

論文96-33A-4-9

온도보상된 유전체공진기 필터를 이용한 10 Gbit/s 클럭추출회로

(10 Gbit/s Timing Recovery Circuit Using Temperature Compensated Dielectric Resonator Filter)

宋宰昊 *, 楊泰皖 *, 朴文秀 *

(Jae-Ho Song, Tae-Whan Yoo, and Moon-Soo Park)

요약

본 논문은 10 Gbit/s 광전송시스템에 사용되는 클럭추출회로의 설계와 특성에 대해서 기술한다. 클럭추출회로는 수동 NRZ-to-PRZ 변환기, 유전체공진기 필터 그리고 협대역 증폭기로 구성하였고, 유전체공진기의 온도특성을 이용하여 추출된 클럭의 위상이 온도보상되는 클럭추출회로를 최초로 설계 및 제작하였다. 제작된 클럭추출회로의 온도를 0°C에서 75°C로 변화시켰을 때 추출된 클럭의 위상변화는 ±6° 이내에 있었고, 중심주파수로부터 ±10 MHz 까지 주파수를 변화시키며 온도변화에 따른 지터 측정을 한 결과 2 ps rms 지터 값을 얻었다. 이 결과는 유전체공진기를 이용한 클럭추출회로가 10 Gbit/s 광전송시스템에 사용하기에 만족할만한 성능을 가지고 있음을 보여 준다.

Abstract

A timing recovery circuit of 10 Gbit/s optical receiver is described. The circuit consists of a passive NRZ-to-PRZ circuit, a dielectric resonator filter (DRF) and a narrow band amplifier, which for the first time adopted a temperature compensation technique using the temperature characteristic of DR. The experimental results showed an output clock phase variation of less than ±6 degree over the operating temperature range from 0°C to 75°C and measured maximum rms jitters of less than 2 ps with the resonance detunings of up to ±10 MHz. These experimental results show that the circuit is a suitable for 10 Gbit/s lightwave transmission system.

I. 서 론

광통신시스템의 전송속도가 수 Gbit/s 이상으로 올라감에 따라, 시스템에 사용되는 전자회로는 점점 더 복잡해지고, 클럭추출회로는 광수신기에서 중요한 문제로 떠오르고 있다. 9.95328 Gbit/s의 전송속도를 가지는 SDH-64 (Synchronous Digital Hierarchy) 광전송시스템에서 광송신기로부터 전송된 NRZ (Non-Return to Zero) 데이터를 수신하여 재생하기 위해서는 클럭추출회로가 필요하다. 클럭 추출의 방법은 크게 두 가지로

분류할 수 있다. 하나는 PLL을 이용하는 방법이고, 다른 하나는 높은 Q를 가지는 수동필터를 사용하는 것이다. PLL을 사용하여 클럭을 추출하는 방법은 자동 위상 정렬, 소형화 등의 장점을 가지고 있어 2.5 Gbit/s 까지 시스템에 적용해 사용하고 있으나^[1], 10 Gbit/s와 같이 전송속도가 높은 시스템에서는 회로가 복잡해져 구현이 쉽지 않다. 높은 Q를 가지는 수동필터는 전송속도가 낮은 광전송시스템에서는 SAW (Surface Acoustic Filter)를 사용하여 구현이 가능하나^[2], 수 Gbit/s 이상에서는 필터 내의 전극 간격이 너무 좁아지고 삽입손실이 커서 제작이 거의 불가능하다. 최근에 각국에서 개발중인 10 Gbit/s 광전송시스템용 광수신기에서는 클럭추출을 위해 유전상수가 큰 유전체공진기 (DR)를 이용한 수동필터가 사용되고 있으나^[3,4], 클

* 正會員, 韓國電子通信研究所 光通信研究室

(Optical Transmission Section, ETRI)

接受日字: 1995年9月21日, 수정완료일: 1996年3月21日

클럭추출회로 온도특성에 대한 보고는 없다^[3]. 현재 유전체공진기가 10 Gbit/s 와 같이 높은 전송속도에서 사용되는 이유는 온도 안정성이 좋고, 손실이 작으며, 값이 싸고 상용으로 구매 가능하고, 10 Gbit/s 정도의 전송속도에서는 소형으로 구현가능하기 때문이다.

