

광섬유를 통한 광 주파수 전송에서 광 위상 잡음의 능동 제거

이원규[†] · 김재완 · 유한영 · 김억봉

한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

Ⓣ 305-340대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2006년 10월 13일 받음, 2007년 2월 9일 수정본 받음)

광섬유 망을 통해 수 kHz의 좁은 선폭을 가지는 1.5 μm 레이저광원을 높은 전송 안정도로 전송하였다. 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통과하면서 발생하는 광 위상 잡음을 능동적으로 제거하는 실험 장치를 구성하였고, 이렇게 하여 전송된 광 주파수의 전송 안정도는 1 초의 평균시간에서 2×10^{-17} 로 측정되었다. 전송된 광 주파수의 품질을 주파수 영역과 시간 영역에서 정량적으로 분석하였다.

주제어 : Fiber network, Phase noise, Transfer stability, Noise cancellation

I 서 론

광섬유를 이용하면 인접한 광학 테이블이나 실험실, 또는 멀리 떨어져 있는 건물들에 광 신호를 쉽게 전달할 수 있다. 또한 광섬유를 이용하면 실험 장치의 광학적 정렬을 쉽게 할 수 있으며 광섬유를 통한 전송 과정에서 발생하는 잡음들을 손쉽게 보정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

광 주파수 표준은 가까운 장래에 $10^{-17} \sim 10^{-18}$ 의 상대주파수 불확도에 도달할 것으로 예상된다.^[1] 이렇게 정밀한 주파수를 구현하는 실험 장치들은 여러 개의 광학 테이블을 차지하는 복잡한 시스템으로 이루어져 있다. 따라서, 옆의 광학 테이블이나 다른 실험실에 위치한 장치들에 주파수의 변화가 없이 빛을 보내야 할 경우가 있다. 공기중을 통해서 빛을 보내거나 광섬유를 이용해서 빛을 전송할 때는 온도나 대기 압력의 미세한 변화가 모두 전송되는 광 주파수에 영향을 준다. B. de Beauvoir^[2] 등의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 광섬유를 이용한 짧은 거리의 전송에서도 레이저의 선폭이 수 kHz 정도로 넓어지므로, 높은 안정도의 광 주파수를 전송하기 위해서는 환경 영향으로 생기는 광섬유에서의 잡음이 반드시 제거되어야 한다. 주파수 전송에서 잡음을 제거하는 기술은, 복잡하고 거대한 규모의 시스템으로 인해 직접 이동할 수 없는 광 주파수 표준의 상호 비교에도 효율적인 수단이 될 수 있을 것으로 기대된다.

L. -S. Ma 등은 25 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유를 통하여 532 nm 파장의 광 주파수를 전송하기 위해 두 대의 음향-광 변조기(AOM; acousto-optic modulator)를 사용하여 광섬유에서 생긴 잡음을 제거하는 연구 결과를 발표하였다.^[3] 이 연구에 의하면, 빛이 광섬유를 통과하는 것만으로도 레이저의 선폭이 300 Hz 정도 확대되고, 보통의 말소리에 의하여 생긴 잡음으로 1 kHz 정도 선폭이 확대된다. 이들은

광섬유에서 생긴 잡음을 제거하기 위해 AOM에 기준 주파수를 공급하는 전압-제어 결정 발진기(VCXO; voltage-controlled crystal oscillator)의 주파수를 조절하여, 광섬유 말단에 원래 레이저와 같은 광 위상을 가지는 빛을 전송할 수 있었다. 또한, JILA의 J. Ye 등은 1064 nm 파장의 요오드-안정화 Nd:YAG 레이저를 3.45 km 길이의 광통신용 단일모드 광섬유를 통해 NIST로 전송하여 원격 절대 주파수 측정을 하는 실험을 하였다.^[4] 이들은 광섬유의 잡음을 없애지 않았을 때 1 초 평균시간에서 3×10^{-14} 의 상대주파수 안정도로 광 주파수를 전송할 수 있었고, L. -S. Ma 등이 이용한 것과 비슷한 실험장치로써 광섬유의 잡음을 제거하여, 광 주파수 전송의 상대주파수 불안정도가 1 초 평균시간에서 3×10^{-15} 인 결과를 얻었다. 한편, 포획된 이온이나 중성원자를 이용하여 10^{-15} 이하의 주파수 안정도를 가지는 광 주파수 표준기들을 주파수 절대 측정하기 위해 광빔 실험 장치로 보내려면 수십 ~ 수백 미터 길이의 광섬유를 이용해야 하는데 이러한 실험들에서도 광섬유로 인한 잡음의 제거는 반드시 필요하다.^[5-8]

