

13 km 광섬유를 통하여 원격지로 전송된 1.4 GHz RF 신호의 위상잡음 제거

이원규[†] · 박창용 · 문종철 · 유대혁

한국표준과학연구원 차세대표준연구단
 ㉠ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2010년 4월 1일 받음, 2010년 5월 31일 수정본 받음, 2010년 6월 3일 게재 확정)

13 km 광섬유를 통해 1.4 GHz의 기준 주파수를 전송할 때, 광섬유에서 발생하는 위상잡음을 제거하는 시스템을 구성하였다. 전송된 주파수의 안정도 성능은 실험장치의 온도변화폭에 의존하였다. 실험실의 온도변화폭이 0.3°C 이내로 유지되는 동안에는 광섬유의 위상잡음을 제거했을 때, 원격지에 전송된 신호가 0.8초의 평균 시간에서 4.6×10^{-14} , 1000초의 평균 시간에서 2.5×10^{-16} 의 상대주파수 전송 안정도를 보여 만족할 만한 결과이었으나, 실험실의 온도가 3.5°C 범위로 변할 때에는, 1.2초의 평균 시간에서 6.8×10^{-14} , 1000초의 평균 시간에서 3.0×10^{-15} 의 전송 안정도를 보였다. 이 결과로부터 1000초의 평균시간에서 10^{-16} 수준의 상대주파수 안정도를 얻기 위해서 요구되는 실험장치의 온도 안정도 조건을 제시할 수 있었다.

Cancellation of Phase Noise in 1.4 GHz RF Signal Transferred to a Remote Site through 13 km Fiber

Won-Kyu Lee[†], Chang Yong Park, Jongchul Mun, and Dai-Hyuk Yu

Center for Emerging Measurement Standards, Korea Research Institute of Standards and Science
 1 Doryong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received April 1, 2010; Revised manuscript May 31, 2010; Accepted June 3, 2010)

A fiber-phase-noise compensating system was constructed for a 1.4 GHz reference frequency transferred through a 13-km-long fiber spool. The transfer instability was dependent on the temperature variation of the compensating system. With the room temperature variation stabilized within 0.3°C, the transfer instability was 4.6×10^{-14} at 0.8 s of average time and 2.5×10^{-16} at 1000 s of average time with the fiber phase noise compensated. However, with the room temperature changed by 3.5°C, the transfer instability was 6.8×10^{-14} at 1.2 s of average time and 3.0×10^{-15} at 1000 s of average time. From this result, the temperature stability condition for the experimental setup could be determined to obtain a transfer instability of 10^{-16} at 1000 s of average time.

Keywords: Optical fiber, RF transmission, Phase noise cancellation, Transfer instability, Temperature stabilization

OCIS codes: (120.3930) Metrological instrumentation; (120.3940) Metrology; (120.5050) Phase measurement; (070.1170) Analog optical signal processing

I 서 론

최근 들어 주파수 표준기의 비약적인 발전으로 인해 10^{-18} 수준의 상대주파수 정확도를 가지는 주파수 표준^[1]이 실현되고 있는 추세에 발맞추어, 광섬유를 통한 기준 주파수의 전송 방법은 기존의 위성 시스템을 이용한 무선 전송의 한계를 뛰어넘을 강력한 후보로서 활발히 연구되고 있다^[2-8]. 또한, 광섬유를 통한 신호의 전송은 구리 재질의 동축케이블을 이용할 때보다 신호의 손실이 작아서 멀리 떨어진 곳까지 높은 안정도의 기준 주파수를 전송할 수 있다는 장점을 가지고 있

다. 광섬유를 통해 기준 주파수를 전송하는 과정에서 전송 경로의 온도 변화 및 진동에 의해 위상잡음이 발생하는데, 온도 변화에 의해서는 전송된 기준 주파수의 장기 안정도가 나빠지고, 진동에 의해서는 단기 안정도가 나빠진다. 광섬유를 통한 전송 과정에서 발생하는 위상잡음을 능동적으로 제거하는 방법에 관한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되어, 현재 100 km가 넘는 거리까지 기준 주파수를 광섬유 위상잡음 없이 전송하는 결과가 보고되고 있다^[8]. 현재, 광섬유를 통한 높은 안정도의 기준 주파수 전송 방법은 주파수 표준 간의 비교에 쓰이고 있을 뿐만 아니라^[2-8], 초장기선 간섭법

[†]E-mail: oneqlee@kriss.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

(VLBI; very long baseline interferometry)을 이용한 전파 망원경 시스템^[9-13]이나 입자 물리학 실험을 위한 선형 가속기의 동기 신호를 제공하는 데에 쓰이고 있다^[14, 15]. 이러한 응용에서는 대체적으로 1000초의 평균시간에서 10^{-16} 수준의 상대주파수 안정도가 요구되고 있다.

국내에서는 100 MHz의 RF 신호를 23 km의 광섬유로 전송할 때, 진동과 온도 변화에 의하여 발생하는 위상잡음을 측정하고 이를 보상하는 실험 결과에 대한 보고가 이루어진 바 있다^[16]. 그러나, 이 연구에서는 광섬유로 전송된 기준 주파수의 전송 안정도 (transfer instability)를 위상잡음 보상을 구성하는 피드백 루프의 오차 신호로부터 구하였으므로, in-loop에서의 결과이고, 전송 경로를 왕복한 후 다시 돌아온 시작점에서 광섬유로 인한 위상잡음이 제거되는 실험 구도를 사용했기 때문에, 원격지에서는 광섬유를 통해 편도로 진행한 만큼의 위상잡음이 남아 있었다.

