

VLBI 전파망원경 기준 신호 전송시스템 안정화 STABILIZATION OF REFERENCE SIGNAL TRANSMISSION SYSTEM IN RADIO TELESCOPE FOR VLBI

제도흥¹, 이원규², 김수연³, 정문희¹, 송민규¹, 정태현¹, 변도영¹, 김승래¹, 손봉원¹, 위석오¹,
한석태¹, 강용우¹

¹한국천문연구원, ²한국표준과학연구원, ³고려대학교

DO-HEUNG JE¹, WON-KYU LEE², SOO-YEON KIM³, MOON-HEE CHUNG¹, MIN-KYU SONG¹, TAEHYUN JUNG¹,
DO-YOUNG BYUN¹, SEUNG-RAE KIM¹, BONG-WON SOHN¹, SEOG-OH WI¹, SEOG-TAE HAN¹, AND YONG-WOO KANG¹

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Korea Research Institute of Standards and Science

³Korea University

E-mail: dhje@kasi.re.kr

(Received November 01, 2013; Accepted December 04, 2013)

ABSTRACT

A fiber-optic reference signal transmission system, which transmits the 1.4 GHz reference signal from H-maser to receiver cabin in radio telescopes, was adopted for compensating the phase changes due to temperature variation and antenna movement. At the first experiment, the remote signal's phase changed more than 15 degrees at 1.4 GHz. We found unstable components in sub-system experiments and replaced them. The main cause of unstable phase stability was the unaligned polarization axis between Laser Diode and Mach-Zehnder Modulator (MZM). The improved system stability showed 1×10^{-16} allan standard deviation at 1,000 sec integration time with the antenna fixed. When the antenna moves in the azimuth axis, the 1.4 GHz remote signal showed the phase change smaller than 0.2 degrees.

Key words: round trip system, H-maser; VLBI: KVN; reference frequency transmission

1. 서론

여러 대의 전파망원경을 사용하여 높은 분해능을 얻는 VLBI(Very Long Baseline Interferometer)에서는 우주전파 신호를 동시에 관측한 후 상관처리를 한다. 관측 대상의 우주전파 잡음신호의 크기가 매우 작아, 높은 신호대잡음비를 얻기 위해, 수백 초 이상 적분하여 상관처리를 한다.

이를 위해 VLBI에서는 1,000초 정도에서 주파수 안정도가 가장 높은 수소 메이저(H-maser)를 기준 주파수 원으로 사용한다(Thompson et al., 2001). 1,000 초 동안의 안정도가 2×10^{-15} 정도가 되는 수소 메이저는 온도와 습도를 일정하게 유지하기 위해서 안테나에서 떨어진 별도의 건물에 설치된다. 이 수소 메이저 기준 신호를 100 m 정도 떨어져 있는 안테나 수신기실까지 전송할 경우, 기준 주파수의 안정도를 수신기실로 전달하려

면, 1,000초 적분시간 동안 1×10^{-16} 정도의 전송 안정도가 요구된다(Sato et al., 2000). 전송된 주파수 기준 신호는 안테나 수신기실까지 전달되어 우주전파수신기의 주파수 변환을 위한 국부발진기의 기준 신호로 활용된다.

전송 과정에서 실내외 온도 변화, 안테나 움직임 등의 영향으로, 안테나 수신기실까지 전달된 기준 신호의 주파수 안정도가 나빠질 수 있다. 이러한 외부 영향들을 보상하는 방법으로는, 동축 케이블이나 광 케이블을 활용한 능동 보상 방법들이 적용되고 있다(Sato et al., 2000). 광 케이블을 사용하는 경우에는 50 dB 이상의 격리도(isolation)를 갖는 광 순환기(optical circulator)를 사용할 수 있고, 동축 케이블보다 좋은 광 케이블의 온도 안정도를 활용할 수 있으며, 신호의 손실이 작아서 멀리 떨어진 곳까지 기준 신호를 전송할 수 있다.

