

광 실시간 지연선로 행렬을 이용하는 마이크로웨이브 포토닉 필터

Microwave Photonic Filter Using Optical True-Time-Delay Line Matrix

정 병 민

Byung-Min Jung

요 약

본 논문에서는 밴드 패스 필터 및 노치 필터로의 용도 변환이 가능하고, 대역폭 변화가 용이한 새로운 구조의 MWP 필터를 제안하였다. 인접 채널의 단위 시간지연 차이가 50 ps인 4×2 광섬유 지연선로 행렬로 구성된 MWP 필터를 제작하였고, 각 채널의 시간 지연 및 MWP 필터의 주파수 응답 등의 특성을 측정하였다. RF 변조 광 신호의 시간 지연 차이와 계수를 변화시킴으로써 20 GHz와 6.67 GHz의 FSR 변화 특성을 확인하였다.

Abstract

Microwave Photonic(MWP) filters capable of use a bandpass filter or a notch filter with large bandwidth have been proposed. 4-lines×2-bit fiber-optic delay lines with a unit time-delay difference of 50 ps were experimentally realized. By changing the time-delay difference and the coefficients of microwave-modulated optical signals, the bandpass and notch filters were implemented and characterized.

Key words: Microwave Photonic Filter, Optical True Time-Delay, Electro-Optic Modulator

I. 서 론

마이크로웨이브 포토닉(Microwave Photonic: MWP) 필터는 광 신호를 이용하여 마이크로웨이브 주파수 또는 RF 주파수 신호를 처리하는 시스템으로써 L과 C를 이용하여 구성하는 RF 필터와 달리 전자파 간섭에 무관하고, FSR(Free Spectral Range)을 크게 할 수 있어 수 GHz 이상의 대역폭을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 광섬유를 이용하여 여러 채널의 신호를 동시에 보낼 수 있는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술을 이용할 수 있는 장점이 있어, 레이더 시스템, 미사일 유도 시스템, 위성통신 시스템 등의 응용분야에 있어서 신호처리 용도로 사용된다^{[1],[2]}.

현재까지 제안된 MWP 필터의 구조는 광섬유 격자 배열(Fiber Bragg Grating: FBG)을 이용하는 방식^[3], FBG와 이진 광섬유 지연선로를 이용한 방식^[4], 다채널 칩 광섬유 격자(Chirped Fiber Grating: CFG)를 이용한 방식^[5] 등이 있다. FBG를 이용하는 방식은 FBG 중심과 중심 사이의 거리제한 때문에 S-밴드 이하에서만 동작시킬 수 있다는 단점이 있고, 이진 광섬유 지연선로를 이용하는 방식은 시간 지연을 얻은 신호들의 손실이 각각 다르다는 문제가 있고, CFG를 이용하는 방식은 파장 가변 광원을 사용하기 때문에 파장 안정화 및 파장 변환 속도 등과 같은 문제점 등이 있다.

최근에 이러한 파장 안정화 및 파장 변환 속도 등의 문제점을 해결할 수 있는 광섬유 지연선로 행렬을 사용하

삼성탈레스 ISR·PGM연구소(ISR·PGM R&D Center, Samsung Thales)

· Manuscript received October 31, 2014 ; Revised December 23, 2014 ; Accepted January 14, 2015. (ID No. 20141031-089)

· Corresponding Author: Byung-Min Jung (e-mail: byungmin75.jung@samsung.com)

