

위상잡음 제거에 의한 광섬유망에서의 높은 안정도의 RF 전송

이원규[†] · 이대수 · 김영범 · 권택용

한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

Ⓞ 305-340대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2006년 10월 31일 받음, 2006년 11월 21일 수정본 받음)

높은 안정도를 가지는 100 MHz의 RF 신호를 23 km의 광섬유망을 통하여 전송하였다. 진동과 온도 변화에 의하여 생기는 광섬유 전송과정에서의 위상 잡음을 측정하고 이를 보상하는 회로를 구성하였다. 광섬유 잡음이 제거되었을 때, RF 신호 전송의 상대주파수 불안정도는 1초 평균시간에서 6×10^{-14} , 10000 초 평균시간에서 2×10^{-17} 으로서 기준 RF 신호의 안정도와 거의 같은 수준으로 광섬유를 통하여 RF를 전송할 수 있었다. 잡음 보상에 의하여 단측파대 위상잡음은 푸리에 주파수 1 kHz 이하에서 20 dB 이상 감소하였다.

주제어 : RF transfer, Fiber network, Phase noise, Transfer stability

I 서 론

광섬유를 통한 RF 전송은 일반적인 구리선 동축케이블에 비해 신호의 손실이 작아서 멀리 떨어진 곳까지 높은 안정도의 기준 주파수를 보내는 데에 장점을 가지고 있다. 광섬유를 통한 광 전송은 공기 중보다 작은 환경영향으로 인해 전송과정에서 추가되는 잡음이 비교적 작고, 능동적으로 잡음의 효과를 보정하는 것이 용이하며, 기존에 광범위하게 설치되어 있는 광섬유망을 활용할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 그러나 광섬유를 통하여 RF를 전송하는 과정에서 광 경로상에서의 진동이나 온도 변화에 의하여 발생하는 위상잡음에 의해 원래의 기준 주파수의 안정도가 다소 악화되는데, 능동적으로 이 잡음을 제거하게 되면 기준 주파수에 거의 근접하는 안정도로 RF를 전송할 수 있다. 현재 광섬유를 통한 높은 안정도의 기준 주파수 전송 방법은 초장기선 간섭법(VLBI; very long baseline interferometry)을 이용한 전파 망원경 시스템^[1-5]이나 입자 물리학 실험을 위한 선형 가속기^[6,7]의 동기 신호를 제공하는 데에 쓰이고 있다. 이러한 응용에서는 1000초의 평균시간에서 10^{-16} 정도의 상대주파수 안정도가 요구되고 있다. 또한, 광통신 분야에서도 향후 높은 안정도의 기준 주파수와 동기 신호의 제공에 대한 요구에 대응할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 포획된 원자나 이온을 이용한 광 주파수 표준기들은 가까운 장래에 $10^{-17} \sim 10^{-18}$ 정도의 상대주파수 정확도에 도달할 수 있을 것으로 예측되는데^[8], 이러한 표준기들은 복잡한 시스템을 가지므로 직접 이동하기에 많은 어려움이 있어 이들 간의 주파수의 상호 비교 방법이 중요한 문제로 대두될 것으로 보인다. 현재 공간적으로 서로 떨어져 있는 주파수 표준을 비교하는 가장 좋은 방법인 위성 항법 시스템(GPS; global positioning system)에 기반한 양방향 시간비교 방법(TWSTT; two-way satellite time

transfer)을 이용하면, 하루 동안의 평균시간에서 10^{-15} 정도의 정확도로 주파수 비교가 가능하지만, 이보다 훨씬 높은 정확도를 가질 것으로 예상되는 광 주파수 표준기들의 비교에는 한계가 있을 것으로 보인다. 광섬유 망을 통한 RF 전송은 이러한 응용에 있어서도 훌륭한 대안이 될 것으로 기대된다.^[9-12] GPS를 이용하는 방법과 비교하여 추가적인 장점으로써 광섬유 망을 통한 전송은 상호 주파수의 단기간(short-term) 안정도의 비교도 가능하다.