이 논문에서는 앞선 연구의 이러한 점들을 개선하여, 기준 주파수를 원격지에서 활용할 수 있도록 하기 위해서, 원격지에서 광섬유 전송으로 인한 위상잡음이 제거되는 구도로 실험 장치를 구성하였고, 실제로 원격지로 전송된 신호의 전송 안정도를 구하기 위해서 위상 보정 피드백 루프 밖에서 (out-of-loop) 위상 검출기로 측정하였다. 이 연구는 전파망원경의 관측기기실에 위치한 수소메이저의 1.4 GHz 기준 주파수를 안테나 수신기실로 광섬유를 통해 전송하는 것을 염두에 두고, 먼저 실험실 내부 조건에서 테스트를 하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 1.4 GHz의 기준 주파수를 13 km 길이의 광섬유 스플을 통해 전송하여 원격지에 전송된

신호의 주파수의 위상잡음을 측정하여, 전송 안정도를 구하였다. 위상잡음 제거 시스템에 의해 광섬유 전송에 의한 위상 잡음이 1/80 ~ 1/800 정도로 제거되는 결과를 얻었는데, 이러한 위상잡음 제거 성능은 실험장치의 온도변화폭에 따라 다른 결과를 보였다. 이로부터 1000초의 평균시간에서 10^{-16} 수준의 상대주파수 안정도를 얻기 위해서 요구되는 실험장치의 온도안정도를 결정할 수 있었다. 선행 연구 그룹에서는^[2-8] 실험실의 온도가 잘 유지되거나, 실험장치의 온도를 안정화한 상태에서 실험을 수행하였는데, 본 연구의 결과로서 실험장치에 요구되는 온도 안정도를 제시할 수 있었다.

II. 실험 장치

광섬유를 통해 기준 RF를 전송할 때, 원격지에서 광섬유의 위상잡음을 제거하기 위한 실험장치의 개요도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 DFB는 레이저 광원으로 사용된 분포 궤환형 레이저 (distributed feedback laser)이고, MZM은 마흐-젠더 광세기 변조기 (Mach-Zehnder intensity modulator), VCXO는 전압조절 결정발진기 (voltage-controlled crystal oscillator), PD는 광다이오드 (photodiode), S는 RF 전력 분배기 (power splitter), 삼각형은 RF 전력 증폭기, 화살표가 그려져 있는 동그라미는 광순환기 (optical circulator)이다. DFB1 (Thorlabs, PRO8000 DWDM source)의 파장은 1552.52 nm이었고, 출력은 13 dBm이었다. 광섬유를 통하여 원격지로 전송되는 레이저 빛에 VCXO에서 발생된 RF 신호를 실어주기 위하여 11

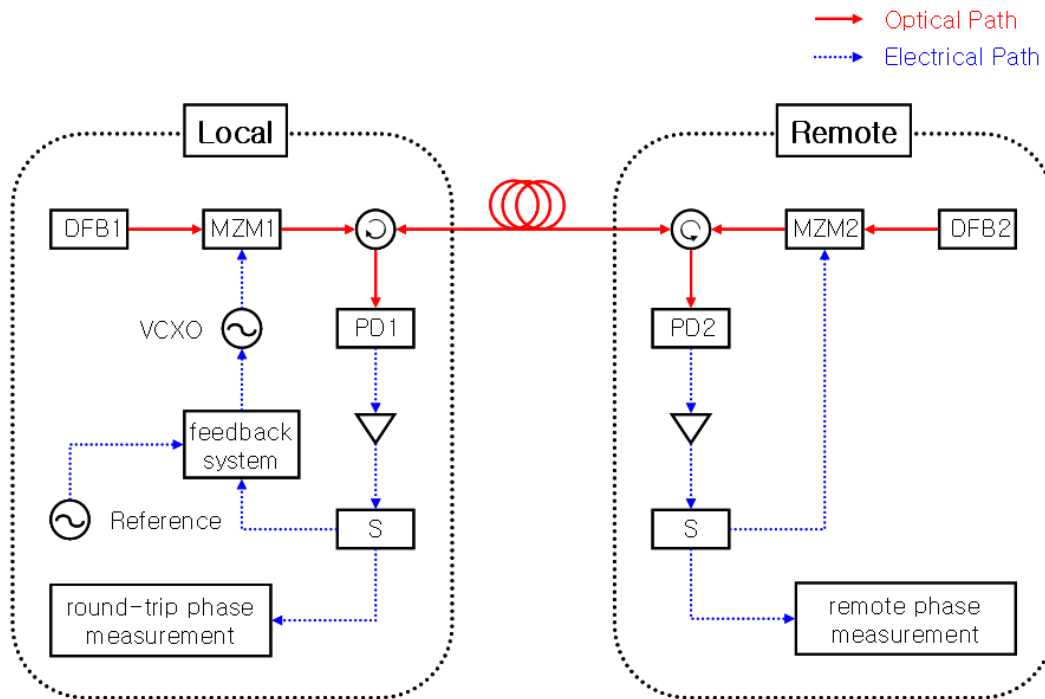


FIG. 1. Experimental outline for the fiber phase noise cancellation at the remote site (DFB; Distributed-feedback Laser, MZM; Mach-Zehnder Modulator, VCXO; Voltage Controlled Crystal Oscillator, PD; Photodiode, S; RF power splitter).