는 광 실시간 지연선로 빔 형성기에 관한 연구 결과가 발표되었다^{[6],[7]}. 이 구조는 파장 가변 광원을 사용하지 않기 때문에, 파장 제어 및 스위칭에 따른 문제 등이 발생하지 않고 신뢰도의 시스템 구축이 가능하고, 또한 전기적 스위치 제어기로 각 2×2 광 스위치 행렬을 열 단위로 동시에 바(bar) 또는 크로스(cross)로 절체하기 때문에, 주사 빔 제어가 빠르고 간단하며, 안테나 소자들에 인가하는 신호들이 동일한 손실을 갖게 되어 주 빔 방향이 흔들리지 않고 안테나 이득이 감소하지 않는 장점을 갖고 있다. 또한, 최근에 광 변조기(Electro-Optic Modulator: EOM)의 위상 전도를 이용하는 MWP 필터에 관한 연구 결과가 발표되었다^{[8],[9]}. 이 구조는 입력 바이어스 전압에 따라 광 변조기 전송함수의 계수가 양극과 음극을 갖는 특성을 이용하여 MWP 필터를 구현할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 다파장 광원과 두 개의 EOM과 광섬유 지연선로 행렬을 이용하여 밴드 패스(band-pass) 및 노치(notch) 필터로의 용도 변환이 가능하고, 대역폭 변화가 용이한 새로운 구조의 MWP 필터를 제안하였으며, 단위 시간 지연 차이가 50 ps(FSR=20 GHz)인 4×2 광섬유 지연선로 행렬로 구성된 MWP 필터를 제작하여 광섬유 지연선로 행렬의 시간지연 및 MWP 필터의 주파수 응답 특성을 살펴보았다. 이 구조는 다파장 광원을 사용하므로 광 파워 및 파장의 안정성을 확보할 수 있으며, 두 개의 광 변조기를 사용하여 밴드 패스 및 노치 필터로의 용도 변환이 가능하고, 전기적 스위치 제어기를 이용하여 2×2 광 스위치 행렬을 열(column) 단위로 절체하기 때문에 RF 신호 대역폭 속도가 빠르고 구동이 간단하다는 장점을 지니고 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 제안된 MWP 필터의 동작 원리에 대하여 간단히 설명하였고, 제 III장에서는 MWP 필터를 구성하는 광섬유 지연선로 행렬의 시간 지연 특성과 MWP 필터의 주파수 응답 특성 등의 실험 결과에 대하여 논하였다. 제 IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 다파장 광원과 광 변조기와 광섬유 지연선로 행렬을 이용하는 MWP 필터

그림 1은 다파장 광원과 두 개의 광 변조기와 광섬유 지연선로 행렬을 이용하는 MWP 필터의 개념도를 보이

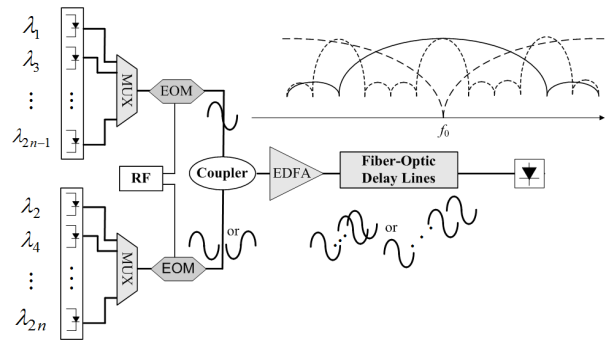


그림 1. 다파장 광원과 광 변조기와 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 MWP 필터 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of the MWP filter using multiwavelength sources, EOMs and a fiber-optic delay line matrix.

는 그림이다. 제안된 MWP 필터 구조는 $\lambda_1, \lambda_3, \dots, \lambda_{2n-1}$ 과 $\lambda_2, \lambda_4, \dots, \lambda_{2n}$ 으로 구성되는 두 그룹의 다파장 광원, 광 다중화기 MUX, 광 변조기, EOM, 1×2 광 결합기 (coupler), 광 증폭기(Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA), 광섬유 지연선로 행렬(Fiber-Optic Delay Lines) 및 검출기(Photo-Detector: PD)로 구성된다.

n -채널 다파장 광원($\lambda_1, \lambda_3, \dots, \lambda_{2n-1}$)과 또 다른 n -채널 다파장 광원($\lambda_2, \lambda_4, \dots, \lambda_{2n}$)의 CW 광 출력 신호들은 광 다중화기(MUX-1, MUX-2)에 의해 광 다중화된 후 각각의 광 변조기(EOM-1, EOM-2)에서 RF 입력 신호를 변조시킨다. 1×2 광 결합기에 의해 결합된 광 변조기 출력 광 신호, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}$ 는 광 증폭기에서 증폭되고, 파장 역다중화기에 의해 파장별로 분리된 후, 광섬유 지연선로 행렬로부터 시간 지연을 얻음으로써 MWP 필터의 RF 신호 대역폭을 결정한다. 예를 들어 인접 채널의 시간 지연이 50 ps인 경우, MWP 필터의 FSR은 20 GHz이고, 시간 지연이 100 ps인 경우에는 10 GHz의 FSR을 갖는다. 광섬유 지연선로 행렬의 입력 광 신호 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}$ 는 행렬의 첫 번째, 두 번째, $2n-1$ 번째, 그리고 $2n$ 번째 행으로 각각 입력되어 광 스위치 상태에 따라 해당되는 시간 지연을 얻는다. 광섬유 지연선로 행렬의 각 열(column)에 있는 광 스위치들은 동시에 바(bar) 또는 크로스(cross)로 절체된다. 광 스위치의 크로스 포트에 연결되는 광섬유 지연선로의 길이는 각 열의 첫 번째 행의 지연선로 길이보다 $(n-1)2^{m-1}\Delta\tau$ 만큼 긴 광섬유 지연선로가

