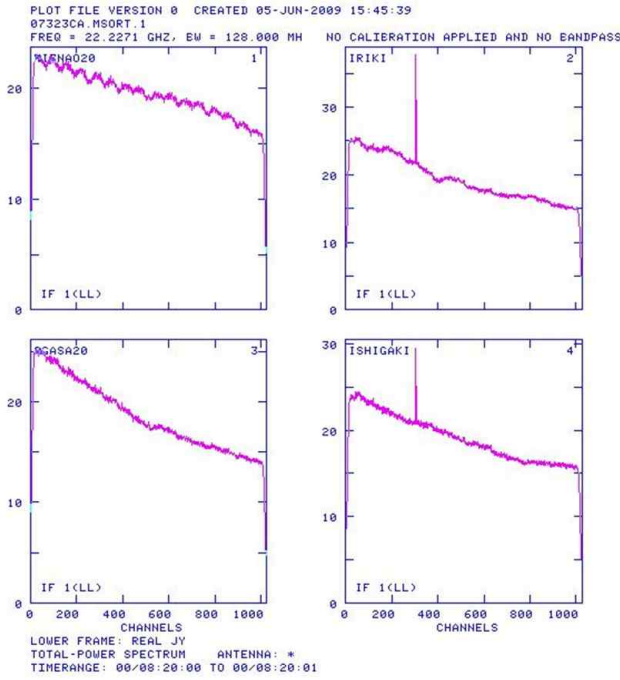
그림 6. OH43의 자기상관결과(x축: channel, y축: amplitude).



(a) 미타카 FX 상관기의 교차상관결과.

(b) VCS의 교차상관결과.

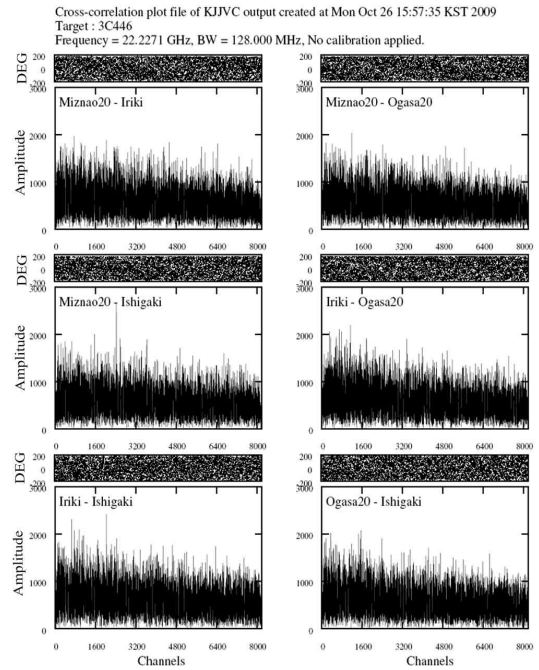
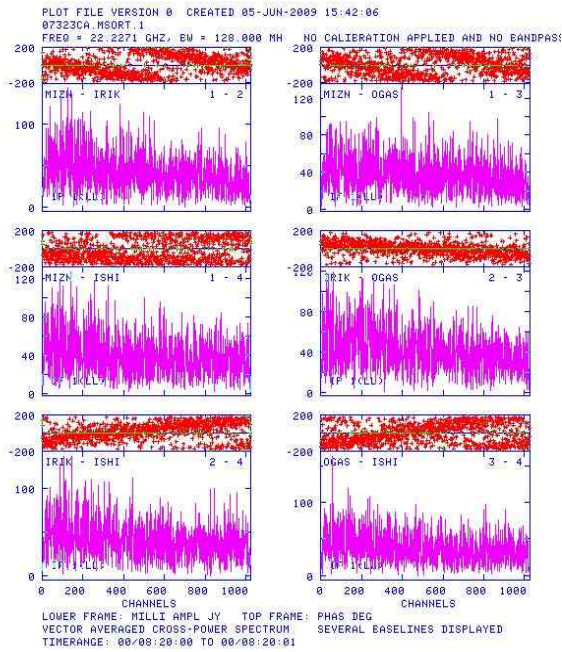
그림 7. OH43의 교차상관결과.



(a) 미타카 FX 상판기의 자기상관결과.

(b) VCS의 자기상관결과.

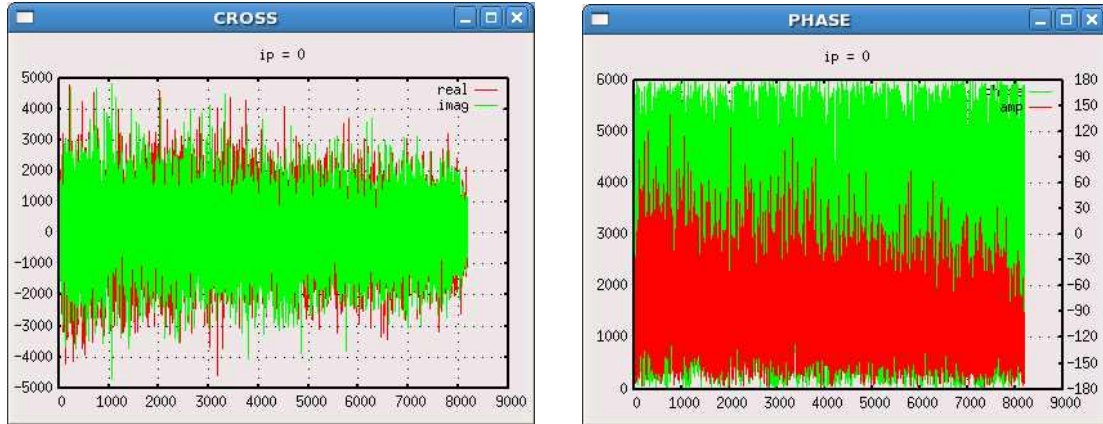
그림 8. 3C446의 자기상관결과(x축: channel, y축: amplitude).



