
주파수 차이 검출기를 이용한 광파의 off-set 주파수 로킹 연구

유 강 희*

A Study on the Lightwave off-set Locking using Frequency Difference Detector

Kang-Hee Yoo*

요 약

본 논문은 초고주파 주파수 차이 검출기를 이용한 광파의 off-set 로킹에 대하여 설계 및 제작 실험 결과를 기술하였다. 두 광파를 비팅하여 중간 주파수인 1.5GHz 주파수 성분을 추출하고 이 값을 다시 1.5GHz 기준 발진기 주파수와 곱하여 차이주파수 성분을 추출한 후 주파수 차이 검출기를 이용하여 주파수 로킹을 시켰다.

상용화된 초고주파 부품을 사용하여 주파수 차이 검출기를 제작하였으며 1.55um 파장의 반도체 레이저의 발생 광파를 입력 광파와 1.5GHz의 주파수 off-set을 유지하면서 로킹이 이루어짐을 확인하였으며 로킹 범위는 320MHz 이었다.

ABSTRACT

A new lightwave locking technique which can be used in tuning the wavelength of a local laser diode to the reference wavelength is presented in this paper.

The optical frequency from the reference laser source and the optical frequency from the local slave VCO laser are heterodyned on a optical receiver, resulting in the 1.5GHz RF signal corresponding to the difference frequency between two input optical signals. The difference frequency is locked to the reference 1.5GHz oscillator source in off-set frequency locking loop. Using the commercialized microwave components, frequency difference detector can be easily established to lock the lightwave. The optical frequency of 1.55um laser diode which keeps the frequency off-set of 1.5GHz is locked to the input reference optical signal with the locking range of 320MHz.

키워드

주파수차이 검출기, 광파, 광 주파수 로킹, off-set locking, 반도체 레이저, 로킹범위

1. 서 론

반도체 레이저의 주파수 안정화는 코히런트 광통신, 고분해 광학 정밀 측정 등 많은 응용 분야에서 매우 중요하며, 실험을 위한 광학적, 전자 통신

적 방법과 결과들이 발표되고 있으며 광학적 방법으로는 파브리 페로를 이용한 방법, 분자선 흡수 방식을 이용한 방식들이 있다.^{[1][2][3]} 광학적 방법의 개요는 일종의 파장 대역 통과 여파기인 공진기 또는 분자 흡수선의 투과 특성과 lock-in 증폭

* 충주대학교 전자통신공학과
접수일자 : 2004. 1. 30

기를 이용하여 광 주파수를 안정화시킬 수 있는 주파수 차이 검출기를 제작하여 투과 곡선의 최대 값에 주파수 로킹 시키는 방식이다.

본 논문은 전자 통신적 방법으로 입력 기준 광 주파수에 종속 반도체 레이저 광 주파수를 능동적으로 주파수 로킹 시키는 기술로 여러 가지 방식이 있을 수 있으나 광 캐리어의 높은 주파수(수 10^{14}Hz) 특성 때문에 중간 주파수를 이용한 off-set 주파수 로킹 방식을 이용하였다.^{[4][5]} 이 방식의 개요는 기존의 무선 전송에서 많이 사용되던 방식으로 주 발진기 신호(절대 기준 광 주파수)에 종속 발진기 신호(종속 전압제어발진기 반도체 레이저 광 주파수)를 헤테로다인시켜 초고주파 대역의 차이 전기 신호 주파수를 추출하고 초고주파 기준 발진기 주파수와 다시 헤테로다인하여 주파수 차이 성분을 추출한 후 주파수 차이 검출기를 이용하여 주파수 차이에 비례하는 직류성분을 추출한다. 이 직류성분은 루프 여파기를 거쳐 종속 반도체 레이저 전류 제어 신호로 변환되고 루프에 부계환을 걸어서 주파수 로킹을 시키게 되며, 초고주파 기준 주파수 만큼의 주파수 차이를 유지하면서 주파수 로킹이 이루어지므로 off-set 주파수 로킹이라고 불린다.

이 방식들로는 디지털 주파수 차이 검출기를 이용하여 광 주파수 로킹 루프를 구현한 연구 결과가 보고 되고 있으나^[2] 디지털 주파수 차이 검출기의 속도가 수십MHz 정도 이므로 루프에 반드시 분주기를 삽입하여 중간 주파수 성분의 속도를 낮추어야 한다. 또한 사용하는 반도체 레이저 자체의 선폭이 수십MHz가 될 경우 동작 한계를 넘게되므로 전압제어발진기용 반도체 레이저로 선폭이 적은 반도체 레이저를 사용하여야 하며 분주기를 사용하더라도 분주기 자체의 속도 때문에 off-set 주파수를 크게 하지 못하게 되므로 루프의 제어에 많은 문제점이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 주파수 차이 검출기로 기존의 무선 통신에서 주파수 차이 검출기로 주로 사용하는 off-set 로킹 기술을 이용하여 루프를 구현하는 방식을 제안하였다.^{[6][7]} 이 방식에 의하여 얻을 수 있는 효과로는, 첫째 디지털 주파수 검출기 방식에 비하여 off-set 주파수를 수GHz 까지 높일 수

