

한일공동VLBI상관기를 위한 소프트웨어 상관기의 개발

염재환, 오세진[†], 노덕규, 강용우, 박선엽, 이창훈, 정현수
한국천문연구원

Development of Software Correlator for KJJVC

J. H. Yeom, S. J. Oh[†], D. G. Roh, Y. W. Kang, S. Y. Park,
C. H. Lee, and H. S. Chung

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea
E-mail: jhyeom@kasi.re.kr

(Received September 14, 2009; Accepted November 6, 2009)

요 약

한일공동VLBI상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC)는 2010년 정상가동을 목표로 한국과 일본 간 공동으로 개발이 진행되고 있다. 이 연구에서는 KJJVC의 핵심이 되는 VLBI 상관 서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS)과 동일한 규격을 갖는 소프트웨어 상관기를 개발하였다. 소프트웨어 상관기는 VCS와 같은 8Gbps급, 8192출력채널, 262,144점 FFT(Fast Fourier Transform)의 규격을 갖고 있으며, VCS의 하드웨어 규격과 동일한 함수 알고리즘과 연산 레지스터를 적용하고 있다. 개발한 소프트웨어 상관기의 성능을 확인하기 위해 일본국립천문대의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 관측망으로 관측한 스펙트럼 선과 연속파 천체를 대상으로 상관처리 실험을 수행하고, 그 결과는 미타카 FX 상관기의 스펙트럼 모양, 위상변화, 프린지 검출 등을 비교하였다. 실험을 통하여, VERA 관측데이터를 이용한 소프트웨어 상관기의 결과는 미타카 FX 상관기의 상관결과와 일치하는 것을 확인하여 그 유효성을 입증하였다. 향후 개발한 소프트웨어 상관기는 GUI와 같은 사용자 인터페이스와 상관 후 처리 부분을 개선하면 KJJVC와 함께 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN)의 소프트웨어 상관기로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Korea-Japan Joint VLBI Correlator (KJJVC) is being developed by collaborating KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute), Korea, and NAOJ(National Observatory of Japan), Japan. In early 2010, KJJVC will work in normal operation. In this study, we developed the software correlator which is based on VCS (VLBI Correlation Subsystem) hardware specification as the core component of KJJVC. The main specification of software correlator is 8 Gbps, 8192 output channels, and 262,144-points FFT (Fast Fourier Transform) function same as VCS. And the functional algorithm which is same as specification of VCS and arithmetic register are adopted in this software correlator. To verify the performance of developed software correlator, the correlation experiments were carried out using the spectral line

[†]corresponding author

and continuum sources which were observed by VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry), NAOJ. And the experimental results were compared to the output of Mitaka FX correlator by referring spectrum shape, phase rate, and fringe detection and so on. Through the experimental results, we confirmed that the correlation results of software correlator are the same as Mitaka FX correlator and verified the effectiveness of it. In future, we expect that the developed software correlator will be the possible software correlator of KVN (Korean VLBI Network) with KJJVC by introducing the correlation post-processing and modifying the user interface as like GUI (Graphic User Interface).

Keywords: software correlator, VCS (VLBI correlation subsystem), VLBI

1. 서 론

최근 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 관측 데이터의 처리를 위해 활용되고 있는 상관기는 하드웨어와 소프트웨어로 구현되어 사용되고 있다(Thompson et al. 2001). 특히 하드웨어 상관기는 EVN(European VLBI Network)의 JIVE 상관기, 미국 국립천문대의 VLBA 상관기, MIT Haystack 천문대의 Mark4 상관기, 일본국립천문대의 미타카 FX 상관기¹⁾ 등이 있다(Campbell 2004, Benson 1995, Whitney et al. 2004). 그리고 대표적인 소프트웨어 상관기는 일본 NICT의 측지 VLBI용 소프트웨어 상관기, 일본국립천문대의 FX 형 소프트웨어 상관기가 있다(Kondo et al. 2004, Kimura 2007). 소프트웨어 상관기는 하드웨어 상관기에 비하여 계산량이 비교적 적은 경우 소프트웨어로 구현하여 활용하고 있으며, 하드웨어 상관기를 대체하기 위해 개발하는 경우도 있다(Kimura 2007). 하드웨어 상관기의 경우 주어진 규격에 한정하여 시스템을 설계제작하기 때문에 규격에 대한 유연성이 적지만 소프트웨어 상관기는 계산기의 성능이 지원된다면 규격 등의 변경과 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다.

한국천문연구원에서는 2010년 정상가동을 목표로 한일공동VLBI상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC) 개발을 일본국립천문대와 공동으로 진행하고 있다. KJJVC는 고속재생기, 동기 재생처리시스템(Raw VLBI Data Buffer, RVDB), VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS), 데이터 아카이브(Peta-scale Epoch Data Archive, PEDA) 그리고 제어 운영 소프트웨어로 구성된다(오세진 외 2008). KJJVC를 구성하는 하드웨어 중 핵심구성품인 VCS의 규격을 결정하는 단계에서는 제시된 알고리즘의 적용 가능성과 적용했을 경우의 계산 결과의 정확성과 효율성을 검증해야 한다. 하드웨어를 제작하기 위한 설계단계에서는 동일한 기능과 성능을 가진 소프트웨어를 작성하여 검증하는 것이 일반적이다. 이 방법은 설계단계와 제작단계에서 발생할 수 있는 오류의 범위를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 즉, 적용된 알고리즘의 규격이 결정된 후 하드웨어에 구현되기 전에 소프트웨어로 구현해서 검증단계를 수행하면 향후 발생할 수 있는 문제점을 해결하는데 도움을 줄 수 있는 것이다. 특히 하드웨어에 적용된 알고리즘 중 레지스터의 비트 폭은 연산 알고리즘의 계산 부피와 관계에 있어서 중요한 요소로 작용한다.

¹⁾<http://vsop.mtk.nao.ac.jp/VSOP/mitaka-e.html>

이 연구에서는 KJJVC의 핵심인 VCS의 개발단계에서 설계 알고리즘의 유효성을 검증하고 성능을 비교하기 위해 VCS와 동일한 규격을 갖는 소프트웨어 상관기를 개발하였다. 개발한 소프트웨어 상관기는 VCS와 같은 8Gbps급, 8192출력채널, 262,144점 FFT(Fast Fourier Transform)의 규격이며, VCS의 하드웨어 규격과 동일한 함수 알고리즘과 연산 레지스터를 적용하고 있다. 그리고 소프트웨어 상관기는 VCS와 동일한 데이터 입출력, 지연예측 파라미터의 처리, 프린지 회전(Fringe rotation), FFT 처리, ΔW 보정 등을 소프트웨어로 구현하였다. 개발한 소프트웨어 상관기의 성능을 확인하기 위해 일본국립천문대 미타카 FX 상관기의 상관결과와 비교하기 위해 VERA 관측망(VERA 2009)으로 관측한 스펙트럼 선(Spectral line)과 연속파(Continuum) 천체의 관측 데이터를 대상으로 상관처리 실험을 수행하였다. 상관처리 실험결과에서는 미타카 FX 상관기와 스펙트럼 모양, 위상변화, 프린지 검출 등을 비교하였으며, 상관처리에 이용한 데이터의 경우 동일한 상관결과가 출력되는 것을 확인하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 VCS 하드웨어 시스템에 대해 살펴보고, 3장에서는 소프트웨어 상관기에 구현된 알고리즘에 대해 기술하며, 4장에서는 개발한 소프트웨어 상관기의 성능을 확인하기 위해 수행한 상관처리 실험결과에 대해 고찰한다. 그리고 5장에서 이 논문의 결론을 맺는다.

2. VLBI상관서브시스템의 하드웨어

VCS의 하드웨어 규격은 표 1에 나타내었다. VCS는 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN)(Kim et al. 2004) 3기의 관측국, 일본 VERA 4기의 관측국, 일본내 대학연합 관측망, 2013년 발사예정인 VSOP-2(Hirabayashi et al. 2004) 및 중국의 VLBI 관측국을 포함하여 총 16기의 관측국 120기선(Baseline)의 상관처리를 동시에 수행할 수 있다. KVN이 22, 43, 86, 129GHz의 4주파수 동시 관측을 수행하기 때문에 안테나 유닛(Antenna unit)에서 이를 지원하고 일본의 인공위성 관측망인 VSOP-2를 지원하기 위해 최대 지연(Maximum delay)을 36,000 km까지 연산할 수 있다. 그리고 1비트 및 2비트의 관측 데이터를 상관처리할 수 있다. FFT 연산을 수행한 후 재양자화는 8비트로 수행하며 레벨은 256단계이다. 상관 결과의 적분을 위한 레지스터는 32비트이다.

VCS에서 처리하는 함수의 구성은 그림 1에 나타내었다. VCS의 함수 구성은 데이터 입력(Data accept), 지연 제어(Delay control), FFT, 상관 및 적분(Correlation and accumulation)으로 크게 구분할 수 있으며, 이하에서 각 구성의 기능에 대해 간략히 기술한다.

2.1. 데이터 입력

VCS는 기록된 관측 데이터를 입력받기 위해 IVS(International VLBI Service)²⁾에 의해 표준화된 VSI-H(VLBI Standard Interface Hardware)³⁾를 채택하고 있다. 데이터를 입력 받는 각 안테나 유닛은 KVN 4주파수 동시관측을 지원하기 위해 4개의 입력 포트를 가지고 있다. VSI-H 규격에는 128MHz 클럭(clock)을 이용하여 최대 4Gbps 속도를 지원하고 있는데, VCS는 64MHz 클럭을 이용하여 최대 2Gbps 속도를 지원한다. 대역폭이 자기 다른 다양한 기록기로 기록된 관측 데이터를 KJJVC의 RVDB 시스템을 이용하여 VCS로 2Gbps 속도로 데이터를 재생할 수 있도록 하였다. 즉, 512Mbps

²⁾ <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>

³⁾ <http://www.vlbi.org/vsi>

표 1. VCS 하드웨어 규격.