본 연구에서는 42 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유와 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통하여 레이저 빛을 전송함에 있어 광섬유에서 생긴 잡음을 제거하는 실험을 수행하였다. 전송된 광 주파수의 상대주파수 전송 안정도는 1 초의 평균시간에서 2×10^{-17} 로 측정되었다. 또한, 광섬유 망의 잡음을 보상하여 전송된 광 주파수의 품질을 주파수 영역과 시간 영역에서 분석하였다. 이러한 결과는 이전에 이루어졌던 연구결과들의 전송 성능을 능가하는 것으로서, 차세대 광 주파수 표준의 원격 비교에도 무리가 없을 것으로 생각된다. 또한, 실험 장치가 모두 광섬유 기반으로 되어 있어서 광섬유 잡음 보상 장치를 소형 모듈화하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

II 실험 장치 및 원리

그림 1에 광섬유를 통한 광 주파수 표준 전송의 실험 장치

[†] E-mail: oneqlee@kriss.re.kr

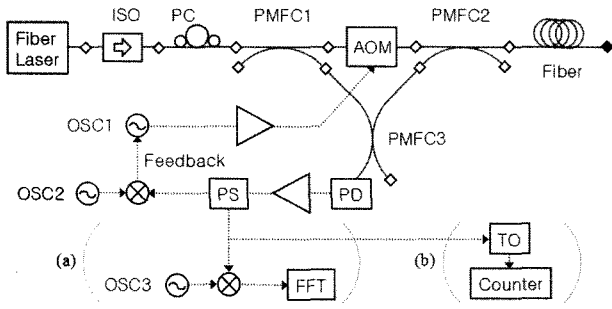


그림 1. 광섬유 망을 통한 광 주파수 표준 전송의 실험장치도. (a) 전송된 빛의 광 스펙트럼을 측정하기 위한 장치, (b) 전송된 빛의 주파수 안정도를 측정하기 위한 장치.

(ISO: optical isolator, PC: polarization controller, PMFC: polarization maintaining fiber coupler, AOM: acousto-optic modulator, PD: photodiode, PS: power splitter, TO: tracking oscillator, FFT: fast Fourier transform spectrum analyzer).

를 나타내었다. 본 연구의 목적인 광섬유에서 발생한 잡음의 제거를 위해서는 아주 좁은 선폭을 가지는 레이저를 광원으로 사용해야 한다. 그 이유는 레이저 자체의 위상 잡음이 너무 크면 광섬유로 인해 생긴 잡음을 보상할 수 없기 때문이다. 이를 위해 선폭이 1.3 kHz 이하이며 1550.1 nm 파장을 가지는 단일 종모드 광섬유 링 레이저^[9]를 사용하였고 그 출력은 -13 dBm이었다. 이 레이저의 출력단에 광 고립기(ISO; optical isolator)를 사용하여 빛이 레이저로 되반사되는 것을 막아 주었다. 광섬유 망에서 발생한 광 위상 잡음을 측정해 내기 위해서 우선 편광유지 단일모드 광섬유 결합기(PMFC1)(50:50)를 사용하여 레이저 빛을 두 경로로 나누었다. 그 한 쪽의 경로에는 입력과 출력이 광섬유로 결합된 AOM(IntraAction, FCM-401E5A)을 사용하여 40 MHz 만큼 광 주파수를 이동시켰다. 그리고 다른 한 쪽의 경로로는 원래의 광 주파수로 레이저 빛이 전파하게 하였다. 레이저의 편광을 PMFC1의 편광방향과 맞추기 위해 편광 조절기(PC; polarization controller)를 사용하였다. AOM에 걸리는 40 MHz의 RF 신호원 으로서는 저잡음 신호발생기(OSC1; Agilent, E4428C)를 사용하여 15 dBm의 세기로 AOM에 RF 신호를 걸어주었다. AOM을 통과한 레이저 빛을 광 주파수 전송의 목적으로 쓰이는 광섬유 망으로 통과시켰다. 이 광섬유 망의 말단의 광섬유 연결기는 FC/PC 모양으로 처리되어 반대방향으로 4 % 정도의 반사가 생기게 하였다. 이 반사광은 반대방향으로 다시 광섬유 망을 통과하여 두번째 편광유지 단일모드 광섬유 결합기(PMFC2)를 거친 뒤, 세번째 편광유지 단일모드 광섬유 결합기(PMFC3)에서 주파수 이동이 없는 원래의 레이저 빛과 합쳐지게 하였다. 이렇게 합쳐진 두 레이저 빛을 광다이오드(PD; Newfocus, 1611)로 검출하면 두 레이저 빛의 주파수 차이인 40 MHz 신호를 얻을 수 있는데, 이 신호에는 광섬유 망을 왕복하면서 레이저 빛이 겪은 광 위상 잡음이 실려 있게 된다. 광섬유 망의 말단에서 반사되어 돌아온 레이저 빛의 세기는 매우 약하였지만, 광다이오드로 자체 헤테

