

# Quadricorrelator 방식을 이용한 광주파수 잠김루프 제작

正會員 유 강 회\*, 박 창 수\*, 박 진 우\*\*

## Optical Frequency Locked Loop using Quadricorrelator

Kang Hee Yoo\*, Chang Soo Park\*, Jin Woo Park\*\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 Quadricorrelator 방식을 이용하여 제작한 광주파수 잠김 루프의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. DFB 반도체를 종속 VCO로 사용하고 믹서와 1GHz 주파수 차이를 유지 하기위한 기준 초고주파 주파수 발생기를 이용하여 Quadricorrelator를 제작 하였으며 측정된 광주파수 잠김범위는 140MHz이었다.

### ABSTRACT

An experimental results of optical frequency locked loop with DFB semiconductor laser as VCO are presented. Using quadricorrelator as frequency difference detector and frequency off-set locking technique with 1GHz reference frequency, frequency locking range of 140MHz was achieved. This paper reports the design and realization details of the loop.

### I. 서 론

광섬유를 이용하여 전송 할 수 있는 궁극적인 전송 용량은 현재 상용화된 1.5um 파장영역에서 15THz 정도로 알려져 있다. 그러나 이 전송용량의 실현은 광파를 캐리어로 이용하는 광주파수 분할다중화를 통하여 가능해지며 이를 위하여 광주파수의 효율적

인 제어가 필요해진다. 광주파수 분할다중 전송시스템의 기본적인 전송요구조건은 여러채널의 광신호들을 광주파수 영역에서 인접채널간의 간섭을 가장 최소화하면서 어떻게 표준화된 광주파수 채널위치에 다중화시키고 다시 역다중화 시킬수 있는냐는 점이다.

채널위치 표준화의 실현은 기존의 동기식 전송장치에서와 같이 일정한 기준 광주파수를 망의 각 노드들에 분배하여 각 노드들이 기준 광주파수에 동기화가 되도록 해주어야한다. 따라서 망의 기준 노드에서 절대기준 광주파수 동기신호를 발생하여 이를 각각

\*한국전자통신연구소 광파통신연구실  
\*\*고려대학교 전자공학과  
論文番號:96297-0914  
接受日字:1996年 9月 14日

의 노드들에 전송해주고 여기에 각 노드의 종속 반도체 레이저들이 주파수잠김이 되도록 해야하며 이 주파수 잠김된 기준주파수를 기준으로 광주파수 다중화 및 역다중화가 수행된다. 광캐리어 복구를 위한 주파수잠김 방식으로는 여러가지 방식이 있으나 광캐리어의 높은 주파수특성 때문에 off-set 주파수잠김 방식이 널리쓰인다. 이 방식의 개요는 기존의 무선전송에서 많이 사용되던 방식으로 주발진기 신호에(절대기준 광주파수 신호) 종속 발진기신호(종속 노드의 반도체 레이저 광주파수)를 beating 시켜 차이 주파수를 추출한 후 초고주파 기준주파수와 다시 beating하고 루프여파기를 거쳐 종속 반도체레이저 전류제어 신호로 바꾼 후 부재환을 걸어서 주파수 잠김을 시키는 방식으로 초고주파 기준주파수 만큼의 주파수차이를 유지하면서 주파수잠김이 이루어 지므로 off-set 주파수 잠김이라고도 불린다. 이 방식은 광검출기와 VCO용 반도체 레이저를 제외한 모든 소자들이 기존의 무선통신에서 사용되는 전자소자들을 사용할 수 있으므로 손쉽게 제작이 가능해진다.

## II. 광주파수 잠김루프 설계

광주파수 동기화장치 구성도는 (그림1)과 같다.