있으므로 두 광파의 차이 주파수를 효율적으로 제어할 수 있고 반도체 레이저의 선폭에 비교적 덜 영향을 받으며, 둘째 제어 가능한 초고주파 -발진기를 효율적으로 제작하거나 안정된 광 주파수 sweep장치 제작에도 응용될 수 있으며, 셋째 이 방식은 광 검출기와 전압제어발진기용 반도체 레이저를 제외한 모든 소자들이 기존의 초고주파 통신에서 사용되는 전자 소자들을 사용할 수 있으므로 기존의 다른 방법에 비하여 경제적으로 제작이 가능하다는 장점이 있다.^[8] 본 연구에서는 off-set 주파수를 이용한 주파수 검출기의 설계된 이론에 따라 기준 초고주파 발진기 출력 1.5GHz 와 헤테로다인된 두 광 주파수 차이에 비례하는 직류성분을 생성하였으며 이 값은 전압제어발진기용 반도체 레이저 전류원에 케환되어 성공적으로 주파수 로킹을 이룰 수 있었다.

II. off-set 주파수 검출기를 이용한 광 주파수 로킹 루프

1. 루프의 개요 및 파라미터 값 설계

본 연구에서 제안한 광 주파수 로킹 루프의 전체 블럭도는 다음 그림 1과 같다. 입력 기준 광 주파수는 편광 제어기를 거쳐 입력된 전압제어발진기 반도체 레이저 광 주파수와 3dB 광 커플러에 의하여 비팅된 후 광 수신기에 의하여 전기 신호로 바뀐다. 광 수신기는 자체 대역폭 특성 때문에 광 캐리어 성분을 제거한 수신 대역 내에 포함되는 중간 주파수 성분만을 추출하며 이 신호는 전력 분배기에 의하여 분리되어 주파수 차이 검출기의 2개의 믹서로 입력된다. 즉 3dB 광 커플러와 광 수신기는 두 광 주파수를 혼합하는 믹서와 광 캐리어 주파수를 차단하는 저역 통과 여파기로서의 역할을 수행하게 된다. 따라서 두 광파의 주파수의 차이, 즉 중간 주파수 성분이 광 수신기의 통과 대역 내에 있지 않으면 이 루프는 동작하지 않게 된다. 전력 분배기에 의하여 분리된 2개의 중간 주파수 성분은 두개의 믹서에서 초고주파 off-set 기준 주파수 발생기 출력의 I신호 및 90° 위상 이동된 Q신호와 각각 혼합되어 저역 통과

여파기에 입력된다.[9][10][11] 이 신호들은 저역 통과 여파기에서 합된 주파수 성분은 제거되고 차이 주파수 성분만이 통과되어 이 성분이 없어지는 방향으로 루프를 동작시켜 주파수 로킹 시키게 된다. 따라서 이 루프는 초고주파 off-set 주파수 크기의 주파수 차이를 입력 기준 광 주파수와 유지 하면서 주파수 로킹을 이루게 된다.

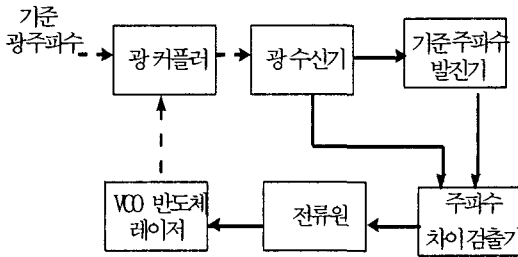


그림 1. 광 주파수 로킹 루프 블록도
Fig.1 Block diagram of optical frequency locked loop

2. 주파수 차이 검출기

주파수 차이 검출기는 전체 주파수 로킹 루프의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소가 된다. 주파수 차이 검출기로는 여러 가지 형태가 있으나 차이 신호를 안정적으로 정확히 처리할 수 있는 방식인 off-set 주파수 로킹 구조의 검출기 방식을 주로 사용한다.[12] 따라서 본 논문에서는 이 방식을 채택하여 주파수 차이 검출기를 구현하였다.[13][14]

주파수 차이 검출기의 블록도는 그림 2와 같다.

