

광변조기의 양방향 변조를 이용한 chirped fiber grating의 시간지연 측정법

전금수 · 이용구 · 반재경[†]

전북대학교 전자정보공학부, 전북대학교 전자정보신기술연구센터

Ⓣ 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

허 현

순천청암대학 정보통신학과

Ⓣ 540-743 전남 순천시 덕월동 224-9

(2002년 7월 25일 받음, 2002년 11월 8일 수정본 받음)

본 논문에서는 Mach-Zehnder 변조기 양방향 변조를 이용하여 chirped fiber grating의 시간지연을 측정할 수 있는 간단한 시스템을 제안하였다. 시간차를 두고 양방향 변조된 광신호는 RF 영역에서 주기적인 간섭무늬를 만들게 된다. 이러한 광과장에 따라 변하는 간섭무늬의 주기를 측정하여 chirped fiber grating의 시간지연을 측정할 수 있다. 5 cm의 chirp과 3.16 nm의 대역폭을 갖는 chirped fiber grating의 시간지연을 측정하였으며 측정된 시간지연의 평균 기울기는 183 ps/nm이고 $\pm 1.7\%$ 보다 작은 오차 범위에서 측정되었다.

주제어 : chirped fiber grating, bidirectional modulation, Mach-Zehnder modulator.

I. 서 론

Chirped fiber grating(CFG)은 장거리 고속 광통신 시스템의 색분산 보상, 광증폭기 이득 평탄화, 센서, 광 마이크로파 필터, 광펄스 증폭 등과 같은 다양한 응용분야에 사용된다.^[1] 이러한 CFG의 응용을 위해서는 파장의 변화에 따른 시간지연의 측정은 매우 중요하다. CFG의 시간지연을 측정하기 위한 방법으로 high-coherence 간섭법,^[2] low-coherence 간섭법,^[3,4] 광섬유의 복굴절을 이용한 방법,^[5] vector-voltmeter를 이용한 위상천이법,^[6] loop-mirror 구조를 이용한 방법^[7] 등이 발표되었다. 간섭을 이용한 방법은 좋은 해상도를 갖지만 시스템이 복잡하고 구현하는데 어려움이 있다. 광섬유의 복굴절을 이용한 방법은 구조가 간단하지만 해상도가 광 스펙트럼 분석기의 해상도에 의해서 제한을 받는다. 위상천이법은 시간지연을 측정하기 위해서는 기준을 위한 별도의 광섬유가 필요하고 변조 주파수에 따라서 측정의 정확도가 영향을 받는다. loop-mirror 구조를 이용한 방법은 CFG의 양방향 반사를 이용하여 간단하게 시간지연을 측정할 수 있지만 측정할 수 있는 CFG의 대역폭이 1 nm 정도로 제한이 된다.

최근에 Mach-Zehnder modulator(MZM)의 양방향 변조를 이용하여 광섬유의 색분산을 측정하는 방법이 발표되었다.^[8] 본 논문에서는 이러한 MZM의 양방향 변조를 적용하여 CFG의 시간지연을 측정할 수 있음을 보인다. 시간차를 두고 양방향 변조된 광신호는 RF 영역에서 주기적인 간섭무늬를 만들고, 광과장에 따른 간섭무늬의 주기를 측정함으로써 CFG의 시간지연을 측정할 수 있다. 제안한 측정 방식은 부가적인 보

상이나 기준을 위한 전자회로나 광섬유가 필요하지 않기 때문에 측정 시스템이 매우 간단하고, 광손실에 의한 출력파워의 변화가 측정 결과에 영향을 주지 않아 재현성 있는 측정이 가능하게 된다.