Item	Description
Observation array constitution	- 16 stations - 4 inputs - (16 Auto-correlation+120 Cross-correlation) × 4sets
Observation requirements	- Observation Frequency 22/43/86/129GHz, 8/22/45(VSOP-2)GHz - Largest Baseline Length 36,000 km - Maximum Baseline Velocity 7.5 km/sec - Frequency Resolution(for 22GHz) 53.3m/sec - Dual Polarization - Maximum Data Output Rate 1.4 Gbytes/sec
Input data profiles	- 1,024 Msps 2 bit/sample - Quantization Levels 4levels("00" < "01" < "10" < "11") - Interface VSI-H
Delay compensation and fringe tracking	- Delay Prediction Parameters $\tau, \dot{\tau}, \ddot{\tau}, \ddot{\tau}$ - Delay Compensation Period FFT segment border - Fringe Phase Quantization $2\pi/16$ radian - Fringe Tracking Word Length 16 bits, 2's complement
Spectral analysis	- FFT Points 256k/128k/64k/32k/16k/8k Points - Word Length 16 bit(R) + 16bit(I) Fixed Point - ΔW Correction - Requantization 8 bit(R) + 8 bit(I) Fixed Point
Correlation and accumulation	- Correlation Word Length 9 bit(R) + 9 bit(I) - Accumulation Word Length 32 bit(R) + 32bit(I) - Integration Period 25.6 ms - 10.24 sec - Frequency Binning 1/2/4/8/16/32/64/128/256channels - Points of Correlation Output Data 8,192 points - Control Interface GbE TCP/IP

속도로 기록된 데이터를 4배속 재생하여 2,048Mbps 속도를 지원한다. 따라서 관측 데이터의 재생속도를 조절할 수 있는 RVDB 시스템을 이용하여 VCS의 상관처리 성능을 최대로 이용할 수 있다.

VCS에는 그림 2에 나타낸 것과 같이 KVN DAS(오세진 외 2007)의 관측모드와 광대역 관측 모드에 맞도록 다양한 스트림(Stream) 형식을 지원한다. 예를 들어, c1은 스트림이 한 개만 존재하는 광대역(Wide band) 모드이다. 2Gbps 속도에서 광대역 모드의 대역폭은 512MHz이고 1Gbps 속도에서는 256MHz가 된다. c5는 스트림이 16개 존재하는 협대역(Narrow band) 모드로 대역폭은 32MHz이다. 기록된 관측 데이터의 비트스트림(Bitstream) 분포는 파일 작성이 Big-endian⁴⁾ 형식이다. 상관처리를 시작하기 전에 입력 포트 부분에 다중화기(Multiplexer)를 두어서 샘플의 위치를 원하는 곳에 위치할 수 있다. 이는 스트림에서 샘플의 위치가 다른 중국이나 미국, 유럽에서 사용하고 있는 방식대로 기록된 관측 데이터를 상관처리하기 위해서 필요한 부분이다. 입력 버퍼의 크기는 일본의 우주 VLBI 위성인 VSOP-2의 최대 지연 시간을 고려하여 설계되었다. 그래서 VSOP-2의 최대 지연 거리는 36,000km이고 최대 지연 시간은 0.12sec이다.

2.2. 지연 제어

VCS는 $\tau, \dot{\tau}, \ddot{\tau}, \ddot{\tau}$ 의 지연 예측 파라미터(Delay prediction parameter)를 이용하여 a-priori를 계

⁴⁾<http://en.wikipedia.org/wiki/Endianness>

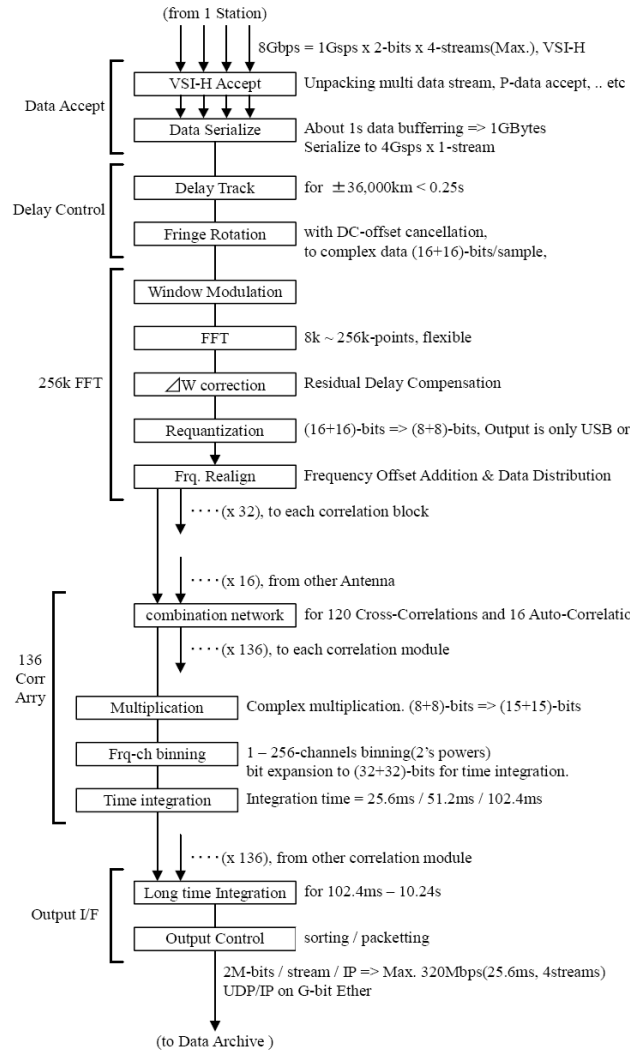


그림 1. VCS의 함수 구성.

산한다(Kondo et al. 1997). a-priori를 구하기 위하여 식 (1), (2), (3)을 각각 이용한다.

$$\tau(t) = \tau + \dot{\tau}t + \frac{1}{2}\ddot{\tau}t^2 + \frac{1}{6}\dddot{\tau}t^3 \quad (1)$$

$$\dot{\tau}(t) = \dot{\tau} + \ddot{\tau}t + \frac{1}{2}\dddot{\tau}t^2 \quad (2)$$

$$\ddot{\tau}(t) = \ddot{\tau} + \dddot{\tau}t \quad (3)$$

$\tau(t)$, $\dot{\tau}(t)$, $\ddot{\tau}(t)$, $\dddot{\tau}(t)$ 를 이용하여 지연 추적(Delay tracking)의 기하학적 지연(Geometrical delay), 지연 변화율(Delay rate), 비트점프(bit jump), 프린지 회전(fringe rotation)의 위상과 위상변화율, ΔW 보정(ΔW correction)의 초기값과 기울기를 구한다. 계산식의 표현을 표 2에 나타내었다. 전파 망원경으로 관측한 신호는 가우시안 랜덤신호이며, 주파수 변환을 수행하는 프린지 회전을 계산하고

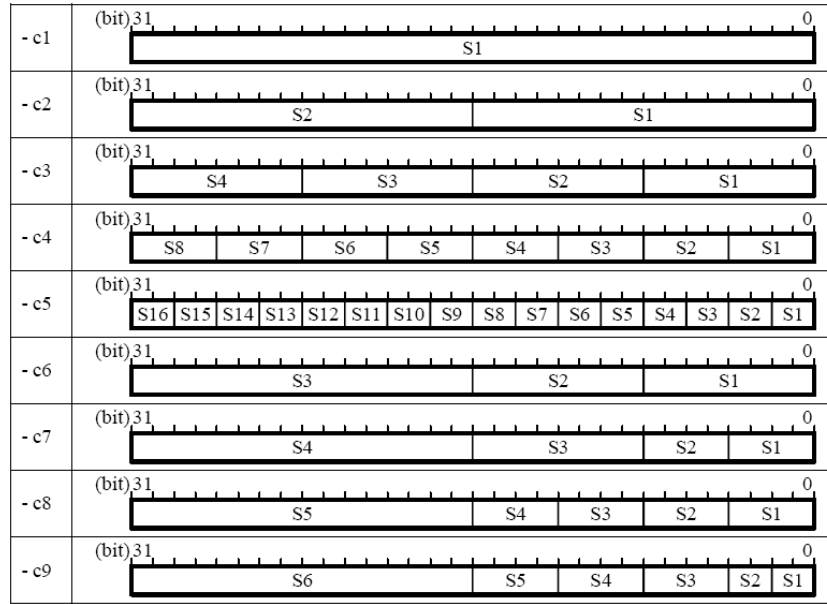


그림 2. KVNDAS의 데이터 서브스트림 형식.

표 2. VCS 파라미터 계산 수식.

	Item	Symbol	Based on
for Delay Track	Initial Delay	D_0	$\tau(t)$
	1st Bit Jump Timing	T_0	$1/\dot{\tau}(t)$
	Bit Jump Period	T	$1/\dot{\tau}(t)$
	Bit Jump Variate Period	T_a	$1/\dot{\tau}(t)$
for Fringe Rotation	Initial Phase	ϕ_0	$\tau(t) \cdot F_o$
	Phase Increase	$\Delta\phi$	$\dot{\tau}(t) \cdot F_o$
	Phase Increase Variate Period	B	$1/(\dot{\tau}(t) \cdot F_o)$
for ΔW Correction	ΔW initial value	ΔW_i	$\tau(t)$
	ΔW gradient	ΔW_g	$\dot{\tau}(t)$

나면, 관측 데이터의 실수 부분은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고 허수 부분은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ϕ_0 는 초기 위상(Initial phase)이며, $2\pi(F_o\tau(t))_{fraction}$ 에 의해 계산된다. 식 (4)와 (5)에서 F_o 는 관측 주파수이다. 지연 변화율은 프린지 회전 주파수로 프린지 멈추기(Fringe stopping)를 수행한다. 이는 도플러 편이(Doppler shift)에 의한 주파수의 적색편이(Red shift)나 청색편이(Blue shift)를 보상하는 역할을 한다. $2\pi(F_o\dot{\tau}t)$ 에 의해 주파수 편이를 보정할 수 있다.

$$x_r(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi F_o \dot{\tau} t + \phi_0) \tag{4}$$

$$x_i(t) = x(t) \cdot \sin(2\pi F_o \dot{\tau} t + \phi_0) \tag{5}$$

VCS는 시스템 리소스를 이용하여 실시간 상관처리 연산을 수행하기 때문에 코사인파와 사인연산을 상관기 시스템 내에서 수행하지 않고 연산속도의 향상을 위해 메모리에 정해진 값을 테이블 형태로

표 3. 프린지 위상(Fringe phase)과 인덱스 코드 테이블(Index code table).

