

VLBI상관서브시스템 시작품의 개발에 관한 연구
A STUDY ON DEVELOPMENT OF VLBI CORRELATION SUBSYSTEM TRIAL PRODUCT

오세진¹, 노덕규¹, 염재환¹, 정현수¹, 이창훈¹,
Hideyuki Kobayashi², Noriyuki Kawaguchi², Kazuyuki Kawakami³

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

SE-JIN OH¹, DUK-GYOO ROH¹, JAE-HWAN YEOM¹, HYUN-SOO CHUNG¹, CHANG-HOON LEE¹,
HIDEYUKI KOBAYASHI², NORIYUKI KAWAGUCHI², AND KAZUYUKI KAWAKAMI³

¹Korea Astronomy & Space Science Institute, 61-1 Hwaam, 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

Email: sjoh@kasi.re.kr

(Received November 17, 2009; Accepted December 15, 2009)

ABSTRACT

We present the performance test results of VLBI Correlation Subsystem (VCS) trial product which was being developed for 1 year from August 2007. It is a core component of Korea-Japan Joint VLBI Correlator (KJJVC). The aim for developing VCS trial product is to improve the performance of VCS main product to reduce the efforts and cost, and to solve the design problems by performing the preliminary test of the manufactured trial product. The function of VCS trial product is that it is able to process the 2 stations-1 baseline, 8 Gbps/station speed, 1.2 Gbps output speed with FX-type. VCS trial product consists of Read Data Control Board (RDC), Fourier Transform Board (FTB), and Correlation and Accumulation Board (CAB). Almost main functions are integrated in the FTB and CAB board. In order to confirm the performance of VCS trial product functions, the spectral analysis, delay compensation and correlation processing experiments were carried out by using simulation and real observation data. We found that the overflow problem of re-quantization after FFT processing was occurred in the delay compensation experiment. We confirmed that this problem was caused by valid bit-expression of the re-quantized data. To solve this problem, the novel method will be applied to VCS main product. The effectiveness of VCS trial product has been verified through the preliminary experimental results, but the overflow problem was occurred.

Key words: VLBI Correlation Subsystem (VCS) trial product, Spectral Analysis, Delay compensation

1. 서론

한국천문연구원에서는 Korean VLBI¹⁾ Network (KVN) (김봉규 외, 2008)과 일본국립천문대의 VLBI Exploration of Radio Astrometry (VERA) 관측망, JVN (Japanese VLBI Network), Chinese VLBI Network (CVN), 그리고 VSOP-2를 포함한 동아시아VLBI관측망 (East Asian VLBI Network; EAVN)의 데이터를 처리할 수 있는 온라인화, 광대역화된 초고속 VLBI 상관처리 시스템인

한일공동VLBI상관기 (Korea-Japan Joint VLBI Correlator; KJJVC)의 설계·제작을 진행하고 있다(노덕규 외, 2008). 현재 진행 중인 상관처리 시스템은 KVN에서 설계한 자료획득시스템(오세진 외, 2007)의 최대 처리속도인 8 Gbps를 처리할 수 있도록 개발하고 있다. 8 Gbps의 처리속도가 실현되면, 현시점의 최고기록속도 1 Gbps의 관측데이터에 대해 8배속 처리가 가능하게 되어 VLBI 상관기의 큰 걸림돌인 상관처리 대기시간이 줄어들며, VLBI관측의 원천적인 문제점인 좁은 시야를

1) Very Long Baseline Interferometry

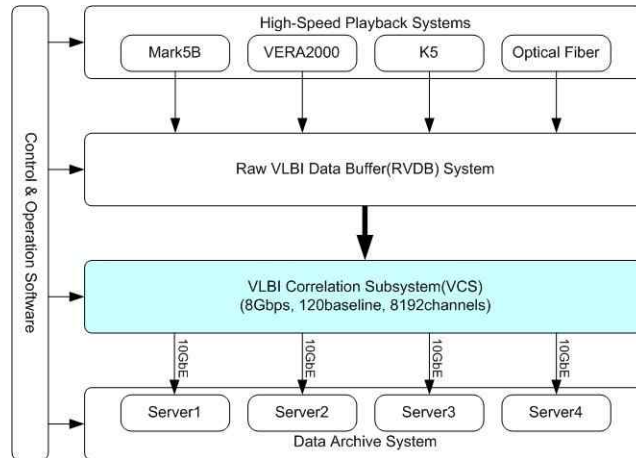


그림 1. 일공동VLBI상관기 구성.

표 1. VCS 규격.

항목	내용
관측국 수와 입력/관측국	16 관측국, 최대 4입력
상관횟수/입력	120 교차상관 + 16 자기상관
관측주파수	(VSOP-2) 45 GHz, 130/86/43/22 GHz
최대 기선길이	36,000 km(0.12 sec)
최대 데이터 출력속도	1.4 GBytes/sec
각 입력에 대한 디지털화	1 Gbps by 2bit/sample
인터페이스	VSI-H
입력 데이터 속도	2 Gbps / 1 Gbps
상관기 구조	FX type, with FPGA
FFT 처리 점수	256k/128k/64k/32k/16k/8k Adjustable
상관출력 데이터 인터페이스	10Gbit Ethernet

적어도 8배 넓힐 수 있는 효과가 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 2007년 8월부터 KJVC의 핵심인 VLBI상관서브시스템 (VLBI Correlation Subsystem; VCS)의 설계제작을 진행하였으며, 2008년 8월에 VCS 시작품의 개발이 완료되었다. VCS 시작품을 제작한 목적은 VCS 본제품을 제작하기 전에 기능적인 면과 문제가 될 수 있는 설계를 사전에 구현하여 VCS 본제품의 완성도를 높이기 위한 것이다. 설계·제작된 VCS 시작품은 간단히 2 관측국, 1 기선의 상관처리를 수행할 수 있으며, 기능적인 면에서 데이터의 입출력, 입력 데이터의 제어, 스펙트럼 분석, 지연보상, 상관처리 등을 수행할 수 있다. 제작된 VCS 시작품의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션 데이터와 실제 관측 데이터를 대상으로 성능시험을 수행하였다. 본 연구에서는 VCS 시작품에 구현된 기능 중 스펙트럼 분석 (Spectral analysis)과 지연

보상 (Delay compensation), 상관처리 (Correlation and accumulation) 등의 성능시험 결과를 본문에서 기술한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 한일공동 VLBI상관기 개발에 대해 간략히 살펴보고, 3장에서는 제작된 VCS 시작품의 규격, 기능에 대해 간략히 기술한다. 4장에서는 VCS 시작품의 성능시험 결과를 고찰한 후, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 한일공동VLBI상관기 개발

그림 1은 한일공동VLBI상관기 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 전체 상관시스템은 고속재생기, 동기처리 시스템인 Raw VLBI Data Buffer (RVDB), 상관처리를 수행하는 VLBI상관서브시스템 (VCS), 상관처리결과를 저장하는 데이터 아카이브 시스템, 전체 상관 시스템의 제어 및 운용을 위한 소프트웨어 부분으로 구성된다(오세진 외, 2008a).

표 2. VCS 시작품의 소요 물량.

항 목	수 량
Antenna Unit (안테나 유닛)	1
RDC(Receive Data Control Board)	2
FTB(Fourier Transform Board)	2
QAUC(Quad Antenna Unit Control board)	1
Correlation And Accumulation Unit (상관 유닛)	1
CAB(Correlation and Accumulation Board)	2
CAUC(Correlation and Accumulation Unit Control board)	1

표 3. VCS 시작품의 인터페이스 포트.

항목	규격	포트	비 고
데이터 입력	VSI-H. 2 Gbps/1 Gbps	8	4port / Antenna × 2Antenna
상관결과 출력	G-bit Ethernet	4	320 Mbps(@25.6ms integration) × 4
제어 포트	G-bit Ethernet	2	각 유닛에 대해

하드디스크를 채용한 Mark5B(오세진 외, 2004) 시스템과 테이프를 채용하고 있는 VERA2000은 기록된 데이터를 재생할 때 미디어의 차이로 인해 정확하게 동기시켜 재생하기 어렵다. 이와 같이 기존의 VLBI 데이터 재생 시스템 사이에 존재하는 차이점과 이질성을 통합하기 위해 일본국립천문대에서 RVDB를 개발하였다(오세진 외, 2008c). 이 시스템은 다양한 종류의 VLBI 데이터 인터페이스와 대용량의 HDD로 구성된 대용량 데이터 서버로서 KJVC의 한 부분으로서 개발되었다.

