대전 상관기의 전처리를 위한 광역 프린지 탐색 소프트웨어 개발 및 시험

Development and Evaluation of Global Fringe Search Software for the Preprocess of Daejoen Correlator

오세진* 노덕규*, 윤영주*, 염재환*, 오충식* 쿠라야마 토모하루**, 정동규*, 정진승*
Se-Jin Oh*, Duk-Gyoo Roh*, Young-Joo Yun*, Jae-Hwan Yeom*, Chung-Sik Oh*, Tomoharu Kurayama**, Dong-Kyu Chung*, Jin-Seung Jung*

요 약

본 논문에서는 대전상관기의 전처리를 위한 광역 프린지 탐색 소프트웨어 개발에 대해 기술한다. VLBI 관측의 경우 전파망원경에 의해 천체를 잘 관측하였는지 확인하기 위해 관측자는 관측일정에서 잘 알려져 있는 전파세기가 강하고 밝은 천체(포인터 소스, 참조천체)를 목적천체와 함께 관측을 수행한다. 상관기는 참조천체를 대상으로 상관 프린지가 잘 검출되는지 확인하는 전처리를 수행한다. 본 논문에서는 특정 관측국을 기준으로 각 관측국 사이의 정확한 지연시각을 계산하는 GFS 소프트웨어를 개발하였는데, 이 소프트웨어는 상관 전처리를 통하여 각 관측국에 위치한 수소원자시계와 GPS 시각 사이의 시각오차 정보 및 참조천체의 지연모델(상관모델)을 이용하여 정확한 지연시각을 계산한다. 개발한 소프트웨어의 성능을 확인하기 위한 상관 전처리 시험을 KaVA 관측망으로 관측한 참조천체와 목적천체에 대해 수행하였다. 시험결과는 GFS 소프트웨어로 찾은 지연시각 오차를 보정한 결과와 그렇지 않은 것의 비교에 따라 매우 좋은 성능을 보여 효과적임을 나타내었다.

ABSTRACT

This paper introduces the development of global fringe search (GFS) software for preprocessing of Daejeon Correlator. In case of the VLBI observation, a observer conducts the observation for the reference sources with strong and point-like radio stars on schedule in order to confirm the well-observedness of the radio source by the radio telescope. The correlator performs the correlation for the reference sources to detect the fringe completely. We developed the GFS software by calculating the precise delay time between each observatory based on specific observatory. Then, this software calculates the precise delay time by using the delay model (correlator model) of reference source and information of time offset between the Hydrogen Maser frequency standard and GPS (Global Positioning System) clock located in each observatory through the correlation preprocessing. In order to confirm the performance of the developed software, experiments were carried out for the reference sources and target sources observed by the KaVA (KVN and VERA Array). Experimental results show that the GFS software has effectively good performance by finding the precise delay time offset according to the comparison between the compensated delay time offset and one without compensation.

Keywords : Daejeon Correlator, Global Fringe Search, Delay and Rate Compensation

Ⅰ. 서 론

한국천문연구원에서는 일본국립천문대와 공동으로 개발한 한일공동VLBI상관기(이하 대전상관기, Daejeon Correlator)를 2009년에 설치하고 운영하고 있다[1-2]. 전파천문에서 사용하는 상관기(Correlator)는 우주의 천체(블랙홀, 별 탄생 영역, 만기형성 등)로부터 오는 전파신호를 수백 km이상 떨어진 여러 대의 전파망원경으로 관측하여 디지털 신호로 변환한 데이터에 대해 상관도를 측정하고, 전파망원경과 별사이의 거리, 전파망원경 간의 거리, 천체로부터 오는 전파신호의 지연시간 등을 측정하는 전용 계산기이다. 즉, 여러 대의 전파망원경의 관측신호를 구경 합성하는 원리인 초장기선전파간섭계(VLBI, Very Long Baseline Interferometry)의 초점을 잡는 전용 계산기이다[3-4]. 대전상관기는 한국천문연구

* 한국천문연구원 ** Teikyo University of Science
투고 일자 : 2014. 6. 16 수정완료일자 : 2014. 10. 29
게재확정일자 : 2014. 11. 2

원이 2009년부터 운영하고 있는 21m 전파망원경 3대로 구성된 한국우주전파관측망(KVN, Korean VLBI Network)과 일본국립천문대가 2002년부터 운영하고 있는 20m 전파망원경 4대로 구성된 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)관측망으로 구성한 7대의 한일VLBI공동관측망(KaVA, KVN and VERA Array)으로 천체로부터 방출되는 우주 전파를 관측한 데이터를 대전상관기에서 상관처리를 수행하고 천문학자들이 이미지 합성, 분석을 위한 FITS (Flexible Image Transportation System) 파일을 제공하는 역할을 수행한다.