Fringe phase(degree)	4-bit code as "p"	Apply phase[p] (degree)
348.75 - 11.25	"0000" (0)	0.0
11.25 - 33.75	"0001" (1)	22.5
33.75 - 56.25	"0010" (2)	45.0
56.25 - 78.75	"0011" (3)	67.5
78.75 - 101.25	"0100" (4)	90.0
101.25 - 123.75	"0101" (5)	112.5
123.75 - 146.25	"0110" (6)	135.0
146.25 - 168.75	"0111" (7)	157.5
168.75 - 191.25	"1000" (8)	180.0
191.25 - 213.75	"1001" (9)	202.5
213.75 - 236.25	"1010" (A)	225.0
236.25 - 258.75	"1011" (B)	247.5
258.75 - 281.25	"1100" (C)	270.0
281.25 - 303.75	"1101" (D)	292.5
303.75 - 326.25	"1110" (E)	315.0
326.25 - 348.75	"1111" (F)	337.5

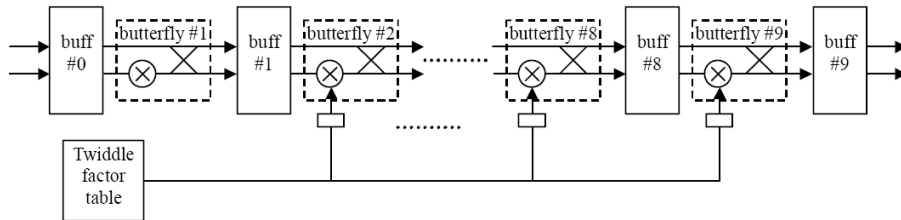


그림 3. FFT 함수 블록의 파이프라인 구성.

로 저장한다(Kondo et al. 1997). 테이블 값은 인덱스(Index)에 의해 메모리로부터 읽어온다. 이 때 메모리에 저장된 값은 16비트 고정소수점을 사용한다. 메모리 인덱스 코드는 4비트이고 표 3에 프린지 위상에 따른 인덱스 코드 테이블을 나타내었다. 프린지 회전을 수행한 후의 데이터는 실수의 16비트 고정소수점과 허수의 16비트 고정소수점이 된다.

2.3. 256k FFT

FFT 함수 블록에서는 현재 구간과 다음 구간 사이의 관측 데이터가 끊어지면서 발생하는 FFT 문제를 해결하고자 해밍(Hamming), 해닝(Hanning), 블랙맨(Blackman) 3가지 형태의 윈도우(Window) 함수를 적용할 수 있다(Ifeachor & Jervis 1993). 윈도우 함수의 모듈레이션(Modulation)은 16비트 고정소수점이다. FFT 함수 블록은 실시간으로 처리할 수 있도록 그림 3과 같이 파이프라인(Pipeline)으로 구성되어 있으며, FFT 함수 블록 또한 16비트 고정소수점을 채용하고 있다. 그리고 FFT 함수를 연산하는 과정에 발생할 수 있는 오버플로우(Overflow)를 방지하기 위해 각 파이프라인 연산의 단계마다 데이터의 크기를 1/2로 조절할 수 있는 기능인 스케일링(Scaling)도 채용하고 있다(Oppenheim & Schaffer 1989).

$$X(k) = \sum x(n)e^{-j\frac{2\pi}{n}nk} \tag{6}$$

FFT를 나타내는 식 (6)에서 다음 각각의 변수를 $N=M \times L$, $n=n_1L+n_0$, $k=k_1M+k_0$ 로 치환하면 다음 식 (7)과 같다. 이를 이용하여 파이프라인 구조의 FFT 연산을 수행한다.

$$X(k_1M + k_0) = \sum \left[\sum x(n_1L + n_0) e^{-j\frac{2\pi}{M} n_1 k_0} e^{-j\frac{2\pi}{N} n_0 k_0} \right] e^{-j\frac{2\pi}{N} n_0 k_1} \quad (7)$$

ΔW 보정은 지연 추적 연산과정에서 발생한 소수점 이하의 값에 의한 오차를 보정하는 부분(Kondo et al. 1997, Iguchi & Okuda 2008)이며 연속과(Continuum) 천체에 의해 위상의 기울기 값을 도출해서 보정할 수 있다. FFT 함수 블록은 256k 점일 경우 1.024 Gsp에서 초당 약 3900여 회의 연산을 수행한다. USB(Upper Side Band)와 LSB(Lower Side Band)를 모두 합칠 경우 약 16Gbps로 데이터가 출력된다. FFT 연산 후의 데이터를 CAB(Correlation and Accumulation Board)로 전송하기에는 데이터 양이 너무 많기 때문에 8비트로 재양자화를 수행한다. VCS는 FFT 출력 데이터의 양을 조정하기 위해 출력 중에서 USB 또는 LSB를 선택할 수 있다. 결국 FFT 함수 블록의 최종 출력은 USB 또는 LSB의 8비트 고정소수점의 실수 데이터와 허수 데이터가 된다.

2.4. 136개의 상관 배열(Correlation array) 및 적분

VCS는 16기의 관측국에 대해 16개의 자기상관과 120개의 상호상관(Cross-correlation)을 수행할 수 있다. VCS는 FX형의 상관시스템으로써 푸리에 변환을 수행하는 F부와 각 채널 별 푸리에 변환의 결과를 곱셈하는 X부로 구성된다(Kondo et al. 1997). 곱셈을 하면서 연산 레지스터는 16비트 고정소수점 실수 데이터와 허수 데이터로 확장된다. VCS는 광대역 관측 데이터의 주파수 분해능을 높이기 위해 상관처리의 최대 주파수 채널은 262,144개이며, 상관결과의 최종 출력 채널은 8,192개이다. 이는 주파수 채널 모두를 출력하는 것이 현재 설계 기술에서는 현실적으로 불가능하기 때문에 VCS에서도 주파수 채널 묶기(Frequency channel binning) 기능을 도입하였다(Okumura et al. 2003). 즉, VCS의 FFT 출력은 16,384, 32,768, 65,536, 131,072, 262,144개를 설정에 따라 각각 출력할 수 있으며, 이를 묶기 인수(Binning factor)를 이용하여 상관결과가 가장 정상적으로 출력할 수 있는 부분에 묶기 인수인 가중치를 두어 주파수 채널을 8,192개로 축소하여 출력하는 것이 가능하다. 이 기능은 특정 부분의 주파수 채널을 좀 더 세밀하게 관측하고자 할 경우 유용하게 사용할 수 있다. 상관결과를 저장하는 PEDAS 시스템으로의 최종 출력은 10Gb 이더넷(Ethernet) 4개 회선(Line)을 이용하며, VCS의 최대 출력 데이터의 양은 11.2Gbps(=1.4 Gbyte/sec)이다.

3. VLBI 소프트웨어 상관기

이 논문에서는 2장에서 소개한 VCS의 하드웨어 성능검증을 위해 동일한 규격과 성능을 가지는 소프트웨어 상관기를 개발하였다. 소프트웨어 상관기를 설계하고 구현하는데 있어서 하드웨어 상관기인 VCS에서 수행하는 지연 예측 파라미터의 계산과 동일한 설계 방식을 도입하였다. 즉, 지연 예측 파라미터를 계산하는 방식에는 관측국 기반과 기선 기반의 방법이 사용되고 있다(Whitney 2000). VCS는 총 16개 관측국을 대상으로 하기 때문에 지구 중심과 관측국 사이의 기선을 이용하는 즉, 관측국 기반의 지연 예측 파라미터를 계산한다(그림 4). 만약 상관기의 지연 예측 파라미터 계산에 기선 기반의 방식을 적용한다면 지연 예측 파라미터가 120개의 상호상관에 대해 모두 필요하게 된다. 그러나 관측국 기반의 지연 예측 파라미터 계산을 적용하면 지구 중심을 기준(Reference)로 하기 때문에 각 관측국의 숫자에 해당하는 16개의 지연 예측 파라미터만 필요하게 된다. 따라서 이 방식을

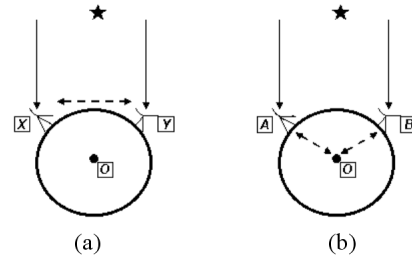


그림 4. 기선 기반 (a)와 관측국 기반 (b).

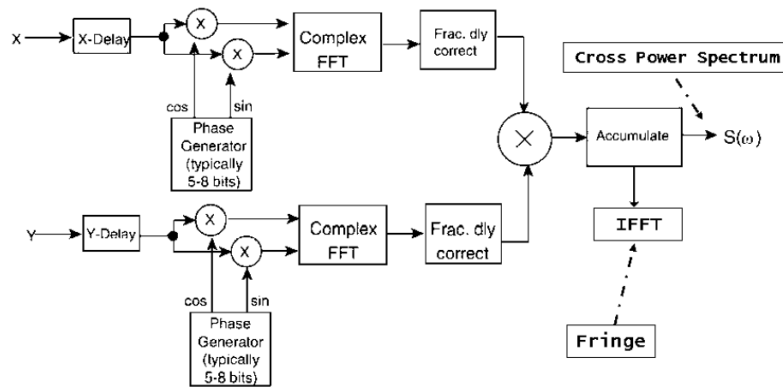


그림 5. 관측국 기반을 갖는 FX상관기 함수 구성.