VCS는 RVDB로부터 VLBI 데이터를 수신하고 상관기 제어 및 운용 컴퓨터로부터 주어진 제어 파라미터와 함께 입력 데이터의 모든 가능한 쌍(Pair) 사이의 상관계산을 수행한다. 그리고 상관결과를 데이터 아카이브 시스템으로 출력하게 된다. 데이터 아카이브 시스템은 데이터 서버의 일종으로서 VCS로부터 상관결과를 추출하고 규격화된 파일 시스템으로 출력결과를 저장하는데 사용된다. 마지막으로 전체 시스템에 대한 상관기 제어 및 운용 소프트웨어는 각 시스템의 제어 및 파라미터 설정과 운용에 관련된 작업을 수행한다.

3. VLBI상관서브시스템 시작품

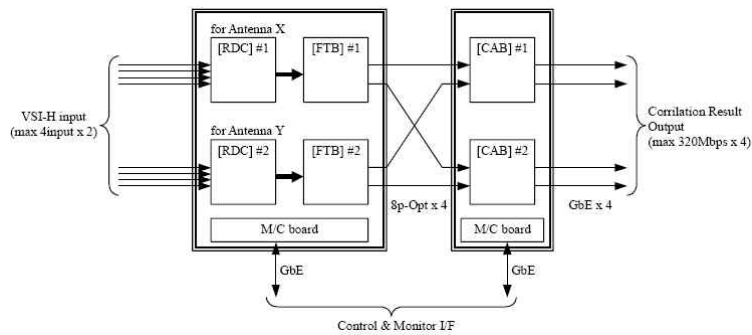
VCS의 설계에 있어서 주요 특징은 다음과 같다. VCS는 최대 16관측국의 관측데이터를 상관처리 할 수 있도록 설계하였다. 즉, 1관측국당 2 Gbps x 4 IF의 데이터 입력이 16관측국이 되므로 총 128 Gbps의 입력 데이터

를 처리할 수 있다. 또한 16관측국의 데이터를 동시에 처리하기 위해 120개($n(n-1)/2$)의 상관처리를 수행할 수 있다. 그리고 기존의 상관기가 16k-point FFT (Fast Fourier Transform)를 처리하는 것에 비하여 높은 주파수 분해능을 얻기 위해 256k-point의 FFT를 수행하도록 설계하였다. VCS는 시스템 내부를 효율적으로 구성하기 위해 최신 디바이스인 100만 게이트(Gate) 이상을 가지는 FPGA (Field Programmable Gate Array)와 PCB (Printed Circuit Board) 기술을 접목하였으며, 장치내부 유닛 사이의 데이터 전송은 광통신을 채용하여 데이터의 연결배선의 수를 줄이도록 설계하였다.

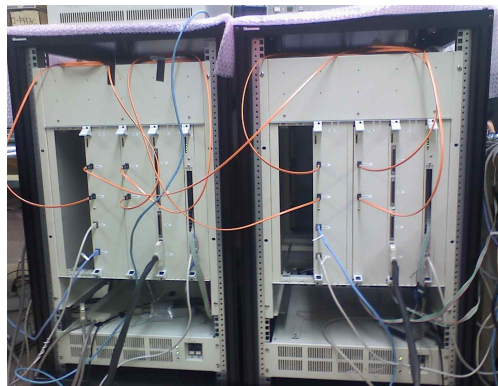
VCS 본제품의 주요 규격은 표 1에 나타내었다. VCS 본제품은 22 GHz에서 0.05 km/sec의 주파수 분해능을 유지하기 위해 FFT 처리를 가변 할 수 있는 구조를 갖는다. 2013년 발사예정인 우주VLBI위성인 VSOP-2를 지원하기 위해 최대 지연율은 $\pm 36,000$ km이고 최대 프린지 주기는 1.075 kHz이다(노덕규 외, 2008). 그리고 VCS 상관결과는 10GbE 스위치 4개를 통해 최대 1.4Gbytes/sec 속도로 출력되며, 원하는 상관결과 부분을 정밀하게 처리할 수 있는 주파수 묶음(Frequency binning) 기능을 도입하였으며, 최대 주파수 채널은 8,192개이다. VCS는 푸리에 변환을 먼저 수행하고 상관처리인 곱셈 과정을 수행하는 FX 구조(Thomson et al., 2000)이다. FX 구조는 교차상관을 수행하기 전에 각 안테나에서 추출한 넓은 대역폭 내의 관측신호에 대해 푸리에 변환을 통하여 얻은 각각의 주파수 성분을 상관결과 내에 채널화하여 유연하고 쉽게 정렬할 수 있다.

표 4. VCS 시작품 성능시험 항목.

기능	항목
Data Acceptance (데이터 승낙)	Input Data Rate(입력 데이터 속도)
	Playback Speed(재생속도)
	VALID Polarity(유효 극성)
	Stream Constitution(스트림 구성)
Input Data Control (입력 데이터 제어)	Port selection(포트 선택)
	Stream selection(스트림 선택)
Spectral Analysis (스펙트럼분석)	FFT points(FFT-점수)
	Scaling(스케일링)
	Window Modulation(윈도우 모듈레이션)
	Frequency Offset Addition(주파수 오프셋 추가)
	DC-offset Cancellation(DC오프셋 제거)
Delay Compensation (지연보상)	Delay Control(지연제어)
	Fringe tracking(프린지 추적)
	Delay Offset(지연 오프셋)
Correlation Processing (상관처리)	Auto Correlation(자기상관)
	Cross Correlation(교차상관)
	Frequency binning(주파수 묶음)
	Integration Period(적분시간)



(a) 시스템 구성.



(b) 제작된 VCS 시작품.

그림 2. VCS 시작품의 하드웨어 구성.

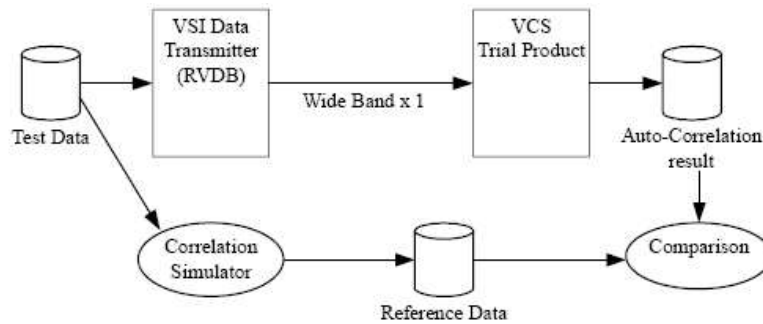


그림 3. 스펙트럼 분석을 위한 VCS 시작품의 평가 구성도.

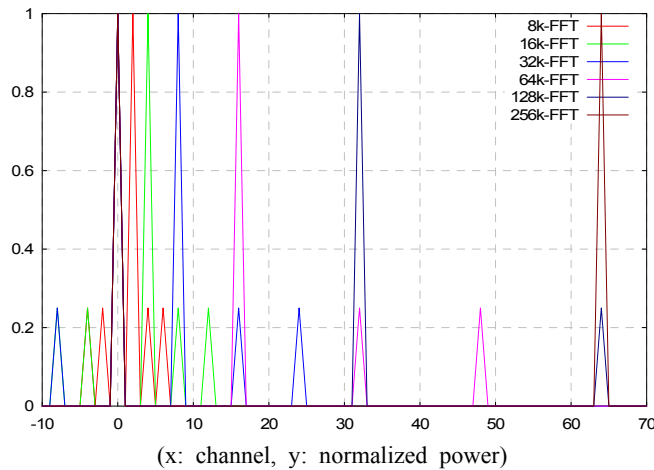


그림 4. FFT-points 수에 따른 스펙트럼 응답.

본 연구에서는 VCS 본제품을 제작하기 전 시스템의 구현, 설계의 정확성, 설계에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 확인하기 위해 시작품을 설계제작 하였다. VCS 시작품은 기본적인 상관처리에 필요한 기능을 구현하였으며, 2관측국-1기선의 상관처리를 수행할 수 있다. 표 2와 표 3은 VCS 시작품을 제작하는데 소요된 시스템의 구성을 나타낸 것이다.

VCS 시작품은 다음의 기능을 수행할 수 있도록 제작하였다(오세진 외 2008b, 염재환 외 2009). 데이터 입출력기능의 경우 2배속/4배속의 데이터 입력을 처리할 수 있으며, KVN DAS의 관측모드(오세진 외, 2007)를 지원한다. 스펙트럼 분석의 경우 8k~256k-point의 FFT 처리가 가능하며, FFT를 수행할 때 발생하는 오버플로어(Overflow)를 방지하기 위해 스케일링(Scaling) 기능도 지원한다(Oppenheim & Schaffer, 1989). FFT에서 발생할 수 있는 Gibbs 현상을 방지하기 위한 윈도우 함수기

능도 구현되었으며, 주파수 오프셋(Frequency offset)과 DC-오프셋(DC-offset) 제거 기능도 지원한다. 지연보상(Delay compensation) 기능은 VLBI상관기의 핵심기능인 지연제어(Delay control)와 프린지 추적(Fringe tracking), 지연 오프셋(Delay offset) 기능을 채용하여 구현하였다(Takahashi et al., 2000). 마지막으로 상관기능은 자기상관과 교차상관, 그리고 주파수 묶음, 다양한 적분시간을 지원한다.