이 분야의 연구는 1990년대에 전파망원경이나 입자가속기 등의 동기 신호 제공의 목적으로 이루어지다가^[1-7] 2000년대 들어 주파수 표준을 전송하는 목적으로도 활발하게 진행되고 있다.^[9-12] JILA 연구소의 J. Ye 등은 광빔(optical comb)을 이용하여 광 주파수를 절대측정하기 위한 기준 주파수 신호로 3.5 km 떨어진 NIST에 있는 수소 메이저를 사용하기 위해서 광섬유 망을 사용하였다. 이들은 광섬유 망의 잡음으로 인한 상대주파수의 불안정도가 1초의 적분시간에서 2×10^{-13} 인 결과를 얻었다.^[9] 또한, C. Daussy 등은 자신들이 개발한 광 주파수 표준기인 산화오스뎀-안정화 이산화탄소 레이저(CO₂/OsO₄)의 주파수를 광빔으로 측정하기 위하여, 경로가 43 km 떨어진 파리의 SYRTE 연구소로부터 1초의 적분시간에서의 안정도가 10^{-14} 이하인 특성을 가지는 극저온 사파이어 발진기(cryogenic sapphire oscillator)의 100 MHz 신호를 광섬유를 이용하여 전송해 오는 연구를 하였다.^[10-12] 이들은 광섬유에서 생긴 위상잡음을 능동적으로 보상함으로써 하루 동안의 적분시간에 10^{-17} 의 상대 안정도로 기준 RF를 전송하는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 주파수 발생기로 100 MHz의 RF를 발생시키고 마흐-젠더 변조기를 이용하여 레이저의 출력을 진폭 변조함으로써 23 km의 광섬유망을 통하여 RF를 전송하였다. RF로 변조된 광신호를 광다이오드(PD)를 이용하여 전기신호로 변환하고, 기준 주파수 발생기와 위상을 비교하여 광섬유 전송 경로에서 발생된 위상 잡음을 추출하였다. 진폭 변

[†] E-mail: oneqlee@kriss.re.kr

조에 이용된 주파수 발생기의 외부 주파수 변조 단자에 이 신호를 걸어줌으로써 위상잡음을 보상하는 써보(servo)를 구성하였다. 광경로 상의 진동과 온도 변화로 인한 위상잡음을 제거함으로써 RF 전송의 위상 안정도가 크게 좋아졌으며, 1 초 평균시간에서 6×10^{-14} , 10000 초 평균시간에서 2×10^{-17} 의 상대 주파수 불안정도를 보였다. 전송된 RF 신호의 단측파 대 위상잡음(single sideband phase noise)을 측정한 결과에서 1 kHz 이하의 주파수에서 위상 잡음이 현저히 줄어들었음을 확인하였다. 이 성능은 현재 가장 뛰어난 정확도와 안정도를 가지는 RF 표준 주파수를 광섬유 잡음 없이 전송할 수 있는 것이다. 또한 앞으로 개발될 광격자(optical lattice) 시계 등의 차세대 주파수 표준기의 전송에도 무리가 없을 것으로 보인다.