로다인 맥놀이(self-heterodyne beat) 신호를 얻는 데에는 충분하였다. 광다이오드에서 얻어진 40 MHz의 신호를 3 개의 RF 증폭기를 사용하여 60 dB 정도 증폭하여 그 세기를 0 dBm으로 조절한 후, 이 신호와 또 하나의 신호발생기(OSC2; Novatech, 2975AR)의 40 MHz 기준 주파수 신호를 위상검출기(Mini-circuits, ZRPD-1)의 두 입력단에 걸어주었다. 위상 검출기의 출력을 1.9 MHz 저역 통과 필터에 통과시킴으로써 광섬유 망을 왕복하면서 겪게 된 광 위상 잡음 신호를 얻어내었다. 이 위상 잡음 신호를 비례-적분 조절기(PI controller)를 사용하여 OSC1의 외부 주파수 변조 단자에 걸어줌으로써, 광섬유 전송 과정에서 발생한 잡음을 능동적으로 보상하는 실험장치를 구성하였다. 그림 1에서 광섬유 연결 부위에 조그만 마름모로 표시되어 있는 곳들은 광섬유 연결기(fiber connector)로써 광학 소자들이 결합되어 있음을 보인다. 흰색 마름모들은 경계면에 경사가 있는 FC/APC 형태를 사용하여 연결 부분에서의 반사와 전체 광 경로상의 다중 반사를 방지하였다. 검은색 마름모로 표시된 광섬유 망의 말단에는 FC/PC 형태를 사용하여 반대 방향으로 4 % 정도의 반사가 일어나게 하였다.

위와 같이 하여 광섬유 망의 잡음을 보상하여 전송된 광 주파수의 품질을 주파수 영역과 시간 영역에서 분석하기 위한 실험장치를 구성하였다. 그림 1의 (a) 부분은 주파수 영역에서 광섬유를 통해 전송된 빛의 스펙트럼을 분석하기 위한 장치이다. 빠른 속도로 광 스펙트럼을 얻기 위하여 고속 푸리에 변환(FFT) 스펙트럼 분석기(Stanford Research Systems, SR785)를 사용하였다. 이 장비의 측정 주파수 범위가 100 kHz 까지이므로 광다이오드에서 얻어진 40 MHz의 신호를 낮은 주파수로 바꾸어 주었다. 낮은 주파수로의 변환을 위해 또 하나의 신호발생기(OSC3; Agilent 33250A)로부터 얻어진 40.050 MHz의 신호와 광다이오드의 신호를 또다른 위상검출기(Mini-circuits, ZRPD-1)로 섞어주었다. 이 위상검출기의 출력을 1.9 MHz 저역 통과 필터에 통과시켜서 두 주파수의 차이에 해당하는 50 kHz의 신호를 얻어서 FFT 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 다음으로 그림 1의 (b) 부분은 시간 영역에서 광섬유를 통해 전송된 빛의 주파수 안정도를 분석하기 위한 장치이다. 광다이오드에서 얻어진 광 헤테로다인 맥놀이(optical heterodyne beat) 신호의 신호 대 잡음비가 충분하지 않기 때문에 추적발진기(TO; tracking oscillator)를 사용하였다. 이 추적발진기의 주파수(40 MHz)를 주파수 계수기(Counter; Agilent, 53132A)로 측정하여 주파수 안정도를 구하였다. 주파수 계수기의 기준 주파수는 OSC1에서 공급되는 10 MHz 신호로 걸어주었다.

그림 2에는 그림 1의 실험장치를 사용하여 광섬유 망의 잡음을 제거하는 원리를 나타내었다. 광섬유 레이저에서 나온 빛의 전기장의 위상 부분을 $\sin[\omega t]$ 와 같이 표현할 때, AOM을 거친 뒤의 광 위상은 $\sin[(\omega + \Delta)t + \phi_c]$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 Δ 는 AOM으로 인한 주파수 이동(40 MHz)이고, ϕ_c 는 광섬유 잡음을 제거하기 위하여 가해진 위상 제어 크기이다. 이

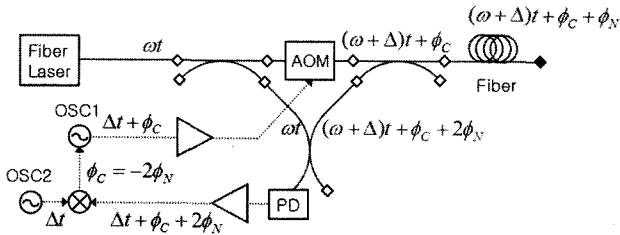


그림 2. 광섬유 망을 통한 광 주파수 표준 전송의 원리 설명도.