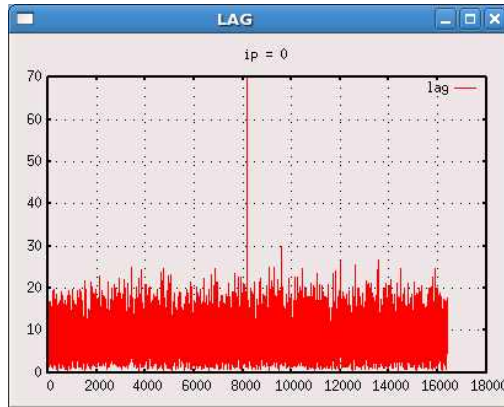
(a) 미타카 FX 상판기의 교차상관결과.

(b) VCS의 교차상관결과.

그림 9. 3C446 교차상관결과.



(a) Cross-Power Spectrum(x축: channel, y축: amplitude). (b) Phase 정보(x축: channel, y축: degree).



(c) Fringe 정보(x축: channel, y축: amplitude).

(MIZUSAWA-IRIKI 기선, 16k-FFT, 409.6 ms 적분)

그림 10. VCS에서 수행한 3C446 천체의 교차상관결과.

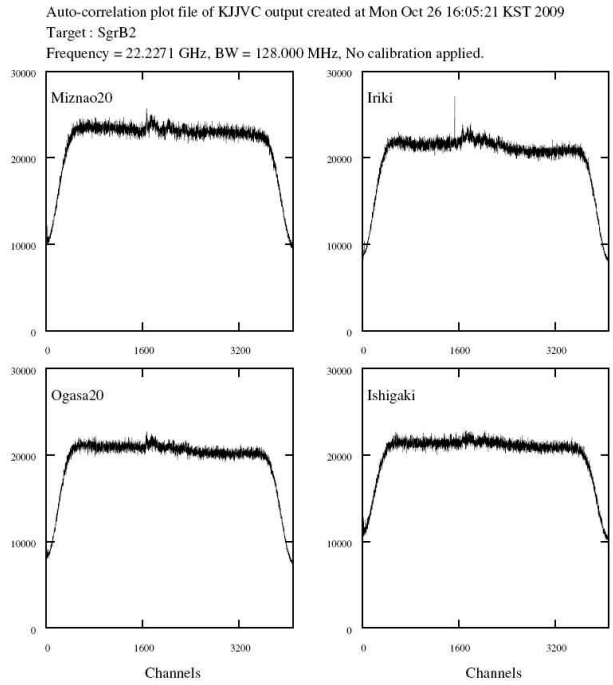
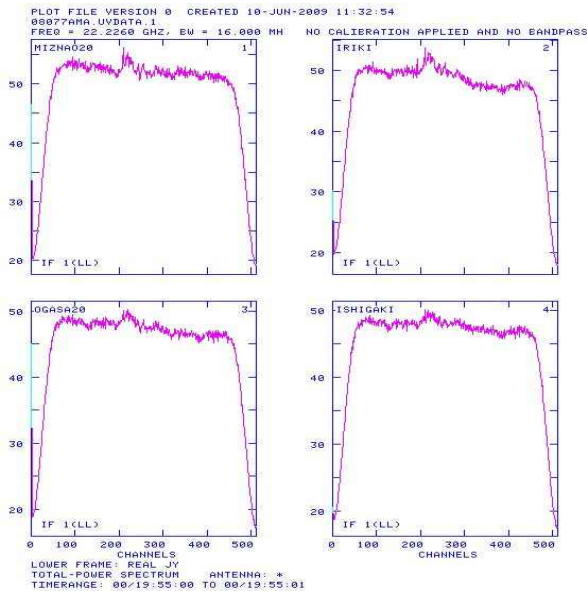
결과의 위상에서는 강하게 변화하는 결과를 얻을 수 있었다.

두 번째로 수행한 OH43 스펙트럼 라인 천체의 경우, 그림 6에 나타낸 것과 같이 VCS의 자기상관결과는 미타카 FX 상관기와 유사한 스펙트럼 모양을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 7의 교차상관 결과에서는 VCS의 출력 채널이 미타카 FX 상관기보다 약 8배 많기 때문에 스펙트럼의 출력 개수가 많이 표시되는 것을 알 수 있다. 그리고 미타카 FX 상관기의 결과와 비교하여 강한 스펙트럼 모양이 보이지는 않지만, 위상 정보를 보면 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

세 번째로 수행한 VCS의 상관처리 시험에서 그림 8과 그림 9에 나타낸 것과 같이 3C446 연속파 천체의 자기상관결과에서는 미타카 FX 상관기와 유사한 스펙