채용할 경우 시스템의 계산량을 현저하게 줄일 수 있는 장점이 있어 이 논문에서는 관측국 기반의 지연 예측 파라미터 계산을 적용하였다.

그림 4는 기선 기반과 관측국 기반의 방식을 나타낸 것이다. 그림 4a의 기선 기반은 기준을 X 관측국으로 하고 한 쪽 관측국의 관측 데이터에 대해서만 지연 추적과 프린지 회전을 수행한다. 그러나 그림 4b의 관측국 기반은 모든 관측국의 데이터에 지연 추적과 프린지 회전을 수행한다. 그림 5에 이 논문에서 채용한 관측국 기반의 지연 예측 파라미터 계산 방식을 적용한 FX 상관함수의 블록 구성을 나타내었다. FX 상관기는 F(FFT)와 X 함수 블록을 모두 거쳐 상호 파워 스펙트럼(Cross power spectrum)을 확인할 수 있고 스펙트럼 데이터를 IFFT(Inverse FFT)하여 래그 도메인(Lag domain)에서의 프린지를 확인할 수 있다. 소프트웨어 상관기도 VCS와 마찬가지로 FX 상관 방식을 채용하고 있으며, 표준 C를 이용하였다. 그리고, 윈도우즈(Windows)와 리눅스(Linux) 환경에서 모두 동작하도록 구현하였다. VCS를 위한 16비트 고정소수점 연산과 double형의 계산 방식 모두를 지원한다.

3.1 데이터 입력 블록

VCS의 서브스트림 형식(c1-c9)을 모두 지원하기 위해서 소프트웨어 상관기는 데이터 입력부에 관측 기록된 샘플데이터를 스트림 별로 정렬하는 블록이 있다. 그림 6에 c2 서브스트림 형식에 대한 데이터 정렬처리를 나타내었다.

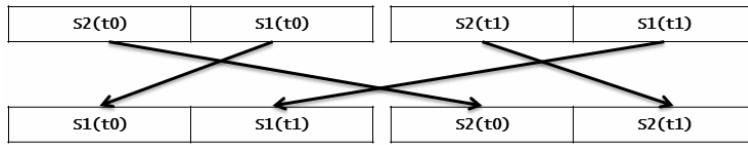


그림 6. c2 형식에 대한 정렬.

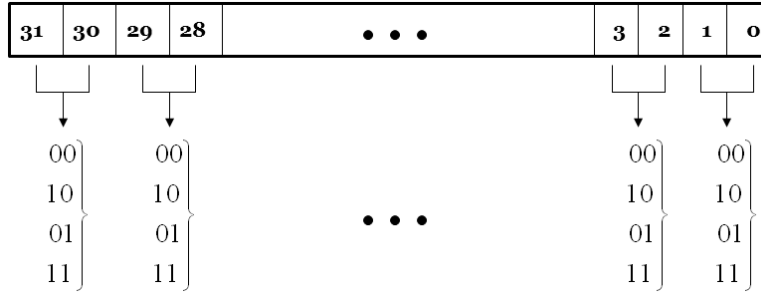


그림 7. 각 샘플의 비트 구성.

KVNDAS의 기록 형태는 VCS의 서브스트림 형식(c1-c9)과 일치하고 샘플의 비트 구성은 Big-endian 형식이며, 2비트 샘플 데이터의 자세한 비트 구성을 그림 7에 나타내었다.

3.2 지연 추적 블록

그림 9에 나타난 것과 같이 각 관측국 A, B에서 관측을 수행할 때 지구도 공전과 자전이 되기 때문에 관측천체에서 각 관측국을 바라봤을 때 관측국 A는 관측국 B에 비해 점점 멀어져 가는 상태가 된다. 그러므로 상관기는 이 지연에 해당하는 값을 추적하게 된다. 그러나 그림 11에 나타난 그래프에서 실선의 실제지연(True delay)은 실제 지연추적에 해당하지만, 일반적으로 구현되는 상관기는 디지털 시스템이므로 실제지연을 계산하지 못하고 계단과 같이 표현된 지연추적(Delay tracking)을 수행하게 된다. 이 때 그림 9에서와 같이 지구의 자전과 공전에 의한 연속적인 지연추적을 상관기에서 수행하지 못하기 때문에 그림 11의 계단 모양의 지연추적을 진행하게 되면 연산과정에서 비트의 점프가 발생하게 되며 이는 그 만큼의 오류(Error)에 해당하는 값이 된다. 그리고 상관기에서 지연추적을 위해 사용하는 지연 예측 파라미터의 값은 각 관측국의 관측 환경(관측 천체, 망원경 위치, 대기 등)에 의존하기 때문에 모든 관측 데이터의 상관처리에서 사용할 때 동일하지 않다. 예를 들어, 표 1에 나타난 VCS의 규격에서 VSOP-2를 지원하기 위한 최대 지연 시간은 $\pm 0.12\text{sec}$ 의 기하학적 지연으로 설정되어 있다. 이 지연시간은 VSOP-2 위성의 최대/최소 거리인 $\pm 36,000\text{km}$ 에 해당하는 값이다. 소프트웨어 상관기에서 기하학적 지연은 VCS와 달리 버퍼의 제약을 받지 않기 때문에 $\pm 0.12\text{sec}$ 이상의 지연 시간을 계산할 수 있다.

그림 8은 그림 4b에서 관측국 A와 B 그리고 지구중심인 O에 대한 기하학적 지연에 대한 처리를 나타낸 것이다. 그림 4b와 함께 그림 8을 살펴보면, 그림 4b에서 관측국 A와 B, 지구중심 O에 대해 관측 천체에서 각 관측국을 바라볼 때, 지구중심 O, 관측국 B, 관측국 A 순서로 거리가 멀다고 가정하는 것이다. 기하학적인 지연은 그림 8과 같이 관측국 A, B순서로 기하학적 지연에 대한 더미(Dummy)

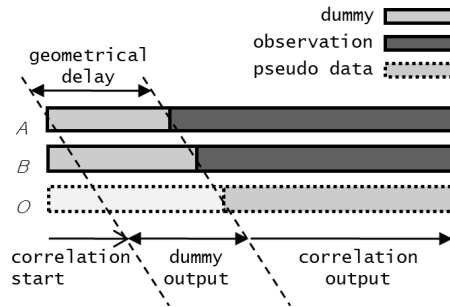


그림 8. 기하학적 지연에 대한 상관처리.

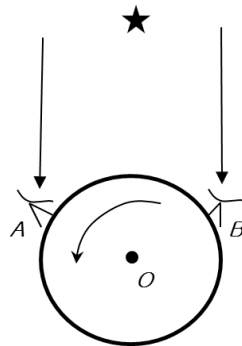


그림 9. 지구의 자전에 의한 비트 점프 발생.

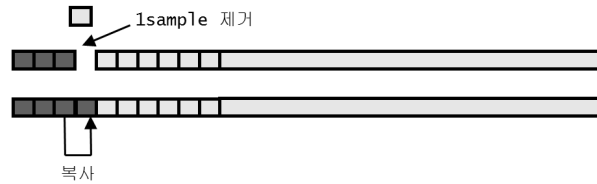


그림 10. 기준국 기준 비트 점프.

데이터가 입력되고, 지구중심 O에 대해서는 의사(Pseudo) 데이터가 입력된다고 가정하여 계산한다.

지구의 공전과 자전에 의해서 지연 시간이 변화하며 이는 지연 파라미터에 포함된다(Kondo et al. 1997). 지연 시간의 변화율, 곧 기울기를 계산하여 비트 점프 처리를 수행한다. 비트 점프는 관측국이 기준국보다 멀어질 때는 1샘플에 해당하는 데이터를 제거하고, 관측국이 기준국보다 가까워질 때는 1샘플에 해당하는 데이터를 재사용하여 상관 처리하는 것을 말한다(Kondo et al. 1997). 그림 10은 그림 9에 나타낸 그림에서 기준이 되는 지구 중심 O를 대상으로 그림의 위쪽에 1 샘플이 제거된 부분이 관측국 A와 지구 중심사이를 나타내고, 그림의 아래쪽이 관측국 B와 지구 중심 O 사이를 나타낸 부분이다. 즉, 기준이 되는 지구 중심 O에서 관측국 A와 B 사이에 상관처리를 위해서는 관측국 A에서 1 샘플 제거하거나 관측국 B에서 1 샘플 복사해서 비트 점프를 통한 상관처리를 수행해

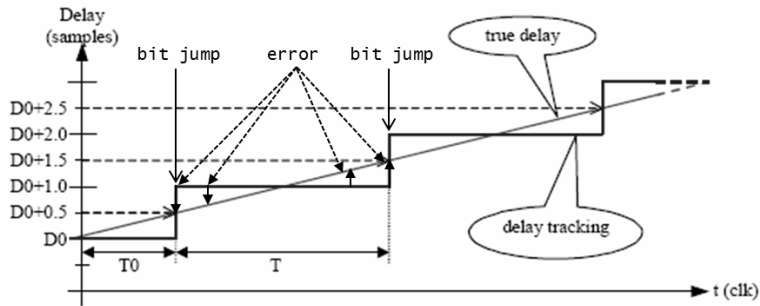


그림 11. 비트 점프의 발생과 소수 지연 에러.