VLBI로 천체관측을 수행할 때는 전파망원경이 목적천체를 정확하게 관측하였는지 확인하기 위해 참조천체(위치와 전파세기가 잘 알려진 천체=포인터 소스)와 목적천체를 번갈아가면서 관측한다. 따라서 상관기는 목적천체에 대한 상관처리를 수행하기 전에 참조천체에 대해 프린지(Fringe, 간섭호)가 잘 검출되는지 확인하기 위한 상관 전처리를 수행한다. 이 전처리 작업은 각 전파망원경에 위치하는 수소원자시계로 만들어낸 시각과 GPS 시각을 시각비교기를 이용하여 측정한 시각오차정보, 그리고 참조천체에 대한 상관모델(지구회전, 도달시간, 천체위치 정보를 이용하여 만든 지연 파라미터)을 이용하여 정확한 지연시각을 찾는 작업을 말한다.

이상에서 설명한 지연시각을 계산하는 프로그램은 AIPS[1)]라는 천문자료 분석 프로그램에서 구현이 되어 있다. 그러나 상관 전처리를 수행한 후 매번 상관결과를 FITS 파일로 변환하고, AIPS에서 천문자료 분석을 수행한 후 지연시각을 찾는 과정을 수행하기 때문에 시간이 많이 소요된다. 따라서 전체 상관처리 시간을 줄이고 지연시간만을 찾을 수 있는 과정이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 대전상관기에서의 효율적인 상관 전처리 작업을 수행하기 위해 광역 프린지 탐색(Global Fringe Search, GFS) 소프트웨어를 개발하였으며, 개발한 프린지 탐색 소프트웨어의 구성, 동작 등에 대해 간략히 기술하고 성능 확인을 위해 수행한 시험결과에 대해 고찰하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 대전상관기의 구성에 대해 간략히 기술하고, Ⅲ장에서는 본 논문에서 개발한 GFS의 구성과 동작에 대해 기술하며, Ⅳ장에서는 개발한 GFS 소프트웨어의 성능을 확인하기 위한 실험 및 결과에 대해 고찰하고 마지막으로 Ⅴ장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 대전상관기의 구성

그림 1은 2009년도에 완성되어 한국천문연구원(대전위치)에 설치되어 운영 중인 시스템의 얼개[2]를 나타낸 것이다. 전체 시스템은 KVN의 하드디스크와 VERA의 테이프 미디어에 대응하는 고속재생기, 그리고 하드디스크와 테이프 미디어 사이에 재생할 때 발생하는 속도문제를 해결하고 데이터 형식 변환 등에 대응하기 위한 재생동기처리 시스템인 Raw VLBI Data Buffer(RVDB)가 있다. 또한 대전상관기의 핵심부분으로 상관처리를 수행하는 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS)이 있으며, VCS의 상관결과를 고속으로 저장하고 사용자가 지정한 특정 파일시스템으로 저장하는 데이터아카이브 시스템(Peta-sale Epoch Data Archive; PEDA)이 있으며, 전체 상관 시스템의 제어 및 운용을 위한 소프트웨어 부분으로 구성된다.