본 논문에서는 10 Gbit/s 광수신기의 클럭추출을 위해 최초로 온도보상기술을 채택한 유전체공진기 필터를 이용한 클럭추출회로의 설계방법과 제작 및 특성결과에 대해 기술한다. 먼저 2절에서는 클럭추출회로의 원리, 유전체공진기 필터 설계 및 온도보상 방법에 대해 설명하고 3절에서는 유전체공진기의 온도특성을 이용하여 온도보상된 클럭추출회로의 제작과 온도시험을 통한 위상변화와 디튜닝에 따른 지터 특성 등을 기술한다.

II. 회로설계

1. 클럭추출회로 블럭도

광수신기에서 일반적으로 사용되는 클럭추출회로는 그림 1의 블럭도와 같고 수동 NRZ-to-PRZ, 유전체공진기 필터 그리고 협대역 증폭기로 구성되어 있다. 신호분배기는 NRZ 데이터 신호를 받아 클럭추출회로와 판별회로에 신호를 분배해 준다. 일반적으로 광전송에 사용되는 데이터는 NRZ 형태인데, 이것에는 전송속도에 해당하는 주파수 성분이 없기 때문에 PRZ (Pseudo-Return-to-Zero) 신호로 변환해 주어야 한다. 이런 변환을 위해서는 일반적으로 EXOR 게이트를 사용한다. 10 Gbit/s 전송속도에서 동작하는 EXOR 게이트는 현재 상용소자인 경우 약 1.5W 를 소모하므로 전력소모를 줄이기 위해 본 실험에서는 마이크로웨이브 수동소자를 이용한 NRZ-to-PRZ 변환기를 사용하였다^[15].

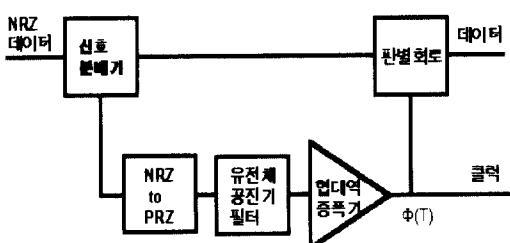


그림 1. 클럭추출회로 블럭도

Fig. 1. Block diagram of clock recovery circuit.

수동 NRZ-to-PRZ 신호변환 회로는 NRZ 입력신호

로부터 미분된 신호와, 위상반전된 미분신호를 얻고 이를 신호를 반파정류한 후 합하여 최종적으로 PRZ (Pseudo-Return-to-Zero) 신호를 얻는다. 변환된 PRZ 신호에는 전송속도에 해당하는 클럭성분이 존재하게 되는데 유전체공진기 필터는 이 PRZ 신호로부터 클럭성분을 추출하는 역할을 한다. 그리고 협대역 증폭기를 사용하여 유전체공진기의 spurious mode 를 제거해 주고 신호 레벨을 일정 수준으로 높여 주어 판별회로와 역다중화기에 클럭신호를 보낸다.

2. 유전체공진기 필터 제작

10 Gbit/s 와 같이 높은 전송속도에서는 신호분배기로부터 판별회로로 입력되는 데이터를 에러없이 재생하기 위해서는 입력 데이터와 클럭의 위상이 잘 정돈되어야 할 뿐만 아니라, 시스템의 운용온도 범위내에서도 정돈된 데이터/클럭간의 위상차를 일정하게 유지해야 한다. 따라서 클럭추출회로로부터 나오는 클럭의 온도변화에 대한 위상 $\Phi(T)$ 는 가능한 변화가 작도록 설계 제작되어야 한다.