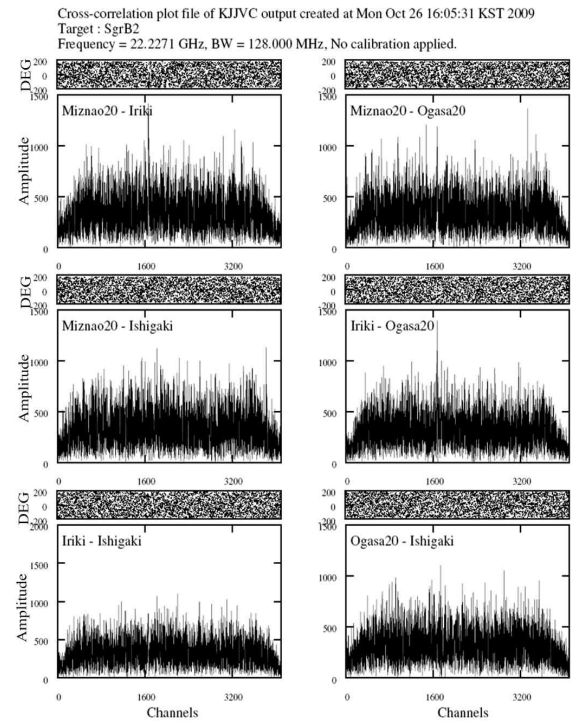
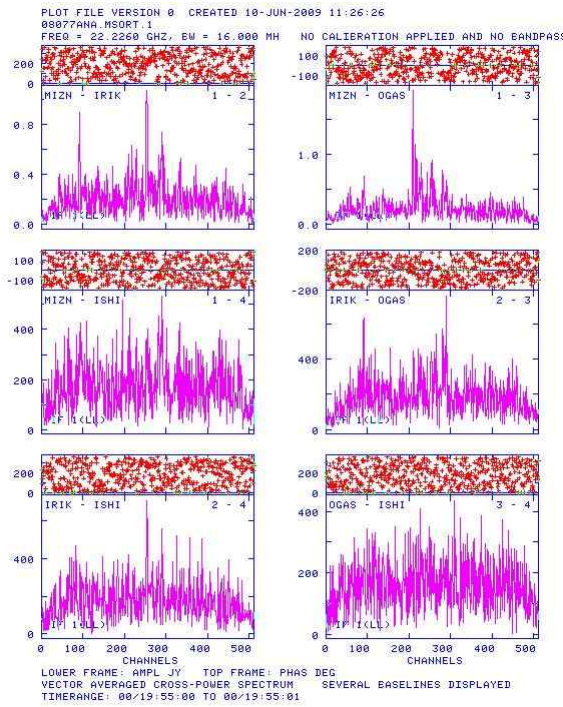
트럼 모양이 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 교차상관 결과의 경우 미타카 FX 상관기의 위상정보 변화가 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있지만, VCS는 보간된 파라미터의 사용과 위상변화를 명확하게 구분할 수 있는 프로그램이 구현되지 않은 상황이므로, 그림 10에 나타낸 것과 같이 LAG 영역에서 프린지를 확인하는 방법으로 비교하였다. 그림 10(b)의 위상 그래프에서 위상은 degree로 주어져 있다. 그림 10(c)에서 8192 출력 채널은 LAG = 0에 해당한다. 그림 10에 나타낸 것과 같이 VERA의 MIZUSAWA와 IRIKI 기선에서 강한 프린지가 얻어지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9의 자기상관결과에서 연속파인데도 불구하고 스펙트럼에 라인 형태가 보이는 것은 시스템의 가짜(spurious) 신호가 포함된 것을 나타내는 것이다.

SgrB2 스펙트럼 라인 천체는 16 MHz 대역/16 채널



(a) 미타카 FX 상관기의 자기상관결과. (b) VCS의 자기상관결과.

그림 11. SgrB2의 자기상관결과(x축: channel, y축: amplitude).



(a) 미타카 FX 상관기의 교차상관결과. (b) VCS의 교차상관결과.

그림 12. SgrB2의 교차상관결과.

표 4. 관측 데이터 및 VCS 설정과 결과

Real Observation Data			VCS Settings		Result
Radio Source	Observation Mode		FFT Points	IP Length	
W49N	VERA1	128 MHz - 2 ch A beam	16 k - points	409.6 ms	OK
OH43	VERA1	128 MHz - 2 ch B beam	16 k - points	409.6 ms	OK
3C446	VERA1	128 MHz - 2 ch A beam	16 k - points	409.6 ms	OK
SgrB2	VERA7	16 MHz - 16 ch A beam	8 k - points	409.6 ms	OK
RCW142	VERA7	16 MHz - 16 ch B beam	8 k - points	409.6 ms	OK

의 관측모드로 설정하여 미타카 FX 상관기에서 512 상관출력이 되도록 한 후 시험하였다. 비교를 위해 VCS는 출력 채널이 1/2로 줄어든 4096 채널로 설정하였다. 그림 11과 그림 12에 나타낸 것과 같이 자기상관결과와 경우 미타카 FX 상관기의 상관결과와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 교차상관결과에서도 VCS의 출력 채널이 많기 때문에 보다 자세하게 cross-power spectrum이 보이는 것을 알 수 있다. SgrB2 천체와 함께 B-빔에서 관측된 RCW142 천체의 경우 상관결과를 얻었지만, 시험 결과에는 나타나지 않았다.

이상의 시험결과로부터 KJVC의 핵심인 VCS 본체품의 현장시험에서는 표 4의 실제 관측데이터 대해서도 VCS 본체품의 공장시험과 동일한 프린지 결과를 보이는 것을 확인하였다.