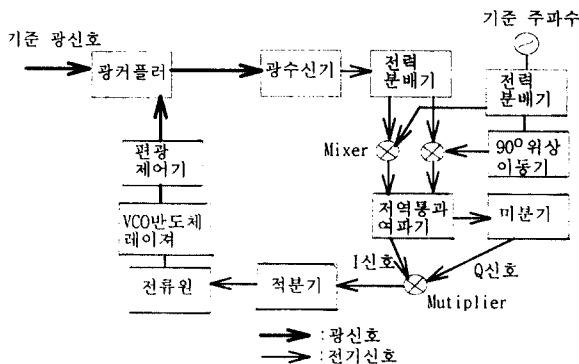


그림 1 광주파수 동기화장치 구성도

광섬유를 거쳐 망의 기준점으로부터 전송되어온 기준 광주파수는 편광제어기를 거쳐 입력된 VCO 반도체레이저 광주파수와 3dB 광커플러에 의하여 mixing 된후 광수신기에 의하여 전기신호로 바뀐다. 광수신

기는 자체 대역폭특성 때문에 광캐리어 성분을 제거한 수신대역내에 포함되는 중간주파수 성분만을 추출하며 이 신호는 전력분배기에 의하여 분리된다. 분리된 2개의 신호는 두개의 mixer에 의하여 기준 주파수발생기 출력의 I신호 및 90° 위상이동된 Q신호와 각각 mixing 되고 이 신호들은 multiplier형 믹서에 의하여 곱해져서 주파수 차이에 따른 DC 신호로 변환된다. 이 DC 신호는 적분기를 거쳐 VCO 반도체레이저 구동전류로 변환되어 부재환된다.

주파수 잠김루프의 설계는 주파수검출기, 전압제어 발진기(VCO) 및 적분기인 루프여파기의 특성 설계로 수행된다. 루프여파기를 OP Amp를 이용하여 2차 능동 RC여파기 및 적분기로 (그림 2)와 같이 구현할 경우 그 전달함수는 다음식과 같이 표현 할 수 있다.<sup>[1]</sup>

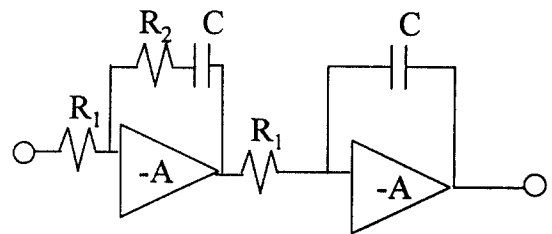


그림 2 적분기 구성도

$$H(s) = \frac{K_o K_d \left( \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1} \right)}{s^2 + s \left( \frac{K_o K_d \tau_2}{\tau_1} \right) + K_o K_d / \tau_1^2} \quad (1)$$

여기서

$$\tau_1 = R_1 C, \quad \tau_2 = R_2 C$$

$K_d$ : 주파수 검출기 이득(V/rad),  $K_o$ : VCO 이득(rad/sec-V)

(1)식을 고유진동수  $\omega_n$ 과 감쇠율  $\zeta$ 로 다시 표현하면 다음 식과 같으며 이 값으로 3dB 대역폭을 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\tau_1} \sqrt{K_o K_d}, \zeta = \frac{\tau_2}{2\tau_1} \sqrt{K_o K_d}$$

$$B_{3dB} = \frac{\omega_n}{2\pi} \sqrt{2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1}}$$

여기서 사용된 광검출기에 의한 응답특성에 의하여  $K_{OPD}$  값이 결정되며  $K_d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$K_{OPD} = 2\sqrt{P_M P_S} R \text{----- (3)}$$

$$R = \frac{e\eta}{h\nu}$$

$$K_d = K_{OPD} A L_1 L_2 K_3$$

r: 광검출기 부하,  $P_M, P_S$ : 기준광 및 VCO반도체레이저 광전력, R: 광검출기 응답도, e: 전자의 전하,  $\eta$ : 광검출기 양자효율, h: 프랑크상수,  $\nu$ : 검출된 광주파수, A: 광수신기 이득,  $L_1$ : 전력분배기 손실,  $L_2$ : Mixer 손실,  $K_3$ : Multiplier 이득,  $K_{OPD}$ : 광검출기 이득

광주파수 잠김루프는 기존의 전기통신 동기화루프와 다르게 루프의 성능이 위상잡음에 상당히 의존하게 되며 이는 사용되는 반도체레이저의 위상잡음이 상대적으로 크기 때문이다.