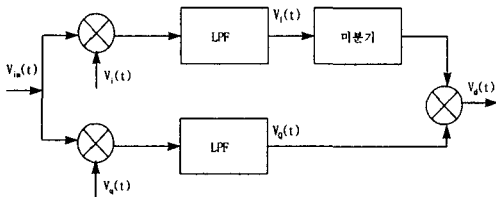


그림 2. 주파수 차이 검출기 블록도
Fig. 2 Block diagram of frequency difference detector

광 수신기로부터의 입력 주파수 신호는 두 개의 믹서에서 90° 위상 차이가 있는 두 개의 기준

주파수 발진기 성분과 곱하여져서 기저 대역 신호인 두 개의 90° 위상 차이가 나는 성분을 출력한다. 이 출력 성분은 두 주파수의 합과 차이 값에 해당하는 주파수 성분을 가지고 있으며 저역 통과 여파기에 의하여 합의 성분은 제거되고 차이 성분만을 얻게 된다. 여기서 이 주파수 차이 검출기가 제대로 동작 하려면 이 두 주파수의 차이는 반드시 저역 통과 여파기의 통과 대역 내에 있어야 동작을 하게 된다. 통과 대역을 벗어난 신호는 여파기의 특성에 의하여 감쇄되며 따라서 통과 대역폭이 루프의 주파수 포획 범위가 된다. 이 중 한 주파수 성분을 미분한 후 다른 한 성분과 다시 혼합하여 주파수 차이 검출기를 거쳐 주파수 차이에 비례하는 직류전압 성분 값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 직류 값은 전압제어발진기 반도체 레이저 전류원에 제환 되고, 직류 값에 따른 주파수 보정 과정을 통하여 입력 주파수 신호를 로킹할 수 있게 된다.

그림 2의 블록도에 의한 off-set 방식 주파수 로킹 루프에 대하여 분석하고 설계 변수를 도출하는 과정은 다음과 같다. 입력 신호는 2개의 신호로 분리되어 2개의 믹서에 입력되고 기준 주파수 발진기에서 발생시킨 신호는 위상 지연기를 이용한 0°, 90°의 위상 관계를 갖는 두 신호들과 2개의 믹서에 의하여 혼합된다. 입력 신호를 $V_m(t)$, 기준 주파수 발진기에서 발생시킨 0°, 90° 위상 신호를 각각 $V_i(t)$, $V_q(t)$ 라고 하면 이 성분들은 다음 식 과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_s \cos \omega_i t \\
 V_i(t) &= 2K_m \cos \omega_o t \\
 V_q(t) &= -2K_m \sin \omega_o t
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 V_s 는 입력 신호의 증폭도이며 ω_i 는 비팅된 두 광파 입력의 차이주파수이고 ω_o 는 기준 주파수발진기의 주파수가 된다. 위 식에서 마이너스 기호는 Q 신호가 I 신호에 대하여 90° 위상 지연 되었음을 의미한다. 사용된 두 개의 믹서를 변환 손실 K_m 을 갖는 이상적인 multiplier 형

으로 가정하고 기준 주파수 발생기 신호의 크기는 조정하여 1이 되도록 한다면 믹서를 통과한 출력은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_I(t) &= K_m V_s \cos(\Delta\omega t) \\ V_Q(t) &= K_m V_s \sin(\Delta\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\Delta\omega = \omega_i - \omega_0$ 이며 저역 통과 여파기에 의하여 합의 주파수 성분은 차단된다. 따라서 이 두 신호 중 $V_I(t)$ 신호를 미분한 후 다시 믹서에 의하여 곱하면 출력 $V_d(t)$ 는 다음 식과 같다.

$$V_d(t) = -\frac{1}{2} \Delta\omega T_d K_m^2 K_3 V_s^2 [1 - \cos(2\Delta\omega t)] \quad (3)$$

여기서 T_d 는 미분기의 시정수이며 K_3 는 3번째 출력 단 믹서의 변환 손실이다.

위 식의 첫 번째 항은 주파수 차이 ($\Delta\omega$)에 비례하는 직류성분이며, 두 번째 항은 이 직류성분에 실린 리플 성분이 된다. 이 리플 성분을 저역 통과 여파기로 차단시키면 직류성분만 남게 되어 이것이 제어 전압으로 전압제어발진기 반도체 레이저 전류 원에 부궤환 되어 주파수 로킹이 이루어지게 된다.

이 루프가 동작하려면 $\Delta\omega$ 는 반드시 저역 통과 여파기의 통과 대역 내에 있어야 하며 이 루프의 포획 범위는 통과 대역보다 크게 되지는 않는다. 미분기는 일종의 고역 통과 여파기로 볼 수 있으며 이때 이 미분기는 다음 식과 같은 전달 함수를 갖는다고 표현할 수 있다.

$$H_d(f) = A(f) \exp[j\theta(f)] \quad (4)$$

여기서 A 는 증폭도, θ 는 주파수 응답에 따른 위상 천이이다. 따라서 위의 전달 함수를 갖는 미분기를 거쳤다고 가정하면 식 (2)의 $V_I(t)$ 는 다음 식과 같이 미분된 식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla V_I(t) = K_m V_s A(\Delta f) \cos[\Delta\omega t + \theta(\Delta f)] \quad (5)$$

여기서 $\theta(\Delta f)$ 는 주파수 차이 Δf 에 대한 위상 천이를 나타낸다.