표 1. 실험에 사용된 주요 부품

항목	품명	제조사
CW 레이저	PRO800 Controller & WDM source (1550 nm)	Thorlabs, Inc.
MZM	F-10 (10 G LN Modulator)	Oclaro
포토 다이오드	1592 Photoreceiver	New Focus
Optical Circulator	NCIR-15-SS-FC/APC	General Photonics
VCO	E4428C	Agilent
벡터전압계	8508A	Agilent

광 변·복조 기술을 활용하여, 한국우주전파관측망(KVN, Korean VLBI Network)을 위한 기준 주파수 전송 시스템을 제작하고 실험실 내부 환경에서 그 성능을 측정 한 연구 결과(이원규 등, 2010)에서는 실험실의 온도에 따라 전송 안정도가 큰 차이를 보였으나, 0.3도 이하의 온도 변화에서는 안정된 성능을 보인 바 있다. 그러나, 실제 전파망원경에서 0.3도 이내의 온도 안정도를 유지하는 것은 매우 어려운 일이다. 실제로 이 시스템을 KVN 전파망원경에 설치하여 전송 안정도를 측정한 결과, 1.4 GHz에서 15도 이상의 위상 변화를 보였다. 다음에서 이러한 불안정한 위상 변화를 개선하여, VLBI 전파망원경에 적합한 기준 주파수 전송시스템을 완성한 내용을 보이고자 한다.

2. 시스템 동작원리 및 초기 성능 측정

2.1. 시스템 동작원리

KVN에서 사용하는 수소 메이저는 기본 5 MHz 신호원을 주파수체배하여 10 MHz, 100 MHz, 그리고 1.4 GHz 신호를 발생시킨다. 수소 메이저 출력 주파수 중에서 가장 높은 1.4 GHz 신호를 기준 신호 전송에 사용하도록 하였다. 이는 되도록 높은 주파수를 사용하여, 신호 전송 안정도를 좋게 하기 위한 것이다.

수소 메이저 1.4 GHz 신호를, 원래의 안정도를 유지한 채, 안테나 수신기실에 전달하기 위해, 광섬유의 광학적 길이 변화를 측정하여, VCO(Voltage Controlled Oscillator)의 전압을 조정함으로써 기준 신호 전송의 위상변화를 보상하는 방식의 전송시스템이 그림 1과 같이 구성되었다(이원규 등, 2010). 관측기기실 로컬 장치(local module)의 VCO 신호가 MZM(Mach-Zehnder Modulator)에서 광 신호로 진폭 변조되어, 길이 100 m의 광섬유를 거쳐서 안테나 수신기실의 원격지 장치(remote module)에 전달된다. 실험에 사용된 주요 부품의 품명과

제조사를 표 1에 보였다.

그림 1에서 VCO 신호(V_{vco})와 돌아온 신호(V_{rt})의 위상차의 절반(ϕ_{fiber})에 해당하는 전압(V_c)을 위상보정회로(phase compensation circuit)에서 만들어 V_{vco} 에 인가한다. 이를 위해 그림 1의 위상보정회로는 다음의 관계가 만들어지도록 구성된다(Fujieda et al., 2009).

$$\phi_{vco} - \phi_{ref} + \phi_{rt} - \phi_{ref} = 0 \quad (1)$$

여기서 ϕ_{vco} , ϕ_{rt} , ϕ_{ref} 는 각각 V_{vco} , V_{rt} 기준 신호(V_{ref})의 위상을 나타낸다. 그림 1의 시스템에서 길이 100 m의 광섬유에서만 시간에 따른 위상 변화(ϕ_{fiber})가 발생하고, 다른 장비들의 위상 변화가 없다고 가정하면, $\phi_{rt} = \phi_{vco} + 2\phi_{fiber}$ 로 표현할 수 있다. 이 관계를 식 (1)에 대입하면,

$$\phi_{vco} + \phi_{fiber} = \phi_{ref} \quad (2)$$

이 식의 좌변은 원격지 신호의 위상 안정도를 나타내어, 원격지 신호의 위상이 기준 신호의 위상을 따라 가게 된다. 이는 시스템의 이상적인 동작 원리이고, 실제 시스템에서는 MZM, 포토 다이오드(photo diode), 위상보정회로 등이 외부 온도 변화 등의 영향을 받아, 원격지 신호의 위상이 기준 신호의 위상과 비교해 미처 보상되지 않는 작은 차이를 나타낸다(Fujieda et al., 2007).