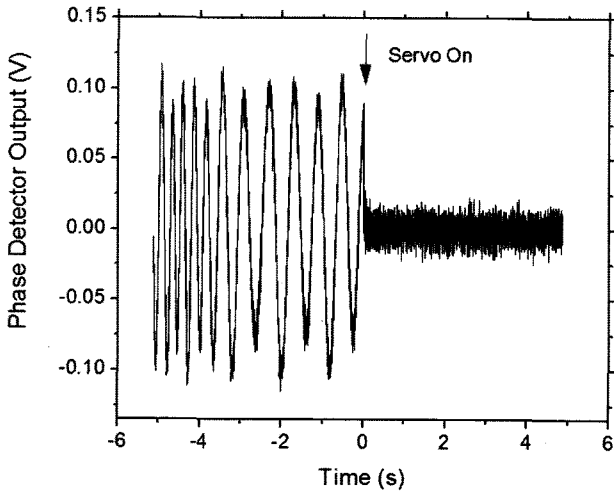


그림 3. 42 m 길이의 편광유지 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 위상 잡음 제거.

빛이 광섬유 망을 한번 통과하게 되면 광섬유로 인한 위상 잡음 ϕ_N 이 더해지게 되어 광 위상은 $\sin[(\omega + \Delta)t + \phi_c + \phi_N]$ 이 된다. 그리고 광섬유 망을 통해 되반사되어 돌아온 빛의 위상은 $\sin[(\omega + \Delta)t + \phi_c + 2\phi_N]$ 이 된다. 위상의 상수항을 무시하면, 광다이오드에서 검출되는 광 헤테로다인 맥놀이 신호의 위상은 $\sin[\Delta t + \phi_c + 2\phi_N]$ 와 같이 된다. 이 신호를 위상 검출기에서 $\sin[\Delta t]$ 와 섞어주어 그 주파수 차이를 얻게 되면 그 신호의 위상은 $\phi_c + 2\phi_N$ 가 된다. 제어 위상을 $\phi_c = -2\phi_N$ 로 주게 되면 광섬유 망에서 생긴 잡음이 제거되며 이 조건은 위상 잠금 회로(phase-lock loop)가 구성되면서 자동으로 만족되게 된다.

III. 실험 결과

그림 3은 광섬유 망으로써 42 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유를 사용하였을 때의 광 위상 측정 결과이다. 광섬유 잡음을 제거하기 위한 써보(servo)를 작동하기 이전에는 (그림 3의 왼쪽 부분 데이터) 광섬유를 통과한 빛의 광 위상이 광경로 상의 진동으로 인한 잡음으로 인해 수 개의 광파장 만큼 천천히 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 위상 검출기의 출력 신호의 최대값은 $\pi/2$ rad의 위상차에 해당하고, 최소값은 $-\pi/2$ rad의 위상차에 해당한다. 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동시키면 이러한 광 위상의 변화가 안정

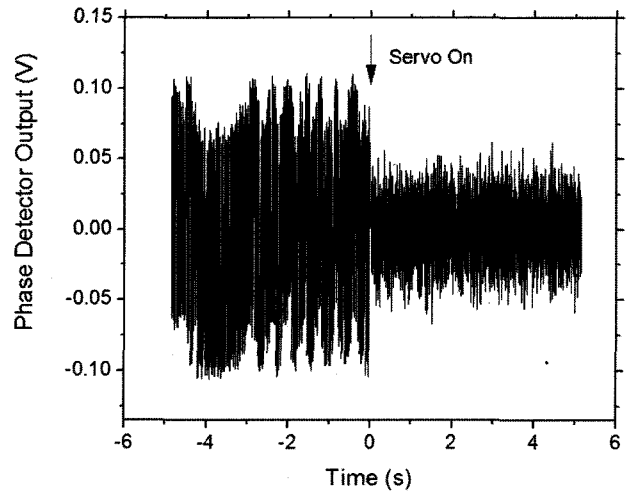


그림 4. 외부 진동 하에서 42 m 길이의 편광유지 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 위상 잡음 제거.

화되었다. 이 때 안정된 광 위상의 표준편차는 92 mrad 이었다. 광섬유 잡음의 제거는 위상 잡음 신호를 OSC1의 외부 주파수 변조 단자에 걸어줌으로써 이루어졌다. 그 변조의 세기는 아래의 그림 6에서 설명될 결맞음 피크의 크기가 최대가 되도록 조절하였고 그 값은 13.9 kHz/V이었다.