광주파수 잠김루프에서 위상에러의 요인으로는 반도체레이저 위상잡음과 광검출 과정에서 발생하는 산탄잡음이 있으며 이중 반도체레이저의 위상잡음은 위상에러 성능을 결정하는 가장 중요한 요인이 된다. 일반적으로 반도체레이저의 위상잡음은 초고주파 기준발진기의 위상잡음에 비교하여 상대적으로 상당히 크므로 반도체레이저의 위상잡음에 의하여 위상에러 성능이 결정되게 된다.

산탄잡음에 의한 전력 스펙트럼 밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{SNr}(f) = 2eR(P_M + P_S)r^2 \text{----- (4)}$$

이 값을 위상값으로 변환한 잡음은 다음과 같이 계산된다<sup>[4]</sup>.

$$S_{SN}(f) = \frac{S_{SNr}(f)}{K^2_{OPD}} = \frac{e(P_M + P_S)}{2RP_M P_S} \text{----- (5)}$$

위상에러값은 다음 식과같이 계산 할 수 있다.

$$\sigma_\phi^2 = S_{SN} I_{SN} + \frac{\Delta\nu_M + \Delta\nu_S}{\pi} I_{PN} \text{----- (6)}$$

$$I_{SN} = \int_0^\infty |H(j2\pi f)|^2 df = \frac{\omega_n}{2} \left( \zeta + \frac{1}{4\zeta} \right)$$

$$I_{PN} = \int_0^\infty \left| \frac{1 - H(j2\pi f)}{f} \right|^2 df = \frac{\pi^2}{2\zeta\omega_n}$$

$\Delta\nu_M$ : 기준 광주파수의 파장폭,  $\Delta\nu_S$ : VCO 반도체레이저 파장,  $I_{SN}$ : 산탄잡음에 의한 위상에러,  $I_{PN}$ : 위상잡음에 의한 위상에러

(6)식의 첫번째 항은 광검출기 산탄잡음에 의하여 발생하는 위상에러 값이며 두번째 항은 기준 광주파수와 VCO 반도체레이저의 위상잡음에 의한 위상에러 값이다. 이때 off-set 주파수발생기의 위상잡음은 상대적으로 아주 적은 양이 되므로 무시된다.

따라서 (5)식을 (6)식에 대입하여 정리하면

$$\sigma_\phi^2 = \frac{e(4\zeta^2 + 1)\omega_n}{8\zeta RP_M} + \frac{\pi}{2\zeta\omega_n} (\Delta\nu_M + \Delta\nu_S) [rad^2] \text{--- (7)}$$

여기서  $P_S \gg P_M$

$\sigma_\phi^2$ 는 적당한  $\omega_n$  값을 정하여 최소화 시킬 수 있다. 이 식에서 보듯이 오른쪽의 첫번째 항은  $\omega_n$ 이 증가함에 따라 증가하고 두번째 항은  $\omega_n$ 이 증가함에 따라 감소하므로 이 첫번째 항과 두번째 항이 같다고 가정하면 최적의  $\omega_n$  값을 구할 수 있으며 이 값으로 최소  $\sigma_\phi^2$  값을 구할 수 있다.

따라서  $\omega_{n, opt}, \sigma_{\phi, min}^2$  값은 다음과 같이 표현된다.<sup>[6]</sup>

$$\omega_{n, opt} = \sqrt{\frac{4\pi(\Delta\nu_M + \Delta\nu_S)RP_M}{e(4\zeta^2 + 1)}} [rad/sec] \text{---- (8)}$$

$$\sigma_{\phi, min}^2 = \sqrt{\frac{\pi e(\Delta\nu_M + \Delta\nu_S)(4\zeta^2 + 1)}{4RP_M \zeta^2}} [rad^2] \text{---- (9)}$$

위 식(7)에 현재 상용화된 DFB 반도체레이저의 선

폭을 고려하여(20MHz로 가정) 감쇠율을 0.7로 설계 하였을 경우 입력 광전력에 따른 위상변화량 대  $\omega_n$  계 산값은 다음 (그림 3)과 같다.