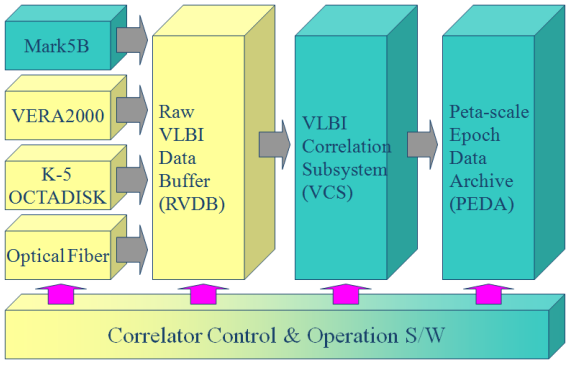


그림 1. 대전상관기의 구성

Fig. 1. Configuration of Daejeon Correlator

Ⅲ. 광역 프린지 탐색

GFS[5-6]는 전파망원경이 위치하는 관측국마다의 지연잔차(Delay residual), 지연 변화율 잔차(Delay rate residual) 등을 계산하는 것을 말한다. VLBI 관측 데이터의 상관처리에서는 프린지 탐색을 수행하지 않으면 목적 천체에서 관측한 신호의 진폭과 위상(Visibility, 비지빌리티)을 얻을 수 없다. 프린지 탐색을 수행하기 위해서는 다음 3가지 사항을 따르면 매우 유효한 결과를 얻을 수 있다.

첫째, 관측데이터 중에서 반드시 전파의 세기가 강하고 잘 알려진 연속파 천체를 대상으로 하며, 스펙트럼 라인(메이저 천체) 천체는 사용하지 않는다. 두 번째, 강한 연속파 천체로부터 상관처리된 결과를 대상으로 하는 프린지 탐색에서의 적분시간은 대기의 위상 흔들림과 가속도 잔차(Residual) 성분을 무시할 정도의 시간으로 설정해야 한다. 강한 연속파 천체들은 30sec 정도, 약한 천체의 경우에도 240sec를 초과하지 않을 정도로 제한해야 한다. 세 번째, 참조(Reference) 관측국은 가능한 전파망원경의 감도가 우수하고 위치정보가 안정된 관측국을 선택해야 한다. 예를 들어 지구 주위를 돌고 있는 인공위성 전파망원경을 선택하면 안 된다.

3.1 GFS 소프트웨어의 구성과 동작

본 논문에서 설계한 GFS 소프트웨어는 대전상관기를 통

1) Astronomical Image Processing System

하여 상관처리된 결과를 특정 파일 시스템으로 변환한 CODA file system[7]을 사용하여 동작한다. 프린지 탐색을 위한 상관처리는 관측자가 참조천체로 선택한 강한 포인터 천체를 대상으로 약 5분 정도 수행한다. 그리고 상관결과를 CODA file system으로 변환한 후 GFS 소프트웨어를 실행한다. GFS는 C++ 로 작성되었으며, CODA의 라이브러리인 CCcoda를 사용한다[7].

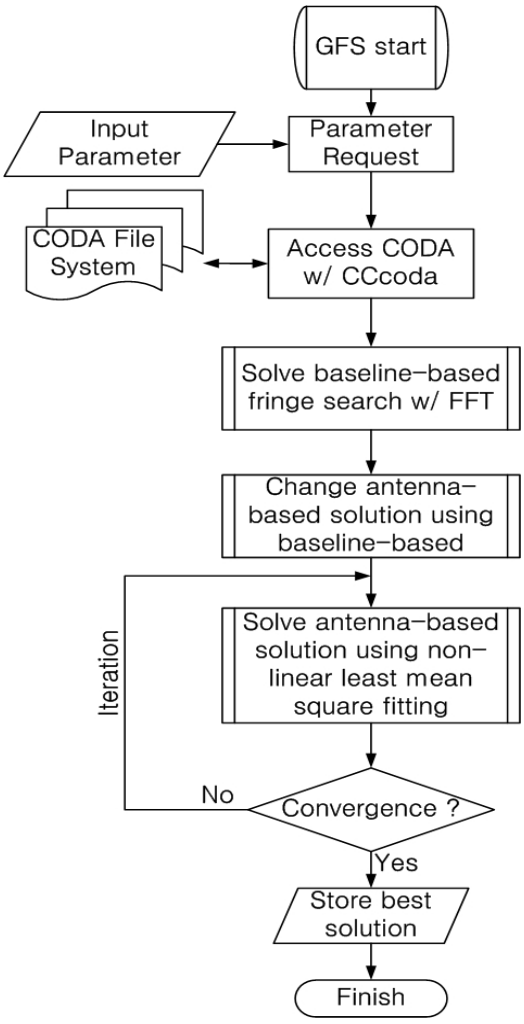


그림 2. 개발한 GFS 동작 순서도
Fig. 2. Developed GFS operation flow chart

그림 2는 본 논문에서 개발한 GFS 알고리즘의 동작 순서를 나타낸다. 이하에 간략히 기술하면 다음과 같다.