2.2. 초기 성능 측정

제작된 전송 시스템(이원규 등, 2010)을 KVN 울산 전파망원경의 관측기기실에 설치하여 위상 안정도를 측정하였다. 설치 과정에서 중간 주파수 발생에 쓰이는 400 MHz 신호 발생기는 한국천문연구원 보유 장비로 대체하였다. 전송시스템의 안정도 측정을 위해, 로컬 장치와 벡터전압계(vector voltmeter)를 관측동의 관측기기실에 설치하였다. 원격지 장치는 안테나 수신기실에 설치해야 하지만, 원격지 신호의 위상 측정을 위하여, 두 가닥의 광섬유를 이용하여 관측기기실에 설치하였다(그림 2). 이 경우 관측기기실의 로컬 장치에서 출발하여 안테나 수신기실까지 갔다가 돌아온 신호가 원격지 장치의 포토 다이오드에서 복조된다. 이 신호는 다시 변조되어 안테나 수신기실까지 갔다가 로컬 장치로 돌아온다. 원격지 신호의 위상 안정도 측정을 위해 전파망원경의 광케이블 길이보다 2배 더 긴 거리에 대하여 신호의 전달이 이루어진 것이다.

로컬 장치에 있는 수소 메이저 1.4 GHz 기준 신호(V_{ref})와 원격지 1.4 GHz 신호(V_{remote})를 DBM(Double Balanced Mixer) 또는 벡터전압계의 두 포트에 연결하여, 두 신호 간의 위상차를 측정하였다. 그림 3의 측정에서

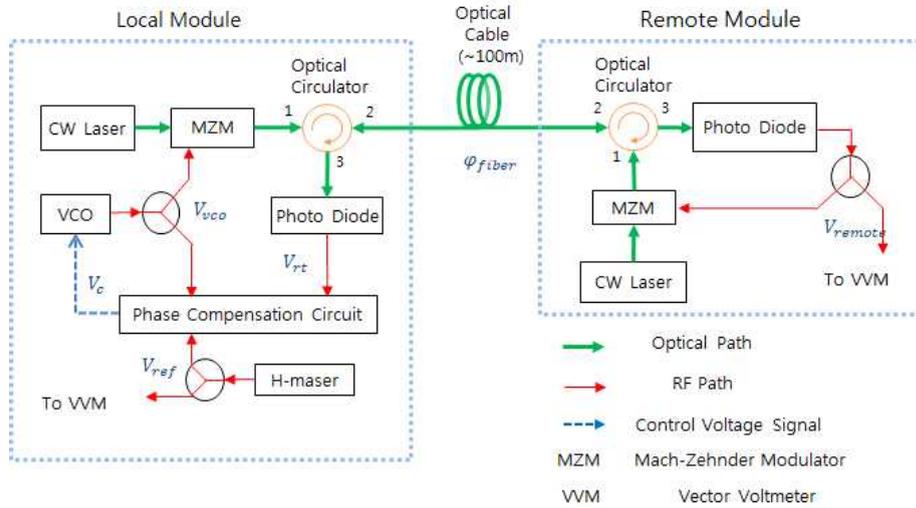


그림 1. KVN 전파망원경을 위한 기준 주파수 전송시스템 블록도.

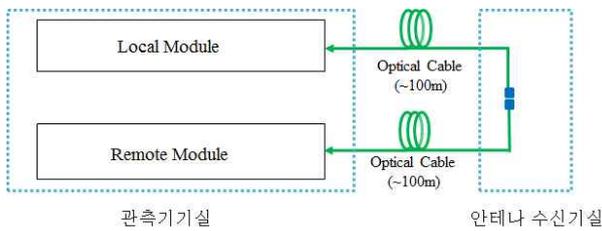


그림 2. 기준 신호 전송시스템의 원격지 신호의 위상 안정도 측정을 위한 장비 구성. 로컬 장치와 원격지 장치를 모두 관측기실에 설치하였음. 로컬 장치와 원격지 장치는 그림 1에 표시된 것을 간략화한 것임.

는 DBM을 사용하였다. 기준 신호로 사용되는 수소 메이저 신호와 원격지 신호를 입력신호로 사용하여 두 신호 간의 위상차를 측정하였다. 이후의 실험에서는 DBM 대신에 벡터전압계를 사용하였다. DBM의 경우 RF 신호 크기의 변화와 위상 변화를 구분하지 못하기 때문이다. 벡터전압계는 0.1도 이하의 해상도를 갖는다. 벡터전압계의 온도에 따른 안정도 측정 한계를 보기 위해 동일한 신호를 전력 분배기로 나누어 벡터전압계의 두 입력에 연결하였는데, 주변 온도가 1.5도 변하는 동안 0.1도 이내의 위상 변화를 보여 벡터전압계의 온도 의존성은 무시할 수 있었다.