III. 실험 장치

그림 1에 광섬유를 통한 RF 전송의 실험 장치를 나타내었다. 광원으로서 1552 nm의 분포 궤환형 레이저(DFB; distributed feedback laser)를 사용하였고(Thorlabs, PRO8000 DWDM source) 그 출력은 13 dBm으로 하였다. 광섬유를 통하여 전송되는 레이저 빛에 RF 신호를 실어주기 위해서 마흐-젠더 변조기(MZM; Mach-Zehnder modulator - AVANEX, PowerLog FA-20))를 사용하여 진폭 변조를 하였다. 진폭 변조에 이용되는 RF 신호(그림에서 OSC1)로서 수소 메이저에 동기된 신호발생기(HP, 8656B)로 10 dBm 세기의 100 MHz 주파수를 걸어 주었다. 변조기를 통과하는 빛의 세기를 MZM에 내장된 광다이오드로 검출하여 변조기의 직류 전압 바이어스에 되먹임시켜서 RF 변조신호된 광신호에 왜곡이 없을 정도의 적당한 수준으로 바이어스를 안정화하였다. 이 때, 진폭 변조의 변조 지수(modulation index)는 19%이었다. 마흐-젠더 변조기에 입사되는 빛의 편광 방향을 맞추어 주기 위하여 입사단에 편광 조절기(PC)를 추가하였다. 이렇게 하여 기준 RF로 진폭 변조된 레이저 빛을 지중구간으로 매설된 길이 250 m의 단일모드 광섬유를 통하여 실험실A(광원과 변조기가 설치되어 있는 건물에 위치)에서 다른 건물에 위치한 실험실B로 전송하고, 잇달아 실험실 B에 위치한 22.5 km 길이

의 광섬유 스폰을 통과시킨 후, 길이 250 m의 또 다른 단일 모드 광섬유를 통하여 다시 실험실A로 되돌려 보았다. 이렇게 하여 총 길이 23 km를 통하여 전송된 RF로 변조된 레이저 빛을 1 GHz의 측정 밴드폭을 가지는 광다이오드(PD; Newfocus, 1611)로 검출하여 RF 신호를 추출해 내었다. 광다이오드에 입사되는 레이저의 세기는 -7 dBm이었다. 광섬유를 통하여 전송된 RF의 특성을 알아보기 위하여 위상검출기로 사용한 믹서(Mini-circuits, ZRPD-1)의 한쪽 입력단에 광섬유를 통하여 전송된 RF를 입력하고, 다른 쪽 입력단에 기준발진기(그림에서 OSC2)로서 수소 메이저에 동기된 저잡음 신호발생기(Agilent, E4428C)의 100 MHz 출력을 걸어 주었다. 이 위상검출기의 출력을 1.9 MHz 저역 통과 필터에 통과시켜서 위상변화를 측정하였다. 위상검출기의 출력 전압을 위상으로 환산하기 위하여 OSC2의 위상을 바꾸어 주면서 그에 따른 출력 전압을 측정함으로써 그 환산 계수를 결정하였다. 위상검출기 출력의 일부는 OSC1의 외부 주파수 변조 단자에 걸어줌으로써, 광섬유 전송과정에서 발생한 잡음을 능동적으로 보상하는 회로를 구성하였다.

III. 실험 결과 및 토의

그림 2에 위에서 언급한 23 km의 광섬유 망을 통해 전송된 100 MHz RF 신호의 하루 동안의 위상변화의 측정 결과를 나타내었다. 이 측정 결과는 광섬유로 인한 잡음을 보상하지 않은 결과이며, 하루 동안에 0.47 rad 정도의 위상변화가 있었다. 한편, 광섬유로 인한 영향이 어느 정도 인지 알아보기 위하여 마흐-젠더 변조기의 출력을 곧바로 광다이오드로 검출하였을 때(short-cut)의 위상변화를 측정하였다. 이 결과를 그림 3에 나타내었는데, 이 경우에는 하루 동안에 66 mrad 정도의 위상변화가 있었다.

일반적으로 광섬유를 통하여 빛이 진행할 때, 그 광경로가 진동과 온도 변화에 의해 영향을 받으므로 그에 따라 전송된 RF 신호에도 위상잡음이 생기게 된다. 진동에 의하여서는 위상 잡음과 단기간 주파수 안정도가 영향을 받고, 이에 비해 상대적으로 느리게 진행되는 온도 변화에 의하여서는 장