J2218-03과 NRAO530의 연속과 천체에 대해서는 VCS 시뮬레이터(염재환 등, 2009)에서와 마찬가지로 프린지 획득에 실패하였는데, 그 이유는 관측천체의 신호 대잡음비가 너무 약하기 때문으로 판단된다. 그래서 이 실험에서는 이 두 관측 데이터의 상관결과를 VCS 현장 시험에서 제외하였다.

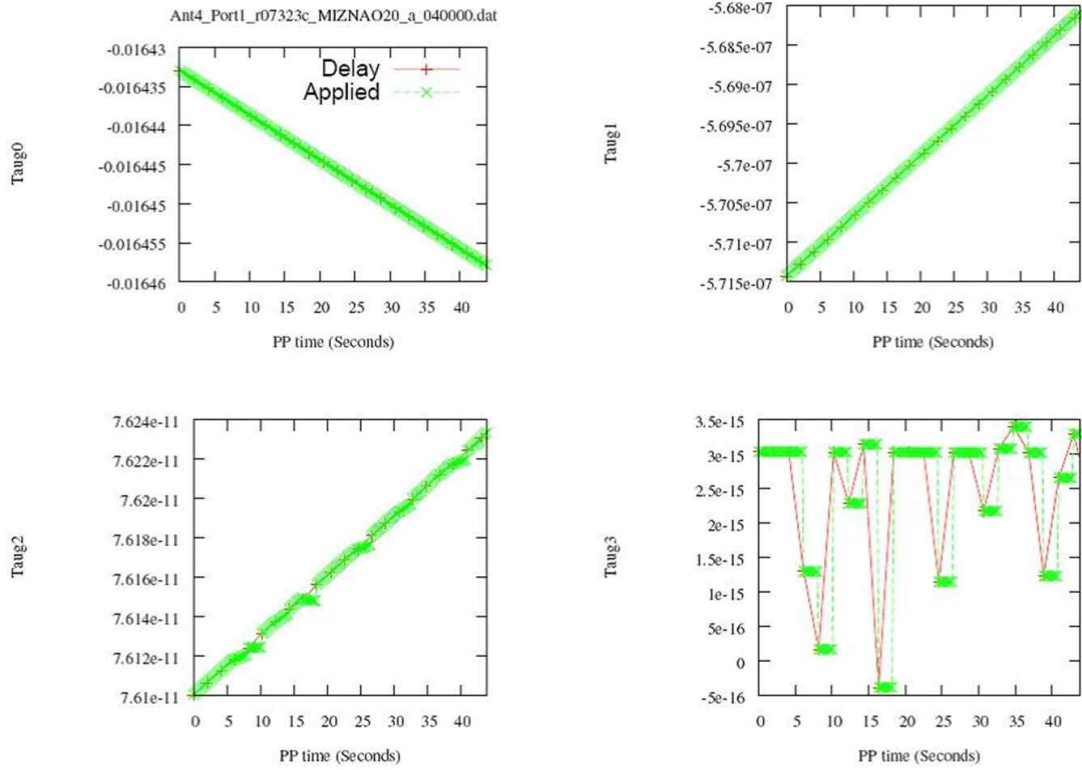
3.2. 4 관측국 모드 설정

이번 시험은 VCS를 4 관측국 모드로 설정한 후 KASI에서 개발한 제어 운영 소프트웨어의 성능시험을 수행한 것이다. 이번 시험구성은 그림 3에 나타낸 것과 동일하며, 제작사에서 개발한 VCS 제어 소프트웨어를 이번 시험에서는 Correlation Control Software(CCS)로 바꾸어 3.1절에서 수행한 시험과 동일하게 수행하였으며, 시험결과가 동일하기 때문에 결과는 나타나지 않는다. 그러나 이번 시험의 중요한 부분은 KASI의 CCS를 활용할 경우 지연 파라미터가 정상적으로 VCS에 전송되어 상관처리에 활용된 후 그 값이 제어 컴퓨터로 정상적으로 전송되는지를 확인하였다. 이 시험은 향후 VCS에 적용된 지연 파라미터를 자료처리 단계에서 다시 활용하기 때문에 중요한 부분이다.

먼저 그림 13과 그림 14에 40 PP(Parameter Period) 및 10 PP동안 CCS를 통하여 VCS에 전송되어 지연 파라미터가 사용된 후 다시 제어 컴퓨터로 전송된 시험결과를 나타내었다. VCS에서는 지연 파라미터 τ , τ_g' , τ_g'' , τ_g''' 까지의 값이 사용된다(염재환 등, 2009). 그림 13과 그림 14에 나타낸 것과 같이 지연 파라미터 값인 τ_0 , τ_g' 가 잘 적용된 후 전송되는 것을 확인할 수 있다. 그림 13과 그림 14에서 지연 파라미터 τ_g'' 값이 비연속적인 것은 지연 파라미터 τ_g''' 값의 설정 때문으로 판단된다. 즉, VCS에서는 앞에서 설명한 것처럼 지연 파라미터 τ_g''' 까지의 값이 사용되므로 미타카 FX 상관기에서 사용하는 지연 파라미터 τ_g'' 값을 지연 파라미터 τ_g''' 의 값으로 보간하여 사용해야 하지만, 이번 시험에서는 보정하지 않고 그대로 사용하였기 때문에 비연속적인 부분이 보이는 것으로 생각된다.