야 하는 것을 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 것과 같이 그림 11은 디지털 시스템의 비트 점프를 계산하는 방법을 나타낸 것으로 그림에서 비트 점프(Bit jump)는 비트 점프라고 표시한 부분의 계단 부분에서 발생하며, 식 (8)과 같이 지연 파라미터 $\tau(t)$ 에 샘플링 주파수 f_s 를 곱한 $D(t)$ 의 절대값이 0.5 이상이 되면 비트 점프가 발생한다.

$$D(t) = \tau(t) \times f_s \quad (8)$$

개발한 소프트웨어 상관은 표준 C 라이브러리의 `nint()` 함수를 이용하여 비트 점프를 계산하도록 구현하였다.

3.3 프린지 회전 블록

프린지 회전 블록은 지구의 공전과 자전에 의한 도플러 편이에 의한 주파수의 영향을 초기위상과 위상 가속(Phase acceleration)에 의해 보정한다. 지연추적에 의해 발생하는 비트 점프의 위상 변화는 초기위상을 이용하여 보정한다. 식 (4)와 (5)에서 ϕ_0 는 초기위상이고 $F_0 \dot{r}$ 는 $\Delta\phi$ 로 위상 가속이다. 비트 점프가 발생할 경우 초기 위상도 90도 점프를 한다. 기록된 관측 데이터가 1비트 2레벨일 경우는 180도 점프를 하고, 3비트 8레벨일 경우는 45도 점프를 한다. 그림 11에 비트 점프의 발생과 소수 지연 에러(fractional delay error)(Kondo et al. 1997)에 대해 나타내었다.

프린지 회전 블록에서 출력되는 복소(Complex) 데이터는 식 (4)와 식 (5)에 의해 각각 실수값과 허수값이 된다.

3.4 FFT 블록과 ΔW 보정 블록

소프트웨어 상관계에서 FFT 블록은 그림 3에 나타낸 것과 같이 VCS 하드웨어와 동일하게 구현하였으며 주파수 채널은 2부터 262,144까지 계산할 수 있도록 하였다. 하드웨어 상관은 하드웨어 리소스(Resource)의 제한으로 시스템의 성능 개선과 추가 기능을 채용하는데 많은 어려움이 있지만, 소프트웨어 상관은 프로그래밍 언어에 의해 구현되기 때문에, FFT 연산 모듈과 같이 상관계의 핵심이 되는 부분은 PC의 메모리 등과 같은 리소스가 허용된다면 쉽게 확장할 수 있는 장점이 있다. 그리고 ΔW 보정 블록은 그림 12에서 나타낸 것과 같이 비트 점프가 발생하는 지점 사이의 에러 값은 디지털 연산에서 불가피하게 일어나는 값이다. 비트 점프는 시간 도메인에서 초기위상을 점프 시켜서 보정을 하지만 보정하지 못한 부분은 ΔW 보정을 이용하여 보정한다. 또한, 연속과 전체를 이용하여 상관처리한 후 위상의 기울어짐을 측정하여 상관 후처리 과정에서 상관계의 위상을 보정한다.

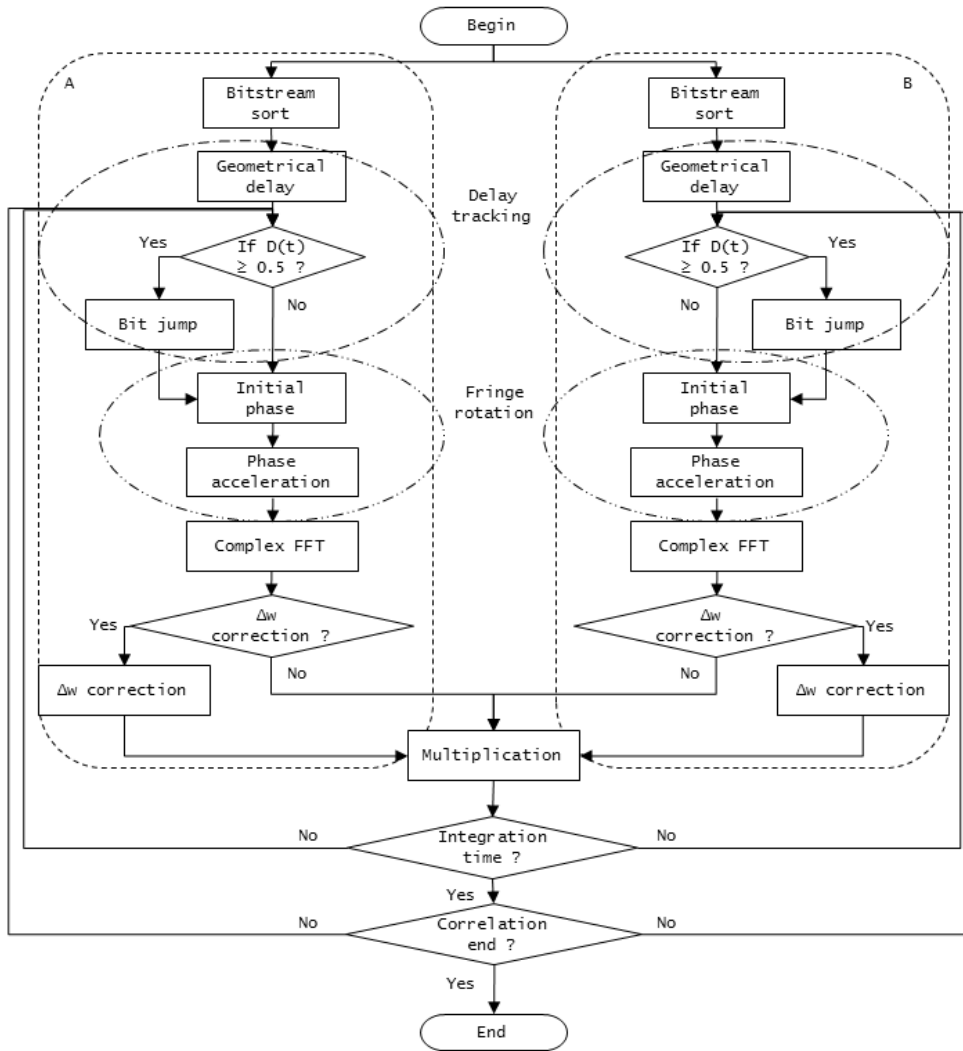


그림 12. 소프트웨어 상관기 순서도(Flowchart).

3.5 X 블록

소프트웨어 상관기의 X 블록은 그림 5에 나타낸 것과 같이 복소 FFT와 ΔW 보정을 연산한 후에 A, B 관측국 데이터를 곱한다. A 관측국의 실수 데이터 R_A , 허수 데이터 I_A , B 관측국의 실수 데이터 R_B , 허수 데이터 I_B 사이의 복소 곱셈을 한다.

소프트웨어 상관기는 입력된 관측 데이터를 정렬하는 비트스트림 정렬 블록, 지연 추적 블록, 프링지 회전 블록, 복소 FFT 블록, 곱셈 블록, 그리고 적분 블록으로 구성된다. 그림 12는 A와 B 관측국에 대한 VLBI 상관기처리 순서를 예를 들어 소프트웨어 상관기의 순차적인 순서도(Sequence flowchart)를 나타낸 것이다.

표 4. 시험에 사용한 관측 데이터의 정보.

Telescope	Source	Observation frequency	Bandwidth	Observation mode
VERA	W49N/OH43.8	22.227GHz	128MHz	VERA1
	(A beam/B beam)			
	3C446(Continuum)	22.227GHz	128MHz	VERA1
	SgrB2/RCW142	22.226GHz	16MHz	VERA7
	(A beam/B beam)			
KVN	W49N	22.227GHz	256MHz	KVN1

4. 소프트웨어 상관기의 성능시험 및 결과

4.1 사용 데이터 및 시험방법

소프트웨어 상관기의 성능검증을 위해 사용한 관측 데이터는 자기상관/상호상관처리를 위해 일본국립천문대의 VERA를 통하여 2007년도에 관측한 스펙트럼 선과 연속파 천체를 대상으로 하였다(Oyama 2009). 그리고 자기상관처리를 위해 KVN연세전파망원경으로 관측한 데이터를 사용하였다. 이 실험에서 사용한 관측 데이터의 정보를 표 3에 나타내었다.

VERA 수신 시스템은 듀얼빔(Dual beam) 시스템(VERA 2009)으로써 그림 14에 나타낸 것과 같은 서브 스트림 구조를 갖는다. 일본국립천문대의 미타카 상관센터에서 운용중인 FX상관기는 하드웨어 상관기이며, 5개 관측국, 1Gbps 처리속도, 1,024출력채널의 규격을 가지고 있다(VERA 2009). 그리고 이 연구에서 개발한 소프트웨어 상관기는 16개 관측국, 8.192Gbps 처리속도, 8,192출력채널의 규격으로 VCS와 동일한 규격으로 설계 구현하였다. 미타카 FX 상관기의 결과와 소프트웨어 상관기의 결과를 비교하기 위해서는 동일한 규격에서 수행하는 것이 타당하다고 생각되지만, 현재 개발한 소프트웨어 상관기는 VCS와 동일한 규격으로 성능검증을 위해 개발하였기 때문에 서로 다른 규격의 시스템을 정량적으로 비교하는 것은 어려움이 따른다. 간단히 예를 들어 미타카 FX 상관기의 출력채널은 1,024개 이므로 만약 256MHz 대역으로 관측한 경우 1출력 채널당 250kHz의 정보를 나타낸다. 그러나 소프트웨어 상관기의 경우는 31.25kHz의 정보를 나타내기 때문에 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 미타카 FX 상관기의 결과는 상관처리를 수행한 후 조금의 조정작업을 수행한 것이기 때문에 현재 개발된 소프트웨어 상관기는 조정작업을 수행할 수 없는 상황이므로 시험결과 그림을 비교할 때 어려움이 있을 수 있다. 즉, 앞에서 기술한 시스템의 설계규격이 다르고 상관 후처리 적용여부가 다르기 때문에 이 연구결과에서는 스펙트럼의 모양, 위상변화와 프린지 검출 등을 중심으로 이하에서 간략히 기술하고자 한다.