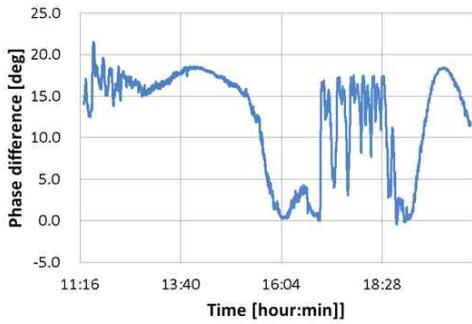
원격지 신호의 위상 측정 결과, 그림 3과 같이 관측 기기실의 온도가 2.5도 변할 때, 원격지 1.4 GHz 신호의 위상이 15도 이상 변화하였다. 이 결과는 망원경 설치 전에 3.5도의 온도 변화에서 얻어졌던 6도의 위상 변화(이

원규 등, 2010)보다 2배 이상 큰 값이다. 이는 원래 제작된 시스템 외에도 전파망원경 실험에 사용된 장비나 실험 환경에 불안정한 요인들이 있음을 의미한다.

3. 시스템 개선

3.1. PMF(Polarization Maintaining Fiber) 영향

그림 3의 원격지 신호에 대한 위상 불안정 원인을 살피기 위해, 실험실에서 시스템의 각 부분에 대한 위상 안정도를 측정하였다. 그림 4(a)와 같이 CW 레이저, MZM, 포토 다이오드를 각 1개씩만 연결한 상태에서, CW 레이저와 MZM를 연결하는 편광 유지 광섬유(PMF)를 단열재 안에 두었을 때와 밖에 두었을 때의 위상 안정도를 측정하여 그림 4(b)에서 비교하였다. 단열재를 사용하지 않았을 때는 주변 온도에 따라 1.4 GHz에서 최대 6도의 위상 변화를 보였으나, 단열재를 사용했을 때는 1.5도 이하로 위상 변화가 줄어들었다. 이러한 PMF로 인한 불안정성은 CW 레이저와 PMF, 그리고 MZM의 편광축이 맞지 않는데 원인이 있었다. PMF에 입사하는 레이저의 편광이 편광축에 맞지 않으면, 복굴절에 의하여 편광이 회전하게 되고, 회전각의 크기는 온도에 매우 민감하다. MZM은 편광의 방향에 매우 민감한 장치이므로, PMF에서의 편광회전은 MZM 출력의 진폭변화로 이어지게 된다. 그림 4의 실험에서는 CW 레이저의 편광축이 MZM의 편광축과 45도 기울어져 있어서, 연결하는 광섬유의 신호 손실도 크게 나타나고, 불안정도도 높게 나왔다. 이것을 없애기 위해서 양쪽 편광



(a)



(b)

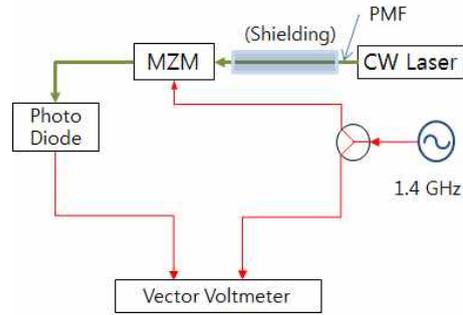
그림 3. KVN 울산 전파천문대 관측기기실에서 측정된 개선 이전의 기준 신호 전송시스템 안정도 측정 결과. (a) 원격지 신호 위상 변화, (b) 온도 변화.

축이 맞도록 한 쪽 편광축이 45도 기울어진 PMF로 CW 레이저와 MZM를 연결하였다.