보다 잡음이 많은 환경 조건에서도 광섬유 잡음을 제거하는 것이 가능한 지 살펴보기 위하여 heat gun으로 위에서 사용한 42 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유에 바람을 불어주었다. 이 때 열은 가하지 않고 차가운 바람만 불어주었다. 이 경우에는 그림 4에서 볼 수 있듯이 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동하지 않으면, 바람에 의한 공기 진동으로 인해 광 위상이 매우 빠르게 그리고 큰 폭으로 변함을 알 수 있다. 이러한 조건 하에서도 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동시키면 광 위상을 안정화할 수 있었다. 안정된 광 위상의 표준편차는 0.28 rad으로서 바람을 불어주지 않았을 때보다는 다소 증가하였으나, 사분의 일 파장($\pi/2$ rad)을 넘는 위상 변화는 일어나지 않았다.

다음으로 보다 먼 거리까지 위상이 안정화된 광 주파수를 보내는 실험을 위하여 광섬유 망으로 525 m의 광섬유를 사용하였다. 이 광섬유 망은 두 건물 사이에 광을 전송하기 위하여 지중구간으로 매설된 시설이다. 이 때 광섬유는 편광유지가 되지는 않고, 광통신 파장 대역에서 단일모드이다. 그림 5에 이 실험 결과를 나타내었다. 이 경우에는 앞서의 경우보다 광섬유의 길이가 훨씬 길고, 환경조건이 실험실 내에서 보다 덜 안정되어 있는 지중구간을 통과하기 때문에, 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동시키지 않았을 때에는 전송된 광 위상에 극심한 변동이 있음을 볼 수 있다. 위상 변화의 시간 규모로 판단할 때 이것의 원인은 전송 경로에서 겪게 되는 여러 가지 진동에 의한 것으로 보인다. 이러한 전송 조건에서도 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 작동시키면 광 위상을 안정화할 수 있었다. 안정된 광 위상의 표준편차는 0.21 rad으로서 짧은 길이의 광섬유 망을 사용했을 때보

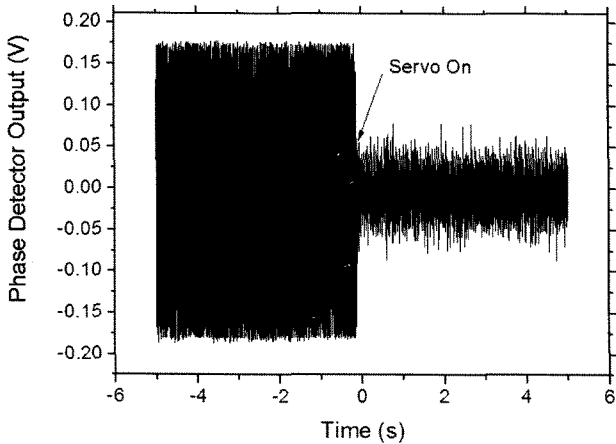


그림 5. 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 위상 잡음 제거.

다는 다소 증가하였으나, 사분의 일 파장($\pi/2$ rad)을 넘는 위상 변화는 일어나지 않았다. 보다 긴 전송거리에서 이러한 광 위상 안정화가 가능한 지 살펴보기 위하여 22.5 km 길이의 단일모드 광섬유 스폰을 광섬유 망으로 사용해 보았는데 이 경우에는 광 위상을 안정화할 수 없었다. 그 이유는 광섬유의 길이가 사용한 광원의 결맞음 길이와 비슷한 정도로 길기 때문이라고 여겨진다. 사용한 광원의 선폭을 1.3 kHz라고 하면 결맞음 길이가 약 150 km 이고, 광섬유 망의 왕복 거리는 45 km이다. 다시 말하여, 긴 광섬유를 진행하면서 레이저 자체의 위상 잡음이 너무 커져서 광섬유로 인해 생긴 잡음을 보상할 수 없는 것이다.

광섬유 망의 잡음을 보상하여 전송된 광 주파수의 품질을 주파수 영역에서 분석하기 위하여, 그림 1의 (a) 부분과 같은 실험 장치를 사용하였다. 그림 6에 42 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 스펙트럼을 나타내었다. 이 결과는 10 회의 데이터를 평균하여 얻어진 것이다. 흰색 동그라미로 표시된 그래프는 바람을 불어주지 않았을 때의 스펙트럼이다. 광원의 결맞음성으로 인해 중앙에 60 dB 정도의 크기를 가지는 피크를 볼 수 있다. 이 피크의 반치폭은 스펙트럼 분석기의 분해능 한계와 같았다. 이 폭은 광원의 선폭을 의미하지는 않는다. 그 이유는 이 실험의 자체 지연 헤테로다인 구조(delayed self-heterodyne)에서 지연길이가 광원의 결맞음 길이보다 훨씬 짧기 때문이다. 중심 피크의 양쪽 옆의 두개의 작은 피크들은 전력선으로 인한 60 Hz 잡음이다. 회색 실선으로 표시된 그래프는 광섬유에 인위적으로 바람을 불어주었을 때의 스펙트럼이다. 광섬유를 통과하면서 겪게 된 광 위상 잡음으로 인해 결맞음성이 떨어져서 피크 구조가 완전히 사라지고 잡음의 수준이 크게 증가하였다. 검은색 마름모로 표시된 그래프는 이러한 조건 하에서 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 동작시켰을 때의 스펙트럼이다. 광섬유 전송과정에서 진동에 의해 발생한 위상 잡음이 제거됨으로써 중앙에 결맞음성으로 인한 피크가 다시 생겨났음을 볼 수 있다. 그림 7에는 525 m 길이의 단일모드 광섬