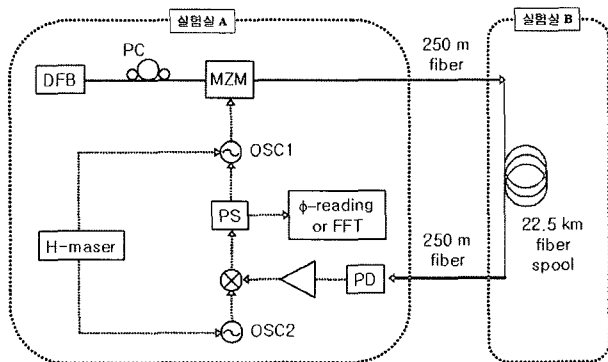


그림 1. 광섬유 망을 통한 RF 전송의 실험장치도.
(DFB: DFB laser, PC: polarization controller, MZM: Mach-Zehnder modulator, PD: photodiode, PS: power splitter, FFT: fast Fourier transform spectrum analyzer).

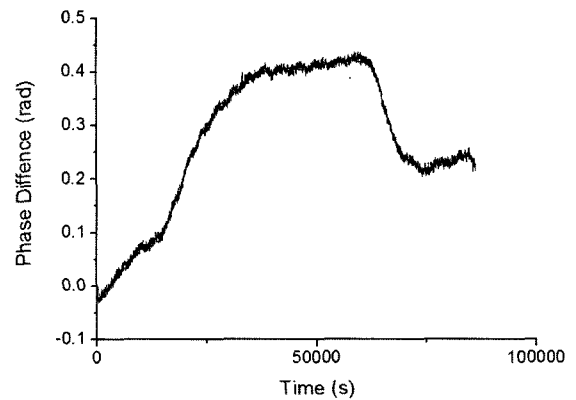


그림 2. 100 MHz의 RF 신호를 23 km 광섬유를 통하여 전송하였을 때의 위상변화.

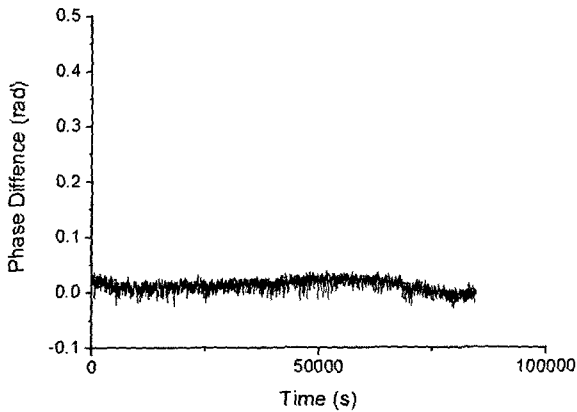


그림 3. 진폭 변조기의 출력을 곧바로 광다이오드로 검출하였을 때, 100 MHz RF 신호의 위상변화.

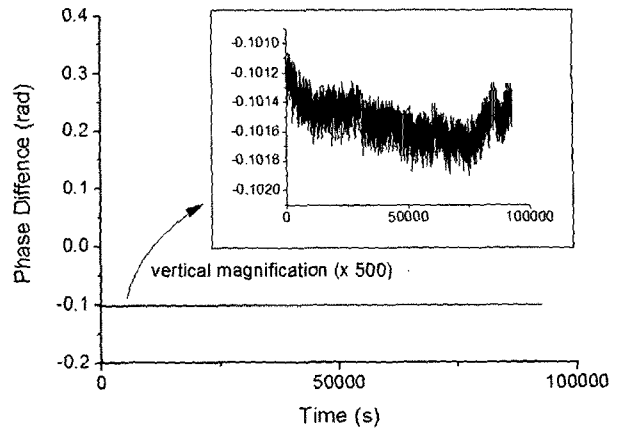


그림 4. 광섬유에서의 잡음을 보상하였을 때, 100 MHz RF 신호의 위상변화.

기간 주파수 안정도가 영향을 받게 된다. 위의 실험 결과에서 위상 변화의 시간적 규모로부터 판단해 볼 때, 하루 동안의 일교차로 인한 광섬유 경로상의 온도 변화가 전송된 RF 신호의 위상변화의 주된 요인이 됨을 알 수 있었다.