이 식을 $V_Q(t)$ 식과 곱하여 식 (3)를 다시 표현하면 다음 식과 같다.

$$V_d(t) = -\frac{1}{2} K_3 K_m^2 V_s^2 A(\Delta f) [\sin\theta(\Delta f) - (\sin 2\Delta\omega t + \theta(\Delta f))] \quad (6)$$

이 식은 루프 여파기를 거치면 $2\Delta\omega$ 항이 없어지므로 따라서 직류성분 값은 $\sin\theta(\Delta f)$ 값에 비례하게 된다. 이 식에서 주파수 차이 값 Δf 가 양의 값을 갖게 되면 식 (6)의 출력 값이 음의 값을 갖게 되어 전압제어발진기용 반도체 레이저의 구동 전류를 줄이는 방향으로 즉 광파의 파장을 감소시키는(광 주파수를 증가 시키는) 동작을 하게 된다. 반대로 주파수 차이 값 Δf 가 음의 값을 갖게 되면 식 (6)의 출력 값이 양의 값을 갖게 되어 전압제어발진기용 반도체 레이저의 구동 전류를 증가 시키는 방향으로 즉 광파의 파장을 증가시키는(광 주파수를 감소시키는) 동작을 하게 되어 루프가 주파수 로킹이 이루어지게 된다.[15][16] 이 식 (6)에서 주파수 차이 검출기는 입력 주파수 증폭도의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 이 값을 일정하게 유지하여 주기 위하여는 AGC (Automatic Gain Control)회로의 사용이 필요하다. 실제 주파수 검출기는 식 (6)의 Δf 주파수 특성 영역에서 주로 동작하게 되며 이 값은 사용하는 저역 통과 여파기 대역폭에 의존하게 된다. 따라서 이 저역 통과 여파기의 대역폭으로 루프의 로킹 범위를 추정할 수 있다. 이 출력은 루프의 동특성을 조정하기 위한 루프 여파기를 통하여 신호 처리된 후 전압제어발진기 반도체 레이저의 조정 전압으로 인가된다. 루프 여파기로는 적분기를 사용하여 직류 신호에 대하여 무한대 이득을 갖게 함으로써 전압제어발진기 반도체 레이저에서 요구되는 조정 전압 크기에 관계없이 비교되는 두 신호의 주파수 차이가 0이 될 수 있도록 하여 즉 주

파수 로킹이 이루어지게 되는 것이다.

III. 제작 시험

1. 주파수 차이 검출기 제작 시험

그림 2의 블록도와 식 (6)에 따라 제작한 주파수 차이 검출기의 입력 전력을 -10dBm 에서 -20dBm 까지 변화 시키고 주파수 차이를 -300MHz 에서 $+300\text{MHz}$ 까지 변화 시키며 측정된 주파수 차이 검출기의 직류 전압 출력특성은 그림 3과 같다. 주파수 차이 검출기의 출력 직류 전압 크기는 주파수 차이가 0 부근에서 선형적 관계를 보이다가 주파수 차이가 120MHz 부근에서 최대 값을 보이면서 감소한다. 이것은 입력 단에 사용한 저역 통과 여파기의 대역폭이 300MHz 이고 3번째 믹서의 대역폭이 167MHz 이므로 곱해진 신호의 대역폭은 146MHz 로 계산된다. 따라서 주파수 검출기의 출력 신호는 146MHz 대역폭을 통과해야만 동작을 할 수 있음을 알 수 있다.

또한 이 광 주파수 로킹 루프가 동작하는 주파수 범위 즉 주파수 포획 영역(frequency acquisition range)은 주파수 차이에 대하여 양, 음의 케환 신호를 발생하는 영역이므로 그림 3으로 부터 대략 $\pm 200\text{MHz}$ 이상의 범위임을 확인할 수 있다.

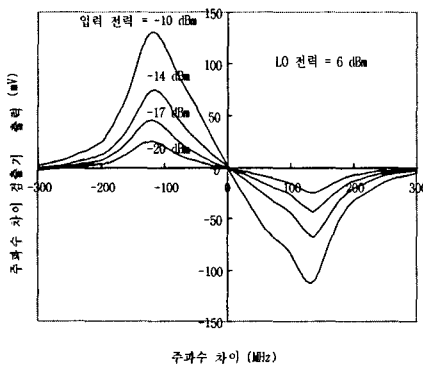


그림 3. 주파수 차이에 따른 주파수 차이 검출기 출력 전압 변화

Fig. 3 Output voltage variation of frequency difference detector vs frequency difference

제작된 주파수 차이 검출기 직류 전압 출력은

LO(local oscillator)로 사용되는 기준 주파수 발진기의 출력 값과 입력 주파수 전력 성분의 크기에 따라서 변한다. 입력 단 믹서의 변환 손실(K_m)은 시험결과 LO 전력이 2.2dBm 이하일 경우는 급격히 증가한다. 따라서 LO로 입력되는 신호 전력은 2.2dBm 이상으로 유지할 것이 요구된다. 실제 시험에서는 기준 주파수 발생기의 출력을 13dBm 으로 조정하여 전력 분배기 손실 7dB 를 고려할 경우 믹서 입력의 전력이 6dBm 이 되도록 설계하였다. 그림 4는 첫 번째 믹서의 LO 입력이 6dBm , 2.2dBm , -0.8dBm 이고 주파수 차가 100MHz 인 경우 입력 전력 성분을 변화시키면서 주파수 차이 검출기의 출력을 측정된 결과이다. 주파수 차이 검출기 출력과 입력 전력 성분은 저역 통과 여파기 통과 대역 내에서 식 (6)에서 유도된 바와 같이 선형적인 관계를 갖도록 설계 되어야한다. 하지만 이 값의 크기가 입력 단 믹서의 1dB 압축점으로 접근함에 따라 출력 증가율이 감소하여 선형 관계에서 벗어난다. 그림 4에서 이 값이 -10dBm 이상으로 증가하였을 때 선형 관계에서 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 앞 단락에서 기술하였듯이 기준 주파수 발진기 전력 값이 2.2dBm 이하로 감소할 때 믹서의 변환 손실이 증가하여 출력이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