GHz까지 변조 가능한 MZM1 (AVANEX, 792000230)을 사용하여 진폭 변조를 하였다. VCXO로는 저잡음 신호발생기 (Agilent, E4428C)를 사용하여 1.4 GHz의 주파수를 발생시켰다. MZM1에 입력되는 광세기 (13 dBm)와 RF의 세기 (10 dBm)는 포화로 인한 신호 왜곡이 발생하지 않도록 적절히 조절하였으며, MZM1의 직류 전압 바이어스에 정전압 공급원을 걸어주어 최대 진폭의 50 % 수준을 중심으로 진폭 변조가 일어나도록 하였다. 일반적으로 마흐-젠더 광변조기는 입사광의 편광에 대한 의존도가 크지만, DFB와 MZM을 편광유지 광섬유로 연결하여 별도의 편광 조절기는 필요하지 않았다. 이렇게 RF로 진폭 변조된 레이저 빛을 광순환기를 통과시킨 후 13 km 길이의 전송용 광섬유를 지나 원격지에서 다시 광순환기를 통과시켜 PD2를 이용하여 RF 신호를 검출할 수 있었다. 원격지에서 다시 시작점으로 레이저 빛을 돌려 보낼 때, 2×2 광섬유 결합기 (fiber coupler)를 사용해도 되지만, 이렇게 하면 광섬유 안에서 서로 반대로 진행되는 빛이 같은 파장을 가지므로 유도 브릴루앙 산란 (stimulated Brillouin scattering)에 의한 잡음이 발생하였다. 이것을 방지하기 위해서 원격지에서 별도의 광원 (DFB2)과 진폭 변조기 (MZM2)를 사용하였다. DFB2의 파장은 1551.79 nm로서 DFB1의 파장과 다르게 하였으며 그 출력은 13 dBm이었다. MZM 및 광섬유 소자들을 거쳐서 실제로 전송용 광섬유에

입사하는 레이저의 세기는 각종 삽입손실들 때문에 -1.7 dBm이었다. MZM2에 실리는 RF로는 PD2로 검출된 신호를 증폭하여 인가해줌으로써 광섬유를 통한 편도 전송으로 인한 위상잡음 정보가 실리도록 하였다. 원격지에서 레이저 빛을 광순환기를 통하여 다시 시작점으로 전송하고 시작점에서의 광순환기를 지난 뒤, PD1으로 왕복 경로의 광섬유로 인한 위상잡음 정보를 가진 신호를 추출하였다. PD1과 PD2로는 3.5 GHz까지의 신호를 얻을 수 있는 모델 (Newfocus, 1592)을 사용하였다. 이 신호를 기준 발진기와 위상 비교를 하여 광섬유로 인한 잡음을 추출하고, 피드백 시스템을 통해 VCXO에 주파수 변조를 해주어 광섬유로 인한 위상잡음을 능동적으로 보상하는 회로를 구성하였다. 이는 변조에 사용되는 발진기의 주파수를 조금 바꾸어 줌으로써 광섬유에서 발생한 위상 변화를 보상하는 원리이다. 기준 주파수를 발생시키는 발진기로서는 수소 메이저에 동기된 저잡음 신호발생기 (Agilent, E4424B)를 사용하였다.

그림 2에는 광섬유로 인한 위상 잡음을 제거하는 피드백 시스템의 구체적인 장치도를 보였다. 1.4 GHz를 발생시키는 VCXO의 위상을 $\omega t + \phi_C$, 1.4 GHz 기준 발진기의 위상을 $\omega t + \phi_R$, 400 MHz의 중간 주파수를 발생시키는 발진기 (Agilent, 8241A)의 위상을 $\omega_{IF}t$ 로 나타낼 때, 주파수 혼합기 (frequency mixer) M1의 출력에 1 GHz 중심의 대역통과필터

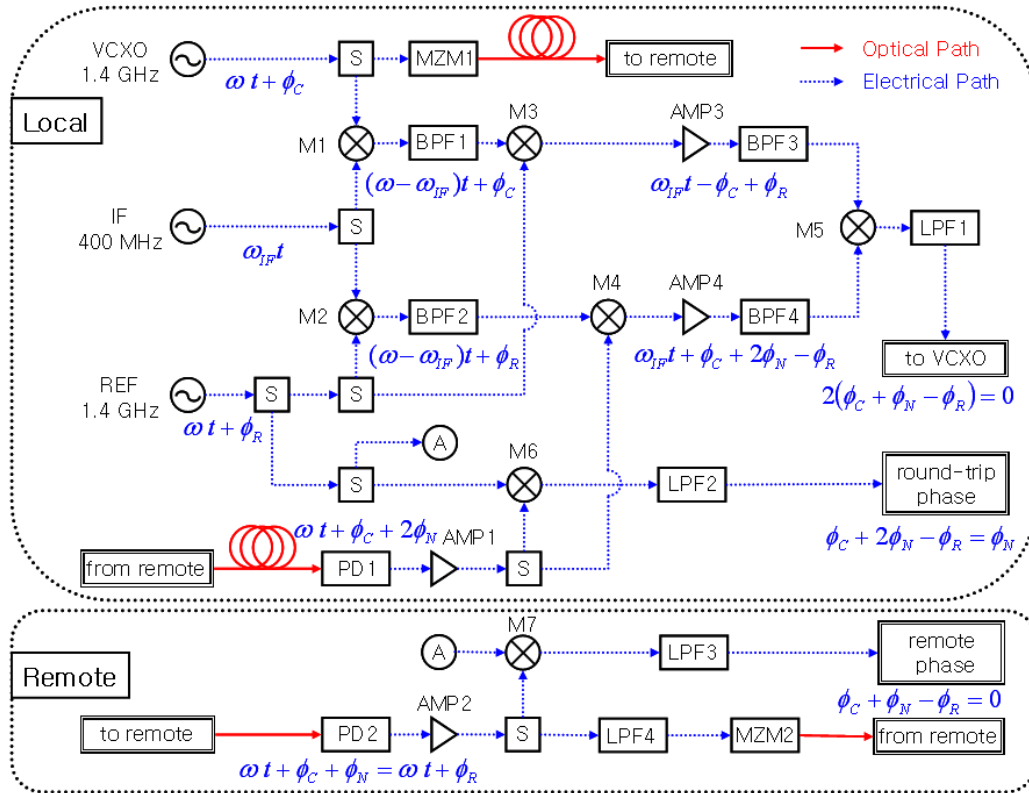


FIG. 2. Experimental feedback setup for the fiber phase noise cancellation at the remote site (MZM; Mach-Zehnder Modulator, VCXO; Voltage Controlled Crystal Oscillator, PD; Photodiode, S; RF power splitter, M; Frequency Mixer, BPF; Band-pass Filter, LPF; Low Pass Filter).