온도(T) 변화에 대한 광경로 $L_{opt} = nL$ 의 상대 변화는 식 (1)과 같이 주어진다.^[4]

$$\frac{1}{L_{opt}} \frac{dL_{opt}}{dT} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (1)$$

여기서, n 은 광섬유의 굴절율이고, L 은 광섬유의 길이이다. 본 실험에서 사용한 코닝(Corning)사의 SMF28 광섬유의 경우에 $dn/dT=7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $dL/dT=5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 로 알려져 있다.^[13] 위의 식에서 광섬유 길이의 선평창에 의한 효과보다 광섬유 굴절율의 변화가 10배 정도 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 2의 실험 결과에서 0.47 rad의 위상 변화는 100 MHz 신호에 대하여 약 220 mm의 광경로 변화에 해당한다. 본 연구에서 사용한 광섬유 망의 23 km 길이에 대해 식 (1)을 이용하여 계산하면, 하루 동안의 평균적인 온도 변화폭이 약 1.3 $^{\circ}\text{C}$ 인 것으로 추산된다. 이는 대부분이 22.5 km 광섬유 스플이 위치한 실험실B의 환경 변화에 기인한다.

능동적으로 광섬유에서 발생한 잡음을 보상하기 위하여, 앞 절에서 기술한 바와 같이 검출된 위상 잡음을 OSC1의 외부 주파수 변조 단자에 걸어주었다. 이것은 변조에 사용되는 발진기의 주파수를 조금 바꾸어 줌으로써 광섬유에서 발생한 위상 변화를 보상하는 원리이다. 이러한 보상 방법은 광 신호가 23 km 길이를 통과하는 데에 걸리는 시간(100 μs 정도)을 무시할 수 있다는 가정 하에서 가능하므로, 보상 회로의 제어 밴드폭은 수 kHz 정도의 한계를 가지게 된다. 광섬유 잡음을 보상했을 때, 23 km의 광섬유 망을 통해 전송된 100 MHz RF 신호의 하루 동안의 위상변화의 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 하루 동안의 위상 변화폭은 0.8 mrad 정도로서 광섬유의 잡음을 보상하기 전과 비교하여 600 배 정도 줄어든 결과를 얻었다. 앞의 결과와 비교를 쉽게 하기 위하여 세로축을 같은 스케일로 나타내었고, 삽입도에 세로

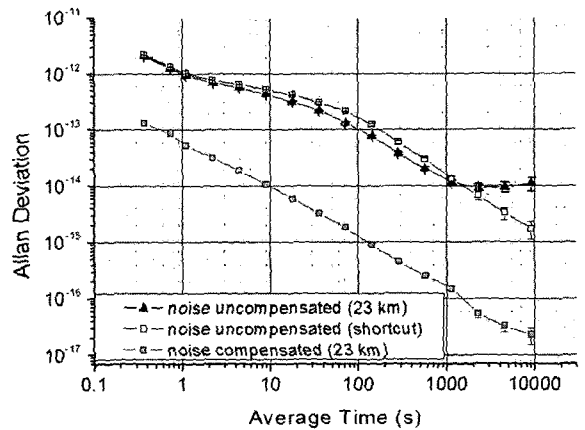


그림 5. 광섬유 망을 통하여 전송된 100 MHz RF 신호의 상대주파수 안정도(알란 편차).

축을 500배 확대하여 나타내었다. 위상 변화를 되먹임함으로써 광섬유의 잡음을 보상하는 이러한 장치는 일종의 위상 잠금 루프(phase-lock loop)로 볼 수 있다. 그림 4의 결과에서 위상오차 신호가 0인 곳에서 잠금이 일어나지 않고 약 -0.1 rad 정도에서 잠금이 일어나는 것은 23 km의 광경로를 진행하는 데에 걸리는 시간에 의한 영향으로 생각된다.