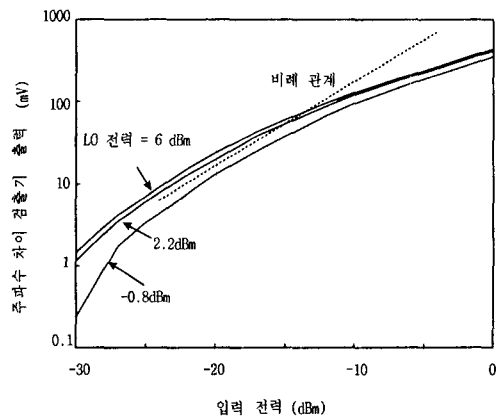


그림 4. 입력 전력 크기 변화에 따른 주파수 차이 검출기 출력 변화

Fig. 4 Output voltage variation of frequency difference detector vs input optical power

따라서, 믹서의 동작 범위는 LO 전력 값 2.2dBm 이상, 입력 전력은 그림 4로부터 대략 -25dBm에서 -10dBm 이하 까지 임을 알 수 있으며 제작된 주파수 로킹 루프의 헤테로다인된 광 주파수 성분은 이 범위 이내에 들도록 광 수신기용 증폭기 또는 AGC 증폭기를 설계하여야 함을 알 수 있다.

2. 광 주파수 로킹 제작 시험

광파의 로킹을 위한 입력 기준 광 주파수 신호는 선폭이 100kHz 이하인 상용 가변 파장 레이저를 사용하였고 전압제어발진기용 반도체 레이저로는 NEC사에서 개발한 선폭 20MHz인 DFB 반도체 레이저를 사용하였다. 이 반도체 레이저는 열전 냉각기(thermo-electric cooler, TEC), 써미스터(thermistor), 광 아이솔 레이터(optical isolator)가 내장되어 있으며 편 배열 모양은 나비(butterfly) 형태로 되어 있다. 레이저의 발진 파장은 25°C와 25mA에서 1547nm이며 레이저의 주입 전류 및 온도를 각각 수 μ A, 수mC 이내로 안정화 시키기 위하여 전류 및 온도 조절기를 사용하였다. 입력 기준 광 주파수 신호는 초고주파 기준 발진기 출력인 1.5GHz 만큼의 광 주파수 차이를 전압제어발진기용 반도체 레이저 광 주파수와 유지하도록 광 수신기 출력을 RF 스펙트럼 분석기로 감시하면서 전류 및 온도를 미세 조정하여 원하는 파장에 맞추어 실험할 수 있도록 하였으며 전압제어발진기용 반도체 레이저 광파의 편광 상태를 편광 제어기로 제어하여 광 수신기 출력이 최대가 되도록 조정하였다. 이때 측정된 사용된 반도체 레이저의 전류 및 온도에 대한 중심 주파수 변화량은 각각 330MHz/mA, 11GHz/oC 이었다. 3dB 광 커플러를 통하여 헤테로다인된 기준 광 신호와 전압제어발진기 반도체 레이저 빛은 InGaAs-PIN 광 검출기에서 전기 신호로 변환된 후 교류 증폭기 2개를 사용하여 증폭하였다.

광 수신기 출력은 수신기 자체의 대역폭 특성 때문에 캐리어 성분은 차단되고 기준 광 주파수와 전압제어발진기용 광 주파수와의 차이 주파수인 1.5GHz 성분만이 출력되도록 기준 광 주파수를

가변하여 조정하였다.

기준 주파수 발진기의 I와 Q신호용 전력 분배기로는 6dB 초고주파 전력 분배기를 알루미늄 기판 위에 마이크로 스트립 라인으로 제작 사용하였으며 RF 믹서는 변환 손실은 7dB 이었다. 제작 시험에 사용한 주요 부품은 표 1과 같다.

표 1. 광 주파수 로킹 루프 제작에 사용한 주요 부품 제원

Table.1 Component specifications used in optical frequency locked loop

사용한 부품	주요특성
광 커플러	2 X 2, 3dB 커플러
광 검출기	3dB 대역폭 : DC - 6GHz Responsivity : 0.6 [A/W] 검출기 형태 : InGaAs-PIN 출력 임피던스 : 50 Ω
증폭기	3dB 대역폭 : DC - 3GHz 이득 : 30dB 입 출력 임피던스 : 50 Ω
전력 분배기	기판 종류 : alumina 손실 : 6dB
90°위상 이동기	지연 선로를 이용한 180° 위상 이동 가능 입 출력 임피던스 : 50 Ω
루프 여파기용 OP Amp	최대 동작 주파수 : 300MHz off-set 전류 : 7 μ A
믹서	동작 주파수 : 0.7 - 2GHz 변환 손실 : 7dB
Multiplier형 믹서	최대 동작 주파수:200MHz 변환 손실 : 0dB
전압제어발진기용 반도체 레이저	선폭(FWHM) : 20MHz(1.5 I _{TH}) 파장 : 1547nm 레이저 구조 : DFB, Butterfly형
편광 제어기	광파의 편광 제어

그림 5와 그림 6은 광 스펙트럼 분석기와 RF 스펙트럼 분석기로 측정한 헤테로다인된 두 광파의 광 스펙트럼과 광 수신기에 의하여 광전 변환하여 1.5GHz 차이를 유지하도록 조정한 RF 스펙트럼 파형을 각각 보여주고 있다.