기본적으로 VCS 시작품의 기능은 본제품과 동일한 것이지만, 시작품에서는 2관측국-1기선이기 때문에 서브어레이(Sub-array) 기능은 제외하였다. 그리고 VCS 본제품에서는 안테나 유닛(Antenna unit)과 상관유닛(Correlation unit) 사이에 광케이블을 연결하기 위한 패치패널(Patch panel)이 있지만, 시작품에서는 안테나 유닛과 상관유닛 사이를 광케이블로 직접 연결하도록 구성하였다.

표 5. FFT-points 수에 따른 채널의 차이 비교.

	DC로부터 주파수 채널		채널 차이
	16 MHz	16.25 MHz	
8k-FFT	128	130	2
16k-FFT	256	260	4
32k-FFT	512	520	8
64k-FFT	1024	1040	16
128k-FFT	2048	2080	32
256k-FFT	4096	4160	64

표 6. 윈도우 함수에 따른 응답.

윈도우 함수	정규화된 전력값		
	-1	0	1
None	0	1	0
Hamming	0.2	0.57	0.2
Hanning	0.2	0.57	0.2
Blackman	0.2	0.43	0.2

VCS 시작품의 하드웨어 구성은 그림 2에 나타내었다.

4. 실험결과

본 연구에서 개발한 VCS 시작품의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션 데이터와 실제 관측 데이터를 이용하여 성능시험을 수행하였다. 표 4는 VCS 시작품의 성능시험 항목을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 표 4의 성능시험 항목 중 스펙트럼 분석, 지연보상, 상관처리 기능 등의 실험결과를 중심으로 이하에 기술한다.

4.1 스펙트럼 분석(Spectral Analysis)

VCS 시작품의 스펙트럼 분석을 위한 시스템 구성은 그림 3에 나타내었으며, 평가 데이터를 이용하여 FFT 처리, 윈도우 모듈레이션, 주파수 오프셋 부가, DC 오프셋 제거 등의 시험을 수행하였다.

4.1.1 FFT-points

우선, 스펙트럼 분석은 신호발생기에 의해 16 MHz+16.25 MHz의 CW (Continuous wave) 신호가 혼합된 평가 데이터를 이용하여 FFT-points 수에 따른 VCS 시작품의 스펙트럼 응답을 비교하였으며, 그 결과를 그림 4와 표 5에 각각 나타내었다. 비교를 위해 각각의 CW 신호 전력을 1로 정규화 하였다.

그림 4에서 채널 0은 16 MHz를 의미하고, 샘플 수를 증가하여 FFT를 수행하면 채널 하나에 해당하는 주

파수 폭이 그에 따라 좁아지는 것을 알 수 있다. 그리고 표 5의 채널차이를 살펴보면 두 평가 데이터에서 사용된 주파수에 대해 각 FFT-points 수에서 나타나는 채널로 판단할 때 정상적으로 동작하고 있는 것을 알 수 있다.

4.1.2 윈도우 모듈레이션(Window Modulation)

디지털 신호처리에서 입력 데이터의 푸리에 변환(Fourier transform)과정에 윈도우 함수(Window function)를 곱하는 것은 입력신호의 주파수 응답에서 발생하는 Gibbs 현상을 해결하는 것이 목적이며, 사용되는 윈도우 함수는 Hamming, Hanning, Blackman 윈도우 함수 등이 있다(이채욱, 1994). 본 연구에서 개발한 VCS 시작품에서도 푸리에 변환에서의 Gibbs 현상을 방지하기 위해 사용할 윈도우 함수의 성능시험을 수행하였다. 윈도우 함수가 잘 적용되는지 확인하기 위해서는 다양한 실제 관측 데이터에서 수행하여야 하지만, 실험에 사용된 평가 데이터는 시뮬레이션 데이터이므로 윈도우 함수를 적용함에 따라 전체적인 출력 스펙트럼 응답의 크기가 줄어드는 현상만을 확인하였다. 그림 5는 비트 레벨이 2진수 00, 01, 01, 11에 해당하는 10진수를 -1, -0.25, +0.25, +1이라고 하면 임의의 구간에 2진수 “11”로 구성된 평가 데이터의 스펙트럼 응답을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보기 쉽게 표현하기 위해 그래프를 조금 이동하여 표시하였다.

그림 5에서 Blackman 함수를 적용한 경우 2차 항은 값이 작기 때문에 그래프에서는 나타나지 않는다. 또한 자기상관결과이므로 원래 “-”인 1차 항의 계수가 “+”값으로 출력된다.

그리고 잡음신호 발생기에 의한 잡음신호 (Noise signal)에 16 MHz CW 신호를 혼합한 평가 데이터에 대해 VCS 시작품의 윈도우 함수 적용에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 512 MHz 대역폭에 대해 VCS 상관출력 채널이 8,192개이므로 주파수 1채널은 62.5 kHz에 해당하며, 이하의 모든 결과에서 동일한 패턴을 갖는다. 그림 6에서 입력신호에 곱한 윈도우 함수의 폭은 상관처리 입력 대역폭과 동일한 것이며, 그림 6은 신호가 있는 16 MHz 부근을 확대하여 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 16 MHz CW 신호에 대해 각각의 윈도우 함수를 적용한 경우의 스펙트럼을 나타낸 것이며, 그림 6(b)는 비교를 위해 16 MHz CW 신호의 전력값을 1로 정규화한 것이다. 앞에서 설명한 것과 같이 본 실험에서는 입력신호에 윈도우 함수를 곱한 결과에 대해 진폭의 변화가 있는지를 확인하였다. 그림 5와 그림 6의 윈도우 함수가 적용된 경우 진폭 변화만의 결과이지만, VCS 시작품의 윈도우 모듈레이션 기능이 잘 적용되고 있는 것을 확인하였다. 향후 다양한 실제 관

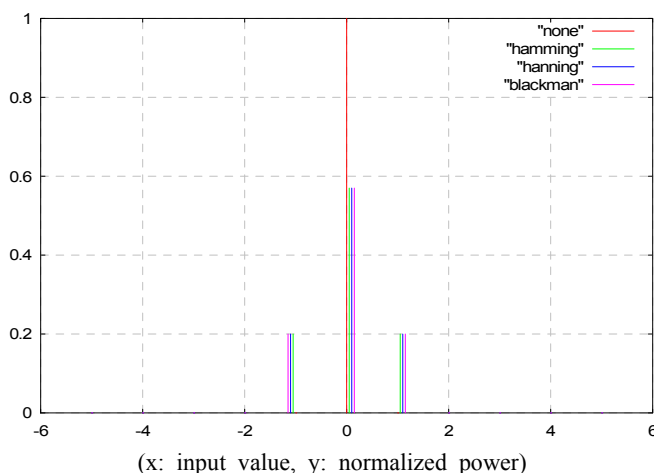
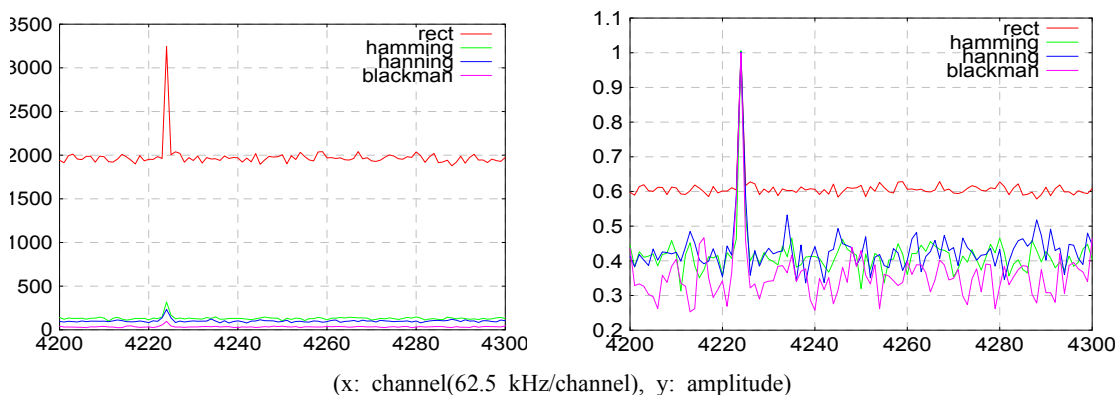


그림 5. VCS에서 윈도우 함수를 곱한 스펙트럼 응답.