(band-pass filter) BPF1를 사용하면 $(\omega - \omega_{IF})t + \phi_C$ 의 신호를 얻을 수 있다. 마찬가지로 주파수 혼합기 M2의 출력에 1 GHz 중심의 대역통과 필터 BPF2를 사용하면 $(\omega - \omega_{IF})t + \phi_R$ 의 신호를 얻을 수 있다. M1과 M2에 입력되는 신호의 세기는 7 dBm으로 맞춰 주었다. 주파수 혼합기 M3와 400 MHz 중심의 대역통과필터 BPF3를 이용하여 M1의 출력 신호와 기준 주파수 신호의 차주파수 신호를 얻으면 그 위상은

$$\omega_{IF}t - \phi_C + \phi_R \quad (1)$$

로 주어진다. MZM1을 이용하여 진폭변조되어 13 km 길이의 광섬유로 전송된 빛을 원격지에서 광다이오드 PD2로 검출하면 그 위상은 광섬유로 인한 위상잡음 ϕ_N 이 더해져서 $\omega t + \phi_C + \phi_N$ 과 같이 주어진다. 이 신호를 RF 증폭기 AMP2로 적절히 증폭한 후 고차조화파를 잘라주기 위한 1.4 GHz 저역통과필터 (low pass filter) LPF4를 사용하여 MZM2를 진폭변조하면, 광섬유로 인한 위상잡음 정보를 유지한 채 다시 시작점으로 레이저 빛을 전송할 수 있다. 이렇게 하여 광섬유를 통해 왕복하여 전송된 후 시작점의 광다이오드 PD1에 의하여 검출된 신호의 위상은 $\omega t + \phi_C + 2\phi_N$ 으로 주어진다. 이 신호와 주파수 혼합기 M2의 출력의 차주파수 신호를 주파수 혼합기 M4와 400 MHz 중심의 대역통과필터 BPF4를 이용하여 얻으면, 그 위상은

$$\omega_{IF}t + \phi_C + 2\phi_N - \phi_R \quad (2)$$

과 같이 주어진다. 식 (1)의 위상과 식 (2)의 위상의 차이를 위상 검출기 M5와 1.9 MHz 저역통과필터 LPF1을 사용하여 얻으면, 그 결과는

$$2(\phi_C + \phi_N - \phi_R) \quad (3)$$

와 같이 주어진다. M5의 출력 전압을 VCXO의 외부 주파수 변조 단자에 걸어주면 피드백 루프가 완성되고, 식 (3)이 0이 되는 조건을 만족시킨다. 이 때, $\phi_C = \phi_R + \phi_N$ 의 관계식을 만족시키며, PD2에 의해 추출된 원격지에서의 RF 신호는

$$\omega t + \phi_C + \phi_N = \omega t + \phi_R \quad (4)$$

로 주어지게 되므로, 광섬유로 인한 위상잡음의 영향이 제거되어 원격지에서 기준 주파수 발생기의 신호와 동일한 RF 신호를 얻을 수가 있다. 원격지에서 전송된 신호의 위상잡음을 보기 위해서는, PD2의 출력 신호와 기준 주파수 발생기의 출력(그림 2에서 ㉑)의 위상차를 위상 검출기 M7과 1.9 MHz 저역통과필터 LPF3를 사용하여 얻으면 되는데, 멀리 떨어진 원격지에서는 전송잡음이 없는 기준 주파수 공급원이 없으므로, 13 km 길이의 광섬유 스폰로 연결된 원격지의

실험장치를 시작점 바로 옆에 위치시켜서 테스트하였다. 한편, 시작점의 광다이오드 PD1의 출력과 기준 주파수 발생기의 출력의 위상차를 위상 검출기 M6과 1.9 MHz 저역통과필터 LPF2를 사용하여 얻으면 그 결과는

$$\phi_C + 2\phi_N - \phi_R = \phi_N \quad (5)$$

과 같이 주어져서, 시작점에서 광섬유를 통한 편도 전송에 의해 발생하는 위상잡음을 모니터링할 수 있는 수단을 제공한다.

III. 실험 결과

앞에서 살펴 보았듯이 그림 2에서 원격지의 위상 검출기 M7의 출력을 측정하면, 위상잡음 제거 서보를 작동하지 않았을 때는 광섬유 편도 전송에 의한 위상잡음을 볼 수 있고, 위상잡음 제거 서보를 작동했을 때에는 광섬유 편도 전송에 의한 위상잡음이 제거되는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 그림 2에서 시작점의 위상 검출기 M6의 출력을 측정하면, 위상잡음 제거 서보를 작동하지 않았을 때는 광섬유 왕복 전송에 의한 위상잡음을 볼 수 있고, 위상잡음 제거 서보를 작동했을 때에는 식 (5)에서와 같이 광섬유 편도 전송에 의한 위상잡음을 측정할 수 있다. 또한, 위상잡음 제거 서보의 피드백에 쓰이는 위상 검출기 M5의 출력을 측정하면, 위상잡음 제거 서보가 얼마만큼 잘 동작하여 오차 신호가 영이 되는 조건을 만족하는 지를 알 수 있고, in-loop에서의 전송 안정도를 구할 수 있다.