① GFS가 실행되면 입력 파라미터 값을 읽어 들인다. 입력 파라미터는 CODA file system의 위치, 적분시간, 스트림(Stream) 수, 참조 관측국, SNR 한계값, 채널 적분 수 등의 정보이다.

② CCcoda 라이브러리를 이용하여 CODA file system에 접근한다. CODA file system에는 상관결과의 비지빌리티와 관측정보를 포함하고 있다.

③ FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 각 관측국을 대상으로 기선기반(Baseline-based)의 프린지 탐색을 수행한다[5-6].

④ 기선기반으로 계산된 프린지 탐색 결과를 관측국기반(Antenna-based)으로 변경한다. 이 안테나 기반의 해를 초기값으로 사용하여 식 (1)에 대입하여 계산한다. 이때 천체의 비지빌리티를 V 라고 하면, 관측 비지빌리티는 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산한다.

$$\hat{V} = |V| e^{i\phi} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\phi = &((\phi_j^{'0} - \phi_k^{'0}) \\ &+ 2\pi\nu_{IF}(\tau_j^{cable,m} - \tau_k^{cable,m} + \tau_j^0 - \tau_k^0) \\ &+ 2\pi\nu_0(\dot{\tau}_j - \dot{\tau}_k)(t - t_0) \\ &+ 2\pi\nu_{IF}(\dot{\tau}_j - \dot{\tau}_k)(t - t_0))\end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서 ϕ 는 위상, ν_{IF} 는 주파수, τ 는 지연시각을 각각 나타낸다. 식 (1)에서 구한 임의의 비지빌리티 $f(x)$ 와 관측 비지빌리티 $\hat{V}$ 와의 잔차벡터 $\boldsymbol{r}$ 을 정의하고 관측방정식 $\boldsymbol{f}$ 의 각 파라미터에 대해 편미분 행렬 P 를 작성한다. 잔차벡터는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\boldsymbol{r} = \hat{V} - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \tag{3}$$

식 (3)으로부터 초기값의 변화량인 Δx 를 연립방정식인 식 (4)와 (5)를 최소자승법을 이용하여 해를 구하여 변화량을 도출한다.

$$\boldsymbol{r} = P\Delta x \tag{4}$$

$$\Delta x = (P^T P)^{-1} P^T \boldsymbol{r} \tag{5}$$

여기서, 편미분 행렬 P 는 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{f_0}}{\partial x_0} & \frac{\partial \boldsymbol{f_0}}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \boldsymbol{f_0}}{\partial x_{q-1}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{f_1}}{\partial x_0} & \frac{\partial \boldsymbol{f_1}}{\partial x_1} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \boldsymbol{f_{p-1}}}{\partial x_0} & \frac{\partial \boldsymbol{f_{p-1}}}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \boldsymbol{f_{p-1}}}{\partial x_{q-1}} \end{pmatrix} \tag{6}$$

⑤ ④에 나타낸 방정식의 해와 같이 비선형 최소자승 피팅[6][8]을 이용하여 안테나 기반의 해를 구한다. 관측된 비지빌리티와 각각의 지연, 변화율을 관측방정식에 적용된 시험 비지빌리티와의 잔차를 구하고 그 잔차의 값이 최소인 때의 지연, 변화율의 조합을 출력한다.

⑥ 이때 프린지 탐색을 통한 지연시각 등의 결과가 특정 값에 수렴할 때까지 반복계산을 수행하고, 지연시각 등이 최소가 되면 값을 저장하고 GFS 알고리즘을 종료한다.

3.2 GFS 결과를 이용한 상관모델의 계산

그림 3은 관측로그를 기반으로 계산한 상관모델에 대해 본 논문에서 개발한 GFS 소프트웨어를 이용하여 정밀한 지연시각과 변화율을 계산하는 방법을 나타낸 것이다.