그림 2는 설계 제작한 유전체공진기 필터를 각각 옆면과 윗면에서 바라본 그림이다. 사용한 유전체공진기는 유전상수가 36이고, 지름=5.5mm, 높이=2.5mm 인 원통형 모양을 지니며, 동작하는 기본 모드 (fundamental mode) 는 TE₀₁₈ 모드이다. 유전체공진기를 다른 회로와 결합시키기 위하여 마이크로스트립 선로를 사용하여 유전체공진기의 TE₀₁₈ 모드와 도체 선로와의 자기적 결합 (magnetic coupling) 이 일어나게 하였다. 그리고 유전체공진기와 도체선로와의 거리를 조절하면서 삽입손실과 Q 값을 조절할 수 있다^[16]. 여기에 사용한 유전체기판은 비유전율 $\epsilon_r = 9.9$, 두께 25 mil 인 알루미나이다. 유전체공진기 필터를 제작하는데 있어서 정확히 원하는 중심주파수를 얻기 어려우므로 금속 동조기를 사용한다. 유전체공진기와 동조기와의 거리가 작을수록 공진 주파수는 증가되며 실질적으로 동조기를 사용하여 동조할 수 있는 범위는 5% 이내이다. 이밖에도 유전체공진기의 방사손실 (radiation loss) 을 줄이기 위해서 금속으로 차폐를 해주었고 유전체공진기의 TE₀₁₈ 모드와 도체선로와의 결합을 보다 잘 이루게 하고 Q 값을 높이기 위해서 지지대를 사용하였다. 유전체공진기 필터의 Q_s 은 무한정 클수록 좋지는 않고 허용 다이내믹 지터와 중심주파수의 detuning 에 대한 감도를 고려하여 결정해야 하는데 대략 Q_s 은

700~1000 정도가 좋은 것으로 알려져 있다^[3].

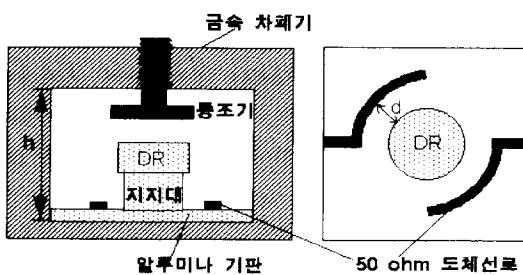


그림 2. 유전체공진기 필터 단면도

Fig. 2. Cross-section of DRF.

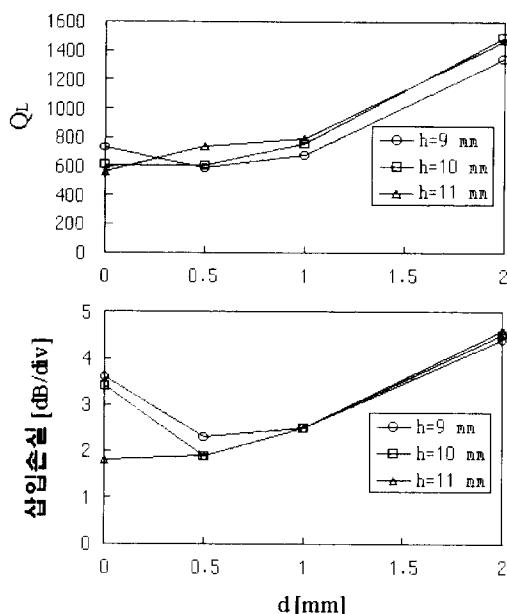


그림 3. 유전체공진기 필터의 Q_L 과 삽입손실

Fig. 3. Q_L and Insertion loss of DRF.

그림 3은 그림 2에서 높이가 3.2 mm인 유전체 저지대를 사용한 경우, 50 Ω 도체선로와 유전체공진기의 거리 d 를 변화시키면서 측정한 유전체공진기 필터의 Q_L 값과 삽입손실을 나타낸 것이다. 일반적으로 d 가 커질수록 유전체공진기와 도체선로간에 결합이 적게 이루어져 Q_L 과 삽입손실 값이 증가하였는데 $d = 0$ mm 일 때 금속차폐 높이 $h = 9, 10$ mm에서 예외가 있었다. Q_L 을 700~1000 사이가 되고 삽입손실을 가능한 작게하기 위해서는 d 가 0.5 mm~1.5 mm 사이에 있도록 해야함을 알 수 있고, 이 범위내에서 h 가 커질수록 Q_L 이 증가함을 알 수 있다. 따라서 d 와 h

를 적절히 조절함으로서 삽입손실이 적으면서 원하는 Q_L 값을 가지는 유전체공진기 필터를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 유전체지지대의 높이가 2 mm이고 $d = 2$ mm, $h = 9$ mm을 선택하여 유전체공진기 필터를 제작하여 클럭추출회로에 사용하였다.