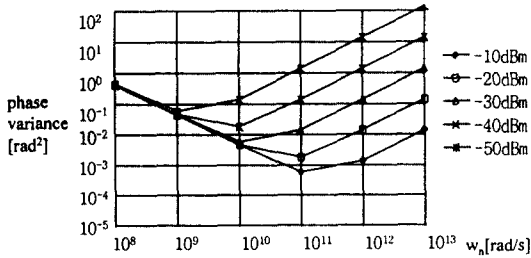


그림 3 광입력에 따른 최적  $\omega_n$  값의 변화

위 그림에서 보면 위상에러 변화량은 입력 기준 광 전력의 증가에 따라 감소하며 최적의  $\omega_n$  값은 입력 기준 광전력 값이 커짐에 따라 증가함을 알 수 있다.  $\omega_n$  값은 사용하는 반도체레이저의 선폭에 의하여도 영향 받으며 선폭이 적은 것 일수록 이 값을 줄일 수 있다.

위의 계산결과에 의한 최적  $\omega_n$  값의 결정은 VCO 용 반도체레이저 선폭과 입력 기준 광전력 값에 따라 다르게 하여야하며 실제 구현가능한 전자회로 소자 값을 고려하여 선정 하여야한다. 2차 능동여파기로 OP amp를 사용할 경우 사용가능한 상용화된 OP amp의 대역폭은 수백 MHz를 초과하지 않으며 상용화된 반도체레이저의 선폭도 수십 MHz 정도이므로 이로 인하여 전자회로의 설계시 많은 제약을 받게된다.

(그림 1)의 블럭도에 의한 quadri-correlator 방식에 의한 주파수 잠김루프에 대하여 분석하고 설계변수를 도출하면 다음과 같다.

3dB 광커플러를 통하여 beating된 광입력 신호는 광수신기에서 전기신호로 변환된다. 이때 beating된 광신호는 광수신기의 대역폭 특성에 의하여 광파 캐리어 성분은 차단되며 기준 광입력과 VCO 반도체레이저의 차단 주파수인  $\omega_c$  값만이 2개의 mixer로 6dB 전력 분배기를 통하여 입력된다.

이 신호는 기준주파수 발생기에서 발생시킨  $0^\circ, 90^\circ$ 의 위상 관계를 갖는 두신호와 다시 2개의 mixer에 의하여 beating되며 이 신호를  $V_m(t)$ , 기준주파수 발생기에서 발생시킨  $0^\circ, 90^\circ$  위상 신호를 각각  $V_i, V_Q$ 라

고하면 다음과같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_m(t) &= V_s \cos \omega_s t \\ V_i &= 2K_m \cos \omega_0 t \\ V_Q &= -2K_m \sin \omega_0 t \end{aligned} \quad \text{----- (10)}$$

사용된 두개의 mixer를 이상적인 multiplier형으로 가정하면 출력은 다음과같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_I(t) &= K_m V_s \cos(\Delta\omega t) \\ V_Q(t) &= K_m V_s \sin(\Delta\omega t) \end{aligned} \quad \text{----- (11)}$$

여기서  $\Delta\omega = \omega_s - \omega_0$ 이며 저역통과 여파기에 의하여 합의 주파수성분은 차단된다. 따라서 이 두신호중  $V_Q(t)$ 신호를 미분한 후 다시 mixer에 의하여 곱하면 출력  $V_d(t)$ 는 다음과 같다.

$$V_d(t) = -\frac{1}{2} \Delta\omega T_d K_m^2 K_3 V_s^2 [1 - \cos(2\Delta\omega t)] \quad \text{----- (12)}$$

$T_d$ : 미분기의 시정수,  $K_3$ : 세번째 mixer의 전달이득

윗식의 첫번째 항은 주파수차이에 비례하는 DC 성분이며 두번째 항은 이 DC 성분에 실린 리플성분이 된다. 이 리플성분을 저역통과 여파기로 차단시키면 DC 성분만 남게되어 이것이 제어전압으로 VCO 반도체레이저 전류원에 부채환되어 주파수잠김이 이루어지게 된다.