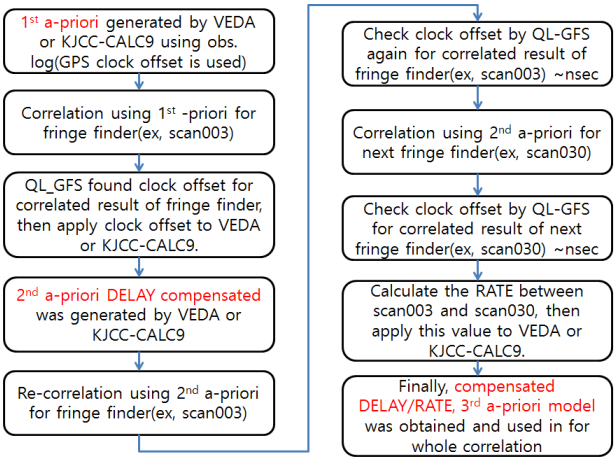


그림 3. GFS를 이용한 지연, 변화율을 계산하는 방법
Fig. 3. Calculating method of delay, rate using GFS

관측로그에는 각 관측국에 위치하는 수소원자시계로부터 생성한 시각과 GPS 시각 사이의 오차(즉, 지연시각)를 기록한 값이 있다. 이 값을 바탕으로 해서 관측천체의 위치정보, 관측국의 위치정보 및 지구회전모델 등을 기본값으로 해서 일본국립천문대에서 개발한 VEDA 프로그램 또는 한국천문연구원에서 개발한 C9T 프로그램으로 초기 상관모델을 계산한다. 이렇게 계산한 상관모델을 이용하여 관측데이터 중에 관측 초기의 참조천체를 대상으로 대전상관기를 이용하여 약 5분정도의 상관처리를 수행한다. 이 상관결과를 CODA file system으로 변환하고, 이 CODA file system을 이용하여 GFS 소프트웨어를 실행하며, 참조천체에 대한 각 관측국의 정확한 지연시각(단위: μs)을 계산한다. 이렇게 구한 정확한 지연시각을 관측로그에서 (-)/(+) 방향으로 기존 지연시각 값에 더하거나 빼준 후 다시 VEDA/C9T의 상관모델 계산 프로그램을 실행하여 지연시각이 보정된 상관모델을 생성한다.

지연시각이 보정된 상관모델을 이용하여 다시 참조천체에 대해 상관처리를 수행하고 다시 GFS 소프트웨어를 실행한 후 얻어진 지연시각을 확인하고, 그 값이 수십 ns 정도 범위에 들어오는지 확인한다. 예상대로 지연시각이 수십 ns 정도의 값이면, 이 지연모델을 이용하여 관측데이터 후반에 위치하는 참조천체를 대상으로 약 5분정도 상관처리를 수행하고 GFS 소프트웨어를 실행하여 지연시각을 계산한다. 이렇게 얻어진 지연시각과 초기에 얻은 지연시각에 대해 선형 피팅(Linear fitting)을 수행하여 지연시각의 변화량을 계산한다. 이렇게 구한 지연시간 변화량을 관측로그에서 (-)/(+) 방향으로 더하거나 뺀 후 지연시각/변화율 등을 보정하여 수정된 상관모델을 계산한다. 이때 지연시각과 변화율에 대해 값이 변화량이 최소가 될 때까지 수회 반복하여 상관모델을 갱신한다. 최종적으로 얻은 상관모델을 이용하여 참조천체와 목적천체를 포함하는 모든 관측데이터에 대해 상관처리를 수행한다.

광역 프린지 탐색과정은 VLBI 관측데이터를 대상으로 상관처리를 수행하는 과정 중에서 가장 시간이 많이 걸리며, 정확한 지연시간, 변화율을 계산하여야 목적천체에 대한 상관결과를 얻을 수 있기 때문에 정확한 작업이 필요하다. 간혹 전파망원경이 참조천체를 제대로 추적하지 못하거나, 다른 시스템의 문제로 인해 관측이 제대로 수행되지 않은 경우도 있기 때문에 상관센터에서는 관측할 때 사용된 관측로그를 참고해서 상관처리에 필요한 입력 파라미터로 활용하고 있다.

Ⅳ. 실험결과

본 연구에서 개발한 GFS 소프트웨어의 성능을 확인하기 위해 강한 세기의 참조천체를 대상으로 상관처리를 수행한 후 결과를 비교하였다. GFS 시험을 위한 관측데이터는 2011년 1월 27일에 관측된 것이며, 대전상관기로 약 5분간 상관처리를 수행하였다. GFS의 성능을 비교하기 위해 동일한 데이터에 대해 일본국립천문대의 미타카 FX 상관기로 수행한 GFS 지연시각 결과를 비교하였다.