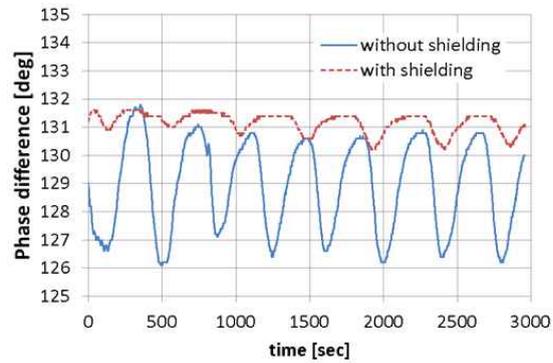
편광축이 맞는 PMF를 새로 설치한 이후의 위상 안정도 측정 결과는 그림 5에 보였다. 그림 5의 측정에서는 DBM 대신에 VVM을 사용하여 위상 측정을 하였다. 그림 3에 나타난 15도 이상의 위상 변화가 사라지고, 주변 온도에 따른 2 - 3도 정도의 완만한 기울기의 위상 변화만 나타났다. 이로부터 처음 망원경 측정에서의 위상 불안정이 PMF의 사용에서 비롯되었음을 확인하였다.

3.2. 안테나 움직임의 영향 개선

안테나 움직임에 따른 영향을 측정한 결과, 그림 6에서처럼 방위각 방향의 움직임에 따라 원격지 신호의 위상이 1도 이상 변화하였다. 이는 안테나가 움직일 때 발생하는 위상 변화가 보상되지 않고, 원격지 신호의 위상 변화로 나타난 것이다. 이 문제는 로컬 장치의 광 순환기를 교체한 뒤에 해결되었다. 광 순환기는 그림 1에서처럼 3개의 포트에 구성된다. 로컬 모듈 내부에 있는 광 순환기에는 1번 포트에 LD와 MZM이 보낸 신호가 입력된다. 입력된 신호의 대부분은 2번 포트를 통해 안테나에



(a)

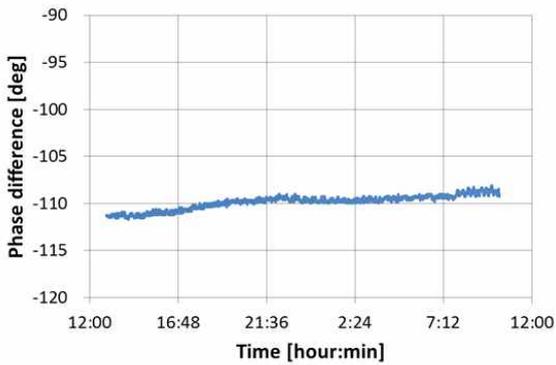


(b)

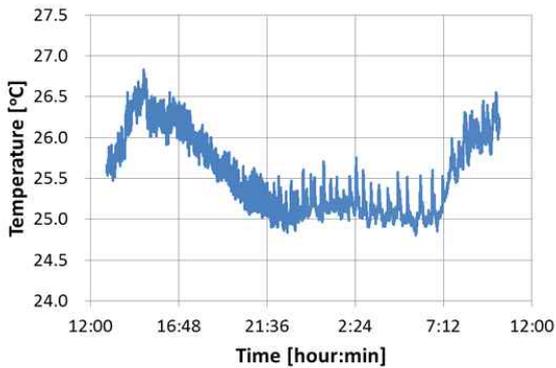
그림 4. PMF를 단열시킨 경우와 그렇지 않은 경우의 위상 변화 비교. (a) 실험 구성도, (b) 측정 결과.

전달되지만, 1/100000 정도는 3번 포트에 결합된다. 안테나로부터 돌아온 신호도 2번 포트를 통해 3번 포트에 전달된다. 이 신호와 1번 포트에서 3번 포트에 넘어간 신호가 간섭 현상을 일으키게 된다. 안테나가 움직일 때, 2번 포트를 통해 들어온 신호는, 방위각 방향의 wrap에 있는 광 케이블이 구부러지거나 비틀리면서 위상뿐만 아니라 크기도 변하게 된다. 이 중에서 크기 변화는 간섭 신호에서 추가적인 위상 변화를 발생시키며, 이는 보상이 되지 않는 오차 신호로 남는다. 이러한 간섭은 광 순환기 자체의 격리도 뿐만 아니라 광 순환기의 2번 포트와 연결된 어댑터에서의 반사에 의해서도 발생할 수 있다.