위상 검출기 M5, M6, M7의 전압 출력을 위상 정보로 환산하기 위해서는 전압-위상 환산계수를 측정해야 한다. 이는 위상잡음 제거 서보를 켜지 않은 상태에서 VCXO의 주파수를 기준 주파수인 1.4 GHz와 약간 다르게 하여 (예를 들어 1.4 GHz + 2 Hz) 측정할 수 있다. 위상 검출기의 양쪽 입력 신호의 위상차가 ϕ 일 때, 위상 검출기의 전압 출력 V 는

$$V = K \sin \phi = \frac{V_{pp}}{2} \sin \phi \quad (6)$$

와 같이 주어진다. 여기서 K 는 위상 검출기의 전압-위상 환산계수이고, V_{pp} 는 출력 전압의 최대치와 최소치의 차이이다. 그러므로 위상 검출기의 양쪽 입력 신호의 위상차 ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \arcsin \frac{2V}{V_{pp}} \quad (7)$$

이와 같은 방법으로 측정된 각 위상 검출기의 전압-위상 환산계수는 M5의 경우 45 mV/rad, M6의 경우 130 mV/rad, M7의 경우 275 mV/rad이었다.

13 km 광섬유를 통해 전송된 기준 주파수 신호의 위상잡음을 제거하는 서보를 동작시켰을 때, 광섬유 왕복 전송 후에 측정된 위상 검출기 M6의 출력 전압을 그림 3에 나타내었다. 이 전압 신호는 식 (5)에서와 같이 광섬유 편도 전송에 의해 발생한 위상잡음을 의미한다. 이 전압 신호를 식 (7)을 이용하여 위상으로 변환한 결과를 그림 4에 나타내었다. 13 km의 긴 전송 거리에서 발생한 위상잡음 신호이므로 $\pm\pi/2$ rad을 초과하는 크기의 위상잡음이 있으므로 식 (7)을 적용할 때 적당한 부호를 선택하고 $\pi/2$ 의 정수배를 더해주었다. 그림에서 볼 수 있듯이 총 21.7 시간 동안의 측정에서 14.3 rad 범위의 위상잡음이 13 km 광섬유 전송에서 발생했음을 알 수 있다.

그림 5에 실험이 진행되는 동안의 실험실 온도를 측정된 결과를 나타내었다. 그래프에서 24.5°C 근처의 온도로 유지된 부분은 낮 동안에 실험실 항온 시스템이 동작된 구간이고, 21.5°C 근처의 온도로 유지된 부분은 밤 동안에 항온 시

스템 설정 온도이다. 항온 시스템의 두 설정값이 바뀌는 동안에는 짧은 시간 동안 약 3.5°C 범위의 온도 변화가 있었다. 그림 4의 광섬유 위상잡음의 변화양상이 그림 5의 실험실 온도의 변화 양상과 일치하므로 이 위상잡음은 주로 광섬유 스플이 위치한 실험실의 온도 변화 때문에 발생한 것임을 알 수 있다. 온도에 따른 광섬유의 광경로 변화가 약 $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있다는 사실로부터 계산해 볼 때^[12], 13 km 길이의 광섬유에 3.5°C의 온도 변화로 인해 발생하는 광경로의 변화는 0.32 m로 추산되고, 이는 1.4 GHz 신호에 대하여 14.1 rad의 위상변화이며, 이것은 그림 4에서의 위상 변화량인 14.3 rad과 잘 일치한다.

13 km 광섬유의 위상잡음을 제거했을 때, 원격지에서 위상 검출기 M7의 출력 신호를 위상으로 변환한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 21.7 시간 동안의 측정에서 0.187 rad의 위상변화가 있었다. 그림 4에서와 같이

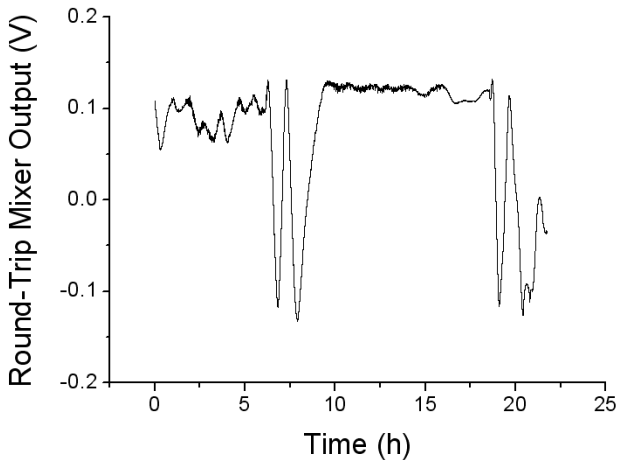


FIG. 3. Output of the mixer measuring the phase of the 1.4 GHz signal after a round-trip through a 13-km-long fiber spool when the fiber phase noise is cancelled.

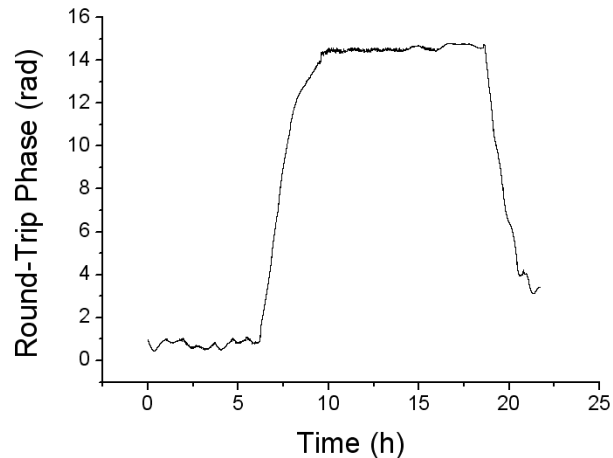


FIG. 4. Phase noise produced in the course of the 1.4 GHz signal transmission through a 13-km-long fiber spool.