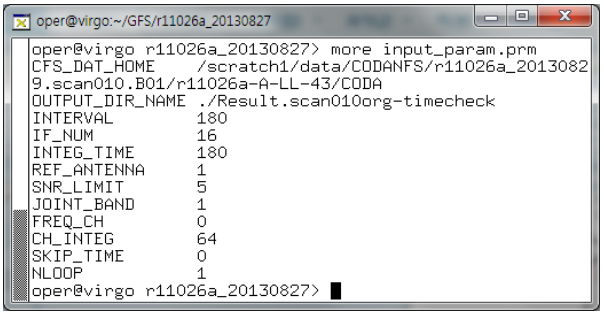


그림 4. GFS 실행에 설정한 입력 파라미터의 예
Fig. 4. Example of input parameter established for GFS execution

그림 4는 GFS를 실행하기 위해 설정한 입력 파라미터를 나타낸 것이다. 그림 4에서는 상관결과 파일시스템의 위치, 결과파일의 저장위치, 시간간격, IF 수, 적분시간, 참조 안테나 번호, SNR 한계값, 대역의 결합분석 여부, 채널 적분 등을 나타내고 있다. 그리고 표 1은 GFS 소프트웨어를 이용하여 얻어진 지연시각에 대한 결과와 일본국립천문대 미타카 FX 상관기의 GFS 소프트웨어로 얻은 지연시각을 비교하여 나타내었다.

표 1에 나타낸 것과 같이 본 연구에서 개발한 초기 버전의 GFS 소프트웨어는 많은 시간이 걸리는 것을 알 수 있다. 즉, GFS 소프트웨어의 설정에서 채널적분 수가 1인 것은 약 41분이 소요되어 5분정도 상관처리한 참조천체의 결

과에 대해 너무 많은 시간이 소요되어 채널적분 기능을 추가하여 약 8분 정도로 프로그램의 운영속도를 단축하였다. 그리고 소요된 시간은 관측국의 수에 비례하여 증가하며, 만약 3개의 관측국인 경우 채널적분을 하지 않고도 약 3분 이내에 지연시각을 정확하게 계산하는 것을 확인하였다. 그리고 표 1에서 일본국립천문대의 미타카 FX 상관기의 GFS 소프트웨어로 구한 지연시각과 비교해서, 본 연구에서 구현한 GFS 소프트웨어의 지연시각이 채널 적분 여부에 관계없이 거의 유사한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

표 1. r11027b 관측에 대해 GFS 소프트웨어를 이용한 지연시각 계산 결과의 비교

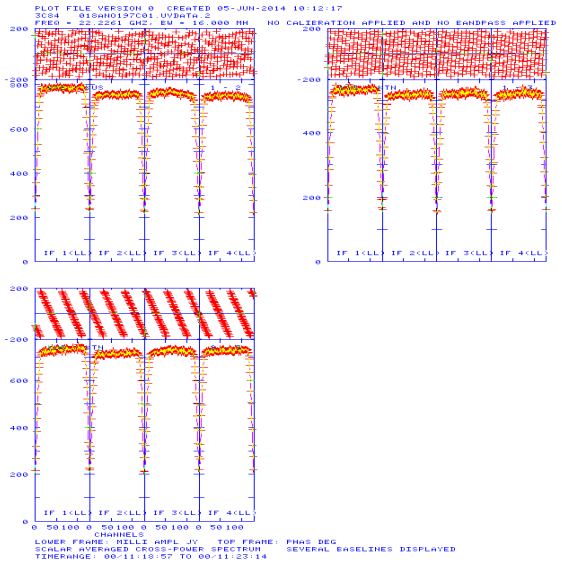
Table 1. Comparison of calculating result for delay time using GFS software for r11027b observation

단위 : μs

채널 적분수	#	1	2	4	8	MTK offset
걸린 시간	sec	2462(~41분)	785(~13분)	408(~6.8분)	485(~8분)	R11027B
관측국	MIZ	-10.2975	-10.2974	-10.2974	-10.2974	-10.37
	OGA	0.018327	0.0183888	0.0184457	0.0184507	-0.05
	ISG	-2.71199	-2.71194	-2.71188	-2.71187	-2.88
	KYS	6.25279	6.25284	6.25291	6.25292	6.43
	KUS	5.47911	5.47918	5.47924	5.47925	5.49
	KTN	5.33505	5.33511	5.33517	5.33518	5.34