II. 측정원리

그림 1은 파장가변 레이저(tunable laser source: TLS), MZM, 회로망 분석기(network analyzer: NA), 광검출기(photodiode: PD), 편광조절기(polarization controller: PC)를 이용하여 CFG의 시간지연을 측정하기 위한 시스템이다. TLS에서 공급된 광신호는 서큘레이터를 통해 MZM에 입사되고 RF 신호에 의해 순방향 변조(진행파형 전극 구조의 MZM에서 RF 신호가 광신호와 같은 방향으로 진행하면서 광신호를 변조)된다. 변조된 광신호는 CFG의 chirp에 따라 광과장에 따라서 다른 위치에서 반사되어 MZM의 반대방향으로 입사되어 MZM의 역방향 변조(RF 신호가 광신호와 반대 방향으로 진행하면서 광신호를 변조)된다. 두 번 변조된 광신호는 서큘레이터를 통해 PD에 수신되어 RF 증폭기로 증폭된다.

그림 1의 MZM의 양방향 변조과정은 입력방향이 다른 두 개의 MZM이 직렬로 연결된 그림 2와 같은 등가모델로 생각할 수 있다. 첫 번째 변조기는 그림 1에서 오른쪽으로 진행하는 광신호를 변조하고 두 번째 변조기는 CFG에서 반사되어 왼쪽으로 진행하는 광신호를 변조한다. MZM 내부의 화살표 방향은 변조기의 설계된 입력방향을 나타낸다. MZM의 양방향 변조과정에서 RF 변조 신호는 두 MZM에 동시에 입력되지만 광신호의 입장에서는 시간차를 두고 두 번 변조되는 것으로 생각할 수 있다. 즉, 첫 번째 MZM은 시간지연이 없는

[†]E-mail: pan@moak.chonbuk.ac.kr

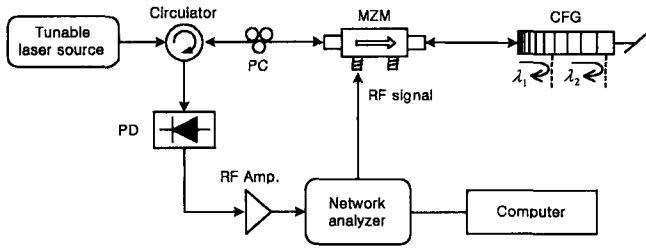


그림 1. MZM의 양방향 변조를 이용한 CFG의 시간지연 측정 시스템. PC: 편광조절기, PD: 광검출기, MZM: Mach-Zehnder 변조기, CFG: chirped fiber grating.

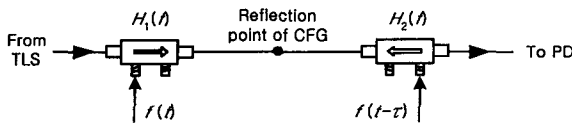


그림 2. MZM 양방향 변조의 등가모델.

RF신호에 의해 광신호를 순방향 변조하고, 두 번째 MZM은 MZM과 CFG사이의 광섬유의 왕복 길이와 CFG의 chirp에 의해 발생하는 시간만큼 지연된 RF 신호에 의해서 순방향 변조된 광신호를 한번 더 역방향 변조하게 된다.

만약 MZM의 순방향과 역방향 변조지수 m_1 과 m_2 가 충분히 작고 변조기의 바이어스 전압을 $V_{\pi}/2$ (V_{π} =RF switching voltage)로 하였을 때 양방향 변조되어 PD에 입력되는 광파워는 다음과 같다.

$$P_{out}(t) = \frac{P_{in} T_D}{4} [1 + m_1 H_1(f) \cos 2\pi f t] \cdot [1 + m_2 H_2(f) \cos 2\pi f(t - \tau)]$$

$$= \frac{P_{in} T_D}{4} [1 + m_1 H_1(f) \cos 2\pi f t + m_2 H_2(f) \cos 2\pi f(t - \tau) + m_1 H_1(f) H_2(f) \cos 2\pi f t \cos 2\pi f(t - \tau)] \quad (1)$$