기준 초고주파 주파수 발진기로는 상용 신호발생기를 사용하였으며 출력된 1.5 GHz 정현파를 전력 분배기로 분배하여 하나는 I신호로 다른 하

나는 위상 이동기를 이용하여 90° 위상 이동 시킨 후 Q 신호로 사용하였다. 믹서에 입력된 광 수신기 증폭기로부터의 전력은 -10dBm 이었으며 기준 초고주파 주파수 발생기로부터의 전력은 6dBm 이었다. 따라서 사용한 첫 번째 믹서의 변환 손실은 7dB 이었으므로 주파수 차이 검출기 입력 신호는 -17dBm 과 6dBm이 각각 되어 그림 4의 선형 동작 영역에서 작동하도록 하였다. 믹서 출력의 I와 Q신호는 300MHz대역의 OP Amp를 이용한 저역 통과 여파기로 캐리어 및 고조파 성분을 제거하고 I 신호는 고역 통과 여파기로 미분하여 출력단 믹서로 입력시켰다. 출력단 믹서의 출력은 OP Amp를 사용한 루프 여파기를 거쳐 전압제어발진기 반도체 레이저 구동용 전류원으로 부궤환 시켰다.

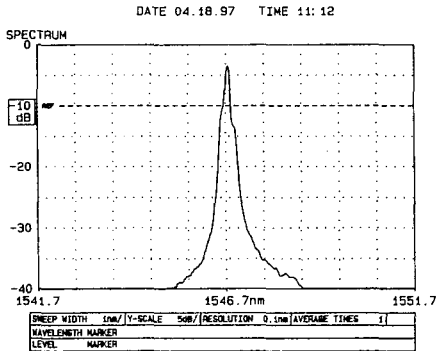


그림 5. 헤테로다인된 두 광파의 스펙트럼
Fig. 5 Spectrum of heterodyned two optical wavelength

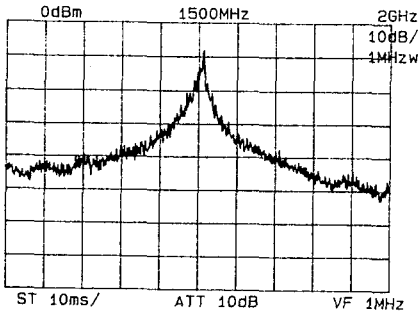


그림 6. 헤테로다인된 후 광전 변환된 광파의 RF 스펙트럼
Fig. 6 RF spectrum of heterodyned two optical wavelengths after O/E conversion

그림 7은 기준 초고주파 발진기 출력과 헤테로다인된 광 주파수 출력 RF 신호와 혼합된 입력단 믹서의 출력 스펙트럼이다. 이 신호는 저역 통과 여파기를 거치게 되면 1.5GHz 와 3GHz 영역의 RF 주파수 성분은 차단되고 직류영역의 기본 대역 중간 주파수 성분만이 주파수 로킹에 이용되게 된다.

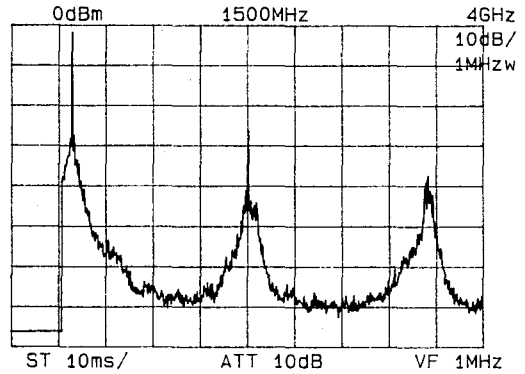


그림 7. 출력단 믹서에 의하여 헤테로다인된 RF 신호의 출력
Fig. 7 RF spectrum of heterodyned RF signals at out stage mixer

그림 3을 살펴보면 주파수 차이가 0 부근 즉 1.5GHz 부근에서 선형적인 관계를 보이다가 주파수 차이가 ±120MHz 일 때 최대 값을 보이고 ±200MHz 부근까지 감쇄한다. 이 특성은 주파수 차이 검출기에 사용된 저역 통과 여파기 특성 때문이며 계산된 3dB 대역폭이 150MHz 정도이므로 주파수 검출기의 출력 신호는 120MHz에서 최대 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 광 주파수 로킹 루프가 동작하는 주파수 범위 즉 주파수 포획 영역은 주파수 차이에 대하여 양음 신호를 발생하는 영역이므로 그림 3으로 부터 대략 ±200MHz 범위의 주파수 차이에 대하여 주파수 포획이 이루어질 수 있음을 알 수 있다.