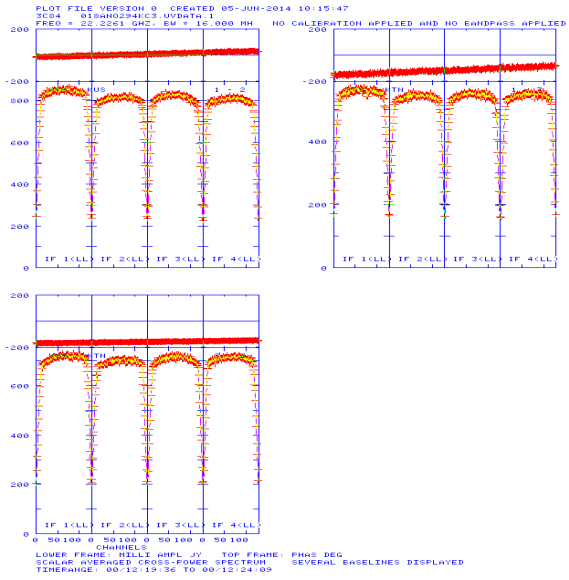
본 논문에서는 표 1의 시험결과와 함께 다른 관측데이터에서 GFS 소프트웨어 결과를 이용하여 상관처리결과에서 어떤 효과가 있는지 확인하기 위해 다른 관측데이터를 대상으로 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 관측데이터는 s14mk102a이며, KVN 3 관측국으로 관측한 것이다. 관측주파수는 22 *GHz* 대역이며, 처음에는 각 관측국에 위치하는 수소원자시계로부터 생성한 시각정보와 GPS 수신기로부터 측정한 시각정보의 차이, 즉 초기 지연값은 KVN연세 관측국은 -16.7μs , KVN울산 관측국은 -3.2μs , KVN탐라 관측국은 0.4μs 이다.

이 초기 지연값을 이용하여 참조천체(포인터 소스)를 대상으로 상관처리를 수행하고, 그 결과를 CODA file system으로 변환하고, 이 CODA file system에 대해 KVN울산 관측국을 기준으로 하여 본 논문에서 구현한 GFS 소프트웨어로 구한 실제 지연값은 KVN연세 관측국의 경우 -17.721844μs , KVN탐라 관측국은 0.23765μs 의 값을 구하였다. 이 초기 지연값과 GFS 소프트웨어로 구한 지연값을 보정한 후의 상관처리 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)의 경우 초기 지연값을 이용하여 상관처리를 수행한 결과로서 프린지 위상을 나타낸 부분에서 시간에 따라 신호의 위상회전이 많이 있음을 알 수 있다. 이는 초기 지연값이 천체로부터 수신한 신호의 위상이 흔들리고 있음을 나타낸다. 이에 대해 GFS 소프트웨어로 계산한 값을 보정한 후의 지연값을 적용한 그림 5(b)의 상관결과에서 위상이 일정하게 안정된 것을 알 수 있다.



아래-x: frequency channel, y: amplitude, 위-phase(degree)

(a) 초기 지연시각을 이용한 상관처리 결과



아래-x: frequency channel, y: amplitude, 위-phase(degree)

(b) 보정된 지연시각을 이용한 상관처리 결과

그림 5. 초기 지연시각과 보정된 지연시각을 이용한 상관처리 결과(위 : 위상, 아래 : 진폭)

Fig. 5. Correlation result using initial delay time and compensated delay time(upper : phase, bottom : amplitude)

이상의 실험결과를 바탕으로 본 연구에서 구현한 GFS 소프트웨어가 각 관측국에서 구한 초기 지연값과 참조천체를 대상으로 상관처리한 후 GFS 결과의 보정된 지연값을 이용한 상관처리 결과에서 유효함을 확인하였다. 현재 본 연구에서 개발한 GFS 소프트웨어는 대전상관기로 관측데이터를 상관처리할 때 지연시각, 변화율 등을 계산하여, 전