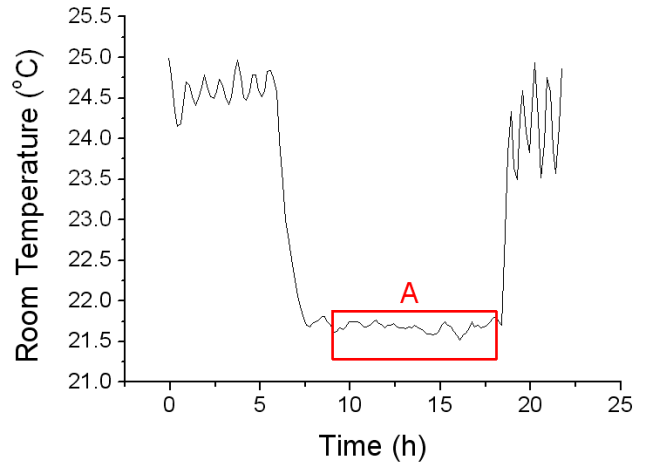


FIG. 5. Room temperature during the reference frequency transmission through a fiber spool. Temperature variation was 3.5°C during the whole measurement time (0.3°C during the time interval marked by 'A' in a rectangular box).

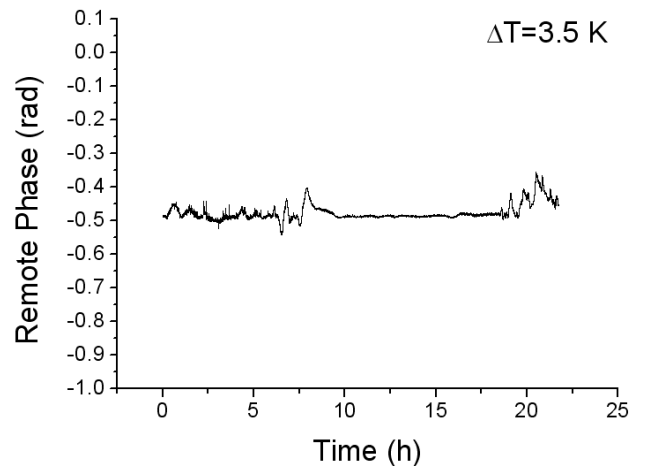


FIG. 6. Phase noise measured by the mixer located at the remote site with the 13-km-long fiber phase noise cancelled.

이 시간 동안 광섬유 편도 전송에서 14.3 rad의 위상잡음이 발생한 것과 비교하면, 위상잡음 제거 서보에 의해 약 1/80 수준으로 광섬유의 위상잡음이 제거되었음을 알 수 있다.

이 실험을 진행하는 중에, 그림 5의 9 h에서 18 h까지의 구간(그림 5에서 사각형으로 표시한 A 구간)에서는 실험실의 온도 변화가 크지 않았는데, 이 시간 구간 동안의 실험실 온도 변화폭은 약 0.3°C 이었다. 이렇게 실험실 온도가 안정된 동안에 원격지에 전송된 신호의 위상잡음을 측정하는 결과를 그림 7에 나타내었고, 위상의 전체 변화폭은 약 18 mrad로 나타났다. 이로부터 실험장치의 온도 변화를 0.3°C 이내로 유지한다면, 광섬유 위상잡음 제거 시스템을 사용하여 약 1/800 수준으로 광섬유로 인한 잡음을 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

실험실 온도가 크게 변할 때에 광섬유 위상잡음의 제거 성능이 나빠지는 것은 실험에 사용된 RF 소자, 구리 동축 케이블, 광 소자 들의 온도 의존성에 의해 발생한 위상잡음의 영향이다. 이러한 위상잡음은 광섬유로 인한 위상잡음과는 달리 레이저 빛이 광섬유를 왕복하는 동안 한번만 발생하기 때문에, 광섬유 위상잡음 제거 서보에 의하여 보상되지 않는다.

그림 8은 위의 결과들의 주파수 전송 안정도를 알란 편차^[17]로 나타낸 결과이다. 이것은 기준 주파수에 비하여 전송된 주파수가 상대적으로 얼마만큼 변했는가를 나타내는 지표이다. 그림에서 동그라미는 광섬유 위상잡음을 제거하지 않았을 때, 광섬유의 13 km 편도 전송에 의한 잡음으로 인한 주파수 전송 안정도이다. 1.2초의 평균 시간에서 1.2×10^{-13} 의 전송 안정도를 가지고, 광섬유 스폰의 온도가 3.5°C 폭으로 하루 동안 변했기 때문에 주파수 흐름이 존재하여, 평균 시간이 증가해도 안정도가 크게 좋아지지 않아서, 10000초의 평균 시간에서도 5.1×10^{-14} 의 전송 안정도를 보였다. 실험실의 온도가 3.5°C 폭으로 하루 동안 변하는 동안에, 광섬유로 인한 위상잡음을 제거하여 원격지에서 측정된 주파수 전송 안정도는 그림 8에서 사각형으로 표시된 그래프와 같다. 이 경

