

전파영상합성기의 보조시스템으로서의 Station Unit의 기능 고찰

Study on Station Unit Function for Sub-system of Cross-Correlator

오세진, 노덕규, 정현수, 김광동, 이창훈
한국천문연구원 전파천문연구부

Se-Jin Oh, Duk-Gyoo Roh, Hyun-Soo Chung, Kwang-Dong Kim, Chang-Hoon Lee
Radio Astronomy Division
Korea Astronomy & Space Science Institute
E-mail : sjoh@trao.re.kr

요 약

한국천문연구원에서는 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network: KVN)을 위한 전파영상합성기(상관기) 개발을 진행하고 있다. 전파관측 VLBI 시스템 중 상관기(Correlator) 시스템의 한 구성요소로서 데이터 입력 부분에 각 관측 사이트의 데이터를 사전 처리하는 Station Unit(SU)이 있다. VLBI 시스템에서, 디지털화된 데이터의 다중채널은 테이프 또는 하드디스크에 다중트랙 형태로 인코딩된다. 이 SU의 주요기능은 다중트랙으로부터 인코딩된 데이터를 디코딩하고, 마치 기록되지 않은 것과 같이 채널기반의 샘플 스트림으로 이 데이터를 복원하는 것이다. 이 기능을 원활하게 수행하기 위해서, SU는 논리적으로 재생기 시스템과 함께 시스템이 통합될 필요가 있다. 본 논문에서는 전파 천문 VLBI 시스템 중 SU의 기능과 구조에 대해 고찰하고자 한다.

1. 서론

초장기선전파간섭계(VLBI; Very Long Baseline Interferometry)[1]는 천문관측장치 중에서 가장 높은 공간분해능을 실현할 수 있는 관측장치이다. 여러 개의 전파망원경에서 얻어진 전파정보를 합성하는 것으로서, 그 공간에 떨어져 있는 전파망원경 사이의 거리에 상당하는 공간분해능을 실현하는 것이 전파간섭계이다. 이 합성된 영상정보를 나타내는 것이 VLBI이다. VLBI에서는 각각의 망원경에서 수신한 우주로부터 도달하는 신호의 기하학적 지연시간을 보정하고 상관처리를 수행하여 높은 공간분해능을 실현한다[1]. VLBI 관측에 의해 매우 compact하게 밝은 천체의 중심핵의 구조를 알 수 있다. 그러나 VLBI에 의해 높은 분해능 관측은 수행할 수 있지만 여전히 어두운 천체를 관측하는 것은 어려운 일이다. 관측할 수 있는 천체의 수, 종류 등을 늘리는 것은 천문학에서는 매우 중요한 일이다. 따라서 VLBI 관측장비는 높은 감도를 가질 필요가 있다.

VLBI 관측의 마지막 단계는 각 관측소의 전파망원

경에 수신된 관측데이터를 자기테이프나 하드디스크에 기록한 후 최종 데이터를 모아서, 이를 합성하여 원하는 정보를 얻게 된다. 이 과정을 수행하는 것이 VLBI용 상관기 시스템이다[1][2]. 국제적인 VLBI 연구센터들은 더 많은 관측국(스테이션)들의 데이터와 보다 넓은 주파수 대역폭의 데이터를 합성하기 위하여 보다 빠르고 큰 용량의 상관기를 개발하여 왔다[2]. 상관기를 운영하는 각 지역 네트워크들은 자신들이 사용하고 있는 고속기록기의 데이터 기록형식에 맞춘 상관기술을 독자적으로 개발하고 있다.

한국천문연구원은 21m 전파망원경 3기를 서울, 울산, 제주 지역에 설치하여 초장기선전파간섭계로 활용할 한국우주전파관측망(KVN, Korean VLBI Network) 구축사업을 수행하고 있다. KVN은 다중 주파수 동시 관측과 고속 절환 구동을 토대로 대기에 의한 위상흔들림을 보상하는 방법을 완성하여 cm파뿐만 아니라 mm파까지 VLBI관측의 영역을 넓혀나갈 예정이다. 이를 위하여 네 개의 중간주파수(IF)를 동시에 관측하는 자료획득시스템을 도입하며, 현재 최대 자료기록속도