4.2 상관처리 시험결과

그림 13은 이 연구에서 개발한 소프트웨어 상관기의 실행화면이며, 터미널 모드에서 파라미터는 스크립트(Script)로 입력되고 윈도우즈, 리눅스 시스템에서도 구동된다. 실험에 사용한 첫 번째 관측 데이터는 스펙트럼 선(Spectral line)의 세기가 강한 천체로서 2007년에 VERA 관측팀에서 관측한 것(Oyama 2009)이며 VERA1 관측모드(Iguchi et al. 2005)이다. A 빔(beam)은 W49N이고 B 빔은 OH43.8이다.

먼저 VERA1 관측모드에서 W49N/OH43.8의 관측데이터 중 A 빔에 해당하는 W49N에 대한

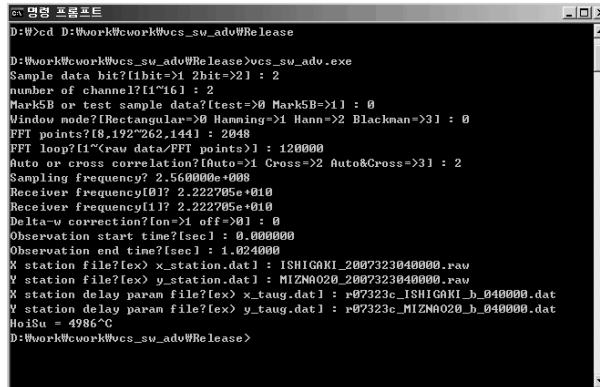


그림 13. 소프트웨어 상관기 실행 화면.

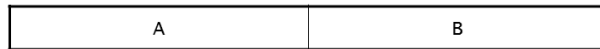


그림 14. VERA1 관측모드의 빔(서브스트림) 구성.

시험을 미타카 FX 상관기와 소프트웨어 상관기로 수행하였다. W49N 천체에 대한 VERA1 관측모드는 128MHz 대역폭이며, 관측 주파수는 22.227GHz이다. VERA 관측국은 MIZUSAWA, IRIKI, OGASAWARA, ISHIGAKI의 4 관측국이며, 미타카 FX 상관기에 의한 적분시간은 1sec이다. 그림 15는 미타카 FX 상관기에 의한 시험결과를 나타낸 것이다. VERA의 4관측국에 대한 상관조합에 의해 6개의 상호상관결과가 출력된다. 비교를 위해 이 연구에서 개발한 소프트웨어 상관기를 이용하여 W49N 천체를 대상으로 동일한 시험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 16에 나타내었다. W49N 천체는 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)이 매우 강한 천체이므로 PC에서 구동하는 소프트웨어 상관기의 상관처리 시간을 줄이기 위해 미타카 FX 상관기보다 짧은 0.096sec(=96msec) 동안만 적분하였다. 매우 짧은 시간동안이지만, 미타카 FX 상관기에서 1sec 동안 적분한 상관결과의 스펙트럼 모양을 얻는 데는 무리가 없기 때문이다. 그림 16에서 각 상관결과는 그림 15에 나타낸 것과 동일한 조합이다.

VERA1 관측모드에서 B 빔에 해당하는 천체는 OH43.8이며, 미타카 FX 상관기를 이용하여 IRIKI-OGASAWARA, MIZUSAWA-IRIKI 기선에 대한 상관처리 결과는 그림 17에 나타내었으며, 상관 적분시간은 1sec이다. 그리고 소프트웨어 상관기를 이용하여 동일한 기선에 대한 상관처리 결과는 그림 18에 나타내었다. 이때 상관 적분시간은 0.96sec이다. 앞서서도 기술한 것과 같이 미타카 FX 상관기와 개발한 소프트웨어 상관기의 규격이 동일하지 않기 때문에 정확한 비교는 할 수 없지만, 그림 17과 그림 18의 스펙트럼 모양을 비교해 보면 스펙트럼의 모양이 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

다음은 연속파 천체인 3C446을 대상으로 미타카 FX 상관기와 소프트웨어 상관기의 성능검증을 위해 상관처리시험을 수행하였다. 연속파 천체는 스펙트럼 모양이 대역통과 필터의 모양을 가지고 있으므로 상호상관처리를 하면 상관결과를 확인하는 것이 어려워 천체의 위상정보 변화와 래그 도메

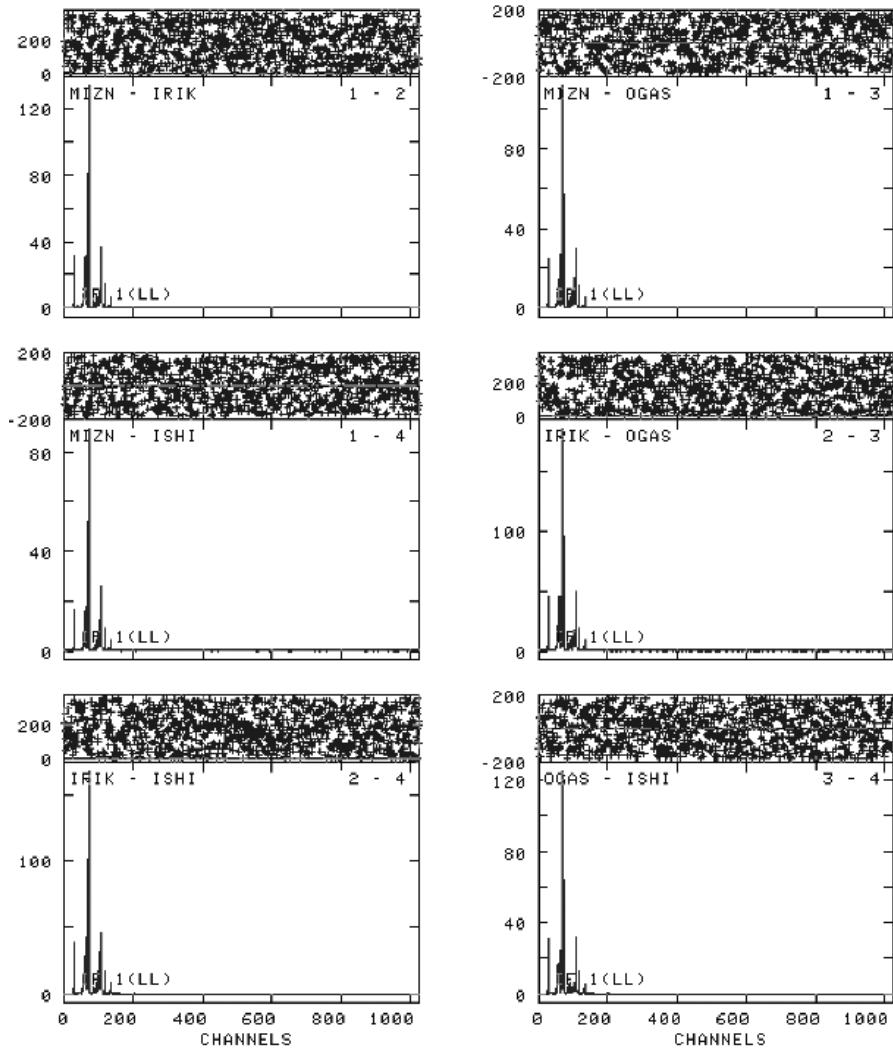


그림 15. W49N 천체의 미타카 FX 상관기 상호상관 결과(위상(위), 상호 파워 스펙트럼(아래), 1sec 적분).

인(Lag domain)에서의 프린지 검출로서 확인할 수 있다. 따라서 이번 실험의 경우 천체의 위상변화와 프린지 검출을 통하여 상관결과를 비교하였다. 그림 19는 연속파 천체인 3C446의 MIZUSAWA-IRIKI, IRIKI-ISHIGAKI 기선에 대한 미타카 FX 상관기의 상호상관결과를 나타낸 것이다. 그림 19의 위는 위상변화, 아래는 상호상관 스펙트럼을 각각 나타낸 것이다. 그림 19의 위상변화에서 상관결과에 따라 천체의 위상이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 3C446 천체에 대한 미타카 FX 상관기의 프린지 검출결과는 그림 20에 나타내었다.

미타카 FX 상관기의 상관결과와 비교를 위해 그림 21과 그림 22에 소프트웨어 상관기에 의한 3C446 연속파 천체(그림 20과 동일한 기선)의 상관결과를 각각 나타내었다. 그림 21과 그림 22의 실험결과에서 미타카 FX 상관기와 비교하여 위상의 변화가 약하지만 위상이 확연히 변화하고 있음을