여기에서 P_{in} 은 변조기의 입력 광파워, T_D 는 시스템의 결합손실과 전송손실을 포함하는 전체손실, $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 는 각 주파수 성분에 대한 MZM의 순방향 및 역방향 변조 전달함수, 그리고 τ 는 시간지연을 나타낸다. PD에서 광전 변환되고 증폭기에 의해 증폭된 신호는 NA에 수신된다. NA는 가변 검출 구조(tuned-receiver architecture)⁹⁾를 적용하여 DC 성분과 고주파 성분을 제거하고 기본 주파수 성분만을 선택하기 때문에 식 (1)에서 첫 번째 항의 DC 성분과 네 번째 항의 고주파 성분은 제거된다. 만약 순방향과 역방향의 변조지수가 같다면 ($m_1 = m_2 = m$) NA에 검출되는 각 변조 주파수 성분의 크기, 즉 MZM의 양방향 변조에 의한 전체 전달함수 $H(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H(f) = A_0 [H_1(f) + e^{-j2\pi f \tau} H_2(f)] \quad (2)$$

여기에서 $A_0 = m R G_m P_{in} T_D / 4$ 이며 R 은 PD의 수신감도를 G_m 은 RF 증폭기의 이득을 나타낸다. 그리고 시간지연 τ 는 MZM과 CFG 사이의 광섬유에 의한 시간지연 τ_{fiber} 와 CFG에 의해 발생하는 시간지연 τ_{CFG} 의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

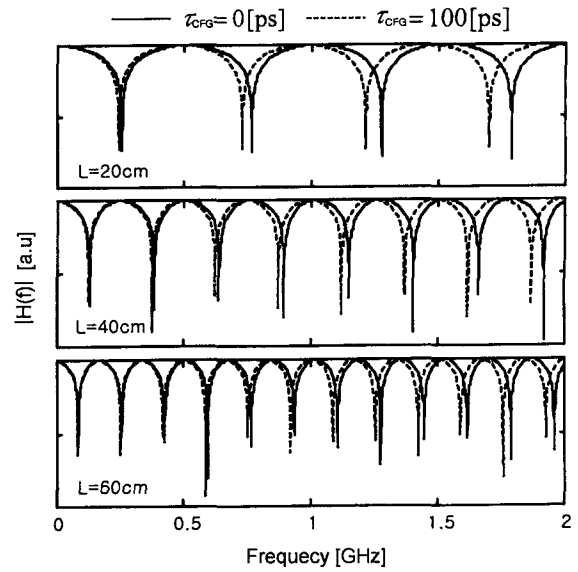


그림 3. $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 동일한 경우 광섬유의 길이 L 과 시간지연 τ_{CFG} 에 따른 전달함수 $H(f)$ 의 특성.

$$\tau(\lambda) = \tau_{fiber} + \tau_{CFG}(\lambda) = \frac{2L}{v_g} + \tau_{CFG}(\lambda) = \frac{N_{eff} 2L}{c} + \tau_{CFG}(\lambda) \quad (3)$$

여기에서 L 은 MZM과 CFG사이의 광섬유의 길이, N_{eff} 는 광섬유의 유효굴절률, c 는 자유공간에서의 광속도, 그리고 v_g 는 광섬유 내에서의 광의 군속도이다. MZM과 CFG 사이의 광섬유의 길이가 작다면(실제 측정에서는 L 은 약 2 m) 광파장의 변화에 따른 시간지연 τ_{fiber} 의 변화는 무시할 수 있기 때문에 상수로 생각할 수 있다. 광섬유의 길이 L 이 일정하면 광파장 변화에 따른 전체 시간지연 τ 의 변화는 CFG에 의해서 발생하는 시간지연 τ_{CFG} 에서 의존하게 된다. 즉, 광파장이 변하면 CFG로부터 반사되는 광신호의 위치가 변하기 때문에 시간지연 τ_{CFG} 값이 변하게되고 이러한 변화가 식 (2)의 전달함수 주기를 변화시킨다. 따라서 식 (2)의 전달함수 주기를 측정함으로써 시간지연을 구할 수 있다.