III. MWP 필터 제작 및 실험 결과

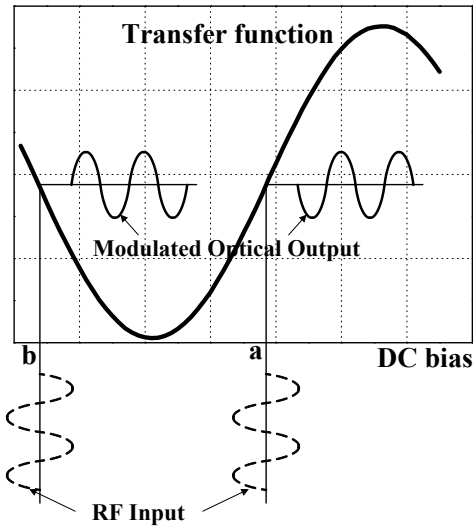


그림 2. 광 변조기의 전송함수 특성 곡선
Fig. 2. The transfer function of the EOM.

연결된다. n 은 그림 1의 광섬유 지연선로 행렬에서 행의 번호를 나타내며, m 은 열의 번호이고, $\Delta\tau$ 는 단위 시간 지연이다. 예를 들어, 모든 광 스위치가 바 상태일 경우, 광섬유 지연선로 행렬의 광 다중화기에 입력되는 모든 행의 광 신호들의 시간 지연은 동일하다. 그리고 첫 번째 열의 모든 광 스위치가 크로스 상태이고, 나머지 열의 광 스위치가 모두 바 상태일 때, 인접 채널 광 신호들의 시간 지연은 $\Delta\tau$ 이고, 두 번째 열만 크로스 상태일 경우에는 $2\Delta\tau$, 그리고 첫 번째 열과 두 번째 열만 크로스 상태일 경우에는 $3\Delta\tau$ 의 시간 지연을 갖는다. 이와 같이 $2n \times m$ 광섬유 지연선로 행렬로부터 얻을 수 있는 시간 지연 개수는 2^m 개이고, 이것은 MWP 필터가 2^m 개에 해당하는 RF 신호 대역폭 개수를 가질 수 있음을 의미한다. 따라서 광섬유 지연선로 행렬을 열 단위로 절체함으로써 MWP 필터의 RF 신호 대역폭을 조절할 수 있다.

그림 2는 광 변조기의 전송함수 특성곡선을 보이는 그림이다. 동일한 위상의 RF 입력 신호에 대하여 광 변조기 바이어스 전압을 조절함으로써 출력신호의 위상이 180° 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다^[8]. 본 논문에서는 입력 바이어스 전압이 $b(2\text{ V})$ 와 $a(4\text{ V})$ 일 때 변조지수가 최대이고, 광 변조 신호의 RF 위상이 180° 다른 광 변조기 EOM-1과 EOM-2를 사용하였다.

그림 3은 네 개의 DFB(Distributed Feedback) LD(Laser Diode)와 두 개의 EOM과 4×2 광섬유 지연선로 행렬로 구성된 MWP 필터의 실험 구성도를 보이는 그림이다. λ_1 과 λ_3 의 CW 광 신호들은 EOM-1에서, 그리고 λ_2 와 λ_4 의 CW 광 신호들은 EOM-2에서 변조된다. 이 때, EOM-1과 EOM-2의 입력 바이어스 전압이 동일하면 EOM-1과 EOM-2로부터 발생하는 광 변조신호들의 RF 위상은 동일하고, 그림 2에서와 같이 전송함수의 기울기가 서로 상반되는 바이어스 전압이 입력되면 λ_1 과 λ_3 의 광 변조신호의 RF 위상과 λ_2 와 λ_4 의 광 변조신호의 RF 위상은 180° 차이가 발생한다. EOM-1 및 EOM-2로부터 출력되는 네 개의 광 변조 신호들은 광 결합기에서 합쳐진 후, 광 증폭기에 의해 증폭된다. 광 증폭기에 의해 증폭된 광 변조신호들은 4-채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리되고, 광섬유 지연선로 행렬로 입력된다. 그림 3의 광섬유 지연선로 행렬을 구성하는 2×2 광 스위치들은 열(column) 단위로 동시에 바(bar) 또는 크로스(cross)로 절체되도록 구성되어 있고, 두 개의 열로 구성(2-비트 동작)되어 있기 때문에 4가지 경우의 시간 지연을 얻을 수 있다. 첫 번째 열과 두 번째 열이 모두 바(bar) 상태인 경우, 인접 채널 간의 시간 지연 차이는 발생하지 않고, 첫 번째 열이 크로스(cross)이고, 두 번째 열이 바(bar) 상태인 경우, 인접 파장 신호들 간의 시간 지연 차이는 $\Delta\tau$ 이고, 첫

