KVN을 위한 소프트웨어 상관기 분석연구

A Study on Software Correlator Analysis for Korean VLBI Network

*오세진, **노덕규, ***김광동, ****이창훈, *****정현수
Se-Jin Oh, Duk-Gyoo Roh, Kwang-Dong Kim, Chang-Hoon Lee, Hyun-Soo Chung

Abstract - 한국천문연구원에서는 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network; KVN)에서 사용할 관측 시스템 중에서 소규모 자료획득시스템(DAS) 구축을 위하여 기가비트 고속샘플러, PC-VSI 보드, 소프트웨어 상관기를 도입하였다. 고속샘플러는 기가비트급 ADS1000, PC-VSI 보드는 VSI-H(VLBI Standard Interface Hardware) 표준을 따른 PCI 버스를 채택하고 있어 일반 컴퓨터에 설치하여 동작되며, 이 규격을 갖춘 시스템과의 데이터 입출력이 가능하다. 소프트웨어 상관기는 일본 NICT와의 연구협력을 통하여 본 연구원에서도 사용할 수 있게 되었으며, FX와 XF 형 2가지를 모두 갖추고 있다. 하지만 현재 구현된 소프트웨어 상관기는 측지 VLBI 관측을 위해 설계되어 있어, 향후 KVN의 하드웨어 상관기와 함께 천문 VLBI 관측을 위한 3기선 분의 소프트웨어 상관기로 개량하려고 한다. 이상에서 소개한 시스템을 좁은 의미로 K5 시스템이라고도 한다. 본 논문에서는 PC-VSI 보드에 대해 간략히 소개하고, K5 시스템을 이용하여 관측한 결과를 빨리 관측자가 원하는 정보를 얻을 수 있는 소프트웨어 상관기의 구조에 대해서도 소개하고자 한다.

Key Words :Korean VLBI Network, PC-VSI, K5 system, Software Correlator, XF/FX

1. 서론

1960년대에 미국에서 개발된 세계 최초의 디지털 VLBI 시스템 Mark1에서는 계산기 프로그램에 의해 상관처리(소프트웨어 상관처리)가 수행되었다[1]. 당시의 대형 계산기 IBM360/50에서, 1비트 720kHz 샘플링의 15lag 상관함수의 200초 적분에 필요한 시간은 90분이라고 보고되고 있다(샘플·lag당 처리시간을 계산하면 2.5μs). 그 후 본격적인 VLBI 시스템 Mark2와 Mark3가 개발되었지만, 당시의 계산기에서는 측지 VLBI 실험과 같이 24시간 관측을 정상적으로 처리하는 계산능력은 없었고, 데이터 처리는 하드웨어 상관기에 의존하고 있었다. 일본의 NICT VLBI 그룹에서도 CCC(Cross Correlation in a Computer)라고 부르는 프린지 테스트용 소프트웨어 상관처리 프로그램을 개발하였지만, 당시(1980년대)의 HP-1000 시리즈 소형컴퓨터(HP-1000/45F)에서 1비트 4MHz 샘플링 데이터의 64lag 상관함수를 4초 적분하는 것으로 HP-1000/45F에서는 8시간(샘플·lag 당 처리시간은 28μs), HP-1000/A900에서는 2.6시간(샘플·lag 당 처리시간은 9μs)의 처리시간이 필요하였다[2]. 일본 NICT에서 개발한 CCC는 일본 국토지리원과 공동으로 실시한 미야자키-카시마 기선의 VLBI 실험(1986년 10월 6일)의 프린지 테스트에 사용되었고, 당시로서는 획기적인 전화회선을 이용한 데이터 전송을 수행하였고, 관측으로부터 10시간 후에는 프린지를 검출하는 것을 성공하였다.