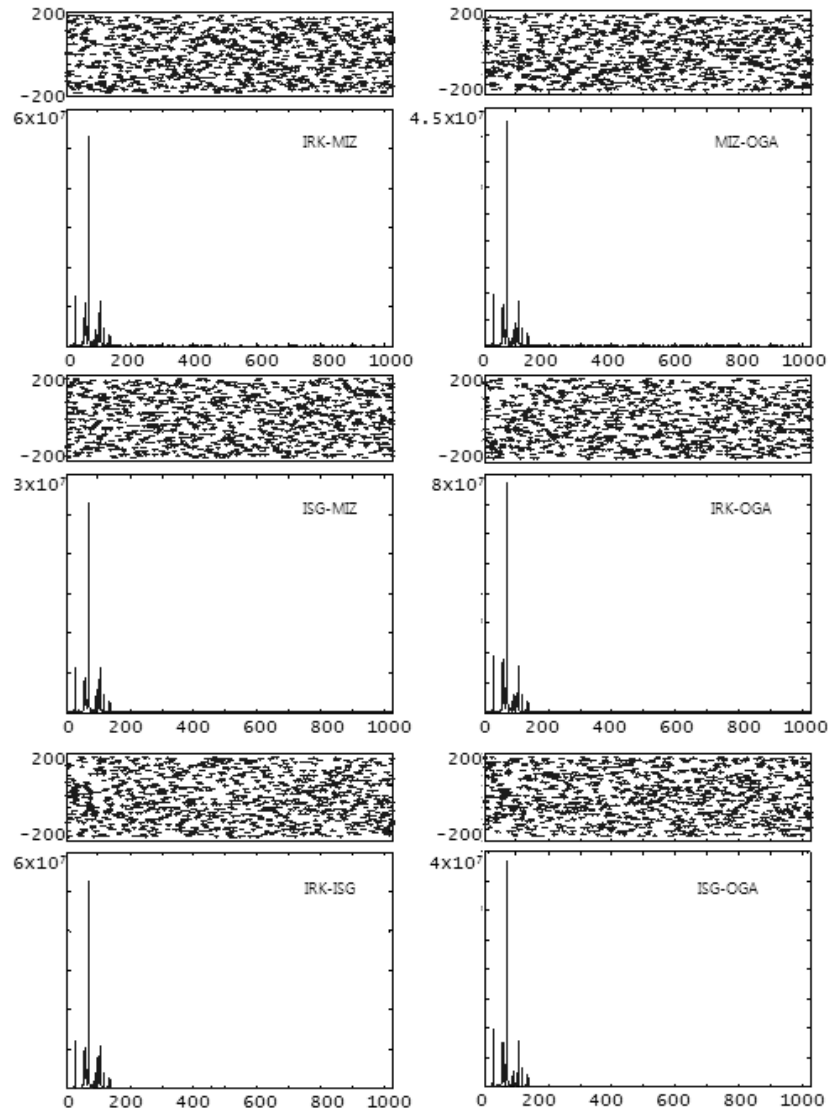


그림 16. W49N 천체의 소프트웨어 상관기 상호상관 결과(위상(위), 상호 파워 스펙트럼(아래), 0.096sec 적분).

확인할 수 있으며, 프린지도 검출되는 것을 확인하였다.

개발한 소프트웨어 상관기의 성능확인을 위해 사용한 세 번째 관측 데이터는 VERA7 관측 모드로 IRIKI-OGASAWARA, MIZUSAWA-IRIKI 기선에서 관측한 스펙트럼 선 천체인 SgrB2와 RCW142이다. VERA7 관측모드는 그림 23에 나타난 것과 같이 16MHz 대역폭을 갖는 16 서브스트림으로 구성되며, KVN의 관측 모드 5(오세진 외 2007)에 해당한다. 그림 23에 나타난 것과 같이 1번째 서브스트림은 A 빔으로 SgrB2 천체이고, 9번째 서브스트림은 B 빔으로 RCW142 천체이다. 이 실험에서는 A 빔만 실험에 사용하였으며 각 상관기의 실험결과는 그림 24와 그림 25에 각각 나타내

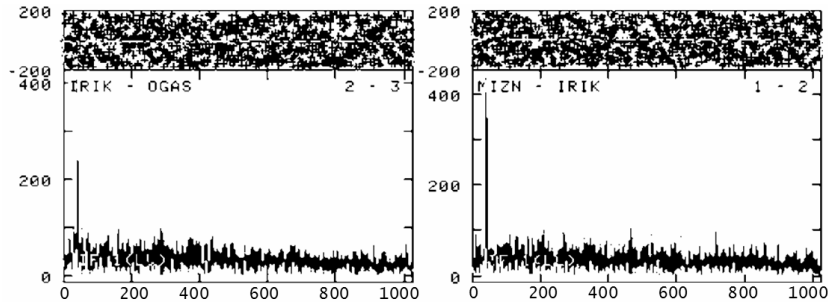


그림 17. OH43.8 천체의 미타카 FX상관기 상호 상관 결과(1sec 적분).

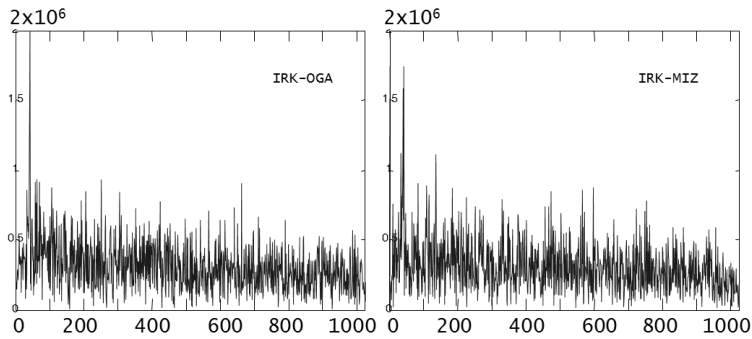


그림 18. OH43.8 천체의 소프트웨어 상관기 상호 상관 결과(0.96sec 적분).

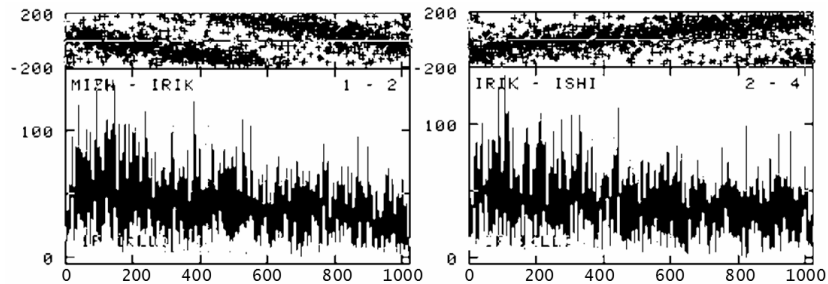


그림 19. 3C446 연속파 천체의 미타카 FX 상관기 상호 상관 결과(1sec 적분).

었다.

미타카 FX 상관기의 상관결과인 그림 24와 소프트웨어 상관기의 상관결과인 그림 25를 비교해 보면, 스펙트럼의 모양이 유사함을 알 수 있다.

KVN연세전파망원경으로 관측한 데이터를 이용하여 개발한 소프트웨어 상관기의 자기상관 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 관측 데이터는 스펙트럼 세기가 강한 W49N 천체이며 KVN의 관측 모드 1인 256MHz 대역폭으로 Mark5B(Whitney 2006) 기록기로 기록한 것이다. 소프트웨어 상관기의 자기상관결과는 그림 26에 나타내었다. 그림 26의 자기상관결과에서 W49N 천체의 스펙트럼이

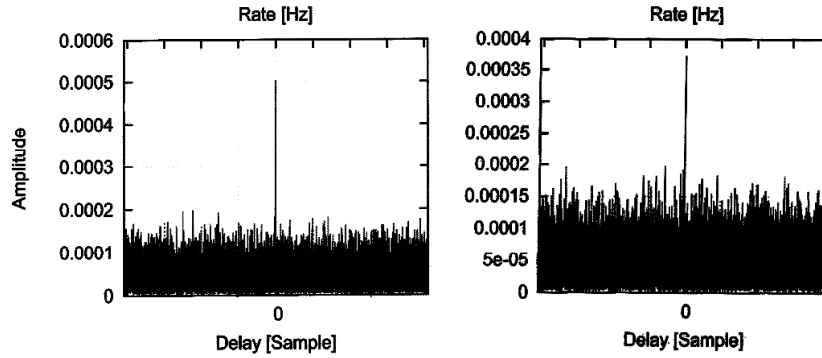


그림 20. 3C446 연속파 천체의 미타카 FX 상관기 프린지 검출결과(IRIKI-MIZUSAWA(왼쪽), IRIKI-ISHIGAKI(오른쪽)).

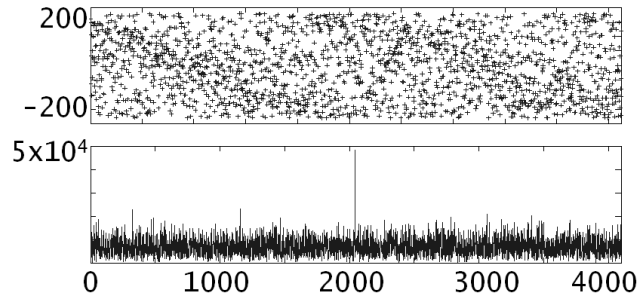


그림 21. 3C446 연속파 천체의 IRIKI-MIZUSAWA 기선에서 소프트웨어 상관기 상호상관 결과(위상변화(위), 프린지 검출(아래), 0.96sec 적분).

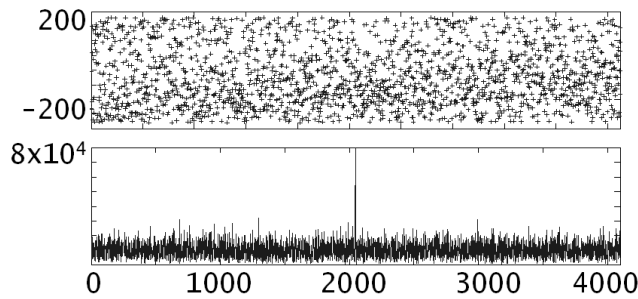


그림 22. 3C446 연속파 천체의 IRIKI-ISHIGAKI 기선에서 소프트웨어 상관기 상호상관 결과(위상변화(위), 프린지 검출(아래), 1.92sec 적분).

896MHz 부근에서 출력되는 확인할 수 있다.

4.3 결과고찰

이 연구에서 개발한 소프트웨어 상관기의 성능확인을 위해 일본국립천문대의 VERA 관측망에서 관측한 데이터와 KVN의 관측 데이터를 대상으로 상관처리 시험을 수행하였으며, 하드웨어 상관

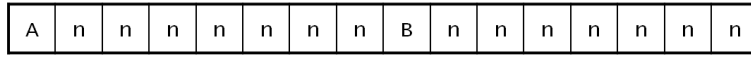


그림 23. 빔(서브스트림) 구성(16 서브스트림 A: A 빔, B: B 빔, n: 노이즈(noise)).