그림 3은 식 (2)에서 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 동일한 경우 광섬유의 길이 L 과 시간지연 τ_{CFG} 에 따른 전달함수 $H(f)$ 의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 광섬유의 길이 L 과 τ_{CFG} 가 증가하면 식 (3)에서 시간지연 τ 가 증가하기 때문에 $H(f)$ 의 주기가 감소하게 된다. 결과적으로 $H(f)$ 의 주기의 역수가 시간지연 τ 가 되기 때문에 $H(f)$ 의 주기를 측정하면 시간지연 τ 를 측정할 수 있다. $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 동일하지 않은 경우에도 전달함수 $H(f)$ 의 크기만 변하고 시간지연에 의해 발생한 전달함수 ripple의 주기는 변하지 않기 때문에 각각의 광파장에서 전달함수 $H(f)$ 의 주기를 측정하여 CFG의 시간지연을 얻을 수 있다.

III. MZM의 순방향 및 역방향 변조 특성

전체 전달함수 $H(f)$ 의 주기를 측정하는데 있어서 그림 3에 서처럼 전달함수의 크기가 0이 되는 dip의 깊이를 크게 하는 것은 주기 측정의 정확도를 향상시키는데 매우 중요하다. 특

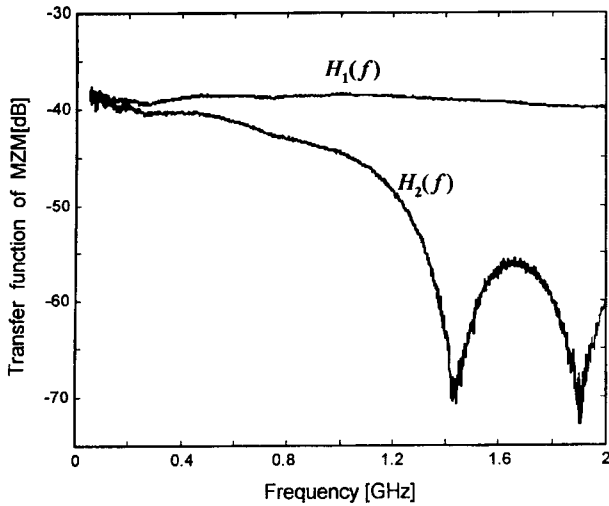


그림 4. MZM의 순방향 $H_1(f)$ 및 역방향 $H_2(f)$ 변조 특성.

히 식 (2)에서 MZM의 순방향과 역방향 전달함수 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 의 크기가 전체 전달함수 $H(f)$ 의 dip 깊이에 가장 큰 영향을 주기 때문에 시간지연을 측정하기 전에 사용된 변조기의 양방향 변조특성을 살펴보았다. 일반적으로 진행파형 전극구조의 MZM¹⁰⁾은 한쪽 방향(순방향)으로만 변조가 잘 되도록 설계되지만, 변조 대역폭보다 매우 낮은 주파수에서는 MZM 전극의 길이와 비교해서 변조신호의 파장이 충분히 크기 때문에 진행파형 전극구조보다 bulk 형태의 전극구조에 가까운 특성을 나타내어 역방향의 변조특성도 순방향 변조특성과 비슷하게 된다.

그림 4는 1550 nm의 광파장에서 측정한 MZM의 순방향 변조와 역방향 변조특성을 나타낸다. 변조 주파수가 증가할수록 순방향에 비해 역방향의 변조특성이 급격히 감소하지만 500 MHz이하의 주파수에서는 순방향과 역방향 변조특성이 거의 동일한 특성을 보인다. 1 GHz 이상의 주파수를 사용할 경우는 역방향의 변조특성이 매우 작아져 dip의 깊이가 급속하