*한국천문연구원 전파천문연구부 선임연구원
**한국천문연구원 전파천문연구부 선임연구원
***한국천문연구원 전파천문연구부 책임연구원
****한국천문연구원 전파천문연구부 책임연구원
*****한국천문연구원 전파천문연구부 책임연구원

한편, PC는 거의 무어의 법칙에 따라 성능향상을 보이고 있어, 현재 PC의 계산속도는 초기의 대형 계산기보도도 확실히 고속이 되었다. 그래서 저가의 PC를 사용한 소프트웨어 상관처리(소프트웨어 상관기)의 실용화가 앞으로 수년 내에 가능할 것으로 보인다. 그래서 일본 NICT에서는 PC기반의 VLBI 단말기[K5시스템]을 개발하였으며, 개발 당초부터 PC를 사용한 소프트웨어 상관처리를 목적으로 CCC를 발전시킨 K5 소프트웨어 상관기의 개발을 수행하였다. K5 소프트웨어 상관기는 측지 VLBI용 하드웨어 상관기와 호환성을 가지고 있는 상관 데이터를 얻는 것을 주 목적으로 한 상관기이며, 그 실체는 FreeBSD/linux/Windows에서 동작 가능한 C 프로그램이다. 계속해서 처리속도 향상을 위한 프로그램 개량이 수행되고 있으며, 현재는 1비트 4MHz 샘플링 데이터 1ch의 32lag 상관을 실시간으로 처리할 수 있다(샘플·lag 당의 처리시간으로 계산하면 약 8nsec. 단, CPU로서 Pentium III 1GHz를 사용한 경우). 본 논문에서는 주로 한국천문연구원에서 일본 NICT와 연구협정을 통하여 사용을 허락받은 K5 소프트웨어 상관기에 대해서 간략히 알아보고, 향후 KVN을 위해 소프트웨어 상관기의 구축계획에 대해 간략히 기술하고자 한다.

2. PC-VSI 보드

1Gbps를 초과하는 고속 샘플링 데이터를 기록처리하는 것을 목적으로 VLBI 표준 인터페이스(VSI: VLBI Standard Interface, Versatile Scientific Interface)의 하드웨어사양에 표준인 신호입력을 기록하기 위한 인터페이스 보드(PC-VSI)의 개발도 진행되고 있다. 현재는 VSI에 의한 데이터 입력이 완성되었지만, 이후, 개발을 계속하여 VSI에 의한 데이터 출

력에도 대응하는 것을 계획하고 있다. 이러한 시스템을 편성하는 것으로 낮은 데이터율에서부터 높은 데이터율까지의 대응가능성, VSI에 의한 데이터 입출력까지의 대응하기 위한 것이다.

기가비트 VLBI 시스템은 IF 신호를 샘플링하는 A/D 샘플러(ADS1000, ADS2000)과 샘플링 데이터를 PC로 저장하는 전용의 PCI 카드, 그리고 RAID 기록장치를 장착한 범용 PC 1대로 구성된다. 관측 때에 IF신호, 10MHz, 1PPS 신호를 A/D로 입력하는 것만으로 통상의 VLBI 관측이 가능하다. ADS1000은 1채널의 A/D 부를 가지며, 1024Msps의 속도로 2bit 양자화가 가능하며 주로 천문관측용으로 개발되어 현재 많은 기관에서 사용되고 있다. ADS2000은 16채널의 A/D 부를 가지며 각 64Msps의 속도로 2bit 양자화가 가능하며 주로 측지용 목적으로 개발되었다. 이러한 샘플러의 최대 전송속도는 2048Mbps이며, 이 데이터를 PC에 저장하기 위해 66MHz/64bit의 PCI 버스를 이용한 데이터 캡처 보드가 사용된다. 이 보드에서 획득된 데이터는 RAID로 구성된 하드디스크에 기록된다. 관측 후에 디스크만 떼어내어 소프트웨어 상관국에 전달 또는 네트워크를 사용한 데이터의 전송을 수행한다. 이 시스템에서는 A/D로 샘플링된 데이터는 VSI 케이블을 통하여 PCI 접속된 캡처보드로 전송되고 여기서는 시간적으로 연속 동작한다. 캡처보드는 내부에 1024Mbit의 버퍼를 2면 가지고 있으며 1Gbps의 관측에는 1초마다 내부 버퍼를 바꾼다. 이 내부 버퍼의 데이터는 폭발적으로 PC의 메인 메모리의 DMA를 이용하여 전송된다. 이때의 속도는 66MHz/64bit의 PCI 버스의 이론한계인 4Gbps에 가까운 속도로 수행되며 1Gbit의 데이터라면 0.25초 정도에 종료된다. 이 사이의 처리는 2회로 분할된 동작과 1회의 DMA 전송만으로 실행된 CPU에는 전체 부하가 발생되지 않기 때문에 높은 부하로의 사용 때에도 안정적인 동작이 가능하다. 이 메인 메모리는 복수의 응용으로부터 동시에 참조할 수 있고, 데이터 기록중에 자기상관처리와 네트워크로의 데이터 전송도 병렬로 실행가능하다(그림 1).