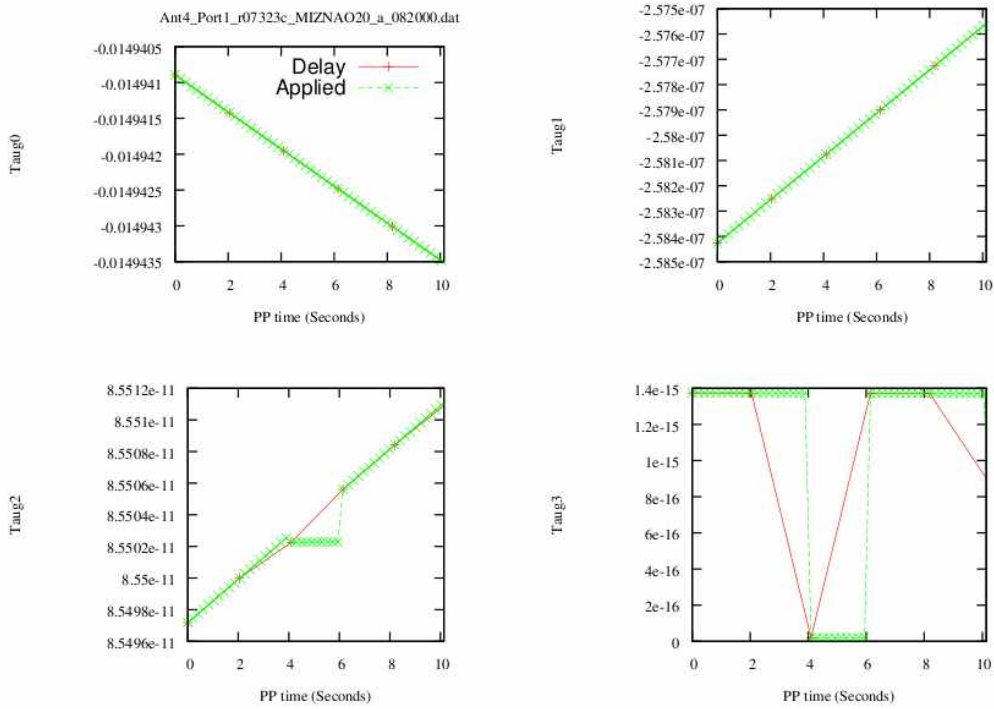
이번에는 VCS를 16 관측국 모드로 설정하여 실제 운영과 동일한 조건에서 정상적으로 동작하는지를 확인하고, 실제 관측데이터를 대상으로 상관처리시험을 수행하였다. 시스템 구성은 그림 15와 표 5에 나타낸 것과 같이 KASI의 CCS로 상관처리 시스템을 제어하고, 상관결과는 10 GbE 광케이블 4개로 연결된 DA 시스템에 저장하도록 설정하였다. VCS는 16 관측국 모드로 설정하는 것이 기본이지만, 실제 16 관측국에서 관측한 데이터가 없기 때문에 상관기 하드웨어가 정상적으로 동작하는지 확인하기 위해 표 6에 나타낸 구성과 같이 RVDB에서 출력되는 4개의 VSI 케이블을 VCS의 안테나 유닛 4대에 각각 연결하였으며, 이를 반복적으로 동일한 시험을 수행하였다. 표 6에 나타낸 구성에서 AU#1과 AU#2는 VCS에 전체에 기본클럭(1 PPS⁹, optical synchronization 신호)을 제공하고 있기 때문에 시험을 위해 구성된 조합에서 AU#1과 AU#2 중에서 동시에 구성되지 못한 조합인 15번과 16번은 이번 시험에서 정상적인 상관처리 결과를 얻지 못하는 것을 알 수 있다.

⁹ Pulse Per Second.



[Applied Delay Parameter 40 PP]

그림 13. 40 PP 동안의 지연 파라미터 계산 적용 전과 후.



[Applied Delay Parameter 10 PP]

그림 14. 10 PP 동안의 지연 파라미터 계산 적용 전과 후.

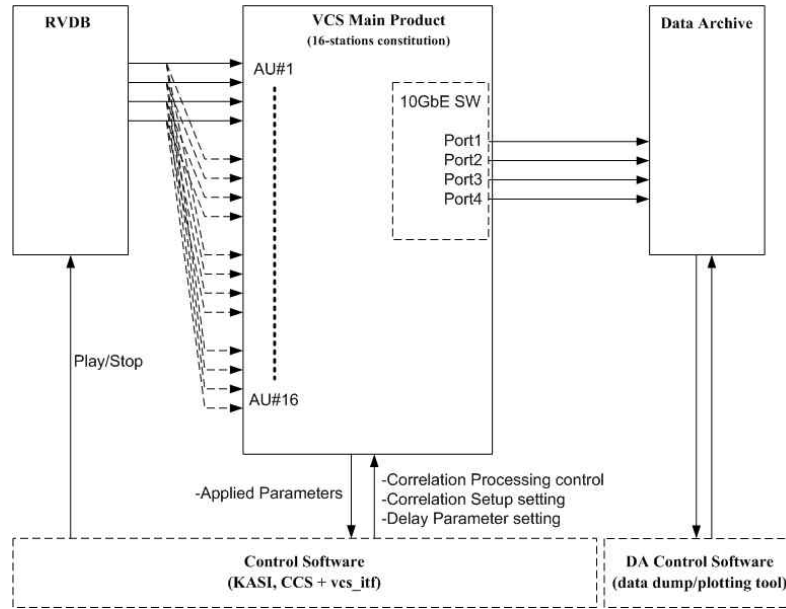


그림 15. 16 관측국 모드의 KJVVC 구성도. 표 6의 안테나 유닛 조합에 대해 RVDB, VCS, DA를 모두 연결한 구성이다. 제어 운영 소프트웨어도 KASI에서 개발한 CCS를 사용한다.