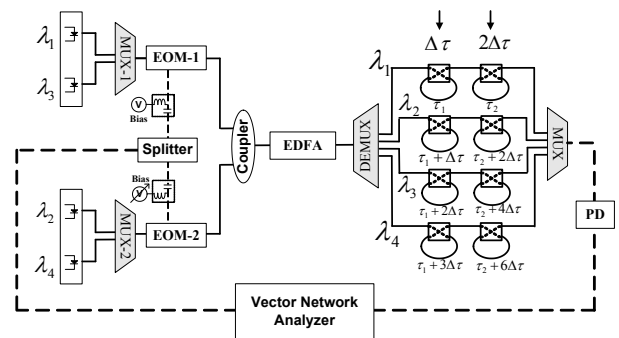


그림 3. MWP 필터의 주파수 응답특성 측정을 위한 실험 구성도
Fig. 3. Experimental setup for the frequency response measurement of the proposed microwave photonic filter.

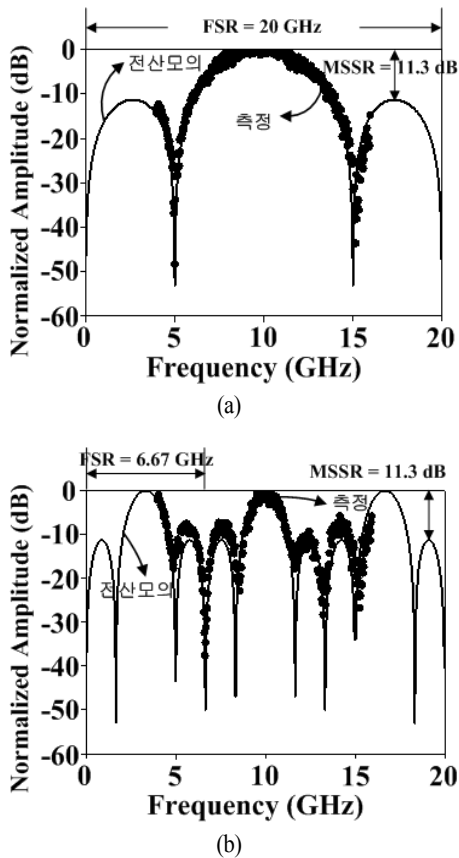


그림 4. $V_{EOM1}=2.0$ V, $V_{EOM2}=4.0$ V이고, 광섬유 지연선로 행렬의 첫 번째 두 번째 열이 (a) 크로스-바 상태일 때, (b) 크로스-크로스 상태일 때, MWP 필터의 주파수 응답 특성 곡선. 이론값(solid line), 측정값(dot)

Fig. 4. The frequency responses of the proposed filter when $V_{EOM1}=2.0$ V, $V_{EOM2}=4.0$ V, and the columns of the fiber-optic delay line are in the (a) Cross-bar states (b) Cross-Cross states. Theory(solid line) and experiment(dot).

번째 열이 바(bar) 상태이고, 두 번째 열이 크로스(cross) 상태인 경우, 시간 지연 차이는 $2\Delta\tau$ 가 된다. 그리고 모두 크로스(cross) 상태인 경우에는 시간 지연 차이는 $3\Delta\tau$ 가 된다. 본 논문에서의 인접 채널의 단위 시간 지연 차이, $\Delta\tau$,는 50 ps로 설정하였다. MWP 필터에 의해 시간 지연을 얻은 광 변조신호들은 4-채널 WDM 다중화기에 의해 결합되고, 광 검출기에 의해 광/전 변환되어 네트워크 분석기로 입력된다.