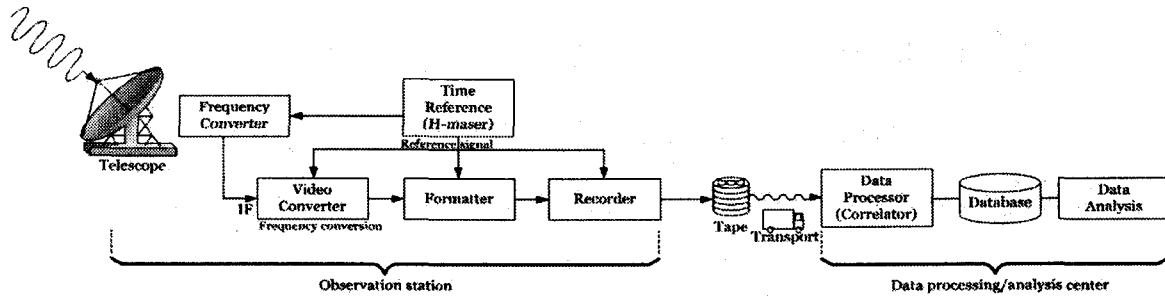


그림 1. 기본적인 VLBI 관측 시스템.

인 1Gbps(총대역폭 256MHz)에 적합한 디지털 필터를 채용하고 있다. 앞으로 각 전파망원경과 상관기가 광섬유로 연결될 경우 최대 4IF×2Gbps(총대역폭 2GHz)의 관측 데이터를 처리할 계획이다. 이에 따라, 관측 국당 최대 8Gbps, 5 관측국 10기선(향후 10관측국 45기선으로 확장 가능하도록 설계), 채널당 4096 주파수 채널을 출력할 수 있는 KVN용 상관기 시스템을 개발하는 프로젝트를 진행 중에 있다[4].

본 논문에서는 우선 기존의 Mark4 상관기 시스템에 대해 살펴보고자 한다. Mark4 상관기는 기록기에 기록된 데이터를 상관기 시스템의 입력에 재생할 때 데이터의 정보를 우선 분석하는 Station Unit(SU) 시스템이 있다. 현재 KVN에서는 Mark4 상관기에서 사용하는 SU 시스템을 장착한 Mark5B 재생기를 사용할 예정이다. 이에 기존에 설계된 Mark4 상관기의 SU 특징, 기능 등에 대해서 살펴보고자 한다.

2. VLBI 시스템

그림 1에 나타난 기본적인 VLBI 관측 시스템에 대해 이하에 간략 한다[1]. 안테나로부터 전파를 수신하여 LNA로 증폭된 고주파(RF) 신호는 각 관측국이 유지하는 기준 주파수에 위상 동기된 국부발진기(LO)의 신호를 이용하여, RF신호와 비교하여 동축케이블에서의 전송 손실이 적은 중간 주파수(IF)대의 신호로 주파수 변환된다. 이처럼 주파수 표준에 동기된 신호를 LO로 사용함으로써, RF 신호의 위상정보를 지닌 채(이것을 코히어런트라고 부른다) 주파수 변환을 하는 점이 VLBI 수신장치로서 지녀야 할 중요한 점이다. 최근에는 IF대의 신호 전송을 위해 광케이블을 사용하는 전송제도 실용화되어 있으며, 1GHz를 넘는 신호를 낮은 손실로 전송하는 것도 가능하다.

IF대의 신호를 여러 주파수 채널로 잘라서 각 채널마다 기저대역(baseband : 0~수 MHz 대역의 신호)으로 주파수 변환을 한다. 이 기준대역 신호를 비디오 신호라고 하며, 기준대역에의 주파수 변환 장치를 비디오 변환기라고 부른다. 비디오 변환기는 이미지 리젝션 믹서(IRM, Image Rejection Mixer)가 사용되며, 상측파대(USB, Upper Side Band)와 하측파대(LSB,

Lower Side Band)가 독립적으로 비디오 신호로 변환된다. 비디오 변환기에서 사용하는 국부발진 신호도 코히어런스를 유지하기 위해 기준 주파수에 위상동기시킨 신호를 이용한다.

비디오 신호는 각 채널마다 디지털 신호로 변환(A/D 변환)된다. 이 경우, A/D변환의 샘플링 주파수는 비디오 대역의 2배를 취한다. 이 샘플링 신호 역시, 기준 주파수에서 만들어낸 신호를 사용한다. A/D 변환의 양자화로는 가장 간단한 1비트의 양자화를 취해준다[3].