(a) 16 MHz CW 신호의 윈도우 함수 스펙트럼. (b) 정규화된 윈도우 함수의 스펙트럼.

그림 6. 잡음신호 + 16 MHz 신호에 대해 VCS에서 윈도우 모듈레이션의 스펙트럼 응답.

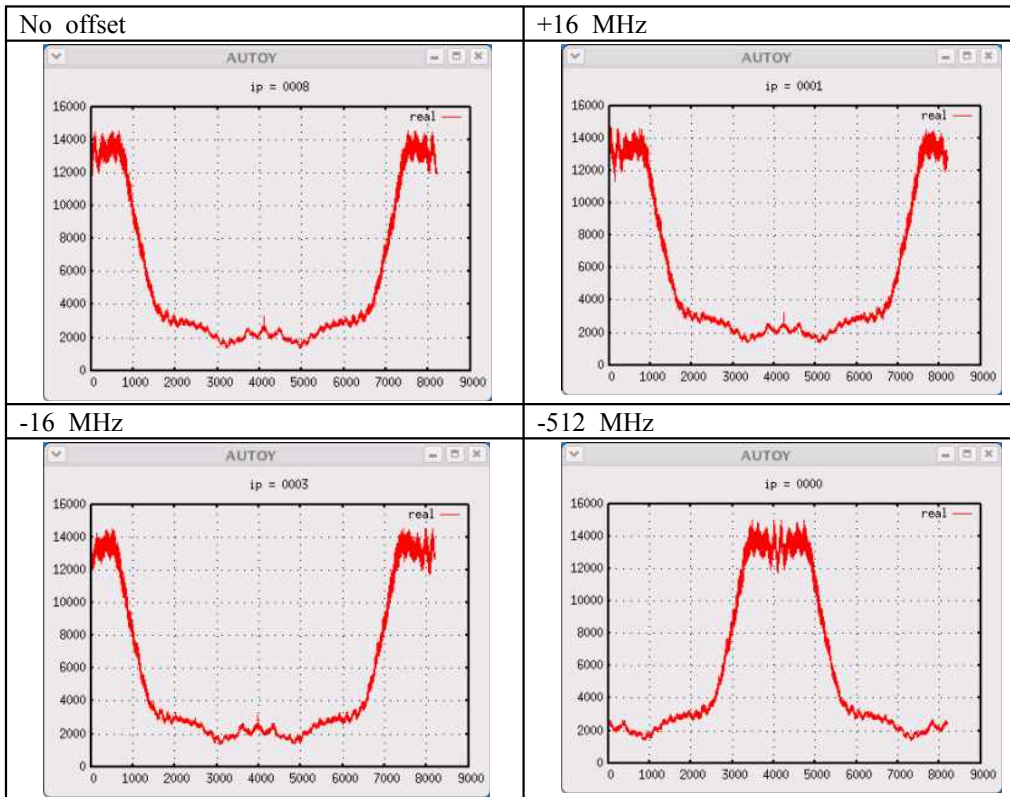
측 데이터에 대해 이 기능의 성능시험을 수행할 예정이다.

4.1.3 주파수 오프셋 부가(Frequency Offset Addition)

주파수 오프셋 부가기능은 상관센터에서 상관처리를 수행할 때 어떤 관측국에서 잘못 설정한 주파수 대역을 상관기에서 보정하기 위해 임의로 관측 주파수에 오프셋을 주는 것이다. 성능평가에 사용된 데이터는 일본 JNet의 Tsukuba 관측소에서 획득한 잡음신호이다. VCS 시작품에서 주파수 오프셋 부가 기능이 정상적으로 수행되는지 확인하기 위해 Tsukuba 관측소의 잡음신호에 대해 주파수 오프셋을 설정한 후 상관처리시험을 수행하였다. 본 실험에서는 Y국에 +16 MHz 주파수 오프셋,

-16 MHz 주파수 오프셋, 그리고 -512 MHz 주파수 오프셋을 부가하였으며, 그 결과는 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 7에 나타낸 것과 같이 8,192 채널(62.5 kHz/채널)의 상관출력에서 주파수 오프셋에 따라 상관 스펙트럼이 이동하는 것(대역 내에서 순환하는 것과 같은 모습)을 확인할 수 있다. 이 결과에 의해서 2013년 발사 예정인 일본의 우주VLBI위성인 VSOP-2(노덕규 외, 2008)에서 요구하는 규격인 USB/LSB (Upper Side Band/Lower Side Band)의 혼합 상관처리가 가능함을 확인하였다. USB/LSB 혼합 상관처리는 준비된 데이터가 없어서 이번 실험에서는 수행하지 않았으나, 향후 실제 관측 데이터를 이용하여 VCS 본제품에서 수행할 예정이다.



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 7. 주파수 오프셋에 따른 자기상관 결과.

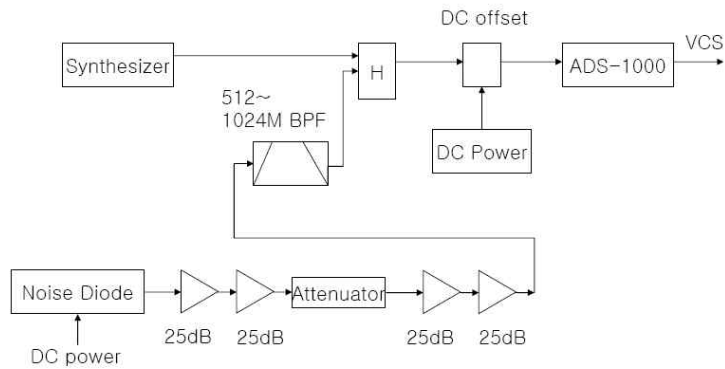


그림 8. DC 오프셋 제거 확인을 위한 신호 입력 구성도.

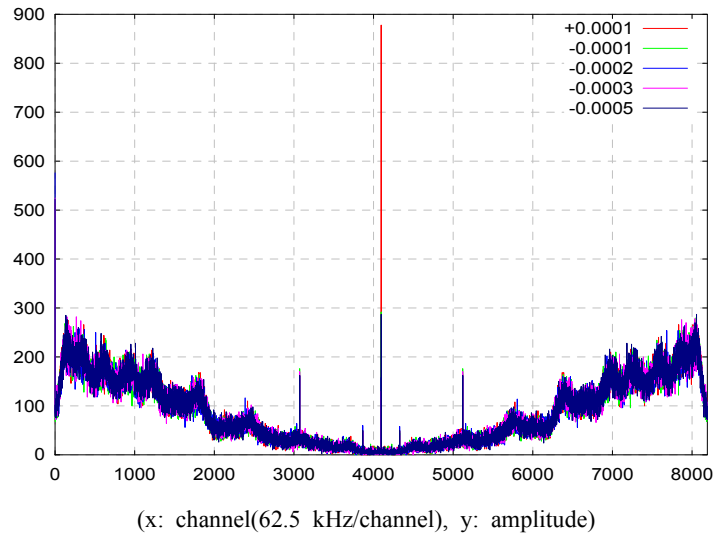


그림 9. DC 오프셋 제거에 대한 VCS 스펙트럼 응답.

표 7. 입력 신호 레벨에 대한 VCS의 DC 응답

설정값	DC 전력	비고
0.0625	627200	값이 너무 커서, 그림에 포함되지 않음
0.002	14506	
-0.002	12336	
0.0001	878	매우 큰 값
-0.0001	292	
-0.0002	158	
-0.0003	130	DC-오프셋 제거의 한계값
-0.0005	287	

4.1.4 DC 오프셋 제거(DC-Offset Cancellation)

DC 오프셋 제거 기능은 관측 시스템에서 임의로 입력될 수 있는 DC 성분을 상관처리에서 제거하는 기능이다. 이 기능을 확인하기 위해 실제 DC 오프셋을 입력할 수 있도록 그림 8과 같은 장치를 구성하였다. 그림 8에 나타난 것과 같이 잡음신호 다이오드 (Diode)를 이용하여 잡음신호를 생성하고 25 dB의 증폭기를 거쳐 512 MHz 대역필터를 통과한 후 CW 신호와 혼합할 수 있는 믹서 (Mixer)를 설치하였다. 그리고 이 믹서 이후에 DC 오프셋을 입력할 수 있는 모듈을 설치하였으며, 이렇게 생성된 데이터를 ADS-1000 (Digital Link) 고속 샘플러를 통하여 VCS에 직접 입력하였다.