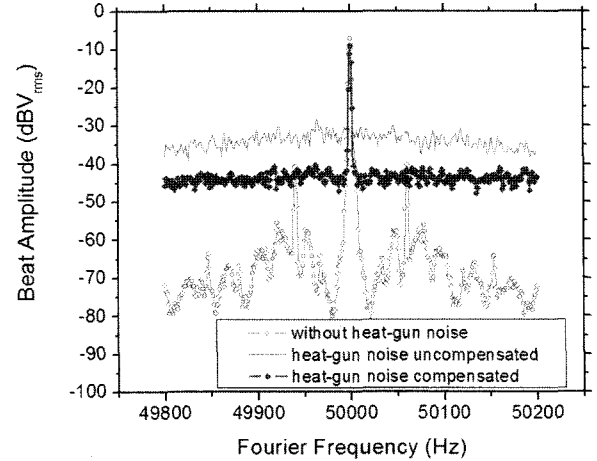


그림 6. 42 m 길이의 편광유지 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 스펙트럼.

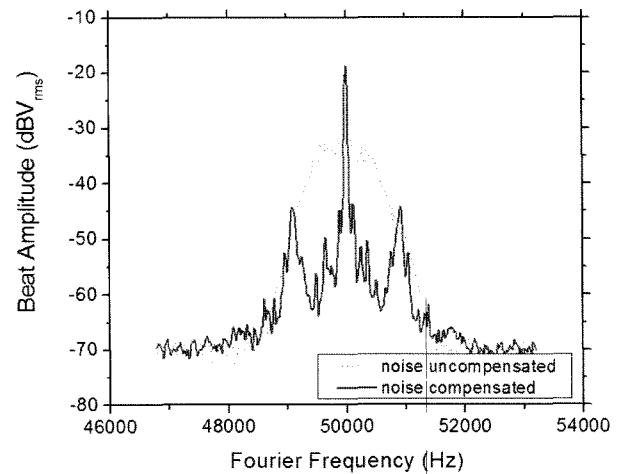


그림 7. 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 스펙트럼.

유를 통해 전송된 빛의 광 스펙트럼을 나타내었다. 이 결과는 10 회의 데이터를 평균하여 얻어진 것이다. 광섬유 잡음을 제거하지 않고서 레이저 빛을 525 m 길이의 광섬유에 통과시킬 때에는, 본래 스펙트럼 분석기의 분해능 한계의 폭을 가지면서 존재하던 결맞음성으로 인한 피크가 그림 7의 점선에서와 같이 수 kHz 정도의 폭으로 넓어진다. 그 원인은 광섬유 전송 경로에서의 여러 가지 진동으로 인한 위상 잡음이다. 이러한 전송 조건 하에서도 광섬유 잡음을 제거하는 써보를 동작시키면 그림 7의 실선과 같이 40 dB 이상의 크기로 결맞음 피크가 생겨난다. 이 피크로부터 양쪽으로 약 1 kHz 정도 떨어진 위치에 작은 피크들이 생겨난 것은 잡음 보상 회로의 제어 밴드폭에 의한 영향이다. 제어 밴드폭을 벗어나는 잡음들은 보상 회로에 의하여 잘못 해석되어 오히려 위상 잡음을 악화시키는 결과가 생기는 것이다. 별도의 방법으로 본 실험의 잡음 보상 회로에 사용된 비례-적분 조

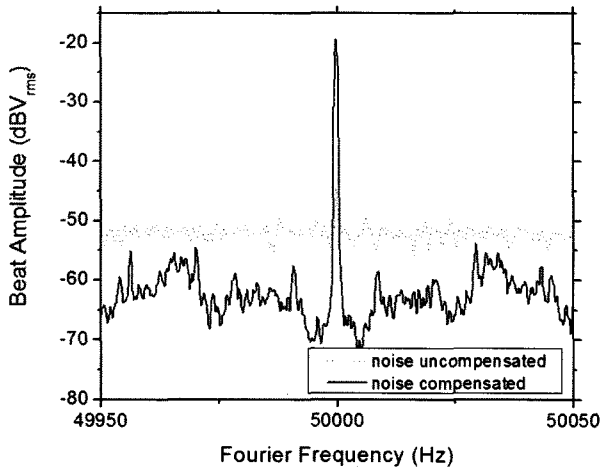


그림 8. 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통해 전송된 빛의 광 스펙트럼.