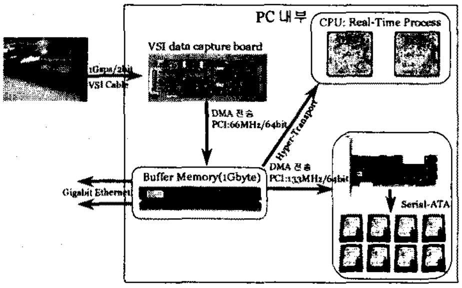


그림 1. PC-VSI 보드를 장착한 시스템의 데이터 흐름.

3. 소프트웨어 상관기

3.1 디지털 상관이론

상관함수는 일반적으로 시간영역에서 두 입력신호의 상관(correlation)을 측정하는 것을 의미한다. 즉, 기준신호에 대해 일정한 거리, 시간, 혹은 속도만큼 지연된 신호와의 상호 연관성을 수학적 지표로 나타낸 것이다. 즉, 두 개의 랜덤 프로세스 $X(t)$와 $Y(t)$를 비교하기 위해서는 두 신호 혹은 프로세스의 성질을 가장 잘 나타내 주는 상호 상관함수(cross correlation) R_{XY}를 도입하는 것이 일반적이다. 이 상관함수는 다음과 같이 표현되는 기댓값이다[3].

$$R_{XY}(\tau) = E[X(t)Y(t-\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} xy f_{X(t),Y(t-\tau)}(x,y)\,dx dy \quad (1)$$

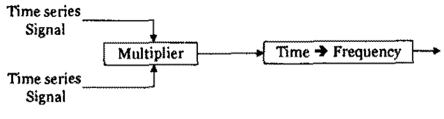
여기서 τ는 time lag이다. 이러한 결과가 -1과 1사이의 값을 갖도록 규격화하기 위해서 상관계수 $\rho(\tau)$를 다음과 같이 도입할 수 있다.

$$\rho(\tau) = \frac{R_{XY}(\tau)}{\sqrt{\sigma_X^2 \sigma_Y^2}} \quad (2)$$

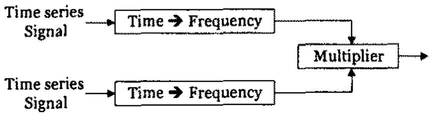
여기서 σ^2는 variance이다. 이 식에서 ρ가 1인 프로세스를 correlated라 하고, 0인 경우를 uncorrelated라 하며, -1인 경우를 anti-correlated라 정의한다.

이렇게 정의되는 상관함수에서 $X(t)$와 $Y(t)$가 같은 프로세스라 하면, 이때의 $R_{XX}(\tau)$로 표시되는 상관함수를 그 프로세스의 자기상관함수라고 한다. 이 자기상관함수를 Fourier 변환하면 그 프로세스의 power spectral density를 얻게 된다.