위에서 측정한 위상변화를 시간에 대하여 미분하면 주파수의 안정도를 알란 편차(Allan deviation)로써 구할 수 있으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 광섬유에서 생긴 잡음을 보상하지 않았을 때, 주파수 안정도는 1초의 평균 시간에서 1×10^{-12} 이었고, 장시간(long-term)의 안정도는 23 km 길이의 광섬유를 통과하지 않았을 때(short-cut)는 평균 시간이 길어짐에 따라 1000 초에서 2×10^{-15} 까지 안정도가 좋아졌다. 다음으로, 23 km 길이의 광섬유를 통과했을 때에는 평균시간 1000초 정도에서부터 안정도가 더 이상 좋아지지 않고 1000 ~ 10000초 사이에서 1×10^{-14} 정도의 안정도를 보였다. 장시간에서의 이러한 두 결과의 차이는 온도의 일교차로 인한 광섬유 경로의 변화 때문에 생기게 된다. 1 ~ 1000초 사이의 두 결과의 작은 차이는 실험한 날짜가 다르므로 인해 환경요

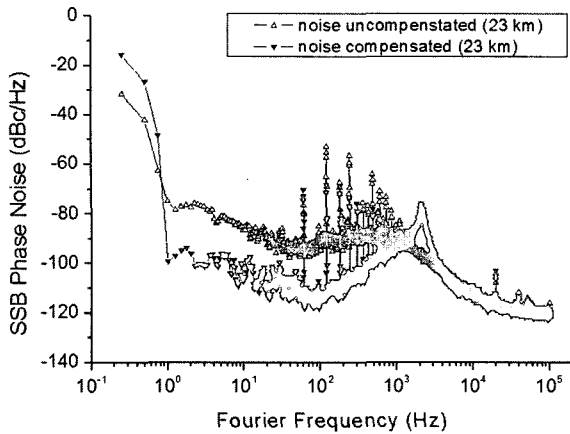


그림 6. 광섬유 망을 통하여 전송된 100 MHz RF 신호의 단측파 대 위상잡음.

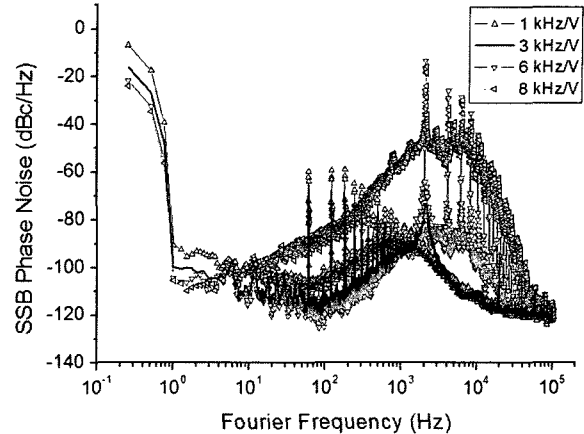


그림 7. 광섬유 잡음 보상을 위한 되먹임 신호의 주파수 변조 크기에 따른 위상잡음.

인이 다르기 때문이라고 생각된다. 23 km 길이를 통과하지 않았을 때(short-cut)의 결과에서 1초에서의 안정도는 실험에서 사용된 두 발진기(OSC1, OSC2)의 주파수 차이의 안정도를 뜻한다. 두 발진기 모두 1 초에서의 안정도가 5×10^{-13} 인 수소 메이저를 기준 신호로 사용하였으나, OSC2가 저잡음 신호 발생기임에 비해, OSC1은 잡음 특성이 이에 미치지 못하는 것을 사용하였으므로, 위 결과는 OSC1의 안정도에 해당된다고 볼 수 있다. 한편, 광섬유에서 생긴 잡음을 보상하였을 때에는 알란 편차로 표현된 주파수의 상대 안정도가 1 초의 평균시간에서 6×10^{-14} 이었고, 10000 초의 평균시간에서는 2×10^{-17} 까지 줄어들었다. 광섬유의 잡음을 보상하지 않았을 때와 비교하여 안정도가 좋아진 것은, 잡음 보상을 위한 되먹임 회로로 인해 두 발진기(OSC1, OSC2)의 위상 동기화 이루어진 영향도 있지만, 특히 장기간의 안정도에 있어서는 광섬유로 인한 잡음이 보상되어 이루어진 결과이다. 이 실험 결과가 뜻하는 것은 기준 주파수 발진기로 쓰인 OSC2를 더 좋은 안정도를 가지는 것으로 대체할 경우, 10000 초의 평균 시간에서 10^{-17} 수준의 안정도로 광섬유를 통하여 전송이 가능하다는 것이다.