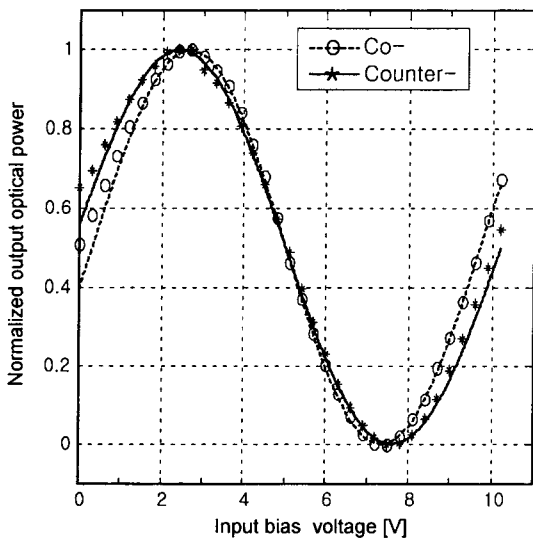


그림 5. MZM의 순방향 및 역방향 V-P 특성곡선.

게 감소하기 때문에 측정의 정확도를 감소시킨다.

그림 5는 사용한 MZM의 순방향과 역방향의 바이어스 전압과 출력 광파워 관계인 V-P 특성 곡선을 보여주고 있다. o와 *는 측정된 값이며 점선과 실선은 근사화한 값이다. 순방향 및 역방향의 V_{π} 는 각각 4.7 V와 5.2 V로 조금 다르지만 바이어스 전압을 5.1V로 하게 되면 순방향 및 역방향 모두 출력 광파워가 입력 광파워의 절반이 되는 바이어스 전압이 된다.

IV. 측정 및 고찰

CFG의 시간지연을 측정하기 위하여 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다. 1500 nm~1580 nm의 TLS, HP8720D NA, JDS Uniphase사의 10 GHz 대역폭을 갖는 MZM(모델 번호: 21012965, 삽입손실: 4dB), 20 GHz의 대역폭을 갖는 PD를 사용하였으며 수신된 신호는 18 dB RF 증폭기를 이용하여 증폭하였다. 측정에 사용된 CFG는 phase-mask 기술⁶⁾로 제작되었으며 5 cm의 격자와 3.16 nm의 대역폭을 갖는다.

그림 6은 변조 주파수를 0.7 GHz에서 1 GHz 범위에서 측정한 전달함수를 세 가지의 다른 광파장(1552, 1553, 1554 nm)에 대해서 보여주고 있다. 광파장이 변하면 전달함수 ripple의 주기가 변하여 dip 주파수가 이동함을 확인할 수 있다. 전달함수의 주기를 측정할 때 dip이 발생하는 주파수의 전달함수 크기가 매우 작기 때문에 PD에서의 잡음과 회로망 분석기의 해상도 등의 영향으로 정확한 dip 주파수 측정에 제한을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 dip 주파수 측정에서 발생하는 오차를 줄이기 위해서, dip 주파수를 직접 측정하지 않고 측정된 전달함수와 식 (2)의 값과 비교하여 상관관계가 가장 큰 시간지연 τ 를 구하는 방식을 사용하였다. 이 때 식 (2)의 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 는 MZM의 순방향 변조와 역방향 변조를 직접 측정한 그림 4의 값을 이용하였다.

그림 7은 그림 6의 측정된 전달함수와 식 (2)에서 시간지연

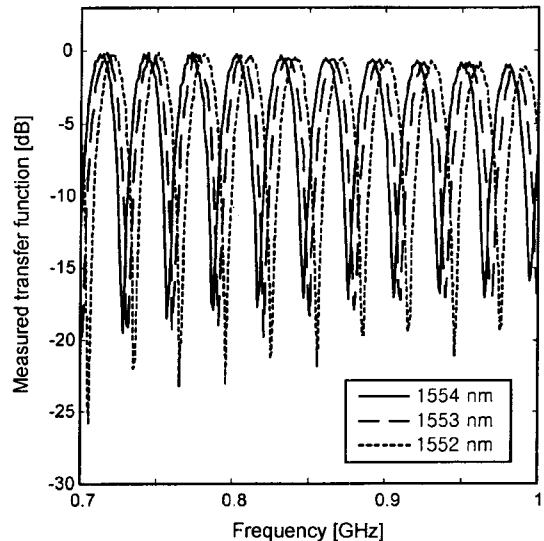


그림 6. 변조 주파수 0.7 GHz에서 1 GHz 사이에서 측정한 광파장에 따른 시스템 전달함수.