이 루프가 동작하려면  $\Delta\omega$ 는 반드시 저역통과 여파기의 통과대역내에 있어야 하며 이 루프의 추적범위는 통과대역보다 크게 되지는 않는다. 여기서 사용된 미분기는 일종의 고역통과 여파기로 볼 수 있으며 이때 이 미분기는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$H_d(f) = A(f) \exp(j\phi(f)) \quad \text{----- (13)}$$

A: 증폭도,  $\phi$ : 주파수 응답에따른 위상천이

따라서 위 전달함수의 미분기를 거쳤다고 가정하면 식(11)의  $V_I(t)$ 는 다음과같이 된다.

$$\tilde{V}_I(t) = K_m V_s A(\Delta f) \cos(\Delta \omega t + \phi(\Delta f)) \text{-----} (14)$$

이식이 저역 통과여파기를 거치면  $2\Delta\omega$ 항이 없어  
 지므로 식(12)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$V_d(t) = -\frac{1}{2} K_3 K_m^2 V_s^2 A(\Delta f) \sin \phi(\Delta f) \text{-----} (15)$$

따라서 DC 성분값은  $\sin \phi(\Delta f)$  값에 비례하게 되며 식  
 (15)는 0을 중심으로 주파수차이에 따라  $\sin$ 파의 반전  
 된 모습을 보이게 된다.

### III. 실험 시스템 구성

실험 시스템 구성은 (그림 1)의 블록도와 같다.

기준 광신호는 선폭이 100KHz 이하인 상용 가변파  
 장 레이저를 사용하였고 VCO용 반도체레이저로는  
 전자통신연구소에서 개발한 선폭 20MHz이고 파장  
 이 1550nm인 DFB 반도체레이저를 사용하였다. 3dB  
 광커플러를 통하여 beating된 기준 광신호와 VCO 반  
 도체레이저 빛은 InGaAs-PIN 광검출기로 전기신호  
 로 변환 된후 AC 증폭기로 50dB 증폭하였다. 사용된  
 광검출기의 응답도는 0.6[A/W]이고 3dB 대역폭은  
 DC-6GHz이었으며 수신기로 입력된 기준 광신호 전  
 력과 VCO 반도체레이저 입력은 각 각 -20dBm, -10dBm  
 이었다. 광수신기 출력은 기준 광주파수와 VCO용 광  
 주파수와의 차이 beating 주파수인 1GHz 성분만이  
 출력 되도록 기준 광주파수를 가변하여 조정하였다.  
 따라서 기준 주파수 발생기 출력 1GHz와 다시 beating  
 된 주파수 잠김이므로 기준 광주파수와 VCO 반도체  
 레이저는 항상 1GHz의 차이를 유지하면서 주파수 잠  
 김이 된다.<sup>[7]계)</sup>

I와 Q신호용 전력 분배기로는 6dB 초고주파 전력  
 분배기를 제작 사용하였으며 RF 믹서는 변환손실이  
 7dB 이었다. 기준 주파수 발생기로는 synthesized 신  
 호 발생기를 사용하였으며 출력된 1GHz 정현파를 전  
 력분배기로 분배하여 하나는 I신호로 다른 하나는 지  
 연선로를 이용하여 90° 위상이동 시킨후 Q신호로 사  
 용하였다. 기준 주파수발생기로 부터의 전력은 +7dBm  
 이었으며 믹서 출력의 I와 Q신호는 300MHz 대역의

저역통과 여파기로 캐리어 및 고조파 성분을 제거한  
 후 Q신호는 고역통과 여파기로 미분하여 multiplier  
 형 믹서로 입력시켰다. 믹서의 출력은 차동 증폭기를  
 사용한 2차 능동 여파기를 거쳐 VCO 반도체레이저  
 구동용 전류원으로 부계환 시켰다.

(그림 1)에서 사용한 반도체레이저 선폭과 입력 광  
 전력을 이용하여 식 (8)에 의한 최적값을 구해보면  
 $5.6 \times 10^{10}$  [rad/sec]이 되며 이 조건에서의 위상에러 값  
 은  $1.59 \times 10^{-3}$ 이고, 이 조건을 충족시키기 위하여는  
 루프의 3dB 대역폭이 18.3GHz가 되어야한다. 그러나  
 이 값은 실제 구현 할 수 있는 전자소자 특성을 고려  
 할 경우 실현이 불가능해진다. 따라서 상용 DFB 반  
 도체레이저를 사용 할 경우는 선폭을 최적값에 근접  
 하도록 줄이는 작업이 추가로 수행되어야한다.<sup>[9]</sup>

본 시험에서는 선폭이 20MHz인 DFB 반도체레이  
 저를 VCO로 사용 하였으므로 최적의 위상에러 값으  
 로 루프를 설계 하지는 못하였다.