체 상관처리를 수행하기 전에 보정된 지연시각, 변화율로 다시 계산한 상관모델을 생성하는데 활용되고 있다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 대전상관기의 전처리를 위한 GFS 소프트웨어의 구성과 개발에 대해 기술하였다. GFS 소프트웨어는 전체 상관처리를 수행하기 전의 전처리 작업을 말하며, 각 관측국에 위치한 수소원자시계와 GPS 시각 사이의 시각오차인 초기 지연값과 참조천체의 지연모델(상관모델)을 이용하여 정확한 지연 시각을 계산하고 프린지의 검출 여부를 확인하는 것이다. 본 연구에서 개발한 GFS 소프트웨어의 성능을 확인하기 위한 전처리 상관시험을 참조천체와 목적천체를 대상으로 수행하였으며, 상관처리 시험을 통하여 유효한 지연시각 값을 얻어 개발한 GFS 소프트웨어가 대전상관기의 상관처리 효율을 높이는데 효과적임을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 노덕규, 오세진, 염재환, et al., “2008년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서,” 한국천문연구원, pp. 3-100, 2008.

[2] 오세진, 노덕규, 염재환, et al., “VLBI상관서브시스템 본제품의 제작현장 성능시험,” 신호처리시스템학회 논문지 제12권, 제4호, pp. 322-331, 2011.

[3] Takahashi F., Kondo T., and Koyama Y., *Very Long Baseline Interferometer*, Ohmsha, pp. 35-55. 2000.

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

[5] Frederic R. Schwab and William D. Cotton, “Global Fringe Search Technique for VLBI,” The astronomical journal, Vol. 88, No. 5, pp. 688-694, 1983. 5.

[6] W. Alef and R. W. Porcas, “VLBI fringe-fitting with antenna-based residuals,” Astronomy and Astrophysics, Vol. 168, pp.365-368, 1086.

[7] 오세진, Y. Kan-ya, 노덕규, et al., “상관결과 분석을 위한 파일 시스템 설계 및 소프트웨어 개발,” 신호처리시스템학회 논문지, 제14권, 제3호, pp. 181-190, 2013.10.

[8] J. A. Zensus, P. J. Diamond, and P. J. Napier, Very Long Baseline Interferometry and the VLBA, ASP conference Series, Vol. 82, 1995.

오 세 진 (Se-Jin Oh)
正會員
1996년 2월 영남대 전자공학과(학사)
1998년 2월 영남대 전자공학과(석사)
2002년 2월 영남대 전자공학과(박사)
2001년 9월 ~ 2002년 12월 대구과학대학 교수
2010년 6월 ~ 2011년 5월 한국천문연구원 그룹장
2012년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 개발, 천문관측기기개발

노 덕 규 (Duk-Gyoo Roh)
正會員
1985년 2월 서울대 천문학과(학사)
1994년 8월 동경대 천문학과(석사)
1997년 8월 동경대 천문학과(박사)
1985년 4월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원
2005년 11월 ~ 2009년 3월 한국천문연구원 그룹장
※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관기 개발

윤 영 주 (Young-Joo Yun)
1999년 2월 서울대 천문학과(학사)
2001년 2월 서울대 천문학과(석사)
2011년 2월 서울대 천문학과(박사)
2011년 3월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관기 소프트웨어 개발

염 재 환 (Jae-Hwan Yeom)
正會員
2005년 8월 한양대 정밀기계공(석사)
2005년~현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 디지털신호처리, VLBI상관기 개발

오 충 식 (ChungSik Oh)
2002년 2월 서울대 천문학과(학사)
2006년 3월 동경대 천문학과(석사)
2009년 3월 동경대 천문학과(박사)
2009년 4월-2010년 11월 한국천문연구원 박사 후 연수원
2010년 12월 - 현재 한국천문연구원 선임연구원
※주관심분야 : 전파천문, Astrometry, VLBI상관처리

쿠라야마 토모하루(Tomoharu Kurayama)

2002년 3월 동경대 천문학과(박사)
2012년 Teikyo University of Science 교수
※주관심분야 : 전파천문, VLBI관측

정 진 승 (JinSeung Jung)
正會員
2008년 2월 경남대 전자공학과(학사)
2010년 2월 경남대 전자공학과(석사)
2010년 8월 ~ 2014년 4월 한국천문연구원 연구원
※주관심분: 디지털신호처리, FPGA 설계

정 동 규 (Dong-Kyu Jung)
2004년 8월 충남대 천문학과(학사)
2006년 8월 충남대 천문학과(석사수료)
2012년 1월~ 현재 한국천문연구원 연구원
※주관심분야 : VLBI상관처리, 천문관측기기 개발