광 순환기의 교체 이후에, 안테나가 방위각 방향으로 0도에서 240도까지 움직일 때, 0.1 - 0.2도의 위상 변화만이 측정되었다(그림 7). 안테나가 움직이지 않을 때와 비교하여, 위상 변화의 차이가 거의 없었다. 이는 기존에 고정된 두 지점의 주파수 전송에 사용되던 그림 1의 VCO를 활용한 RF 주파수 전송 방법이 전파망원경처럼 광 케이블이 움직이는 경우에도 광학적 길이 변화를 잘 보상함을 보인 것이다. 안테나가 고도각 방향으로 움직



(a)



(b)

그림 5. PMF 교체 이후에 KVN 연세 전파천문대 관측 기기실에서 측정된 기준 신호 전송시스템 안정도 측정 결과. (a) 원격지 신호 위상 변화, (b) 온도 변화.

일 때는 특별한 위상의 변화가 측정되지 않았다. 안테나의 고도각 방향의 케이블 wrap은 최대 ± 45 도 정도까지 완만하게 구부러지기 때문에, 방위각 방향의 wrap에 비해 거의 위상 변화를 발생시키지 않는 것이다.

3.3. 시스템 안정화

주파수 전송 시스템의 성능 측정은 대부분 KVN 연세 전파천문대에서 이루어졌다. PMF와 광 순환기의 교체 외에도 포토 다이오드 적정 전력 입력, MZM 바이어스 전압 조정, 광 커넥터 연결 상태 개선 등을 시행하였다. 이러한 부분들이 제대로 설정되지 않았을 때는 갑작스런 0.5 - 1도의 위상 변화 등 불안정한 시스템 특성을 보였다.

이러한 개선 이후에 안테나가 고정된 상태에서 온도 변화의 영향을 측정하였다. 8시간 동안 측정된 위상 안정도를 그림 8에 보였다. 관측기기실은 최대 1.2도의 온

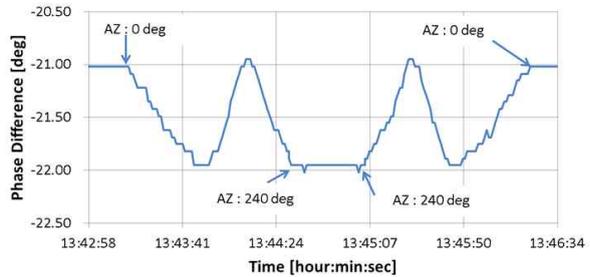


그림 6. 전파망원경이 방위각 방향으로 0도에서 240도로 움직였다가, 다시 240도에서 0도로 움직일 때의 원격지 신호의 위상 변화 측정 결과(개선 이전).

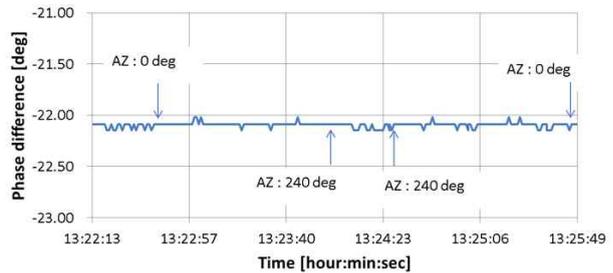
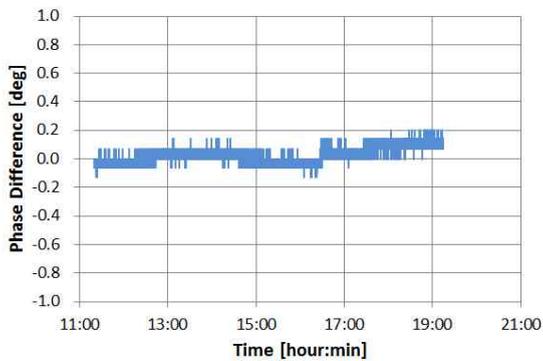


그림 7. 광 순환기 교체 이후에, 전파망원경이 방위각 방향으로 0도에서 240도로 움직였다가, 다시 240도에서 0도로 움직일 때의 원격지 신호의 위상 변화 측정 결과(개선 이후).