표 5. 16 관측국 모드에 사용된 소프트웨어 및 구성

- Optical Cable Connection	16 Stations 구성
- RVDB Control	KASI Tools
- RVDB Playback Data	2-minutes Data
- Correlation Process Control	CCS + vcs_itf
- Correlation Setup Setting	CCS + vcs_itf
- Delay Parameter Setting	CCS + vcs_itf
- Data Acquisition	DA System
- Dump/Plotting	KASI Tools

표 6. 16 관측국 모드에서의 시험결과

No	Combination	Result
1	AU#1, AU#2, AU#3, AU#4	OK
2	AU#1, AU#2, AU#3, AU#5	OK
3	AU#1, AU#2, AU#3, AU#6	OK
4	AU#1, AU#2, AU#3, AU#7	OK
5	AU#1, AU#2, AU#3, AU#8	OK
6	AU#1, AU#2, AU#3, AU#9	OK
7	AU#1, AU#2, AU#3, AU#10	OK
8	AU#1, AU#2, AU#3, AU#11	OK
9	AU#1, AU#2, AU#3, AU#12	OK
10	AU#1, AU#2, AU#3, AU#13	OK
11	AU#1, AU#2, AU#3, AU#14	OK
12	AU#1, AU#2, AU#3, AU#15	OK
13	AU#1, AU#2, AU#3, AU#16	OK
14	AU#1, AU#2, AU#7, AU#8	OK
15	AU#1, AU#6, AU#7, AU#8	Fail
16	AU#5, AU#2, AU#7, AU#8	Fail

3.3. 16 관측국 모드 시스템 구성

이번 시험구성에서는 강한 스펙트럼 라인 천체인 W49N을 대상으로 상관처리를 수행하였으며, 그 결과를 그림 16과 17에 각각 나타내었다. 시험구성에 사용한 파라미터 정보는 앞에서 수행한 시험과 동일하며, 상관 결과는 DA에 4개의 10 GbE를 통하여 저장하였다.

그림 16에 나타난 자기상관결과에서 VCS의 특징인 8192 출력채널의 결과가 잘 표현되어 있음을 알 수 있다. 3.1절의 4 관측국 모드에서 나타난 W49N의 상관결과와 마찬가지로 16 관측국 모드에서도 강한 스펙트럼 라인의 자기상관결과를 얻을 수 있었다. 그리고 그림 17의 교차상관결과에서는 VERA 4 관측국 중에서 MIZUSAWA와 IRIKI 기선에 대해서만 나타내었는데, cross-power spectrum과 위상 등에서 강한 스펙트럼 라인을 확인할 수 있었다. 특히 LAG 영역에 나타난 프린지의 W49N 천체가 매우 강하기 때문에 다른 천체와 비교하여 강한 프린지를 얻을 수 있었다.

3.4. 검토

이상의 현장설치 후 수행된 시험 결과를 요약하면 다음과 같다. 3.1절에서 수행된 시험결과를 바탕으로 보면 VCS 본제품의 공장시험에서 활용한 VERA 관측데이터인 W49N/OH43, 3C446/J2218-03, SgrB2/RCW142, NRAO530의 2초 및 2분 데이터에 대해 상관시험을 수행하여 VCS 본제품의 공장시험에서 수행된 결과와 동일함을 확인하였다. 그리고 NAOJ 미타카 FX 상관기에 의한 VERA의 시험결과 비교에서는 유사한 결과가 출력되는 것을 확인하였다. 특히 자기상관결과와 경우 동일한 스펙트럼 모양이 출력되는 것을 확인하였다. 그러나 교차상관결과와 경우 미타카 FX 상관기와 VCS는 입력 데이터의 전개, 입력 파라미터, 프린지 계산모듈, 출력채널 등의 시스템 규격이 정확히 일치하지 않기 때문에 출력결과에 조금씩 차이가 있음을 알 수 있었다. 그리고 VCS의 출력결과를 표현하는 소프트웨어의 개발에서 지원해 주지 않는 기능이 있기 때문에 향후 이 부분은 개선하여 해결할 예정이다. 3.2절에서 수행한 결과를 바탕으로 VCS를 4 관측국 모드로 설정하여 공장시험에서 문제가 된 VCS의 지연 파라미터의 계산 모듈이 정상적으로 동작되는 것을 확인하였다.