상관기에는 그림 2에 나타낸 것과 같이 2가지 종류가 있다. 하나는 XF형의 상관기로서 이것은 시간 영역에서 먼저 상호상관처리를 수행하고 주파수 영역으로 변환하기 위해 Fourier 변환을 수행한다. XF형 상관기는 지연 lag의 수를 감소시킴으로써 고속의 처리속도를 달성하기 위해 개발되었다. 백색잡음의 상관함수는 매우 뾰족한 형태로 표현되기 때문에, 32lag 또는 이보다 작은 지연 lag의 수를 감소할 수 있다. 따라서 XF 형 상관기는 주로 측지 VLBI 시스템(KSP, K3, Mark4 상관기)에 사용되고 있다. 다른 하나는 FX형 상관기로서 시간 영역의 2개의 데이터 스트림(data stream)이 우선 Fourier 변환을 통하여 주파수 영역으로 변환된다. 그리고 곱셈기(multiplier)를 이용하여 상호 스펙트럼을 구하게 된다. 마지막으로 Fourier 역변환을 수행하여 상호상관을 최종적으로 구하게 된다. 이 FX형 상관기는 긴 지연 lag를 쉽게 처리할 수 있고 높은 스펙트럼 분해능이 필요한 천문응용 분야의 데이터 처리에 사용된다. K5 소프트웨어 상관기는 FX/XF형 상관기가 모두 C 프로그램 형식으로 구축되어 있다.



(a) XF type correlator.



(b) FX type correlator.

그림 2. 2종류의 상관기.

3.2 소프트웨어 상관기

K5 소프트웨어 상관기는 우선 KSP 상관기와 같은 XF 방식(시간영역 상관처리)(그림 3)으로 개발을 수행한 프린지 검

출의 실제 증명을 수행하는 것과 함께, 처리시간을 측정하는 데 수행되었다. 개발당초, 1비트 4MHz 샘플링 데이터 1ch의 32lag 상관함수 1초 적분에 필요한 시간은 Pentium II 300MHz의 CPU를 사용하여 약 10초가 된다. 그 후, 소프트웨어의 개량 및 고속의 CPU(Pentium III 1GHz)를 사용함으로써, 처리시간을 약 2초까지 단축하였다. XF 방식 상관처리의 알고리즘의 검증과 처리시간에 대한 전망을 얻은 후, 우주탐사체의 상대 VLBI 관측에 K5를 사용하기 위해, lag 수의 확대가 쉬운 즉, 주파수 분해능의 향상이 쉬운 telemetry carrier 신호와 같은 협대역 신호처리의 상관처리에 적합한 FX 방식(주파수 영역에서의 상관처리)의 소프트웨어 상관기의 개발도 시작되었다(그림 4). 그래서 lag 수를 임의로 크게 설정할 수 있는 소프트웨어 상관기가 개발되었으며, 2002년 여름부터는 실제 관측에 사용하고 있다.

FX 방식의 소프트웨어 상관기는 K5 측지 실험에도 사용되고 있고, 기존의 하드웨어 상관기와 오차범위 내에서 기선해석 결과가 일치하는 것도 확인할 수 있다. 단, 처리의 최적화는 수행되지 않았지만, 실시간 VLBI를 실현하기 위해서는 더욱 고속화할 필요가 있다. 그래서 다시 XF 방식으로 되돌아가서, 데이터를 측지 VLBI 관측에서 가장 좋게 이용되고 있는 1비트 샘플링 데이터로 한정하여, 소프트웨어 상관기의 고속화에 집중하였다. 그 결과, 현재는 1비트 4MHz 샘플링 데이터 1ch의 32lag 상관함수 1초 적분에 필요한 시간 (Pentium III 1GHz 사용)은 약 1초로 거의 실시간 처리가 가능한 속도가 되었다. 그림 5에 1비트 8MHz 샘플링 데이터를 FX 방식(fx_cor) 및 XF 방식(cor)으로 처리한 경우의 1초 적분에 필요한 시간을 lag 수 및 ch 수를 파라미터로 하여 나타내었다(주: K5 시스템은 PC 1대당 4ch 데이터를 획득한다). 처리시간에는 ch 사이의 위상차를 교정하기 위해 주입된 위상교정신호(Pcal) 위상의 검출에 필요한 시간도 포함되어 있다. FX 방식은 lag 수의 차이에 의해 큰 처리시간의 변화는 볼 수 없지만, XF 방식은 lag 수에 거의 비례하여 처리시간이 변화하고, 512lag 이하에서는 XF 방식이 고속인 것을 나타났다. 역시 측지 VLBI 상관기의 lag 수는 초기 (K3-VLBI 시스템 시대)에 있어서는 8이었지만, 최근의 VLBI 처리에서는 32lag가 표준이 되었다. 또한 우주탐사체의 VLBI 실험에는 1024lag 또는 그 이상을 사용한다.