3. 클럭추출회로로 온도 보상 방법

클럭추출회로에서 추출된 클럭 신호는 온도에 따라 위상 변화가 일어나는데 이는 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 위상이 변화는 이유로는 각 전자소자의 온도에 따른 의존성과 유전체공진기 필터의 공진주파수 변화를 들 수 있는데 본 논문에서는 유전체공진기의 τ_f (Temperature coefficient of frequency)를 변화시켜 온도를 보상하는 방법을 처음으로 소개한다. τ_f 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_f = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} [\text{ppm/oC}] \quad (1)$$

여기서 f_0 는 유전체공진기의 공진 주파수이고 Δf , ΔT 는 각각 주파수와 온도의 변화량을 나타낸다. 만약 클럭신호의 위상 $\Phi(T)$ 가 온도에 따라서 단조적으로 증가하거나 감소한다면 온도의 일차함수로써 표현할 수 있고 위상의 변화는 유전체공진기의 적당한 τ_f 를 선택함으로서 보상할 수 있다. 그림 4는 위상보상 원리를 설명한다.

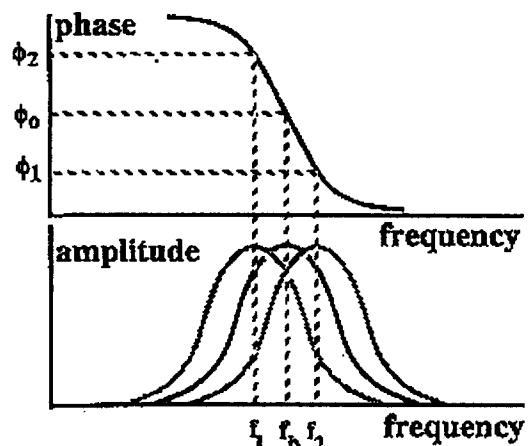


그림 4. 유전체공진기 필터의 공진주파수 변화에 따른 위상 변화

Fig. 4. Phase variation according to the resonance frequency change of DRF.

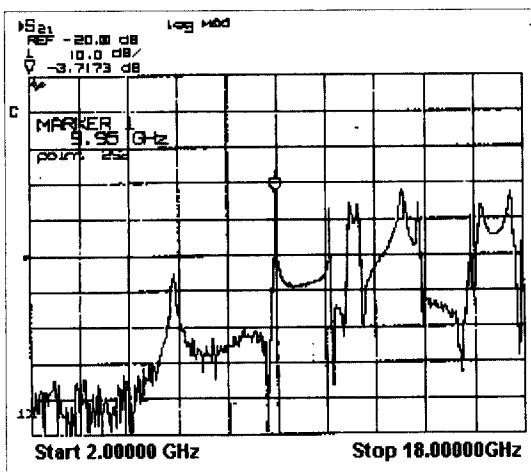
만약 공진주파수가 f_b 에서 양의 방향으로 움직인다면 출력되는 클럭의 위상은 앞서게 된다. 이것은 유전체공진기의 τ_f 가 유전체공진기 필터의 온도에 따른 공진주파수의 변화로서 위상의 기울기를 결정하는 것과 같다고 말할 수 있다. 따라서 유전체공진기 필터를 제외한 나머지 클럭추출회로의 온도에 따른 위상변화를 알 수 있다면 적합한 τ_f 를 사용하여 유전체공진기 필터를 제작함으로 위상을 보상시킬 수 있다. 여기서 유전체공진기 필터의 위상의 기울기는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dT} = \tau_f f_b s \text{ [degree/oC]} \quad (2)$$

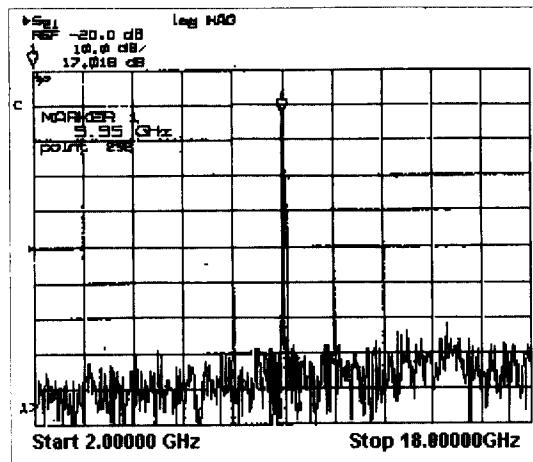
여기서 f_b 는 전송속도 주파수이고 s 는 유전체공진기 필터의 공진주파수 부근의 위상 기울기를 나타낸다.