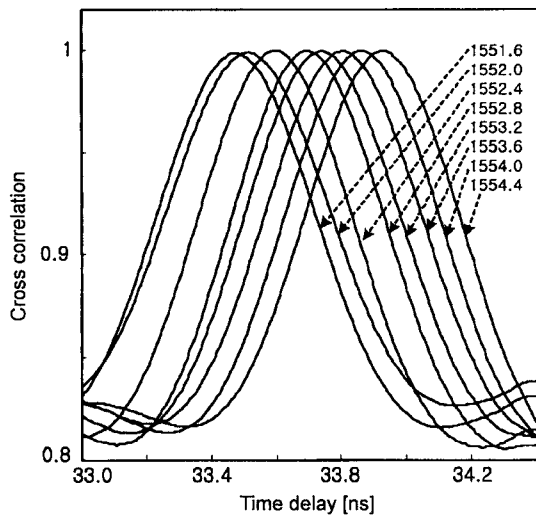


그림 7. 각 광파장에서의 측정된 전달함수와 식 (2)의 상관 값.

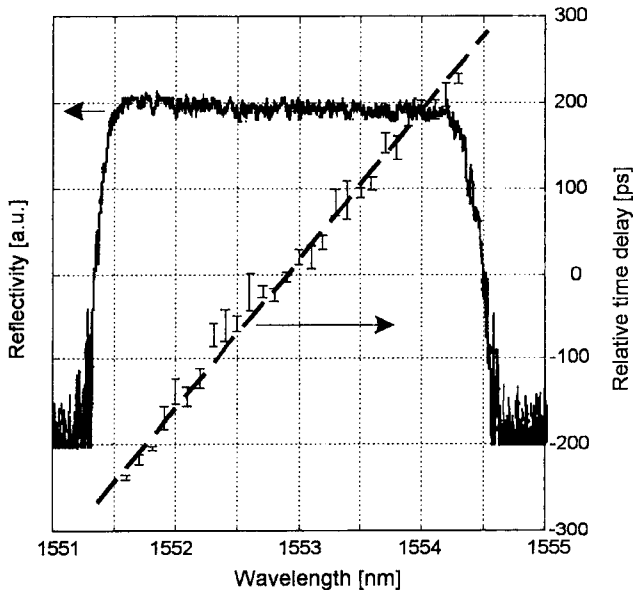


그림 8. 광파장에 따른 측정된 CFG의 반사특성(실선)과 시간지연(점선).

τ 를 변화시키면서 구한 상관 값을 나타낸 것이다. 여기에서 각 파장에서 가장 큰 상관 값을 나타내는 시간지연이 전체 시간지연이 된다. 그림 8은 사용한 CFG의 반사특성(실선)과 제안한 방법으로 측정된 시간지연(에러 막대)과 선형보간한 결과(점선)를 나타낸다. 같은 방법으로 여러 번 측정된 시간지연의 평균 기울기는 183 ps/nm이고 $\pm 1.7\%$ (또는 ± 3.1 ps/nm)보다 작은 오차 범위에서 측정되었으며 이 값은 측정시스템의 해상도가 된다. 제안한 방법의 정확성을 확인하기 위해 vector-voltmeter^[4]를 이용한 방법을 이용하여 같은 CFG의 시간지연을 측정하였다. vector-voltmeter를 이용한 방법에서 0.8 GHz, 2.2 GHz, 8.0 GHz, 10 GHz의 주파수를 사용하여 TLS의 광신호를 변조하였으며 측정된 시간지연의 평균 기울기는 181ps/nm로 제안한 시스템의 결과와 잘 일치한다.