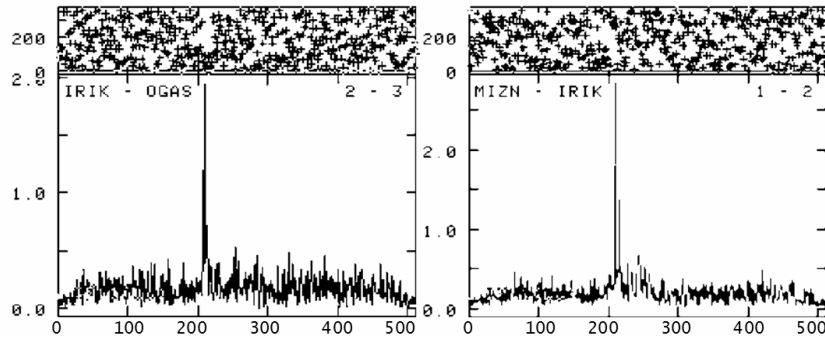


그림 24. SgrB2 천체의 미타카 FX 상관기 상호상관 결과(IRIKI-OGASAWARA 기선(왼쪽), MIZUSAWA-IRIKI 기선(오른쪽), 1sec 적분).

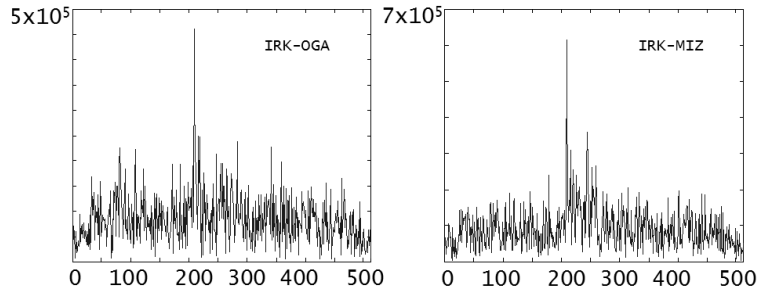


그림 25. SgrB2 천체의 소프트웨어 상관기 상호상관 결과(IRIKI-OGASAWARA(왼쪽),IRIKI-MIZUSAWA(오른쪽), 1.92sec 적분).

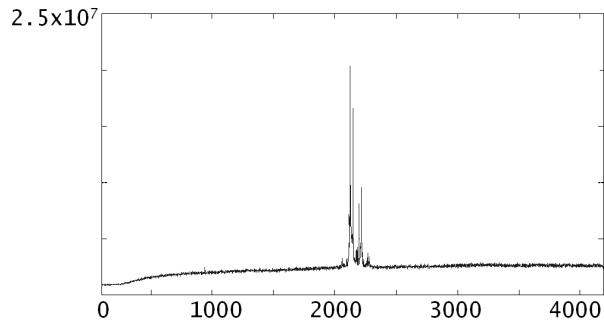


그림 26. KVN 관측 데이터 W49N 천체의 소프트웨어 상관기 자기상관 결과.

기인 미타카 FX 상관기와 비교검토 하였다. 그런데, 미타카 FX 상관기의 하드웨어 규격과 소프트웨어 상관기의 규격이 동일하지 않고, 상관처리를 위해 입력되는 파라미터의 조건이 엄밀하게 일치하지 않는다. 따라서 소프트웨어 상관기의 결과는 미타카 FX 상관기와 완벽하게 일치하는 결과를 얻을 수 없었으며, 정확한 비교를 하는 것은 어려움이 있다고 판단된다. 하지만 개발한 소프트웨어 상관기의 성능을 확인하기 위해서는 이미 상관결과를 알고 있는 동일한 관측 데이터를 대상으로 실험을 수행할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 하드웨어 상관기인 미타카 FX 상관기의 상관결과를 대상으로 스펙트럼 모양, 프린지 검출, 위상변화 등을 통하여 비교실험을 수행한 결과를 이상에서 기술하였다. 현재 소프트웨어 상관기는 상관처리의 핵심부분이 완성된 상태로서, 상관 후처리 등 보조기능이 완벽하게 갖추어진 상태는 아니다. 그러므로 향후 상관 후처리와 사용자 인터페이스를 개선한 최종 개발이 완료되면 동일한 상관결과를 얻을 것으로 기대한다. 그리고 개발된 소프트웨어 상관기가 멀티코어 CPU를 채용한 대용량 서버 시스템에서 구동되고, 전과영상합성 작업을 수행하면 다른 하드웨어 상관기와 동일한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 연구에서는 한일공동VLBI상관기(KJJVC)의 핵심부분품인 VLBI상관서브시스템(VCS)과 동일한 규격을 갖는 소프트웨어 상관기를 개발하였다. 개발한 소프트웨어 상관기의 성능을 확인하기 위해 일본국립천문대의 VERA 관측망으로 관측한 스펙트럼 선과 연속파 천체를 이용하여 상관처리 실험을 수행하였으며, 상관처리 결과는 하드웨어 상관기인 미타카 FX 상관기의 상관결과와 비교하였다. W49N과 OH43.8, SgrB2의 스펙트럼 선 천체의 미타카 FX 상관기와 동일한 상관결과를 확인하였다. 그리고 연속파 천체인 3C446에 대해서도 위상변화와 프린지 검출에 의해 미타카 FX 상관기의 상관결과와 동일함을 알 수 있었다. 이상의 실험결과에서는 스펙트럼 모양, 위상변화, 프린지 검출 등을 미타카 FX 상관기와 비교하였다. 이 연구에서 개발한 소프트웨어 상관기는 KJJVC의 핵심부분품인 VCS와 동일한 규격을 갖고 있으며, 미타카 FX 상관기의 규격, 파라미터 입력, 상관 후처리 등이 동일하지 않는 점이 있다. 따라서 미타카 FX 상관기의 상관결과와 정확히 일치하는 결과를 얻는 데는 어려움이 있지만, 이러한 상관처리실험을 통하여 개발한 소프트웨어 상관기가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 향후에는 KVN에 의해 관측한 많은 데이터를 대상으로 상관처리 시험을 수행하고, KJJVC와 함께 KVN을 위한 소프트웨어 상관기로 활용할 수 있도록 프로그램을 개선할 예정이다.

감사의 글: 이 논문은 한국천문연구원 2009년도 "한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발" 연구과제의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- 오세진, 노덕규, 염재환, 강용우, 박선엽, 변도영, 손봉원, 정현수, 이창훈, 김효령, Kobayashi, H., & Kawaguchi, N. 2008, in 천문관측기기 워크숍 (대전: 한국천문연구원), pp.53-64
- 오세진, 노덕규, 염재환, 변도영, 이창훈, 정현수, 제도홍, Wajima, K., & Kawakami, K. 2007, 한국천문학논총, 22, 63
- Benson, J. M. 1995, in Very Long Baseline Interferometry and the VLBA, eds. J. A. Zensus, P. J.

- Diamond, & P. J. Napier (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), pp.117-131
- Campbell, R. M., 2004, in Proceedings of the 7th European VLBI Network Symposium, eds. R. Bachiller, F. Colomer, J. F. Desmurs, & P. Vicente (Toledo: Observatorio Astronomico Nacional), pp.245-248
- Hirabayashi, H., Murata, Y., Edwards, P. G., Asaki, Y., Mochizuki, N., Inoue, M., Umemoto, T., Kameno, S., & Kono, Y. 2004, in Proceedings of the 7th European VLBI Network Symposium, eds. R. Bachiller, F. Colomer, J. F. Desmurs, & P. Vicente (Toledo: Observatorio Astronomico Nacional), pp.285-288
- Ifeachor, E. C. & Jervis, B. W. 1993, Digital Signal Processing, A Practical Approach (New York: Addison-Wesley), p.294
- Iguchi, S., Kurayama, T., Kawaguchi, N., & Kawakami, K. 2005, PASJ, 57, 259
- Iguchi, S. & Okuda, T. 2008, PASJ, 60, 857
- Kim, H.-G., Han, S.-T., Sohn, B. W., Oh, S.-J., Je, D.-H., Wi, S.-O., & Song, M.-G., 2004, in Proceedings of the 7th European VLBI Network Symposium, eds. R. Bachiller, F. Colomer, J. F. Desmurs, & P. Vicente (Toledo: Observatorio Astronomico Nacional), pp.241-244
- Kimura, M. 2007, in IVS NICT Technical Development Center News, no. 28, National Institute of Information and Communication Technology (Kashima: NICT), p.22
- Kondo, T., Kimura, M., Koyama, Y., & Osaki, H. 2004, in IVS 2004 General Meeting Proceedings (Ottawa: IVS Coordinating Center), pp.186-190
- Kondo, T., Takahashi, Y., & Koyama, Y. 1997, Very Long Baseline Interferometer (Tokyo: Ohmsha IOS Press), pp.45-108
- Okumura, S. K., Iguchi, S., Chikada, Y., & Momose, M. 2003, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol.306, New Technologies in VLBI, ed. Y. C. Minh (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), pp.259-270
- Oppenheim, A. V. & Schafer, R. W. 1989, Discrete-Time Signal Processing (New Jersey: Prentice Hall), pp.636-640
- Oyama, T. 2009, private communication
- Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson Jr, G. W. 2001, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy (New York: Wiley), pp.254-382
- VERA Observatory 2009, VERA Status Report (Tokyo: NAOJ), pp.1-25
- Whitney, A. R. 2000, in IVS 2000 General Meeting Proceedings, eds. N. R. Vandenberg & K. D. Baver (Kotzing: IVS Coordinating Center), pp.187-205
- Whitney, A. R. 2006, 2004, in IVS 2004 General Meeting Proceedings (Ottawa: IVS Coordinating Center), p.177
- Whitney, A. R., Cappallo, R., Aldrich, W., Anderson, B., Bos, A., Casse, J., Goodman, J., Parsley, S., Pogrebenko, S., Schilizzi, R., & Smythe, D. 2004, Radio Science, 39, 1