절기의 3 dB 밴드폭을 측정한 결과가 500 Hz인 것으로부터 이러한 해석이 뒷받침된다. 그림 8은 그림 7의 실험결과를 좀 더 좁은 주파수 범위에서 분해능을 높여서 측정한 결과이다. 여기에서도 광섬유 잡음 보상에 의하여 50 dB 정도의 결맞음성으로 인한 피크가 보이는데 그 반치폭은 스펙트럼 분석기의 분해능의 한계와 같다.

다음으로 광섬유 망의 잡음을 보상하여 전송된 광 주파수의 품질을 시간 영역에서 분석하기 위하여, 그림 1의 (b) 부분과 같은 실험 장치를 사용하였다. 광섬유 망으로는 지중구간에 매설된 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 사용하였다. 광다이오드에서 얻어진 광 헤테로다인 맥놀이 신호(40 MHz)의 신호 대 잡음비가 충분하지 않기 때문에 추적발전기(TO; tracking oscillator)를 사용하였다. 주파수 계수기(Counter; Agilent, 53132A)로 추적발전기의 40 MHz 신호를 측정하여 주파수 안정도를 구하였다. 이 광섬유 망의 말단에서 일어나는 4 % 반사를 이용하면 광 헤테로다인 맥놀이의 신호 대 잡음비가 20 dB 이하로 얻어졌다. 뿐만 아니라, 이 광섬유 망은 편광유지 광섬유가 아니기 때문에 편광 변화에 의하여 신호 대 잡음비에 빠르고 큰 변동이 있어서 추적발전기의 위상 미끄러짐(cycle slip)이 빈번히 일어났다. 이런 상황에서는 주파수 계수기로 측정을 하기가 불가능하므로 광섬유 말단의 4 % 반사를 이용하는 대신에 광섬유 말단을 PMFC3의 한쪽 입력단에 직접 연결하였다. 이렇게 하여 신호 대 잡음비를 40 dB 정도로 키워 주었다. 이 경우에도 편광 변화에 의하여 광 헤테로다인 맥놀이 신호의 요동이 있어서 추적발전기를 사용해야 하였으나 위상 미끄러짐은 거의 일어나지 않았다. 그림 9에 이렇게 하여 측정된 주파수의 전송 안정도를 알란 편차(Allan deviation)로 나타내었다. 이것은 전송된 빛과 원래의 빛의 주파수 차이를 광 주파수로 나눈 상대주파수로부터 계산되었다. 이 결과는 원래의 빛의 절대 주파수 안정도는 아니고, 광섬유 전송과정에서 생겨난 잡음으로 인한 전송 불안정도를 의미한다. 이 실험에서의 안정도의 측정

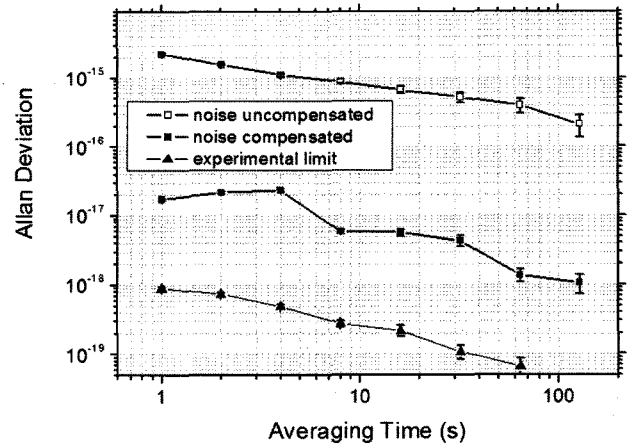


그림 9. 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통해 전송된 빛의 전송 안정도(알란 편차).