그 다음으로, 위 실험장치의 위상검출기의 신호로부터 고속 푸리에 변환(FFT) 스펙트럼 분석기(Stanford Research Systems; SR785)를 이용하여 위상잡음을 분석하였다. 그림 6에 23 km의 광섬유를 통하여 전송된 100 MHz RF 신호의 단측파 대 위상잡음(single sideband phase noise)을 나타내었다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 광섬유의 잡음을 보상하기 전과 비교하여 푸리에 주파수 1 kHz 이하에서 20 dB 이상 위상잡음이 감소하였음을 알 수 있고, 이 결과로서 RF 전송의 안정도가 좋아졌음을 확인할 수 있었다. 그림 6에서 60 Hz 및 그 배수의 주파수에서 나타나는 피크들은 AC 전원으로부터 기인한 잡음이다. 한편, 광섬유의 잡음을 보정한 결과에서 2.1 kHz 정도에서 생겨나는 넓은 피크는 잡음 보상회로의 제어 밴드폭에 의한 영향이다. 제어 밴드폭을 벗어나는 잡음들은 보상 회로에 의하여 잘못 해석되어 오히려 위상잡음을 악화시키는 결과가 생기는 것이다. 따라서 광섬유 잡음의 보상회로의

이득을 적당히 조절해 줄 필요가 있다. 광섬유 잡음의 보상은 OSC1의 주파수 변조를 통하여 이루어 지므로, 보상회로의 이득은 위상검출기의 위상 오차 신호 전압에 따른 OSC1의 주파수 변조폭에 의해 결정된다. 그림 7에 광섬유 잡음 보상을 위한 되먹임 신호의 주파수 변조 크기에 따른 위상잡음을 나타내었다. OSC1의 주파수 변조폭이 낮을 때에는 위상잡음의 억제가 충분하지 않고, 반대로 주파수 변조폭이 너무 커지면 그림 7에서 볼 수 있듯이 잡음 보상회로의 제어 밴드폭을 벗어나는 잡음들에 대한 오작동으로 인해 오히려 위상잡음이 크게 증가하게 된다. 본 실험에서는 위상잡음을 충분히 억제하면서도 제어 밴드폭의 한계로 인한 오작동이 비교적 작도록 하기 위하여 OSC1의 외부 주파수 변조폭을 3 kHz/V로 하였다.

본 연구에서는 23 km의 광섬유망을 통하여 광섬유로 인한 잡음 없이 높은 안정도의 RF 신호를 전송하는 시스템을 구현하였는데, 현재까지의 결과는 광섬유의 위상 잡음이 보상된 위치가 광다이오드(PD)가 있는 실험실 A이다. 실제적으로 멀리 떨어진 곳(실험실 B)에서 높은 안정도의 RF 신호를 이용하기 위해서는 실험실 B의 위치에서 광섬유의 위상 잡음이 보상되도록 해야 하며, 참고문헌 11에 제시된 방법을 사용하면 이것이 가능하다. 이 방법은 광섬유를 왕복하면서 생긴 잡음의 절반만큼을 보상함으로써 실험실 B의 위치에서 위상 잡음이 제거되도록 하는 원리이다. 현재 이러한 실험장치의 개선에 관한 연구가 진행 중에 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 높은 안정도를 가지는 100 MHz의 RF 신호를 마흐-젠더 변조기를 이용하여 레이저의 출력을 진폭 변조함으로써 23 km의 광섬유망을 통하여 전송하였다. 광섬유 전송 과정에서 진동과 온도 변화에 의하여 생기는 위상 잡음을 측정하고 이를 보상하는 회로를 구성하였다. 광섬유 잡음을 제거함으로써 RF 전송의 주파수 안정도가 크게 향상되었으며, 1초 평균시간에서 6×10^{-14} , 10000초 평균시간에서 $2 \times$