따라서 기준 주파수 발생기 신호 1.5GHz에 전압제어발진기 반도체 레이저의 선폭을 유지하면서 주파수 로킹 시키는 것은 성공적으로 수행되었으며 이때 측정된 주파수 로킹의 범위는 ±160MHz 이었다.

그림 8은 1.5GHz의 기준 주파수 발진기에 주파수 로킹 된 헤테로다인된 광 신호를 RF 스펙트럼 분석기로 측정한 신호이다. 기준 광원으로 사용한 광파의 선폭이 100kHz이하이므로 사용한 전압제어발진기용 DFB 반도체 레이저의 선폭이 RF 스펙트럼 분석기에 그대로 나타나고 있다.

그림 8은 주파수 로킹이 이루어지기 전 2분간 온도 및 유입 전류만을 안정화하여(온도/전류 조절기를 사용하여 전류: μA 이하, 온도: m°C 이하로 제어) 측정한 상태이며 로킹 후 광 주파수는 안정된 상태로 동작 하였다.

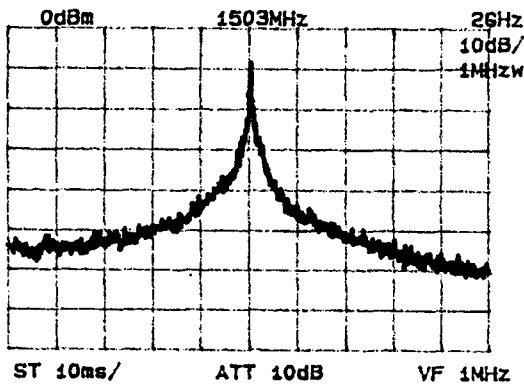


그림 8. 주파수 로킹 상태에서의 헤테로다인 광 신호 RF 스펙트럼
Fig. 8 RF spectrum of heterodyned optical signals at frequency locked stage

IV. 결론

광파의 주파수 로킹에 초고주파 신호처리 방식을 적용하여 off-set 형식의 주파수 차이 검출기 구조를 도입하였으며 기준 입력 광 주파수에 대하여 비교적 넓은 동작 영역에서 동작하며 광 주파수 동기화 시킬 수 있는 전압제어발진기 반도체 레이저 광 주파수 로킹 기술을 제안 하였다. 이 방식을 이용할 경우 디지털 주파수 검출기 방식에 비하여 off-set 주파수를 수GHz 까지 높일 수 있으므로 두 광파의 차이 주파수를 효율적으로 제어할 수 있고 반도체 레이저의 선폭에 비교적 덜 민감하게 되므로 여러 가지 장점이 있게 됨을 확인

할 수 있었다.

이 방식은 반도체 레이저의 주입 전류 및 온도에 의하여 변화하는 민감한 광 파장 변동을 입력 기준 광 주파수와 헤테로다인시켜 차이 주파수를 검출하고 이를 이용하여 광 주파수 로킹 시켜야 한다. 그러나 광파의 높은 주파수에는 직접 주파수 로킹이 불가능하므로, 본 연구에서는 1.5GHz의 초고주파 기준 주파수를 이용하여 차이 주파수 성분을 추출하고 이 성분을 이용하여 루프를 로킹 시켜야 하므로 일정한 차이 주파수를 유지하면서 광 주파수를 로킹 시키는 off-set 주파수 로킹 방식에 의하여 광 주파수 로킹 루프를 구현하였다.

본 논문에서는 주파수 로킹 루프의 일반적인 구성 요소인 주파수 차이 검출기, 전압제어발진기용 반도체 레이저 로킹의 설계에 대하여 이론적으로 검토하여 주파수 차이 값이 검출되는 과정을 이론적으로 살펴보고 설계 파라미터들을 도출하였으며 체계적인 시험 결과 및 분석을 기술하였다. 루프 여파기 설계는 광대역의 OP Amp를 이용하여 2차 능동 여파기 및 적분기로 구현하였으나 이 내용은 기존의 위상 고정 루프에서 많이 다루므로 기술하지 않았다. 본 연구에서 제안한 주파수 차이 검출기인 off-set 방식의 주파수차이 검출기 동작 범위는 출력단 믹서의 LO 출력이 2.2dBm 이상일 경우 광 수신기로 부터의 RF 입력이 -10dBm 에서 -25dBm까지의 범위에서 선형적으로 동작됨을 확인하였으며, 설계의 기대 값과 일치함을 알 수 있다. 시험 결과 주파수 차이 검출기의 직류값은 off-set 초고주파 기준 주파수 1.5GHz를 중심으로 $\pm 300\text{MHz}$ 대역에서 측정되었다. 전체 주파수 로킹 루프에 대한 실험에서 20MHz 파장 폭을 갖는 전압제어발진기 반도체 레이저는 입력 광 주파수에 1.5GHz 주파수 차이를 유지하며 주파수 로킹이 되었으며 1.5 GHz를 중심으로 $\pm 160\text{MHz}$ 범위에서 주파수 로킹이 이루어졌다. 따라서 본 시험 결과로 부터, 광 FDM 전송망의 로킹 루프에 적용 할 경우 파장 및 선폭이 안정화된 절대 기준 광 주파수에 대하여 전송망 노드의 동기화부 전압제어발진기 반도체 레이저는 1.5GHz 주파수 차이를 유지하면서 ± 160

MHz의 주파수 범위 내에 있어야 주파수 로킹이 이루어질 수 있음을 의미한다..