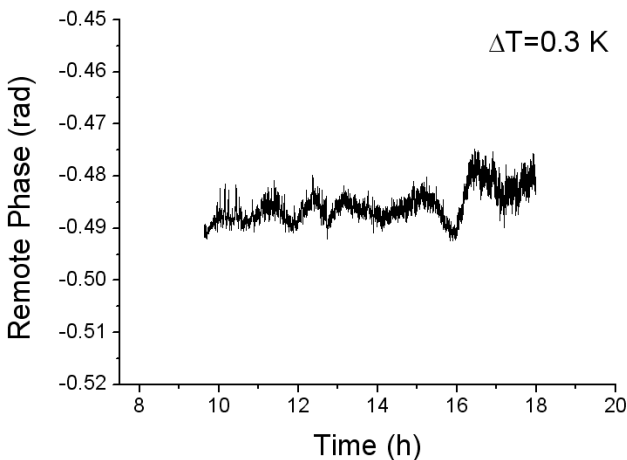


FIG. 7. Phase noise measured by the mixer located at the remote site with the 13-km-long fiber phase noise is cancelled when the room temperature is stabilized within 0.3°C.

우에는 1.2초의 평균 시간에서 6.8×10^{-14} 의 전송 안정도를 보였고, 1000초의 평균 시간에서 3.0×10^{-15} , 10000초의 평균 시간에서 5.7×10^{-16} 의 전송 안정도를 보였다. 이 경우 광섬유로 인한 주파수 불안정도가 위상잡음 제거 서보에 의해 10000초에서 20 dB 정도 개선된 결과를 보였으나, 실험실의 온도 변화로 인해 광섬유를 제외한 실험장치에서 발생한 위상잡음의 영향이 일부 남아 있다. 그림에서 마름모로 표시된 그래프는, 광섬유로 인한 위상잡음을 제거하여 기준 주파수를 전송했을 때, 실험실 온도가 0.3°C 폭 이내에서 변하는 동안만 원격지에서 측정된 주파수 전송 안정도이다. 이 때에는 실험 장치의 온도 변화가 크지 않기 때문에 전송 안정도가 더욱 개선되어, 0.8초의 평균 시간에서 4.6×10^{-14} 의 전송 안정도를 보였고, 1000초의 평균 시간에서 약 2.5×10^{-16} 의 전송 안정도를 보였다. 이 결과는 서론에서 언급한 응용 분야들에 활용 가능한 수준이며, 참고문헌 [2]와 비교할 때, PMD의 효과를 상쇄하지 않은 결과로서는 세계 수준에 근접한 성능을 보인 것이라고 해석된다. 보다 향상된 전송 안정도를 얻기 위해서는 편광모드분산(PMD)으로 인한 효과를 없애기 위해 polarization scrambler를 사용해야 하는데^[4, 8], 이 경우에는 1000초의 평균 시간에서 4×10^{-17} , 10000초의 평균시간에서 1×10^{-17} 의 전송 안정도가 가능하다는 것이 보고된 바 있다^[4]. 또한, 그래프의 기울기가 대략적으로 평균 시간의 역수에 비례하는데, 이것은 위상 잡음 루프에서 흔하게 볼 수 있는 상관관계이며, 광섬유의 위상잡음이 성공적으로 제거되어 원격지에서도 기준 주파수 발진기의 위상과 동일한 위상을 가진다는 것을 의미한다. 좀 더 오랜 시간동안 실험실 온도가 0.3°C 폭 이내로 유지되었다면, 10000초의 평균 시간에서 약 2.5×10^{-17} 의 전송 안정도를 보일 것으로 기대되며, 이 경우에는 광섬유로 인한 주파수 불안정도가 위상잡음 제거 서보에

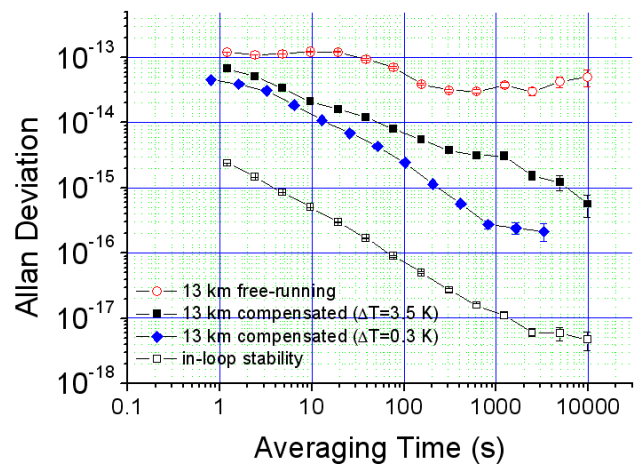


FIG. 8. Transfer instability (Allan deviation) of the 1.4 GHz signal transferred to the remote site via a 13-km-long fiber spool (Circles; with free-running fiber, filled squares; with fiber noise cancelled when the temperature variation is 3.5°C, diamonds; with fiber noise cancelled when the temperature variation is 0.3°C, open squares; in-loop instability).

의해 33 dB 만큼 개선될 수 있음을 의미한다. 흰색 사각형으로 표시된 그래프는 위상제거 피드백에 사용된 오차 신호로부터 얻어진 in-loop에서의 전송 안정도인데, 1.2초의 평균 시간에서 2.4×10^{-14} , 10000초의 평균 시간에서 4.7×10^{-18} 의 전송 안정도를 보였다. 이것은 위상잡음을 보상하는 피드백을 걸어 주었을 때 in-loop에서 남아있는 위상잡음을 의미하며, 가장 이상적인 상태에서의 위상잡음 제거 시스템의 성능을 나타낸다고 볼 수 있다.