V. 결 론

본 논문에서는 MZM의 양방향 변조를 이용하여 CFG의 시간지연을 측정할 수 있는 간단한 시스템을 제안하였다. 제안한 방법의 성능을 평가하기 위해서 5 cm의 격자와 3.16 nm의 대역폭을 갖는 CFG의 시간지연을 측정하였다. dip이 발생하는 주파수의 전달함수 크기가 매우 작기 때문에 dip 주파수를 직접 측정하지 않고 상관법을 이용하여 전달함수의 주기를 구하였다. 측정된 시간지연의 평균 기울기는 183ps/nm이고 $\pm 1.7\%$ 보다 작은 오차 범위에서 측정되었다. 제안한 방법은 CFG의 시간지연을 정확하고 간단하게 측정할 수 있으며 광대역의 CFG의 시간지연도 측정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00257-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg gratings : Fundamentals and Applications in Telecommunications and sensing* (Artech House, Norwood, MA, 1999).
- [2] S. Barcelos, M. N. Zervas, R. I. Laming, D. N. Payne, L. Reekie, J. A. Rucknott, R. Kashyap, P. F. McKee, F. Sladen, and B. Wojciechowicz, "High accuracy dispersion measurements of chirped fibre gratings," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 15, pp. 1280-1282, 1995.
- [3] M. Volanthen, H. Geiger, M. J. Cole, R. I. Laming, and J. P. Dakin, "Low coherence technique to characterize reflectivity and time delay as a function of wavelength within a long fibre grating," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 8, pp. 757-758, 1996.
- [4] S. D. Dyer and K. B. Rochford, "Low-coherence interferometric measurements of fibre Bragg grating dispersion," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 17, pp. 1485-1486, 1999.
- [5] F. Ouellette and D. Y. Stepanov, "A new technique for measuring the group delay of chirped fiber Bragg gratings," *OFC'97*, pp. 153-154, 1997.
- [6] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings* (Academic Press, San Diego, CA, 1999).
- [7] A. K. Atieh and I. Golub, "Scheme for measuring dispersion of chirped FBG using loop mirror configuration," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 12, pp. 1331-1333, 2001.
- [8] K. S. Jeon, H. J. Kim, D. S. Kang, and J. K. Pan, "A simple method for measurement of chromatic dispersion of optical fiber by using bi-directional modulation of a Mach-Zehnder modulator," *OFC2002*, pp. 616-617, 2002.
- [9] *Exploring the architectures of network analyzers*, Agilent Application Note 1287-2.
- [10] G. K. Gopalakrishnan, W. K. Burns, R. W. McElhannon, C. H. Bulmer, and A. S. Greenblatt, "Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 10, pp. 1807-1819, 1994.

**A time delay measurement of a chirped fiber grating by using
bidirectional modulation of an optical intensity modulator**

Keum-Soo Jeon, Yong-Gu Lee, and Jae-Kyung Pan[†]

Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

[†]*E-mail: pan@moak.chonbuk.ac.kr*

Hyun Huh

Department of Information and Communication, Cheong-Am College, Jeonnam 540-743, KOREA

(Received June 25, 2002, Revised manuscript November 8, 2002)

A simple method for a time delay measurement of a chirped fiber grating by using bidirectional modulation of a Mach-Zehnder modulator has been proposed. The bidirectionally modulated light with time difference makes an interference fringe in the RF domain. The time delay of a chirped fiber grating can be obtained by measuring the period of the RF interference fringe for different wavelengths. We have measured the time delay of a chirped fiber grating with a chirped length of 5 cm and a bandwidth of 3.16 nm. The average slope of the time delay has been measured to be 183 ps/nm and its uncertainty has been less than $\pm 1.7\%$.

Classification code : FO.030.