제안된 광 주파수 로킹 루프의 성능 향상을 위하여 향후 추진 사항으로는 파장 폭이 적은 반도체 레이저를 사용하여 루프의 대역폭 특성을 키우는 연구와 로킹 루프의 안정된 동작을 보장하는 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 주파수 차이 검출기의 대역폭을 크게 하여 루프의 포획 범위를 늘려서 온도와 전류 변화에 대한 반도체 레이저의 주파수 변동범위가 크더라도 광 주파수 로킹이 가능 하도록 하는 연구와 전압제어발전기 반도체 레이저의 변화 값을 주파수 로킹 범위보다 작게 하여 주파수 로킹이 풀어지지 않게 함으로써 루프의 성능이 개선 될 수 있는 연구가 아울러 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] U. H. P. Fischer and Clemences von Helmolt, Absorption Spectra of Exited Kr 84 States Between 1.5 and 1.58um and Their Use for Absolute Frequency Locking, J. Lightwave Technol., vol. 14, pp. 139-143, 1996.
- [2] K. Kuboki and M. Ohtsu, A Synthesized Method to improve Coherence in Semiconductor Lasers by Electrical Feedback, IEEE J. Quantum Electronics., vol. 25, pp. 2084-2090, 1989.
- [3] K. Kuboki and M. Ohtsu, An Allan Variance Real-Time Processing System for Frequency Stability Measurements of Semiconductor Laser, IEEE Trans. Instrumentation and measurement, vol. 39, pp. 637-641, 1990.
- [4] U. Glese, T. N. Nielson, and B. Broberg, A Wideband Optical Phase Locked Loop for Generation of 3-18GHz Microwave Carriers, IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 4, pp. 936-938, 1992.
- [5] M. Ohtsu, Realization of Ultrahigh Coherence in Semiconductor Lasers by Negative Electrical Feedback, J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 245-256, 1988.
- [6] T. G. Hodgkinson, Phase-locked-loop analysis for pilot carrier coherent optical receiver," Electron. Lett., vol. 21, pp. 1202-1203, 1985.
- [7] R. C. Steel, Optical Phase Locked Loop using Semiconductor Laser Diodes, Electron. Lett., vol.19, pp.69-71, 1983.
- [8] H. R. Telle and H. Li, Phase-Locking of Laser Diodes, Electron. Lett., vol. 26, pp. 858-859, 1980.
- [9] 추봉진, 최중문, 최용화, 이호준, 스캐닝 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 멀티 캐리어 레이저 다이오드 주파수 안정, 전자공학회 논문지, 제28권, pp. 47-53, 1991.
- [10] D. Jay M. Sabido IX, M. Tabara, and L. G. Kazovsky, Experimental Linewidth Insensitive Coherent Analog Optical Link, J. of Light-wave Technology, vol. 12, pp. 1976-1986, 1994.
- [11] J. Harrison, "Linewidth and offset frequency locking of external cavity GaAlAs lasers, J. Quantum Electro., vol. 25, no. 6, pp. 1152-1155, April. 1987.
- [12] F. M. Gardner, Properties of Frequency Difference Detectors, IEEE Trans. Com., vol. COM-33, pp. 131-138, 1985.
- [13] A. N. D'Andrea and U. Mengali, Design of Off-set s for Automatic Frequency Control Systems, IEEE Trans. Com., vol. 41, pp. 988-997, 1993.
- [14] D. G. Messerschmitt, Frequency Detectors for PLL Acquisition in Timing and Carrier Recovery, IEEE Trans. Com., vol. COM-27., pp. 1288-1295, 1979.
- [15] A. N. D'Andrea and U. Mengali, Performance of Quadricorrelator Driven Modulated Signals, IEEE Trans. Com., vol. 38, pp. 1952-1957, 1990.
- [16] A. Bononi, and P. Ghiggino, Analysis of the Automatic Frequency Control in Heterodyne Optical Receiver, J. Lightwave Technol., vol. 10, no. 6, pp. 794-803, 1992.

저자 소개



유강희(Kang-Hee Yoo)

1979년 2월 고려대학교 전자공학과 학사

1982년 9월 고려대학교 전자공학과 석사

1987년 8월~1989년 8월 벨기에 Bell telephone 방문 연구원

1997년 9월 고려대학교 전자공학과 박사

1978년 12월~1998년 6월 한국전자통신연구원 연구원, 선임연구원, 책임연구원, 연구실장

1998년 9월~현재 충주대학교 전자통신공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신시스템, 초고주파회로설계