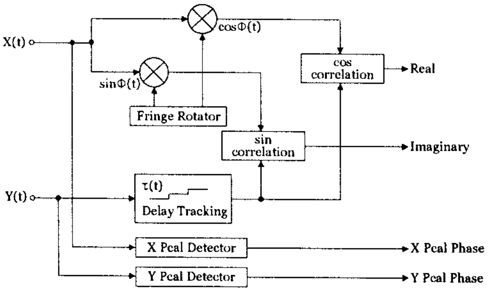


그림 3. XF 형의 소프트웨어 상관기 구조.

그리고 소프트웨어 상관기를 구축하는데 있어서 가장 중요한 알고리즘이 그림 6에 나타낸 것과 같이 바로 분산처리에 의해 시스템이 구현되었다는 것이다. 이것은 컴퓨터 시스템의 속도에 의존하고 있는 소프트웨어 상관기의 속도를 개선하기 위한 방법으로 널리 사용되고 있다. 즉, 입력된 데이터 스트림은 짧은 시간 성분으로 분해되고 상관처리는 분해된 데이터의 각 쌍에 대해서 수행하는 방법을 채택하고 있다.

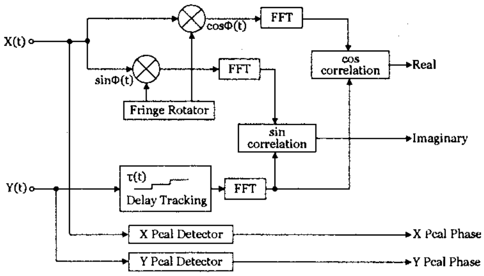


그림 4. FX 형의 소프트웨어 상관기 구조.

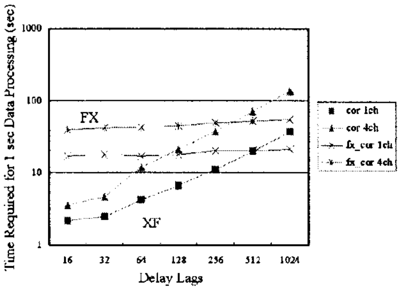


그림 5. FX(fx_cor)방식과 XF(cor)방식의 처리시간비교.

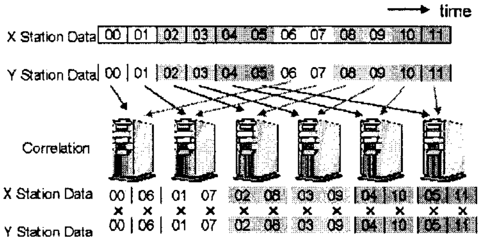


그림 6. 분산처리의 예.

4. 향후 KVN 상관기 계획

KVN을 위한 상관기 개발에서는 하드웨어 상관기 개발을 목표로 하고 있다. 하지만, 개발된 상관기의 검증을 위해 기존에 개발된 측지 VLBI용 소프트웨어 상관기를 활용하여 3 기선용, VLBI 천문용 상관기로 확장 개량할 예정이다. 현재 2004년부터 5개년 계획으로 프로젝트가 진행 중에 있으며, 2010년경에는 KVN으로 관측된 데이터를 상관처리 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Bare et al., "Interferometer experiment with independent local oscillator," Science, 157, pp. 189-191, 1967.

[2] Kondo et al., "Cross-correlation processing in a computer for VLBI fringe tests," J. Commun. Res. Lab., Vol. 38, No.3, pp. 503-512, 1991.

[3] 이창훈 et al., "400MHz autocorrelation spectrometer," 한국우주과학회지, 제19권 제4호, pp. 327-340, 2002.