한편 포맷터는 1비트 샘플링시킨 신호에 시각부호를 붙인 하나의 시계열 디지털신호를 기록장치로 출력시키는 장치로, 입력 인터페이스라고도 한다. 이 디지털 신호를 기록기(대용량 기록장치)에 기록한다. 이렇게 테이프와 HDD에 기록된 데이터는 데이터 센터로 보내져 상관기에서 상관처리를 수행하고 분석을 수행하게 된다.

3. VLBI Correlator

그림 2에 Mark4 상관기[5]의 기본적인 블록도를 나타내었다. Playback Unit(PBU)를 통한 데이터 재생과 함께 SU에서 데이터의 다양한 정보를 분석한 후 각 상관기 모듈에서 처리를 수행하게 된다. 이하에서는 상관기 시스템 중에서 전단에 해당하는 PBU와 특히 SU의 기능들에 대해 자세히 살펴보고자 한다.

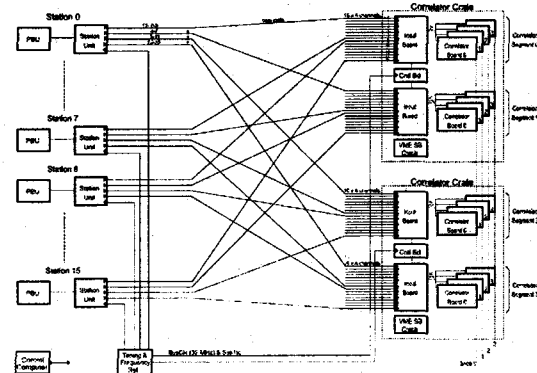


그림 2. Mark4 상관기 블록도.

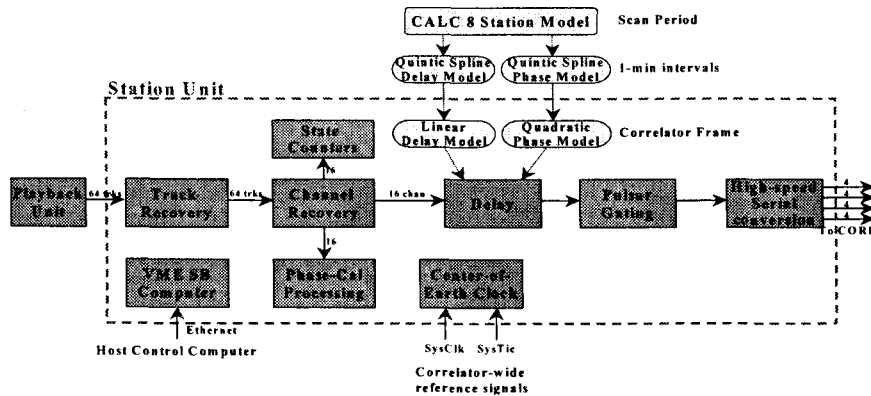


그림 3. Station Unit의 블록도.

3.1 재생기 시스템(PBU)

Mark4 상관기와 함께 사용되는 Playback Unit(PBU)은 18Mbps/track(16Mbps의 unformatted 데이터율)까지에서 64track을 재생할 수 있는 2개의 32-track headstack을 공급하는 향상된 VLBA 테이프 운송에 기반하고 있다. PBU는 32Msample/sec에서 2-bit 샘플링과 관련하여 각각 64Mbps의 16개 기록된 데이터 채널까지 가능한 VLBA DAS 또는 Mark4 DAS로 기록된 테이프와 호환성을 가진다. 단일 채널로부터의 데이터는 8tracks 만큼 확장될 수 있다. 16Mbps/track보다 작게 기록된 데이터는 32Msample/sec를 초과하지 않는 재생된 채널을 제공된 16Mbps/track까지 재생될 수 있다.

각 PBU는 각 테이프에 붙어 있는 barcode 라벨을 자동적으로 읽기 위해 barcode 리더기가 설치되어 있다. 이 라벨은 처리하기 전에 각 테이프의 정보를 확인하기 위해 실험 기록과 함께 사용된다.

3.2 Station Unit(SU)

각 PBU에 의해 재생된 64 트랙은 관련된 SU로 전송된다. SU의 주요 기능은 채널 데이터를 재구성하고 상관기로 데이터가 전송되기 전에 모델 지연을 적용하는 것이다[5]. 실제로, SU는 이외에 몇 가지 기능을 수행한다. 그림 3에 SU의 블록도를 나타내었으며, 상세한 부분은 아래에 간략하였다.