III. 실험결과

그림 5a)는 유전체공진기 필터의 주파수 응답을 나타낸 것으로 원하는 공진주파수 외에 많은 spurious mode 들이 발생함을 볼 수 있다. 하지만 협대역 증폭기를 능동필터로 사용하여 그림 5b)에서와 같이 spurious mode 를 제거할 수 있다. 그림 6은 똑같은 주파수 응답을 좁은 주파수 대역에서 나타낸 것으로 Q_L 은 820, 삽입손실은 2.4 dB 그리고 위상 기울기는 $8.7^\circ/\text{MHz}$ 이다. Q_L 과 삽입손실은 설계된 값과 잘 일치함을 볼 수 있다.



a) 협대역 증폭기가 없는 경우



b) 협대역 증폭기가 있는 경우

그림 5. 유전체공진기 필터의 광대역 주파수 특성

Fig. 5. Broadband frequency response of dielectric resonator filter.

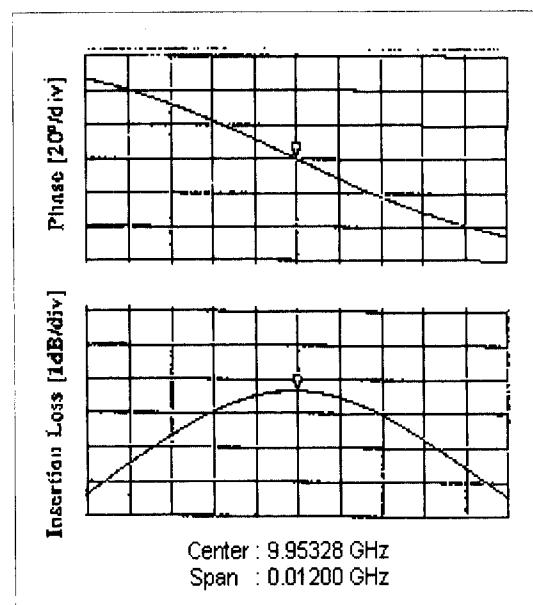
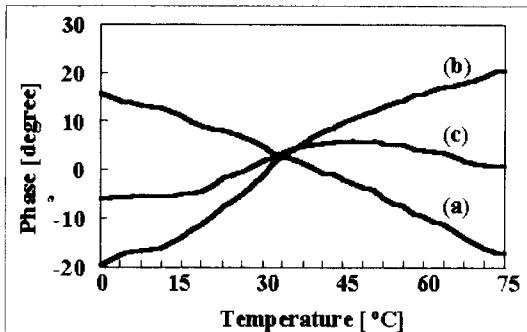


그림 6. 유전체공진기 필터의 협대역 주파수 특성

Fig. 6. Narrowband frequency response of dielectric resonator filter.

그림 7은 oven 의 온도를 0°C 에서 75°C 로 3시간 동안 변화시키면서 측정한 위상 값이다. 먼저 클럭추출회로를 측정하고 이어서 유전체공진기 필터만의 위상을 측정하였다. 이 두개의 값으로부터 유전체공진기를 뺀 나머지 클럭추출회로의 위상변화를 구하였는데 그림 7(a)에서와 같이 위상의 기울기는 $-0.466 \text{ degree}/^\circ\text{C}$