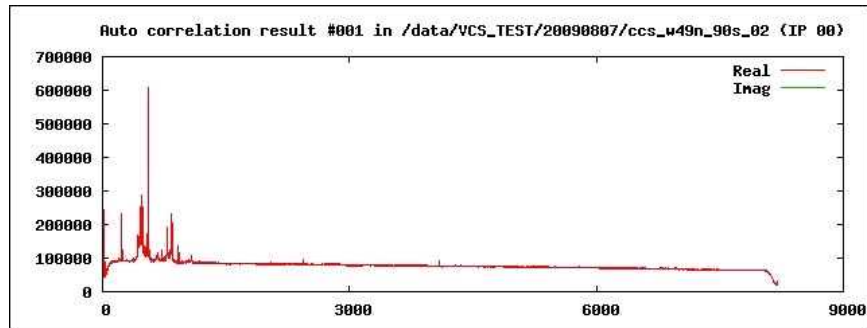
한일공동VLBI상관기를 구성하는 각 시스템 전체를 연결하여 수행한 16 관측국 모드의 상관처리 시험에서는 2분 분량의 관측데이터를 활용하였으며, 제작사의 제어 소프트웨어와 KASI에서 개발한 VCS 제어 소프트

웨어를 사용한 상관결과가 동일함을 확인하였다. 특히 현장설치 후 수행한 시험에서는 공장시험에서 문제가 된 상관결과와 DC 부근 스펙트럼 오류와 지연 예측 파라미터의 계산 모듈의 오류, 그리고 신호대잡음비가 낮은 관측 데이터의 경우 프린지를 획득하지 못하는 부분이 모두 해결된 것을 확인하였다. VCS의 문제가 된 주요 원인은 각 모듈을 구성하는 FPGA의 컴파일러 버전 오류, 지연 예측 파라미터의 계산과 전송과정의 시퀀스 오류, 그리고 VCS의 FPGA 내부에서 관측 데이터를 읽는 로직인 MSB/LSB 부분이 잘못된 것을 확인하여 VCS를 현장에 설치하기 전에 문제점을 모두 해결하고 이번 현장시험에서는 문제없이 원활하게 상관시험을 수행하였다.

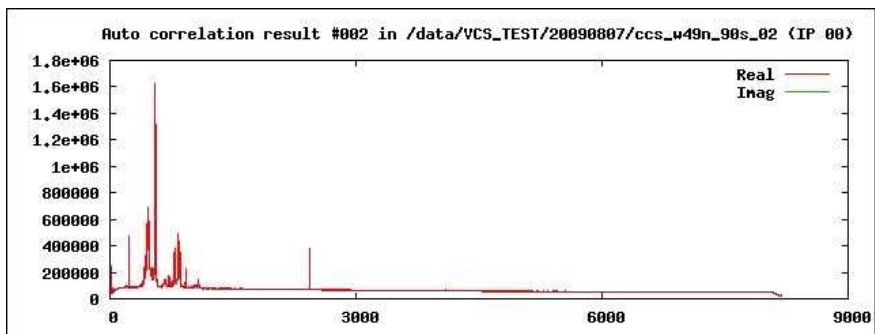
4. 결론

본 논문에서는 한일공동VLBI상관기를 구성하는 고속제생기, RVDB, VCS, DA 시스템 등을 현장에 설치하고 전체 시스템의 데이터 연결성 시험과 상관처리 시험을 수행하였다. NAOJ의 VERA 관측망으로 관측한 실제 VLBI 데이터를 이용하여 미타카 FX 상관기의 상관처리 결과와 비교하였다. 이번 시험에서는 VCS 시작품과 본제품의 공장시험과는 달리 한일공동VLBI상관기의 각 구성 시스템을 설치하였으며, 4 관측국 모드와 16 관측국 모드에 대해 VCS 본제품의 공장시험에서 발견한 스펙트럼 오류, 지연 파라미터 모듈 오류, FPGA 오류 등의 문제점이 해결되었는지 확인하기 위해 실제 관측 데이터를 이용하여 상관처리시험을 수행하였다. 또한 VCS 제어 운영을 위해 개발한 소프트웨어의 정상여부도 함께 시험하였다. 상관처리 시험결과를 통하여, VCS를 현장에 설치하기 전 수행된 공장시험에서 발견한 상관결과와 DC 부근 스펙트럼 오류와 지연 예측 파라미터의 계산 모듈의 오류, 그리고 신호대잡음비가 낮은 관측 데이터의 경우 프린지를 획득하지 못하는 부분이 모두 해결된 것을 확인하였다. VCS의 문제가 된 주요 원인은 각 모듈을 구성하는 FPGA의 컴파일러 버전 오류, 지연 예측 파라미터의 계산과 전송과정의 시퀀스 오류, 그리고 VCS의 FPGA 내부에서 관측 데이터를 읽는 로직인 MSB/LSB 부분이 잘못된 것을 확인하였다. 이러한 문제점들이 VCS를 현장에 설치하기 전에 모두 해결되어 현장에서의 상관처리시험이 원활하게 수행되어 만족한 결과를 얻었다.

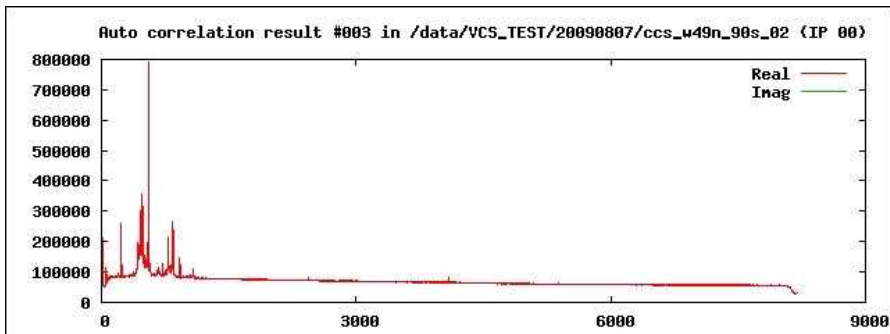
향후에는 한일공동VLBI상관기의 각 하드웨어 시스템들을 안정화하고, 제어 운영 시스템의 개선 그리고 천문학자들이 과학적 목적으로 분석할 수 있는 상관후