그림 9와 표 7은 VCS 시작품의 스케일링 인자 (Scaling factor)와 가중치 표 (Weight table)를 조정하고, 입력 신호의 세기, DC 오프셋 값을 조정하면서 얻은 스펙트럼 응답과 DC 전력 값을 나타낸 것이다. 표 7에

서 CW 입력 신호의 세기를 크게 하면 초기에 스펙트럼 응답이 출력되지 않는 것을 확인하였다. 이는 스케일링 인자와 가중치 표 등을 변화시키면서 확인하였으나, 근본적으로 FFT 연산 후 수행하는 재양자화 (Re-quantization) 과정 (Oppenheim & Schaffer, 1989)에서 유효비트에 의한 오버플로어가 발생하는 것을 실험으로 확인하였다. 이 문제에 대한 내용은 4.2 절의 지연보상에서 초기 지연과 지연 오프셋 부분에서 상세히 기술한다. 표 7의 결과를 보면, 입력신호의 세기를 “-0.0001”로 설정하면 DC 전력 값이 감소하는 것을 확인하였으며, “-0.0003”로 설정했을 때가 최소값이 되는 것도 알 수 있다. 이 실험을 통하여 DC 오프셋의 제거 기능이 정상적으로 동작하고 있으며, 향후 DC 오프셋을 “0”으로 하는 것이 가능하다고 판단된다.

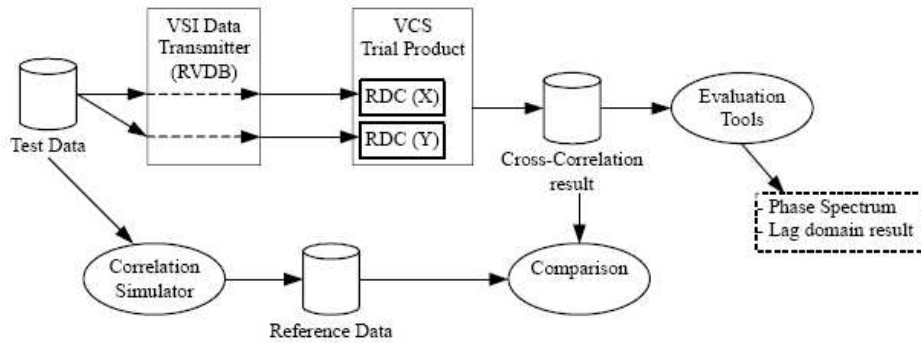
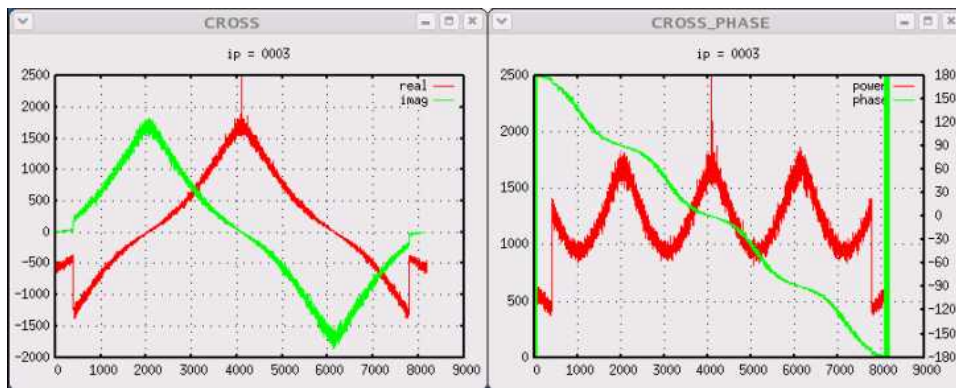


그림 10. 지연 보상 시험 구성도.



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude, phase)

(a) 교차상관 결과, (b) 위상정보와 교차 전력 스펙트럼

그림 11. -1샘플 이동에 대한 VCS의 교차상관 및 위상 결과.

4.2 지연보상(Delay compensation)

VCS 시작품의 지연보상기능을 확인하기 위한 시험 구성도는 그림 10에 나타내었다. RVDB에 입력된 평가 데이터를 VCS 시작품의 X국, Y국에 재생하여 얻은 상관결과와 Correlation Simulator(염재환 외, 2009)의 상관결과를 비교하였다.

먼저 VCS 시작품의 지연제어 (Delay control) 기능을 확인하기 위해 평가 데이터는 초기지연 (Initial delay) 및 지연 오프셋 (Delay offset) 그리고 1,500 km, 3,000 km 등의 시뮬레이션 데이터 (Simulation data)를 작성하였으며, 각 데이터를 대상으로 VCS 시작품의 성능시험을 수행하였다. 1,500 km와 3,000 km의 시뮬레이션 데이터 (잡음신호+16 MHz CW)는 X국의 데이터와 동일한 데이터에 대해 Y국 데이터는 각각 1,500 km와 3,000 km 떨어진 효과를 주기 위해 더미 (Dummy) 데이터를 데이터 앞부분에 입력하여 작성되었다.

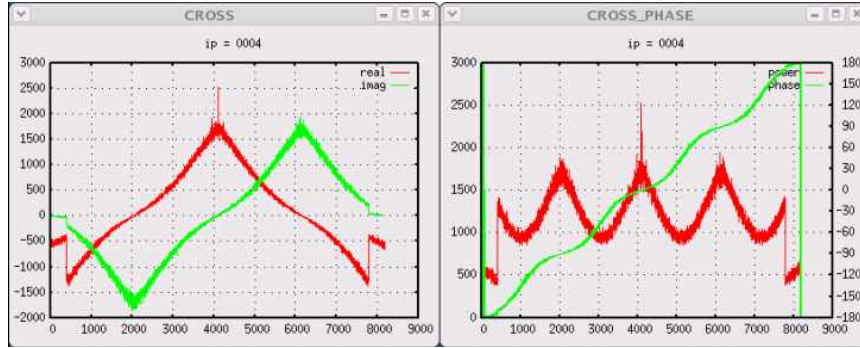
4.2.1 초기지연(Initial Delay)/지연오프셋(Delay Offset)

○ -1샘플 이동(sample shift)

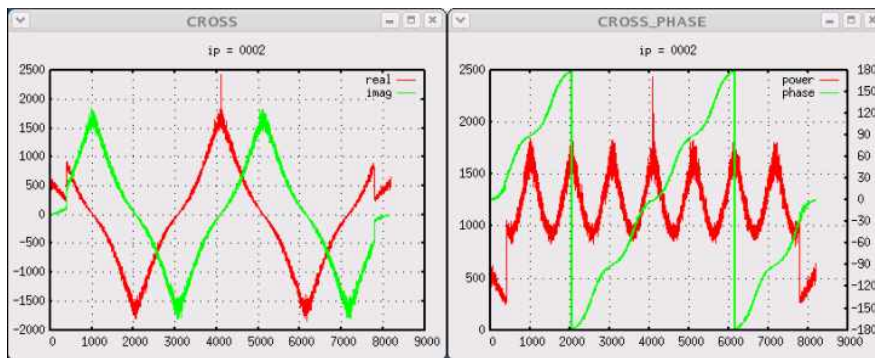
시뮬레이션 데이터(잡음신호 + 16 MHz CW)에 대해 -1 샘플 이동한 경우의 VCS 교차상관 및 위상에 대한 결과를 그림 11에 나타내었다.

그림 11(a)는 평가 데이터의 실수와 허수에 대한 교차상관결과이고 그림 11(b)는 cross-power와 위상을 함께 나타낸 것이다. 상관결과에서 나타난 파도 (Waving) 모양은 현재 VCS 시작품에서 FFT 연산 후에 수행하는 재양자화의 유효비트 처리에 문제로 인하여 오버플로어가 발생하기 때문에 나타나는 현상이다. 그림 12는 +1 샘플 이동과 +2샘플 이동한 경우를 각각 나타낸 것이며, 그림 12의 +1샘플 이동과 비교하기 위해 동일한 데

○ +1샘플 이동과 +2샘플 이동



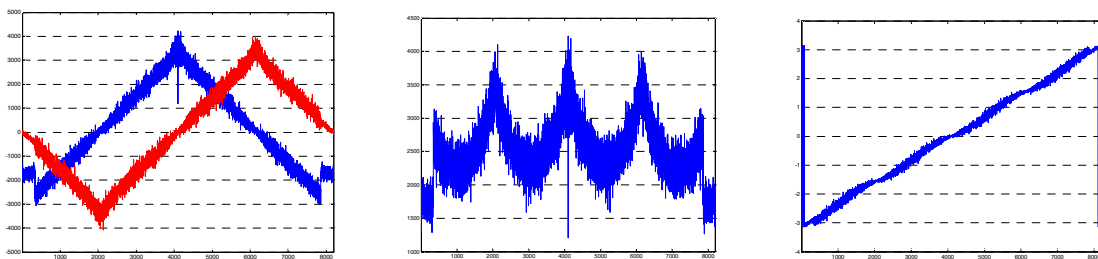
(a) +1샘플 이동한 결과.