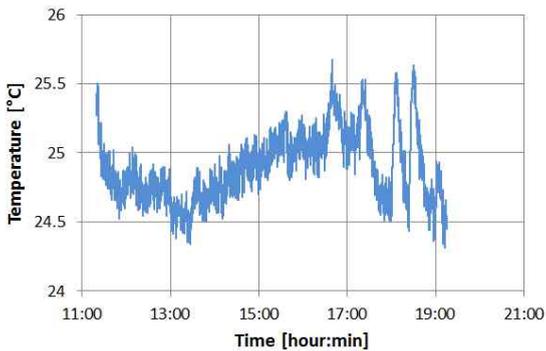
도 변화를 보였다. 관측기기실의 1.4 GHz의 원격지 신호는 0.3도 이내의 위상 변화를 보였다. 그림 8의 위상 안정도를 사용하여, 알란 편차를 계산하였다(Thompson et al., 2001). 그림 9에 나타낸 알란 편차에서 1,000초 안정도는 1×10^{-16} 을 보여, 서론에서 기술한 요구사항을 만족하였다. 이는 처음 KVN 울산 전파망원경에서 측정된 10도 이상의 위상 변화에 비하면 수십 배 이상 안정도가 향상된 것이다.

4. 결론

VCO를 활용한 광 변·복조 RF 기준 신호 전송시스템을 VLBI용 전파망원경에 설치하여, 1,000초 동안 약 1×10^{-16} 의 전송 안정도를 얻었다. 세부 시스템에 대한 안정도 측정과 부품의 교체를 통해서 전체 시스템의 안정도를 개선하였다. LD, MZM, 포토 다이오드만을 연결한 측정에서, 편광축이 맞지 않는 문제를 발견하여, 10도 이상의 위상 불안정을 PMF 교체로 개선하였다. 안테나



(a)



(b)

그림 8. KVN 연세 전파망원경에서 얻어진 안테나가 고정된 상태에서의 원격지신호 위상 안정도 측정 결과. (a) 원격지 신호 위상, (b) 관측기기실 온도.

가 방위각 방향으로 움직일 때 나타나는 1도 정도의 위상변화는 광 순환기의 교체로 수신기실에 전송되는 1.4 GHz 신호가 0.2도 이내의 작은 위상 변화만을 보였다. 이는 기존에 고정된 광 케이블에 대해서만 적용되었던 VCO 전압조정 방식의 광 변·복조 기준 주파수 전송시스템이 광 케이블이 움직이는 전파망원경에도 적용됨을 처음으로 보인 것이다.

이 실험은 KVN 전파망원경에서 이루어졌으며, 개발된 시스템은 3기로 이루어진 KVN의 기준 주파수 전송을 위해 사용되고 있다.

참고 문헌

이원규, 박창용, 문종철, 유대혁, 2010, 13 km 광섬유를 통하여 원격지로 전송된 1.4 GHz RF 신호의 위상잡음 제거, 한국광학회지, 21, 103

Fujieda, M., Kumagai, M., Gotoh, T., & Hosokawa, M., 2007, First Experiment of Ultra-stable Frequency Transfer System via Optical Fiber in NICT, Frequency Control Symposium, 840

Fujieda, M., Kumagai, M., Gotoh, T., & Hosokawa, M.,

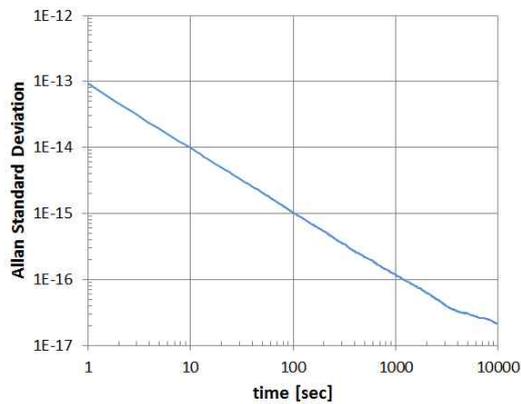


그림 9. KVN 연세 전파망원경에서 얻어진 개선 이후 기준 신호 전송시스템의 원격지 신호의 알란 편차.

2009, Ultrastable Frequency Dissemination via Optical Fiber at NICT, IEEE Trans. Instru. & Meas., 58, 1223

Sato, K., Hara, T., Kuji, S., Asari, K., Nishio, M., & Kawano, N., 2000, Development of an Ultrastable Fiber Optic Frequency Distribution System Using an Optical Delay Control Module, IEEE Trans. Instru. & Meas., 49, 19

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