① 각 SU는 처리하게 될 스캔(scan)에 적절하게 재구성된 'center-of-earth' 라는 시각을 보유하고 있다(여기서 스캔은 몇 초에서 몇 분까지의 특별한 범위 즉, 특별한 시간동안 단일 전파 원으로부터 VLBI 안테나 어레이에 의해 동시에 수집된 데이터로서 정의한다). 주어진 스캔을 처리하는 모든 SU는 상관기의 기준주파수에 의해 동기된 각각의 'center-of-earth' 시각을 보유

하고 있다. 여기서 상관기의 기준주파수와 같은 SysClk은 32×10^6 SysClk의 주기를 가지는 관련 tick(SysTic이라고 부름)과 전형적인 32MHz에서의 SysClk을 말한다. 만약 SysClk이 32MHz이면, SysTic 비는 1/s이다. 그러나 각 SU는 스캔을 처리하는 적절한 'center-of-earth' 시간을 가지고 있는 다른 스캔을 동시에 처리한다. 'center-of-earth' 시각 비는 PBU의 재생비와 연관이 있으며 이는 2 또는 4의 factor에 의해 원래 기록율보다 빠르다.

② PBU의 각 트랙으로부터의 데이터는 Track Recovery Module(TRM)에서 복원된다. 에러가 계산되고, parity bits가 해체된다. 복원된 테이프 시간 데이터는 테이프 재생 동기를 맞추기 위한 위치 오류를 계산하기 위해 필요한 데이터 지연과 center-of-earth와 비교한다. 이때 TRM은 320 kB/track의 버퍼를 가지고 있는데 이것은 PBU에 필요한 동기를 느리게 한다. TRM으로부터의 데이터는 byte-wise 데이터 유효 또는 유효하지 않는 플래그 정보와 함께 Channel Recovery Module(CRM)로 전달된다. 이 정보는 임의 데이터가 테이프의 잘못된 동기 또는 테이프 재생 문제로 인한 나쁜 결과가 초래된다는 것을 알고 있거나 의심을 나타낸다.

③ Channel Recovery Module(CRM)은 필요하다면 관련된 트랙으로부터 데이터를 곱하여 원래 데이터 채널을 재구성한다. 최대 16까지 2-bit 채널이 32 Msample/sec의 최대 채널 데이터율로 재구성된다. CRM의 출력은 데이터 부호, 진폭 그리고 채널에 전달되는 모든 트랙으로부터 유효 정보를 결합하여 얻어진 형태인 데이터의 유효 비트 스트림으로 구성된다.

④ Crossbar Switch 다음의 재구성된 채널 데이터는 Delay Module(DM)로 전송된다. 이것은 각 채널에 지연을 적용하고 데이터를 SysTic의 약속과 동시에 발생하는 경계인 Correlator

Frames(CF)로 분할한다. 선형 지연 모델이 각 CF의 주기에 대해 사용된다. 이 선형 모델은 1분의 스캔 세그먼트에 대해 미리 계산된 5th-order-spline 지연모델로 고정된 least-square로부터 유도된 것이다. 여기서 1분의 스캔 세그먼트는 NASA CALC8에 의해 생성된 매우 정밀한 것으로부터 차례로 유도된 것이다. 각 1-샘플 지연이 변하는 순간에, 단일 샘플이 지연율의 부호에 따라 채널 데이터 스트림으로부터 삭제되거나 복사된다. PBU로부터 16 채널 각각은 지연모듈(DM)의 버퍼한계의 성능 범위 내에서 독립적인 지연모델에 의해 제어된다. 이것은 하늘에서 다른 포인팅 중심을 가지는 Crossbar Switch로부터 나오는 각 채널을 동시에 처리할 수 있는 유연성을 허락하는 것이다. 주어진 스캔을 처리하는 모든 SU 이들 데이터를 동기화된 CF으로 분할한다.

⑤ 재구성된 채널 데이터는 Crossbar Switch를 통해서 Phase-Calibration Module(PCM)로 전송되며 이 PCM에서는 각 채널에 대해 기계의 위상보정 정보를 제공하는 숨어있는 작은 코히어런트한 보정 톤(tone)의 위상과 진폭을 추출한다.