(b) +2샘플 이동한 결과.

(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

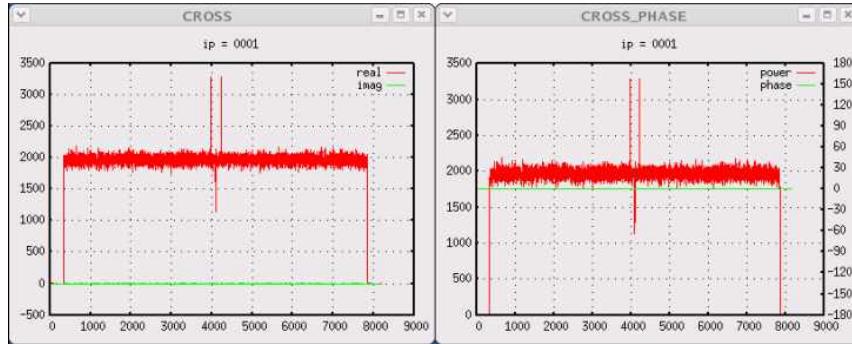
그림 12. +1샘플 이동과 +2샘플 이동에 대한 VCS의 교차상관 및 위상 결과.



(a) 교차상관, (b) 교차 전력 스펙트럼(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude), (c) 위상정보(x: channel(62.5 kHz/channel), y: phase).

그림 13. Correlation Simulator에서 +1샘플 이동한 상관결과.

○ 1,500 km/3,000 km 지연



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 14. 1,500 km 또는 3,000 km 지연에 대한 VCS의 상관결과.

이터에 대해 Correlation Simulator에서 수행한 경우의 결과는 그림 13에 나타내었다. 그림 12(a)와 그림 13을 비교해 보면, 교차상관결과와 cross-power spectrum과 위상 정보가 동일함을 알 수 있다. 따라서 VCS 시작품의 재양자화 오버플로어 문제가 하드웨어와 시뮬레이터에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 오버플로어 문제를 해결하기 위해서는 재양자화 과정에서의 유효비트를 증설하는 것이 쉬운 해결방법이지만, 이런 경우 하드웨어의 변경에 따른 비용이 증가하는 문제점이 있다. 이 문제는 VCS 본제품을 제작할 때 심도 있는 논의를 진행할 예정이다.

그림 14에 나타낸 것과 같이 실제로 X국과 Y국의 데이터는 동일하지만, Y국 데이터에 1,500 km 또는 3,000 km에 상당하는 샘플 데이터 부분에 더미 데이터를 삽입하여 X국과 Y국을 상관처리 하는 것이다. 그 결과는 그림 14에서의 자기상관결과와 유사하며 위상이 0이 되는 것을 확인하여 VCS의 지연기능이 정상적으로 적용되고 있음을 확인하였다.

4.2.2 프린지 추적(Fringe Tracking)

각 관측국에서 수신되는 전파는 서로 떨어진 전파망원경의 거리에 따라 지연이 발생하며, 이때 발생하는 지연성분을 이용하여 상관기에서는 프린지 추적을 수행한다. VCS의 기능인 프린지 추적 기능의 성능을 확인하기 위해 일본 JNet Tsukuba 관측소에서 획득한 잡음신호의 스펙트럼에 대해 프린지 추적 시험을 수행하였다. 그림 15는 프린지 회전을 확인하기 위해 설정한 초기위상 값을 나타낸 것이다. 그림 16에 나타낸 것과 같이 그림 15의 초기 위상에 대한 스펙트럼 변화를 먼저 고찰하였으며, 위상을 조금씩 변화시킨 경우에 대해서도 시험을 수행하였다.

그림 16에서는 설정된 초기 위상에 따라 실수와 허

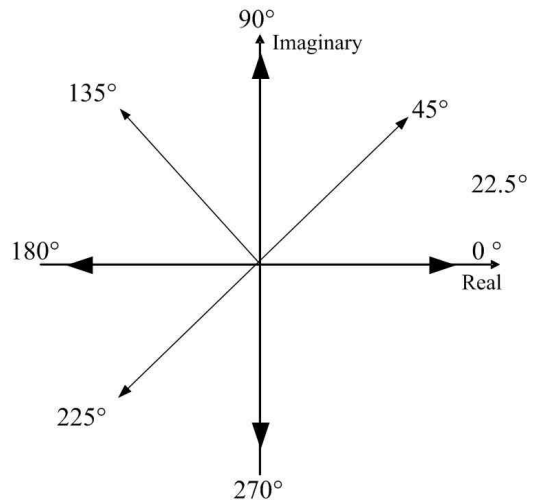
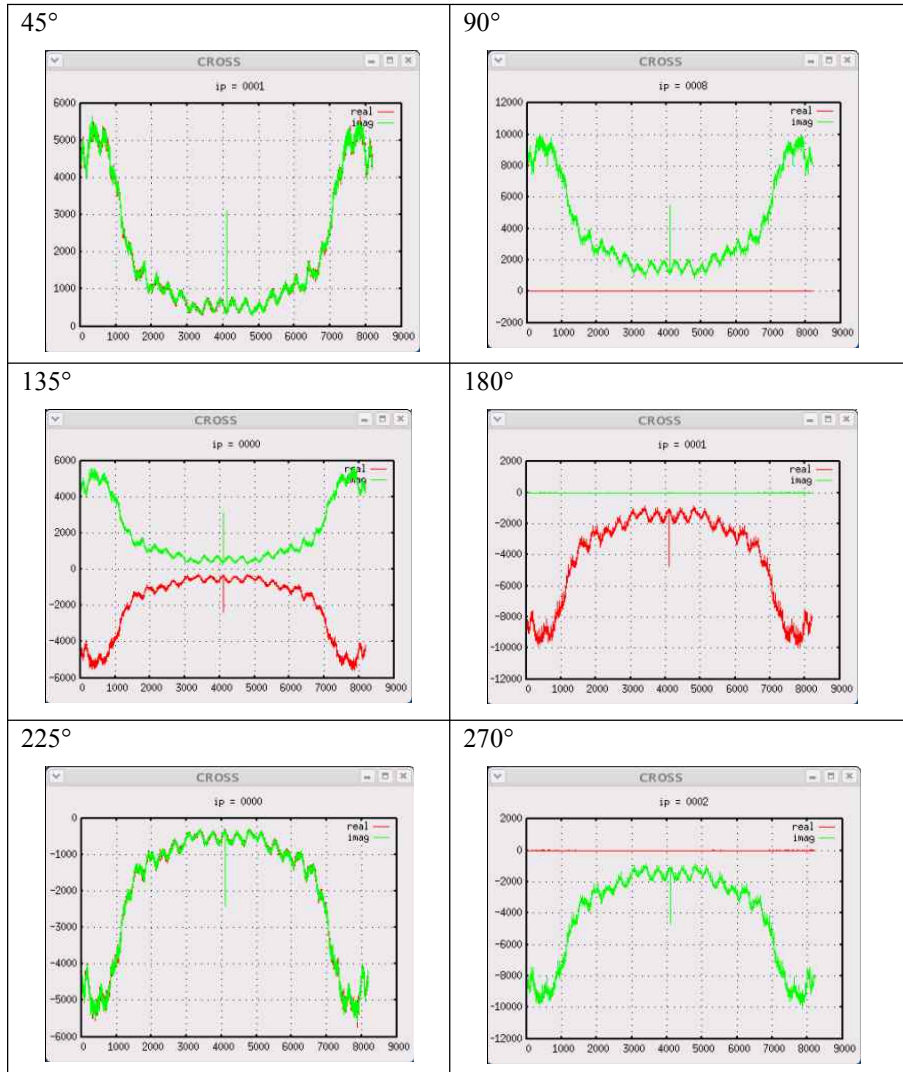


그림 15. 프린지 회전 초기위상의 설정값.

수에 대한 VCS 시작품의 프린지 추적이 정상적으로 수행되는 것을 알 수 있다. 앞서서도 설명한 것과 같이 VCS의 프린지 추적 기능 중에서 프린지 회전 (Fringe rotation)은 주파수 성분을 Δf 만큼 이동시킨 것과 같은 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 우선 16 MHz와 16.25 MHz의 CW 신호만을 대상으로 Δf 이동을 먼저 확인하고, 100 MHz와 90 MHz CW 신호에 대해서도 성능을 확인하였다. 마지막으로 16 MHz와 16.25 MHz 신호에 대해 잡음신호와 CW 신호가 각각 입력된 신호에 대해서도 Δf 이동을 확인하였다. 실험에서는 실제 CW 신호를 입력하는 방식을 사용하였는데, 2가지 신호를 동시에 생성하기 위해 그림 17과 같이 2대의 신호생성기 (Signal generator)를 사용하여 이중 (Dual) CW 신호를 ADS-1000 고속샘플러에 입력하도록 하였다.