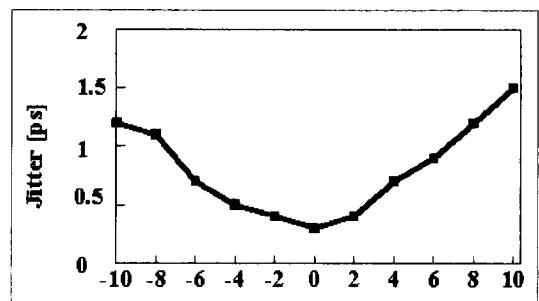
이다. 따라서 $0.466 \text{ degree}/\text{C}$ 의 위상 기울기를 가지는 유전체공진기 필터를 제작하면 온도보상된 클럭추출회로를 제작할 수 있을 것이다. 적합한 유전체공진기의 τ_f 를 찾기 위하여 식 (2)에 $\Delta\Phi/\Delta T = 0.466$, $f_b = 10 \text{ GHz}$, $s = 8.7'/\text{MHz}$ 를 대입하면 $\tau_f = 5.3 \times 10^{-6}$ 을 얻는다. 상용화된 제품중 가장 비슷한 값을 지닌 $\tau_f = 6 \times 10^{-6}$ 인 유전체공진기를 사용하여 필터를 제작하여 온도실험 결과를 (b)에 나타냈고 전체 클럭추출회로의 온도실험 결과는 (c)와 같다. 전체 클럭추출회로의 온도변화량 $\Phi(T)$ 는 $\pm 6^\circ$ 만큼의 위상변화를 보였다.



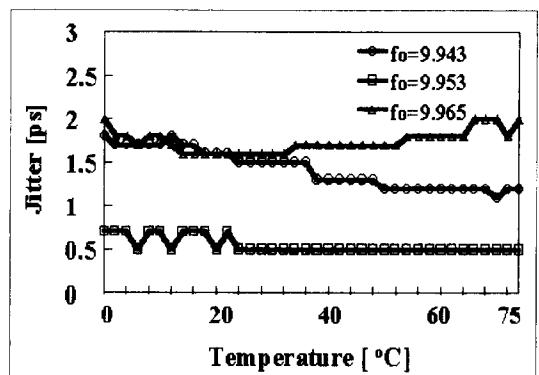
(a) 클럭추출회로 - 유전체공진기 필터
 (b) 온도보상용 유전체공진기 필터
 (c) 온도보상된 클럭추출회로

그림 7. 온도에 따른 클럭추출회로의 위상 변화
 Fig. 7. Measured output phase of clock recovery circuit against temperature variation.

그림 8은 온도보상된 클럭추출회로의 지터측정 결과를 나타낸 것이다. 먼저 $2^{31}-1$ 의사랜덤 신호를 입력으로 하여 유전체공진기 필터를 -10 MHz 에서 $+10 \text{ MHz}$ 까지 디튜닝하여 측정한 rms 지터 결과를 그림 8a)에 나타냈는데 그 값은 1.5 ps 이하이다. 다음은 온도변화에 따른 지터측정을 해서 그림 8 b)에 나타냈는데 디튜닝을 안한 경우 $0.75 \text{ ps} \pm 10 \text{ MHz}$ 디튜닝을 한 경우 2 ps 이하의 rms 지터 값을 얻었다. 이 결과는 동기망에서 들어오는 클럭의 주파수 변화가 최대 $\pm 1000 \text{ ppm}$ 까지 변하고 시스템의 운용온도범위가 $0^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$ 까지 변할 때 최대 rms 지터가 2 ps 이내로 유지될 수 있음을 보여준 것이다. 실제 동기망의 기준 클럭의 변화는 최대 $\pm 100 \text{ ppm}$ 이내이고 시스템 운용온도 범위는 $0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ 이므로, 이 유전체공진기 필터를 이용하면 아무런 문제없이 광수신기에서 신호를 재생할 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8. 디튜닝과 온도에 따른 rms 지터 측정 값
 Fig. 8. Measured rms jitter performance as function of (a) detuning and (b) temperature.

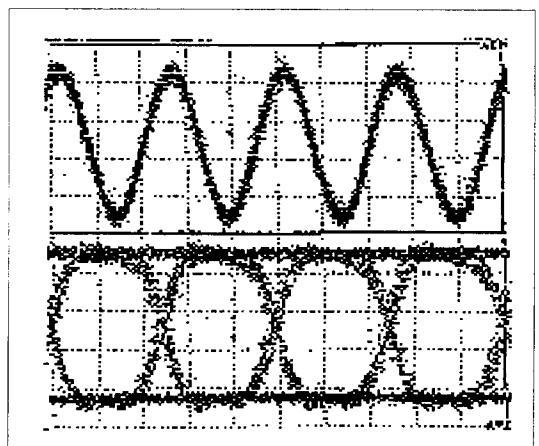


그림 9. 재생된 클럭과 데이터 신호
 Fig. 9. Recovered clock and data signal.