시험에 사용한 루프의 설계값들은 다음과 같다.

$K_d$  값은 식 (3) 그리고 사용한 증폭기의 이득 및  
 Mixer의 손실을 고려하여 계산하였으며 그 값은 0.134  
 [V/rad]가 되었다.  $K_o$  값은 off-set 주파수 1GHz를  
 0.8GHz 에서 1.2GHz 까지 가변하면서 multiplier형  
 믹서출력의 DC 전압변화를 측정하였으며 그 값은  
 $4.8 \times 10^9$  [rad/sec/V] 이었다. 믹서 출력의 주파수차이  
 에 의한 DC 전압 변화특성은 (그림 4)와 같다.

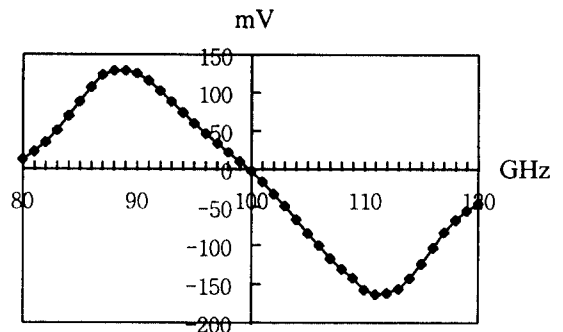


그림 4 믹서출력 DC 전압 S 곡선

믹서 출력단에 구성한 저역통과 여파기의  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 값  
 은 식(1)에 의하여 계산 하였으며  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 값은 각각  
 $6.72 \times 10^{-5}$ ,  $6 \times 10^{-9}$  이었다. 이 값들로 식(2)를 이용하

여 계산한  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 값은 각각  $377 \times 10^6$  [rad/sec]와 1.113 이었으며 이때의 3dB 대역폭은 161MHz로 계산 되었다.

측정된 주파수 잠김의 범위는 140MHz정도로 측정 되었다.

(그림 5)는 1GHz의 off-set 기준 주파수에 주파수 잠김된 beating된 광신호를 RF 스펙트럼 분석기로 측정 한 신호이다. 기준 광원으로 사용한 광의 선폭이 100KHz이하 이므로 사용한 VCO용 DFB 반도체 레이저의 선폭이 RF 스펙트럼 분석기에 그대로 나타나 고 있다.

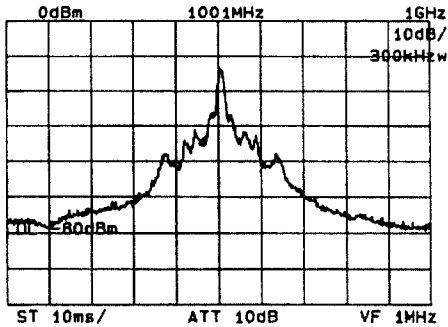


그림 5 주파수 잠김 상태에서의 beating 신호

#### IV. 실험결과 분석 및 보완

본 절에서는 초대용량 광신호 전송기술인 광주파수 분할 다중전송장치에 소요되는 광주파수 잠김루프의 설계조건 및 제작시험 결과에 대하여 기술하였다. 광주파수 잠김루프는 기존의 무선전송에서 사용되는 루프의 설계개념이 대부분 그대로 적용 될 수 있으나 광학부분인 위상검출기로 사용되는 광검출기와 VCO 역할을 담당하는 종속 반도체레이저의 새로운 모델링이 필요해진다. 본 시험은 종속 반도체레이저의 주입전류에 의하여 변화하는 민감한 파장 변동을 기준 광주파수에 beating시켜 주파수 잠김시켜야 하므로 일정한 차이주파수를 유지하면서 주파수잠김시키는 off-set 주파수 잠김방식에 의하여 구현하였다. 광주파수 잠김루프가 기존의 주파수 잠김루프에 비하여 설계상 어려운 점은 사용하는 반도체레이저의 위상잡음(FM잡음)이 상대적으로 크다는 점이다. 따라서 식 (8), (9)에서 보는 바와 같이 고유진동수  $\omega_n$  및 위

상에러값  $\sigma_\omega^2$  등의 중요한 파라미터 설계에 입력 및 VCO 반도체레이저 빛의 위상잡음이 많은 영향을 미치게 된다.