그림 17의 설정을 사용하여 신호생성기와 ADS-1000



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 16. 각 초기 위상에 대한 VCS의 프린지 추적 결과.

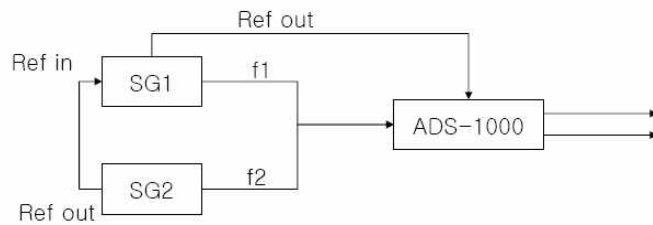
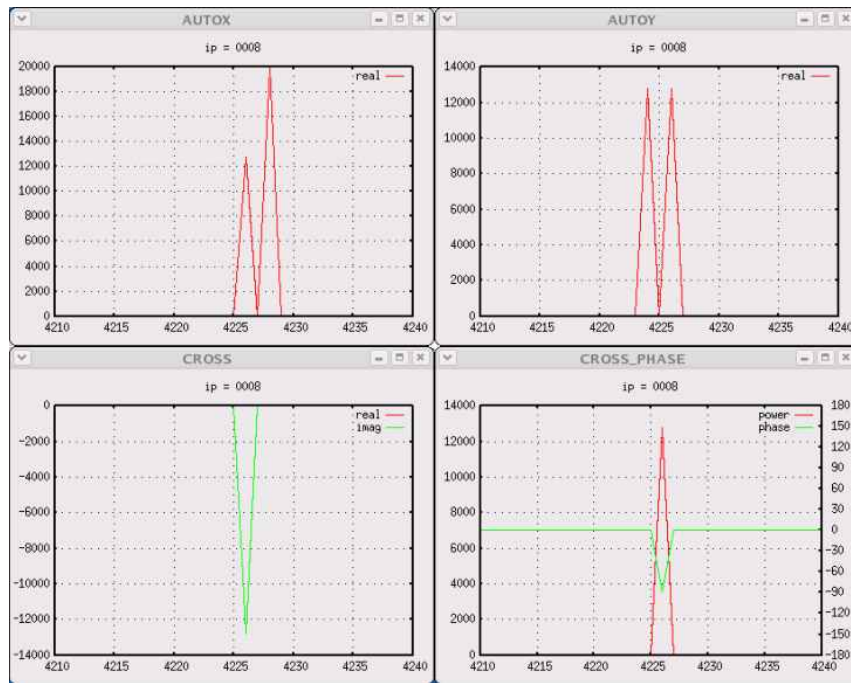
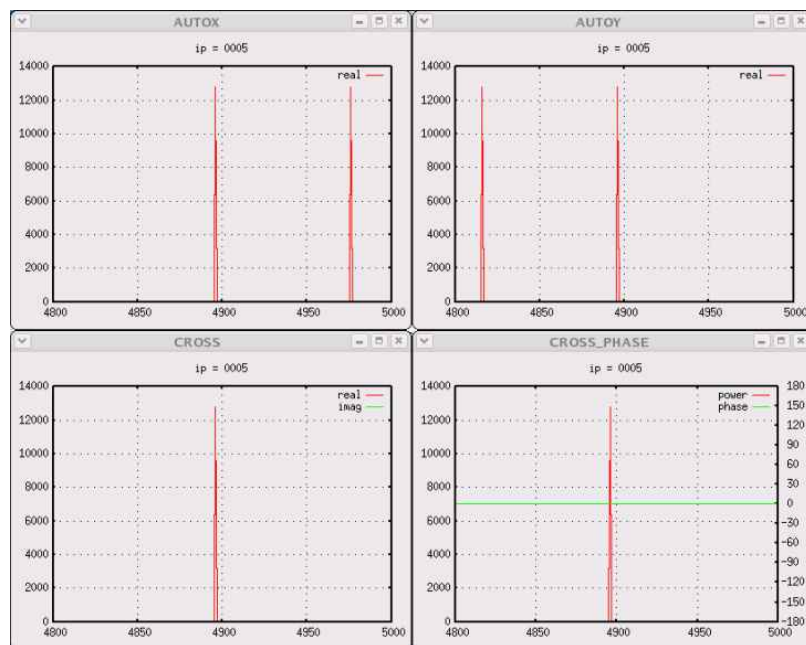


그림 17. 이중 CW 입력신호를 위한 시스템 구성도.



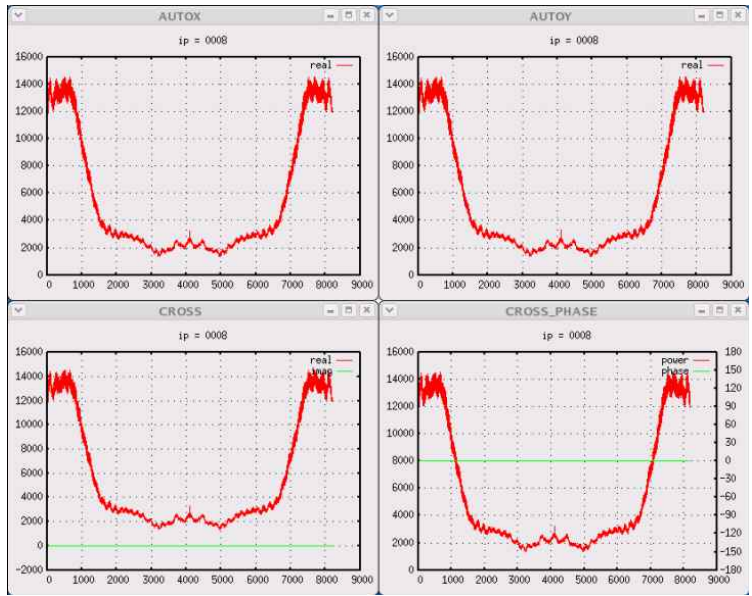
(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 18. 16 MHz와 16.25 MHz(프린지 초기위상:270°) CW 신호에 대한 Δf 이동의 결과.



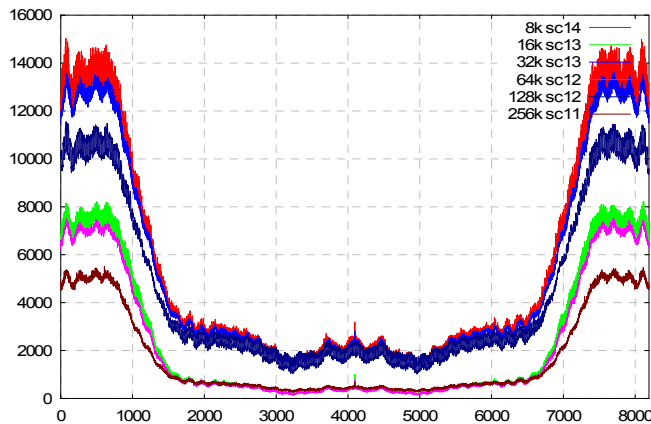
(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 19. 90 MHz와 100 MHz (프린지 초기위상 0°) CW 신호에 대한 Δf 이동의 결과.



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 20. Tsukuba 관측소의 잡음신호에 대한 VCS의 자기상관 및 교차상관 결과.



(x: channel(62.5 kHz/channel), y: amplitude)

그림 21. FFT-points에 따른 주파수 묶음에 대한 VCS의 결과.

고속샘플러에 의해 X국과 Y국에 16 MHz+16.25 MHz, 90 MHz+100 MHz의 이중 CW 신호를 각각 입력하였다.

그림 18은 프린지 회전에 의해 X국을 +250 kHz 이동한 경우이고, 그림 19는 X국을 +10 MHz 이동했을 때의 스펙트럼 응답을 나타낸 것이다. 그림 18의 교차상관 (CROSS) 결과에서 허수 부분이 출력되는 것은 16.25 MHz 신호의 프린지 초기 위상이 270° 주어진 경우이며, 그림 19의 교차상관 (CROSS) 결과에서 허수 부분이 0이고, 실수 부분이 출력되는 것은 100 MHz 신

호의 프린지 초기위상이 0°로 주어진 경우이므로 Δf만큼 이동한 경우에도 상관결과가 정상적으로 출력되는 것을 알 수 있다.