그림 4는 그림 3의 실험 구성도에서 $V_{EOM1}=2.0$ V이고, $V_{EOM2}=4.0$ V일 때, MWP 필터의 주파수 응답 특성 곡선에 대하여 이론값(Sim.)과 측정값(Mea.)을 보이는 그림이다. 이론값은 0 GHz부터 20 GHz까지 참고문헌 1의 수식을 이용하여 계산하였고, 측정값은 4 GHz부터 16 GHz까지 그림 3의 실험 구성도에서 Vector Network Analyzer를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정한 것이다. V_{EOM1} 과 V_{EOM2} 가 다르기 때문에 그림 2에서와 같이 MWP 필터 계수의 부호가 다르고, 이에 해당하는 필터의 주파수 응답 특성을 보이는 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)는 광섬유 지연선로 행렬이 크로스(cross)-바(bar) 상태일 때, 그림 4(b)는 크로스(cross)-크로스(cross) 상태일 때, 주파수 응답 특성을 보인다. 인접 채널의 시간 지연이 각각 50 ps와 150 ps이기 때문에 MWP 필터의 FSR이 20 GHz와 6.67 GHz인 결과를 볼 수 있다. 그림 4(a)의 10 GHz에서 3 dB 대역폭은 이론값이 4.56 GHz, 측정값이 4.16 GHz이고, 그림 4(b)의 10 GHz에서 3 dB 대역폭은 1.52 GHz와 1.20 GHz이다. 대역폭 오차는 광섬유 지연선로 행렬의 시간 지연 오차에 의한 것이라 볼 수 있다. MSSR(Main to Secondary Side-lobe Ratio)의 이론값은 11.3 dB이고, 그림 5(b)에서 측정한 MSSR 값은 7.5 dB이다. MSSR 오차는 MWP 필터의 삽입 손실과 채널 신호의 크기 차이에 기인한다.

IV. 결 론

밴드 패스 필터 및 노치 필터로의 용도 변환이 가능하고, 대역폭 변화가 용이한 새로운 구조의 MWP 필터를 제안하고, 단위 시간 지연 차이가 50 ps(FSR=20 GHz)인 4x2 광섬유 지연선로 행렬로 구성된 MWP 필터를 제작하여 광섬유 지연선로 행렬의 시간지연 및 MWP 필터의 주파수 응답 특성을 살펴보았다. 이 구조는 다파장 광원을 사용하므로 광 파워 및 파장의 안정성을 확보할 수 있으며, 두 개의 광 변조기를 사용하여 밴드 패스 및 노치 필터로의 용도 변환이 가능하고, 전기적 스위치 제어를 이용하여 2x2 광 스위치 행렬을 열(column) 단위로 절체하기 때문에 RF 신호 대역폭 속도가 빠르고 구동이 간단하다는 장점을 지니고 있다.

References

- [1] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, "A tutorial on microwave photonic filters", *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 201-229, Jan. 2006.
- [2] A. J. Seeds, K. J. Williams, "Microwave photonics", *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4628-4641, Dec. 2006.
- [3] G. Yu, W. Zhang, and J. A. R. Williams, "High-performance microwave transversal filter using fiber Bragg grating arrays", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 1183-1185, Sep. 2000.
- [4] D. Pastor, B. Ortega, J. Capmany, P. -Y. Fonjallaz, and M. Popov, "Tunable microwave photonic filter for noise and interference suppression in UMTS base stations", *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 16, pp. 997-999, Aug. 2004.
- [5] D. B. Hunter, L. V. T. Nguyen, "Widely tunable RF photonic filter using WDM and a multichannel chirped fiber grating", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 2, pp. 900-905, Feb. 2006.
- [6] B. -M. Jung, J. P. Yao, "A two-dimensional optical true time-delay beamformer consisting of a fiber Bragg grating prism and switch-based fiber-optic delay lines", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 627-629, May 2009.
- [7] B. -M. Jung, J. -D. Shin, and B. -G. Kim, "Optical true time-delay for two-dimensional X-band phased array antennas", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 12, pp. 877-879, Jun. 2007.
- [8] J. Capmany, D. Pastor, A. Martinez, B. Ortega, and S. Sales, "Microwave photonic filters with negative coefficients based on phase inversion in an electro-optic modulator", *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 16, pp. 1415-1417, Aug. 2003.
- [9] B. Vidal, J. L. Corral, and J. Marti, "All-optical WDM microwave filter with negative coefficients", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 666-668, Mar. 2005.

정 병 민



2000년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)

2007년 10월~2009년 2월: University of Ottawa Research Fellow

2009년 2월~2010년 8월: 광주과학기술원 연구교수

2010년 9월~현재: 삼성탈레스(주) 전문연구원

[주 관심분야] 능동 위상배열 레이더 시스템, 금속탐지기 시스템