10^{-17} 의 상대 불안정도를 얻을 수 있었다. 전송된 RF 신호의 단측파대 위상잡음을 측정할 결과에서 1 kHz 이하의 푸리에 주파수에서 위상 잡음이 20 dB 이상 줄어들었음을 확인하였다. 이러한 실험 결과로서 기준 RF 신호의 안정도와 거의 같은 수준으로 광섬유를 통하여 RF를 전송할 수 있었다. 이를 이용하면 향후 보다 향상된 정확도와 안정도를 가지는 주파수 표준을 광섬유로 인한 잡음의 영향 없이 전송하는 것이 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] 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.*, vol. 41, no. 3, pp. 385-389, 1992.
- [2] 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.*, vol. 19, no. 1, pp. 19-24, 2000.
- [3] R. T. Logan Jr. and G. F. Lutes, "High stability microwave fiber optic systems: demonstrations and applications", in *1992 IEEE Frequency Control Symposium*, pp. 310-316, 1992.
- [4] P. A. Krug, M. I. Large, and R. G. Davison, "Optical fiber technique for remote stabilization of RF phase", *Optical Fiber Technology*, vol. 5, pp. 175-184, 1999.
- [5] 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*, pp. 1-11, 2002.
- [6] J. Frisch, D. G. Brown, and E. L. Cisneros, "The RF phase distribution and timing system for the NLC", in *XX International Linac Conference*, Monterey, California, pp. 745-747, 2000.
- [7] J. Frisch, D. Bernstein, D. Brown, and E. Cisneros, "A high stability, low noise RF distribution system", in *Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference*, vol. 2, pp. 816-818, 2002.
- [8] L. Holberg, C. W. Oates, E. A. Curtis, E. N. Ivanov, S. A. Diddams, T. Udem, H. G. Robinson, J. C. Bergquist, R. J. Rafac, W. M. Itano, R. E. Drullinger, and D. J. Wineland, "Optical frequency standards and measurements", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, no. 12, pp. 1502-1513, 2001.
- [9] 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*, vol. 20, pp. 1459-1467, 2003.
- [10] 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.*, vol. 94, pp. 203904-1~4, 2005.
- [11] 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.*, vol. 77, pp. 064701-1~8, 2006.
- [12] A. Amy-Klein, A. Goncharov, C. Daussy, C. Grain, O. Lopez, G. Santarelli, 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*, vol. 78, pp. 25-30, 2004.
- [13] G. Melts and W. W. Morey, "Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity", in *International Workshop on Photoinduced Self-Organization Effects in Optical Fiber*, *Proc. SPIE*, vol. 1516, pp. 185-199, 1991.

Highly Stable RF Transfer over a Fiber Network by Fiber-induced Phase Noise Cancellation

Won-Kyu Lee[†], Dae-Su Yee, Young-Beom Kim and Taeg Yong Kwon

Length/Time Metrology Group, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 1 Doryong-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, Korea

[†]E-mail: oneqlee@kriss.re.kr

(Received October 31, 2006, Revised manuscript November 21, 2006)

We have transferred highly stable 100 MHz RF through a 23 km fiber network. The fiber-induced phase noise due to the vibration and the temperature fluctuation in the optical path is detected and is compensated by configuring a noise-canceling servo. The transfer instability was 6×10^{-14} at 1 s of averaging time and 2×10^{-17} at 10000 s of averaging time. The single sideband phase noise was greatly reduced by more than 20 dB below the Fourier frequency of 1 kHz. The transferred RF has nearly the same stability as the original reference frequency.

OCIS code : 120.3930, 120.3940, 120.5050, 070.1170.