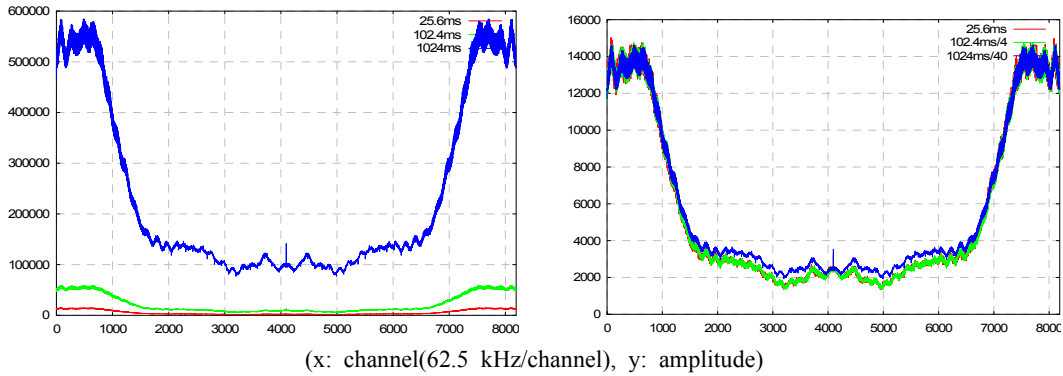
4.3 상관처리 시험

4.3.1 자기상관, 교차상관(Auto/Cross-Correlation)

일본 JNet의 Tsukuba 관측소에서 획득한 잡음신호에 대해 VCS의 자기상관 및 교차상관 기능을 확인하였으며, 그 결과를 그림 20에 각각 나타내었다.

표 8. IP 길이에 따른 전체 전력 값의 비율.

IP 길이	전체 전력	비율(25.6ms에 대해)
25.6ms	4.48E+07	1.0
102.4ms	1.79E+08	4.0
1024ms	1.90E+09	42.3



(a) 각 적분시간별 VCS 상관결과, (b) IP 길이 비율로 정규화한 결과.

그림 22. 각 적분시간별 VCS의 상관결과와 IP 길이의 비율로 정규화한 결과.

그림 20은 X국과 Y국에 동일한 데이터를 입력하여 지연보상과 프린지 추적 등을 적용하지 않고 자기상관과 교차상관을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림 20에서 동일한 데이터에 대해 자기상관 및 교차상관을 수행하였기 때문에 자기상관인 AUTOX, AUTOY의 결과는 동일하며, 교차상관인 CROSS의 경우 실수에 대한 결과만 출력되고 허수에 대한 교차상관결과는 출력되지 않고, CROSS PHASE의 경우도 위상이 0이 되는 것을 확인할 수 있다.

4.3.2 주파수 묶음(Frequency binning)

VCS에서 주파수 묶음 기능은 상관결과가 출력될 가능성이 높은 채널은 선택적으로 묶음인자 (Binning factor)를 적용하여 보다 정밀하게 상관결과를 출력하고, 그렇지 않는 채널은 그대로 출력하는 기능을 말한다. 실제로는 일정한 스케일링 인자를 적용하여야 하지만 4.2절에서 확인된 VCS의 재양자화 문제로 인해 본 실험에서는 VCS의 각 FFT-points에 따른 주파수 묶음 기능에서 스케일링 인자를 조정하면서 성능시험을 수행하였으며, 결과는 그림 21에 나타내었다.

그림 21에서 각 FFT-points에 따라 스케일링 인자의 설정값에 따라 스펙트럼 모양이 유사한 것을 확인할 수

있다. 이 주파수 묶음 기능은 VCS 본제품에서 재양자화 문제를 해결한 후 다시 성능시험을 수행할 예정이다.

4.3.3 적분시간(Integration Period)

VCS에서 적분시간에 따른 스펙트럼 결과를 확인하기 위해 일본 JNet의 Tsukuba 관측소에서 획득한 잡음신호에 대한 각 적분시간별 VCS 상관처리를 수행하였다.

그림 22(a)는 VCS에서 출력된 결과 값을 그대로 그래프로 나타낸 것이다. 그림 22(b)는 각 적분시간별 스펙트럼 모양을 비교하기 위해 IP (Integration period) 길이 (Length)의 비율로 나눈 것을 나타낸 것이다. 이와 함께 각각의 IP 길이에 따른 전체 전력 값의 비율을 확인한 결과를 표 8에 나타내었으며, 전체 전력 값은 IP 길이에 비례하는 것을 확인할 수 있다.

4.4 결과고찰

VCS 시작품 제작 및 성능시험의 목적은 VCS 본제품 제작에 앞서 핵심 부분품을 실제로 구현하여 설계대로 작동하는지 여부를 확인하고 미흡한 부분이 발견될 경우 보완함으로써 VCS 본제품의 완성도를 높이는 데 있다. 본 연구에서 수행한 성능시험 항목 중 스펙트럼 분

석의 경우 VCS 시작품이 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 특히 스케일링(Scaling)은 이전의 시험에서 출력되지 않은 잡음신호 스펙트럼이 스케일링 값과 잡음 입력신호의 레벨을 조정된 후 출력되는 것을 확인하였다. 이 문제점을 분석한 결과, VCS 시작품의 FFT 연산 후 재양자화과정에 문제가 있음을 확인하였다. 그리고 지연보상 기능은 1,500 km, 3,000 km에 해당하는 더미 데이터를 삽입한 시뮬레이션 데이터를 대상으로 평가한 후 정상동작하는 것을 확인하였다. 또한 1 샘플 이동의 지연보상에서도 재양자화 문제가 발생하는 것을 확인하였다. 이 재양자화 문제는 스펙트럼에서 파도 모양을 발생시키고 있으며, VCS 시작품에 전반적인 영향을 미치고 있는 것을 실험으로 확인하였다. 상관처리 시험항목에서는 일본 JNet의 Tsukuba 관측소에서 획득한 잡음 신호에 대해 수행한 자기상관/교차상관, 주파수 묶음기능, 적분시간 등의 결과에서 VCS 시작품에 구현된 기능들이 정상적으로 동작하는 것을 실험으로 확인하였다.

이번 VCS 시작품 성능시험을 통하여 FFT 연산 후의 재양자화 부분에 유효비트의 처리에 따른 오버플로어 문제를 발견하였으며, 그 보완책을 본제품 제작시에 반영하기로 한 점은 시작품 제작을 통해 얻은 중요 성과로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 한일공동VLBI상관기의 핵심 구성시스템인 VCS 시작품의 성능시험을 수행하였다. VCS 시작품은 2 관측국 1기선의 관측 데이터에 대한 상관처리가 가능한데, 특히 데이터 입출력, 포트 선택, 스펙트럼 분석, 지연보상, 상관처리 등의 기능들을 처리할 수 있다. 본 연구에서는 상관시스템의 핵심이 되는 스펙트럼 분석, 지연보상, 상관처리 등을 중심으로 시뮬레이션 데이터와 실제 전파망원경으로 획득한 잡음신호 데이터를 이용하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가 결과를 통하여 VCS 시작품에 구현된 기능이 정상적으로 동작되는 것을 확인하였다. 특히 지연보상 성능시험에서 발견한 FFT 연산 후의 재양자화 문제를 VCS 시작품에서 발견하였으며, 이 문제를 해결한 후 VCS 본제품을 제작할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국천문연구원 2009년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 연구 과제를 통하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김봉규 외, 2008, 2007년도 한국우주전파관측망 구축사업 결과보고서, 한국천문연구원
- 노덕규 외, 2008, 2008년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서, 한국천문연구원
- 오세진 외, 2004, 관측데이터의 고속기록을 위한 대용량 저장시스템, 천문학논총, 19, 85
- 오세진 외, 2007, KVN을 위한 디지털 데이터 처리 시스템의 성능평가, 천문학논총, 22, 63
- 오세진 외, 2008a, 동아시아VLBI관측망을 위한 VLBI상관기 개발현황, 제2회 천문관측기기 워크숍 논문집, 2, 53
- 오세진 외, 2008b, VLBI상관서비스시스템 시작품 성능시험 결과 보고서, 한국천문연구원
- 오세진 외, 2008c, 한일공동VLBI상관기에서 관측 데이터의 동기재생처리를 위한 RVDB 시스템 개발과 성능시험, 천문학논총, 23, 1
- 염재환 외, 2009, 한일공동VLBI상관기를 위한 소프트웨어 상관기 개발, 한국우주과학회지, 26, 4, 1
- 이채욱, 1994, 디지털신호처리 기초와 응용, 청문각
- Alan Whitney, 2002, VLBI Standard Interface Specification, VSI-H.
- Digital Link Co. Ltd., Gigabit Sampler ADS-1000 Operating Manual
- Takahashi F., Kondo T., and Koyama Y., 2000, Very Long Baseline Interferometer, Ohmsha
- Oppenheim, A. V. & Schaffer, R. W., 1989, Discrete-Time Signal Processing (New Jersey: Prentice Hall), pp.636-640
- Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. Jr., 2001, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2nd Ed., (New York:John Wiley & Sons), 289