그림 9는 입력 신호를 $2^{31}-1$ 의사 랜덤 NRZ 신호로 하였을 때 추출된 클럭과 이 클럭을 사용하여 재생한 데이터의 아이 디어그램을 나타낸 것이다.

IV. 결 론

10 Gbit/s 광전송시스템의 광수신기에 사용되는 클럭추출회로를 유전체공진기 필터를 이용하여 제작 실험하였다. 유전체공진기 필터는 SDH-64 의 전송속도에 해당하는 9.95328 Gbit/s에서 Q_L 은 820, 삽입손실은 2.4 dB의 특성을 지니며 수동 NRZ-to-PRZ 회로와 협대역 증폭기와 함께 클럭추출회로로 작용해 깨끗한 클럭 신호를 출력함을 보였다. 또한 유전체공진기의 온도특성을 이용하여 클럭추출회로의 온도에 따른 위상변화에 대한 보상 역할도 할 수 있음을 최초로 보여주었는데, 온도를 0°C에서 75°C로 변화시켰을 때 ±6° 만큼의 위상변화의 결과를 얻을 수 있었다. 아울러 ±10 MHz 디튜닝하며 온도변화에 따른 지터 측정을 한 결과 2 ps 이하의 rms 지터 값을 얻었다. 위 결과들로부터 유전체공진기를 이용한 클럭추출회로는 10 Gbit/s 광전송시스템에 사용하기에 만족할만한 성능을 가지고 있음을 볼 수 있었다.

사 사

* 본 연구는 HAN/B-ISDN 과제중 “10Gbps SDH 광전송 시스템 개발”의 일환으로 수행되었음을 알려드립니다. 그리고 많은 후원과 조언을 주신 이만섭 박사님과 심창섭 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Ransijn and P. O'conner, "A PLL-based

저 자 소 개

宋宰昊(正會員)

1969년 10월생. 1992년 2월 홍익대학교 전자공학과(학사). 1994년 2월 홍익대학교 전자공학과(석사). 1994년 ~ 현재 한국전자통신연구소 주 관심분야는 광통신시스템 등임

朴文秀(正會員)

1955년 11월생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1981년 8월 서울대학교 전자공학과(석사). 1993년 11월 The University of Sydney, Electrical Engineering(박사). 1982년 ~ 현재 한국전자통신연구소, 현재 광통신연구실 실장. 주 관심분야는 초고속광링크, 초고속 전자회로 설계, 광무선기술 등임

2.5 Gbit/s GaAs clock and data regenerator IC.", IEEE J. Solid State Circuits, vol. 26, No 10, pp. 1345-1353, 1991.

- [2] R.L. Rosenberg, C. Chamzas, and D.A. Fishman, "Timing recovery with SAW transversal filters in the regenerators of undersea long haul fiber transmission system.", J. Lightwave Technol., vol. 2, no. 6, pp. 917-925, 1984.
- [3] P. Monteiro, J.N. Matos, A. Gumerio, J.R.F. da Rocha, "10 Gbit/s timing recovery circuit using dielectric resonator and active bandpass filters", Electron. Lett., vol. 28, pp. 819-820, April 1992.
- [4] Y. Kobayashi, Y. Akatsu, K. Nakagawa, Y. Imai, and H. Kikuchi, "Compact 10 Gbit/s optical transmitter and receiver circuit packs", IEEE MTT-S Digest, pp. 73-76, 1994.
- [5] T.H. Yoo, J.H. Song, M.S. Park, and C.S. Shim, "A novel clock extraction circuit using a new NRZ-to-PRZ converter and a DRF for 10 Gbit/s optical receiver", IEEE MTT-S'95, paper TH3F-D4, Orlando, FL, 1995.
- [6] D. Kajfez and P. Guillon, Editors, Dielectric resonators, Artech House Inc., Washington MA, p. 379, 1986.

俞泰皖(正會員)

1958년 7월생. 1981년 2월 서울대학교 원자핵공학과(학사). 1983년 2월 한국과학기술원 물리학과(석사). 1993년 8월 Texas A&M University, Electrical Engineering(박사). 1983년 ~ 현재 한국전자통신연구소 주 관심분야는 광통신시스템, 초고속 전자회로, 마이크로파/밀리미터파를 이용한 무선 통신 등임