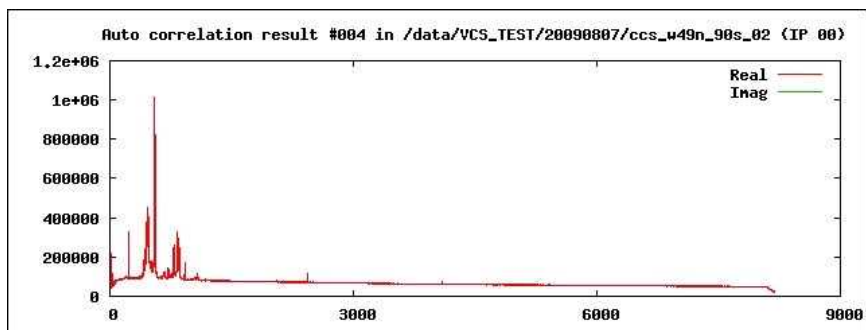
(a) VERA 미즈사와 관측국의 W49N 자기상관결과.



(b) VERA 이리키 관측국의 W49N 자기상관결과.



(c) VERA 이시가키 관측국의 W49N 자기상관결과.



(d) VERA 오가사와라 관측국의 W49N 자기상관결과.

그림 16. W49N 천체에 대한 VERA 4 관측국의 자기상관결과(x축: channel, y축: amplitude).

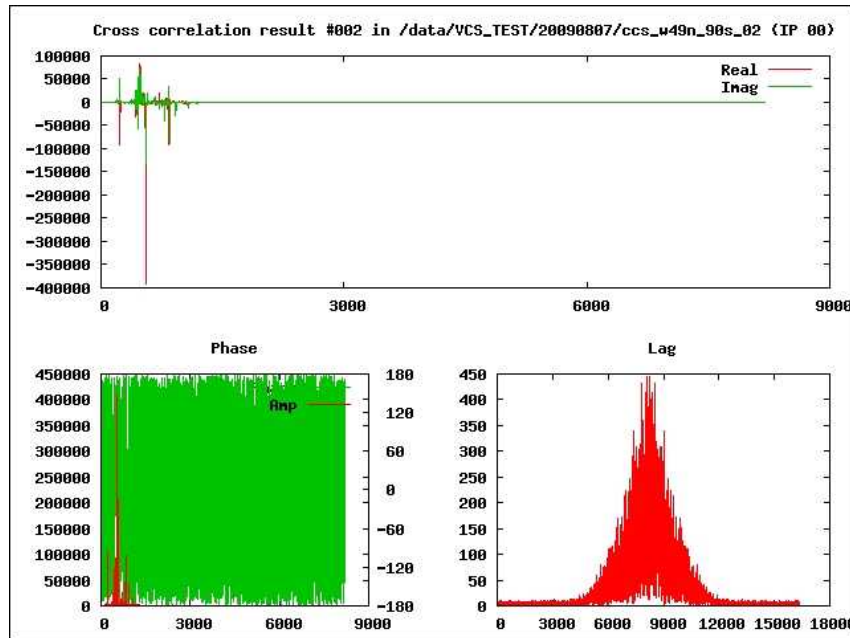


그림 17. VERA 미즈사와와 이리키 기선에서의 교차상관결과(위: cross-power spectrum, 아래왼쪽: 위상정보, 아래오른쪽: 프린지).

처리 소프트웨어 등의 개발을 진행하여, KVN과 VERA 관측망을 포함하는 동아시아VLBI관측망(East Asian VLBI Network, EAVN)으로 관측한 VLBI 데이터에 대한 상관처리를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

노덕규, 오세진, 염재환 등, 2008, 2008년도 한일공동 VLBI 상관기 및 수신기 개발 결과보고서, 한국천문연구원

오세진, 노덕규, 김광동 등, 2004, 관측데이터의 고속기록을 위한 대용량 저장시스템, 천문학논총, 19, 85

오세진, 노덕규, 염재환 등, 2009, VLBI상관서브시스템 시작품의 개발에 관한 연구, 천문학논총, 24, 1

오세진, 노덕규, 염재환 등, 2011, VLBI 상관서브시스템 본제품의 제작현장 성능시험, 신호처리시스템학회 논문지, 12, 4, 322

염재환, 노덕규, 오세진 등, 2009, 한일공동 VLBI 상관기를 위한 소프트웨어 상관기 개발, 한국우주과학회지, 26, 4, 1

Kobayashi, H., Sasao, T., & Kawaguchi, N., et al., 2003, VERA: A New Instrument Free from the Atmosphere, in New Technologies in VLBI (Ed. Y. C. Minh), ASP

Conf. Ser., 306

Oyama, T., Kono, Y., Hara, T., & Kawaguchi, N., 2008, The Development and Performance of a New 4 Gbps Disk Recorder and eVLBI Systems Using a 10 GbE Network, General Meeting of IVS, 68

Takahashi, F., Kondo, T., & Koyama, Y., 2000, Very Long Baseline Interferometer, Ohmsha

Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. Jr., 2001, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2nd Ed. (New York: John Wiley & Sons), p.289

Tony, S., 2002, DIR - 2000, 1 Gbit/sec Data Recorder for VERA Project, NASA/IEEE Mass Storage Conference, 17, 327