위의 실험결과로부터 1000초의 평균시간에서 10^{-16} 수준의 상대주파수 안정도를 얻기 위해서 요구되는 실험장치의 온도안정도가 0.3°C 정도임을 결정할 수 있었다. 이 조건은 실험장치를 둘러싸는 케이스의 온도만을 조절한다면, 실험적으로 어렵지 않게 실현 가능한 것이며, 현재 진행되고 있는 온도 안정 장치의 설계에 반영하여 제작되고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 실험실 내부 조건에서 13 km 길이의 광섬유 스플을 통해 1.4 GHz의 기준 주파수를 원격지로 보낼 때, 광섬유에서 발생한 위상잡음을 제거하는 실험을 수행하였다. 실험실의 온도가 하루 동안에 3.5°C 폭으로 변하는 조건에서는, 위상잡음 제거 서보를 동작시켰을 때, 원격지로 전송된 신호의 전송 안정도가 1.2초의 평균 시간에서 6.8×10^{-14} , 1000초의 평균 시간에서 3.0×10^{-15} 이었다. 실험실의 온도변화 폭이 0.3°C 이내로 유지되는 동안에는 전송 안정도가 개선되어 0.8 초의 평균 시간에서 4.6×10^{-14} , 1000 초의 평균 시간에서 약 2.5×10^{-16} 로서, 서론에서 언급한 응용 분야들에서 활용 가능한 수준의 전송 성능을 보여주었다. 이로부터 1000 초의 평균시간에서 10^{-16} 수준의 상대주파수 안정도를 얻기 위해서 요구되는 실험장치의 온도안정도가 0.3°C 정도임을 결정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국천문연구원에서 시행한 출연연구사업 위탁 연구과제의 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

1. C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, "Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks," *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070802 (2010).
2. C. Daussy, O. Lopes, A. Amy-Klein, A. Goncharov, M. Guinet, C. Chardonnet, F. Narbonneau, M. Lours, D. Chambon, S. Bize, A. Clairon, G. Santarelli, M. E. Tobar,

- and A. N. Luiten, "Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} ," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 203904 (2005).
3. A. Amy-Klein, A. Goncharov, C. Daussy, C. Grain, O. Lopez, G. Santarelli, and C. Chardonnet, "Absolute frequency measurement in the 28-THz spectral region with a femtosecond laser comb and a long-distance optical link to a primary standard," *Appl. Phys. B* **78**, 25-30 (2004).
4. O. Lopez, A. Amy-Klein, C. Daussy, C. Chardonnet, F. Narbonneau, M. Lours, and G. Santarelli, "86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer," *Eur. Phys. J. D.* **48**, 35-41 (2008).
5. S. M. Foreman, K. W. Holman, D. D. Hudson, D. J. Jones, and J. Ye, "Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks," *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 021101-1-25 (2007).
6. J. Ye, J. L. Peng, R. J. Jones, K. W. Holman, J. L. Hall, D. J. Jones, S. A. Diddams, J. Kitching, S. Bize, J. C. Bergquist, L. W. Hollberg, L. Robertsson, and L.-S. Ma, "Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network," *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 1459-1467 (2003).
7. F. Narbonneau, M. Lours, S. Bize, A. Clairon, G. Santarelli, O. Lopez, C. Daussy, A. Amy-Klein, and C. Chardonnet, "High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network," *Rev. Sci. Instr.* **77**, 064701 (2006).
8. M. Kumagai, M. Fujieda, S. Nagano, and M. Hosokawa, "Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link," *Opt. Lett.* **34**, 2949-2951 (2009).
9. K. Sato, T. Hara, M. Fujishita, S. Kuji, S. Tsuruta, Y. Tamura, T. Sasao, K. Sato, and S. Manabe, "Application of phase-stabilized optical fiber in transmission of reference and IF signals in VLBI observation," *IEEE Trans. Instr. Meas.* **41**, 385-389 (1992).
10. K. Sato, T. Hara, S. Kuji, K. Asari, M. Nishiro, and N. Kawano, "Development of an ultrastable fiber optic frequency distribution system using an optical delay control module," *IEEE Trans. Instr. Meas.* **19**, 19-24 (2000).
11. R. T. Logan Jr. and G. F. Lutes, "High stability microwave fiber optic systems: demonstrations and applications," in *Proc. 1992 IEEE Frequency Control Symposium* (Hershey, PA, USA, May 1992), pp. 310-316.
12. P. A. Krug, M. I. Large, and R. G. Davison, "Optical fiber technique for remote stabilization of RF phase," *Optical Fiber Technology* **5**, 175-184 (1999).
13. M. Calhoun, R. Sydnor, and W. Diener, "A stabilized 100-megahertz and 1-gigahertz reference frequency distribution for Cassini radio science," *IPN Progress Report* **42-148**, 1-11 (2002).
14. J. Frisch, D. G. Brown, and E. L. Cisneros, "The RF phase distribution and timing system for the NLC," in *Proc. XX International Linac Conference* (Monterey, California, USA, Aug. 2000), pp. 745-747.

15. J. Frisch, D. Bernstein, D. Brown, and E. Cisneros, "A high stability, low noise RF distribution system," in *Proc. IEEE Particle Accelerator Conference* (Chicago, IL, USA, Aug. 2001), vol. **2**, pp. 816-818.
16. W.-K. Lee, D.-S. Yee, Y.-B. Kim, and T. Y. Kwon, "Highly stable RF transfer over a fiber network by fiber-induced phase noise cancellation," *Hankook Kwanghak Hoeji* (Korean Opt. Photon.) **17**, 514-518 (2006).
17. J. A. Barnes, A. R. Chi, L. S. Cutler, D. J. Healey, D. B. Leeson, T. E. McGunigal, J. A. Mullen JR., W. L. Smith, R. L. Sydnor, R. F. C. Vessot, and G. M. R. Winkler, "Characterization of frequency stability," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **IM-20**, 105-120 (1971).