⑥ DM은 각 채널에 대해 각 CF의 시작에 240-bit 헤더를 위치하고 있으며, 간혹 관련된 240 유효 비트를 대신하는데 제공된다. 각 헤더에는 다음과 같은 정보를 포함한다. (a) CF 지연 모델, 이것은 CF에 대해 사용된 선형 지연율과 CF 헤더 다음의 첫 번째 샘플에 대한 'fractional-bit delay' (즉, 연속적인 모델 지연과 데이터 스트림의 양자화된 지연사이의 차이)로 구성된다. (b) center-of-earth에 관한 RF 위상에 대해 Station 2차 위상모델은 5th-order delay spline과 유사하게 5th-order phase spline에 least-squares 2차 추정으로 유도된다. (c)Oversampling factor(즉, 실제 샘플율과 Nyquist 샘플링율과의 비)는 모든 station에 대해 동일해야 한다. (d)기저대역 표시기(Baseband indicator)는 양쪽 station에 동일해야 한다. (e)전송확인 목적을 위한 Station 채널 ID, 프레임 시리얼 번호, Fletcher checksum 등.

다른 관측국(station)과 상호상관 파트너 채널로부터의 헤더 정보와 결합된 이 정보는 Mark4 상관기 칩에 필요한 상호상관처리 전체를 계산하는 충분하다.

실제로 Mark4 상관기의 파이프라인 구조 때문에, CF n의 시작에서 DM에 의해 놓여진 헤더 데이터는 CF n+1에 속하게 된다.

⑦ DM의 출력에서 데이터는 적절한 상호상관 정규화를 위해 필요한 상태(샘플) 통계를 모으는

State Counter(SC)로 보내진다. 이러한 데이터는 후상관처리를 지원하기 위해 실제 상관계수를 포함하여 제어 프로세서로 주기적으로 전송된다.

⑧ Pulsar Gating Module(PGM)은 pulsar-timing model과 함께 각 채널과 동반하는 유효 비트 스트림을 처리함으로써 데이터를 적절하게 'gate' 하는데 사용된다.

⑨ 마지막으로 CF의 16개 병렬 스트림은 상관기에 적절하게 전송하기 위해 각 링크에서 4개의 임의로 선택할 수 있는 채널과 함께 4개의 초고속 시리얼 데이터 링크 위에서 곱해진다. 각 채널에 대한 데이터는 각 샘플에 대해 부호, 진폭, 유효 정보 등을 포함한다. 이러한 링크는 Hewlett-Packard HDMP-1012/14의 초고속 시리얼 링크 칩셋을 이용하며 각 링크는 ~400Mbps까지 지원한다.

SU의 설계로 인해 CF의 최대 길이는 16×10^6 SysClk cycles로 제한되는데, 이것은 32MHz의 명목상의 SysClk 주파수에서 상관기 'wall clock'의 1/2초와 연관된 것이다. 실제로 실제 SU 모듈과의 관계는 정확하지 않다.

4. 결론

VLBI 상관기 시스템의 한 구성요소로서 데이터 입력 부분에 각 관측 사이트의 데이터를 사전 처리하는 Station Unit(SU)이 있다. VLBI 시스템에서, 디지털화된 데이터의 다중채널은 테이프 또는 하드디스크에 다중트랙 형태로 인코딩된다. 이 SU의 주요기능은 다중트랙으로부터 인코딩된 데이터를 디코딩하고, 마치 기록되지 않은 것과 같이 채널기반의 샘플 스트림으로 이 데이터를 복원하는 것이다. 이 기능을 원활하게 수행하기 위해서, SU는 논리적으로 재생기 시스템과 함께 시스템이 통합될 필요가 있다. 본 논문에서는 전파 천문 VLBI 상관기 시스템의 SU의 기능에 대해 고찰하였다.

5. 참고문헌

- [1] 오세진, 노덕규, *간접계 전파천문학의 이론과 실제*, 한국천문연구원, Vol. 1, 2003. 12. 18.
- [2] Thomson et al., *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [3] Sasao et al., *Basic Knowledge of Radio Astronomy*, 아주대학교, 2005. 3. 18.
- [4] 노덕규 외, "KVN 전파영상합성기 개발을 위한 기획연구," 한국천문연구원, 2004. 3.
- [5] A. R. Whitney et al., "Mark4 VLBI Correlator: Architecture and algorithms," *Radio Science*, Vol. 39, 2004.