한계를 그림 9의 검은색 세모로 표시된 그래프로 나타내었다. 이 측정한계는 주파수 계수기의 기준 주파수를 OSC1에서 공급되는 10 MHz 신호로 걸어준 뒤, 이 주파수 계수기로 OSC1의 40 MHz 출력을 측정하는 방법으로 얻어졌다. 실험적 측정한계는 1 초의 평균시간에서 9×10^{-19} 이었다. 그림 9의 흰색 네모로 표시된 그래프는 광섬유 잡음을 제거하지 않았을 때의 광 주파수의 전송 안정도이다. 광섬유 전송 과정에서의 잡음으로 인해 상대주파수의 전송 안정도는 1 초의 평균시간에서 2×10^{-15} 이었다. 그림 9의 검은색 네모로 표시된 그래프는 광섬유 잡음을 제거하였을 때의 광 주파수의 전송 안정도이다. 그 결과는 1초의 평균시간에서 2×10^{-17} 이었다. OSC1과 OSC2의 10 MHz 신호의 주파수 안정도를 측정할 결과가 1초의 평균 시간에서 각각 1.3×10^{-12} , 7.1×10^{-11} 이었으므로 광 위상 잡음이 제거되었을 때의 전송 안정도는 주로 OSC2의 주파수 안정도에 의존하게 된다. 그림 9의 결과에서 평균시간이 커짐에 따라 알란 편차가 단조 감소하지 않는 것은 40 MHz 기준 주파수 공급에 사용한 OSC2의 영향이다. OSC2는 DDS(direct digital synthesis)방식을 사용하는 신호 발생기인데, 별도의 실험장치로 OSC2의 주파수 안정도를 측정하였을 때 그림 9의 검은색 네모로 표시된 그래프의 모양과 일치하는 특성을 가지는 것을 확인하였다. OSC2로서 보다 좋은 안정도를 가지는 신호 발생기를 사용하면 전송 안정도가 더 좋아질 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 광섬유 망을 통해 광 주파수를 전송할 때 발생하는 광 위상 잡음을 제거하는 실험을 수행하였다. 42 m 길이의 편광유지 단일모드 광섬유와 525 m 길이의 단일모드 광섬유를 통하여 레이저 빛을 전송함에 있어 광섬유에서 발생한 광 위상 잡음을 제거하였다. 전송된 광 주파수의 상대주파수 전송 안정도는 1 초의 평균시간에서 2×10^{-17} 로

측정되었다. 또한, 전송된 광 주파수의 품질을 주파수 영역과 시간 영역에서 정량적으로 분석하였다. 이 결과는 현존하는 가장 뛰어난 안정도의 광 주파수 표준을 광섬유를 통해 잡음 없이 전송하는 데에 무리가 없으며, 이러한 결과를 이용하면 뛰어난 안정도를 가지는 차세대 광 주파수 표준기들의 주파수 상호 비교에도 유용할 것으로 기대된다. 아울러, 실험 장치가 모두 광섬유 기반으로 되어 있어서 광섬유 잡음 보상 장치를 소형 모듈화하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] B. de Beauvoir, F. Nez, L. Hilico, L. Julien, F. Biraben, B. Cagnac, J.J. Zondy, D. Touahri, O. Acef, and A. Clairon, "Transmission of an optical frequency through a 3 km long optical fiber", *Eur. Phys. J. D*, vol. 1, pp. 227-229, 1998.
- [3] L.-S. Ma, P. Jungner, J. Ye, and J. L. Hall, "Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path", *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1777-1779, 1994.
- [4] 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.
- [5] T. Udem, S. A. Diddams, K. R. Vogel, C.W. Oates, E. A. Curtis, W. D. Lee, W. M. Itano, R. E. Drullinger, J.C. Bergquist, and L. Hollberg, "Absolute frequency measurements of the Hg^+ and Ca optical clock transitions with a femtosecond laser", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, pp. 4996-4999, 2001.
- [6] S. A. Diddams, T. Udem, J. C. Bergquist, E. A. Curtis, R. E. Drullinger, L. Hollberg, W. M. Itano, W. D. Lee, C. W. Oates, K. R. Vogel, and D. J. Wineland, "An optical clock based on a single trapped $^{199}Hg^+$ ion", *Science*, vol. 293, pp. 825-828, 2001.
- [7] B. C. Young, R. J. Rafac, J. A. Beall, F. C. Cruz, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, " Hg^+ optical frequency standard: recent progress", in "Laser Spectroscopy - Proceedings of the XIV International Conference (ICOLS 1999)", R. Blatt, J. Eschner, D. Leibfried, and F. Schmidt-Kaler eds., (World Scientific, Singapore, 1999), pp. 61-70, 1999.
- [8] R. J. Rafac, B. C. Young, J. A. Beall, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, "Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of $^{199}Hg^+$ ", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 2462-2465, 2000.
- [9] H. Y. Ryu, W.-K. Lee, H. S. Moon, S. K. Kim, H. S. Suh, and D. Lee, "Stable single-frequency fiber ring laser for 25-GHz ITU-T grids utilizing saturable absorber filter", *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1824-1826, 2005.

Active cancellation of phase noise induced by an optical fiber for delivery of optical frequency standard

Won-Kyu Lee[†], Jae Wan Kim, Han-Young Ryu and Eok Bong Kim

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 13, 2006, Revised manuscript February 15, 2007)

We have transferred a narrow-linewidth 1.5 μm laser beam through a 525 m fiber network with excellent transfer stability. The fiber-induced optical phase noise during the fiber transmission is cancelled by configuring a noise-canceling servo. The transfer instability was 2×10^{-17} at 1 s of averaging time. We quantitatively analyzed the transferred optical frequency in the frequency domain and in the time domain.

OCIS code : 120.3930, 120.3940, 120.5050, 070.1170.