본 절에서는 광주파수 잠김루프 설계 파라미터 값인 루프여파기,  $\omega_n$ ,  $\zeta$ ,  $\Delta\nu_M$ ,  $\Delta\nu_S$ ,  $P_M$ ,  $P_S$ ,  $R$  등의 설계가 루프설계에 미치는 영향에 대하여 이론적으로 분석하였으며 실제 루프 구성에 사용한 광 및 전자소자 파라미터 값들을 도출한 식들에 대입하여 설계값들을 계산하여 주파수 잠김루프를 구현 하였다. 주파수 잠김 범위는 140MHz로 사용한 저역통과여파기 대역폭 150MHz와 비슷한 결과를 보였다. 실험결과인 주파수 잠김범위는 전체 루프의 대역폭에 영향을 받으며 이 대역폭은 사용한 저역통과여파기의 대역폭에 직접 의존하며 이는 OP Amp로 설계한 전자소자의 한계 때문에 본 실험에서 얻은 결과값 이상의 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 보다 개선된 주파수 잠김범위값을 얻기위하여는 저역통과 여파기의 대역폭 특성을 개선하여야 할 것이다.

본 시험결과를 광주파수 분할 전송망의 동기화루프 설계에 적용 할 경우 파장 및 선폭이 안정화된 절대기준 광주파수에 대하여 전송망 노드의 VCO 반도체레이저는 1GHz 주파수 차이를 유지하면서 140MHz의 주파수 범위내에 있어야 주파수동기가 이루어진다.

#### 참 고 문 헌

1. F. M. Gardner, Phaselock Techniques. New York : Wiley, 1979.
2. Alain Blanchard, Phase-Locked Loop, Wiley-interscience, 1976.
3. T. G. Hodgkinson, "Receiver analysis for synchronous coherent optical-fiber transmission systems," J. LightwaveTechnol., vol. LT-5, no. 4, pp. 573-586, April. 1987.
4. R. T. Ramos et al. "Delay,linewidth and bandwidth limitation in optical phase-locked loop design," Electron. Lett., vol. 26, no. 6, pp. 389-391, Aug. 1990.
5. T. G. Hodgkinson, "Phase-locked-loop analysis for pilot carrier coherent optical receiver," Electron. Lett., vol. 21, pp. 1202-1203, 1985.

6. Bjarke Skjoldstrup et al. "A new method for electrical Frequency locking of optical FDM transmitters," J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 4, p. 494-504, April. 1991.
7. R. C. Steele, "Optical phase-locked loop using semiconductor laser diodes," Electron. Lett., vol. 19, no. 2, pp. 69-71, Jan. 1983.
8. Katsuhico Kuboki et al, "Frequency offset locking of AlGaAs semiconductor laser," J. Quantum Electron., vol. QE-23, no. 4, pp. 388-394, April. 1987.
9. J. Harrison, "Linewidth and offset frequency locking of external cavity GaAlAs lasers," J. Quantum Electro., vol. 25, no. 6, pp. 1152-1155, April. 1987.

유 강 희(Kang Hee Yoo)

정회원



1979년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1982년 9월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1978년 12월~현재 : 한국전자통신연구소 광파통신연구실, 책임연구원

※주관심분야: 광통신시스템 설계

박 창 수(Chang Soo Park)

정회원

1979년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1981년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1990년 12월 : Texas A&M Univ.(Texas) 전기공학과 졸업(공학박사)  
1982년 7월~현재 : 한국전자통신연구소 광파통신연구실장, 책임연구원

※주관심분야: 레이저 다이오드 응용, 광통신시스템 설계, 마이크로파 응용을 위한 광변환등임.

박 진 우(Jin Woo Park)

정회원

한국통신학회 논문지 제19권 제12호 참조