

2차원 X-밴드 위상 배열 안테나용 광 실시간 지연선로

정병민 · 김성철 · 신종덕[†] · 김부균

승실대학교 정보통신전자공학부
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도동 1-1

(2005년 3월 30일 받음, 2005년 5월 26일 수정본 받음)

본 논문에서는 크로스(CROSS) 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 2×2 광 스위치들로 구성된 광섬유 지연선로 행렬과 다파장 광원을 이용한 2차원 위상 배열 안테나(Phased Array Antenna; PAA)용 광 실시간 지연선로(True Time-Delay ; TTD)의 구조를 제안하였고, 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD를 결합하여 10-GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD를 제작하였다. 단위 시간 지연 차이가 각각 $\Delta T=12\text{ ps}$ 와 $\Delta \tau=6\text{ ps}$ 인 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD의 모든 주사각에 대해서 시간지연을 측정하였다. 파장 의존형 광 TTD의 시간 지연 오차는 지터에 의해 최대 2.8 ps가 발생하였으며, 파장 비의존형 광 TTD의 경우에는 $\pm 0.8\text{ ps}$ 이하의 오차가 나타났다. 제안된 2차원 PAA용 광 TTD의 구조는 1차원 선형 PAA보다 높은 이득을 얻을 수 있고, 다파장 광원을 사용하므로 광 파워 및 파장의 안정성을 확보할 수 있으며, 전기적 스위치 제어기를 이용하여 2×2 광 스위치 행렬을 열(column) 단위로 절제하기 때문에 주사 빔 제어 속도가 빠르고 구동이 간단한 장점을 갖고 있다.

주제어 : Phased array antenna, True time-delay, Micro-electro-mechanical system.

I. 서 론

위상배열 안테나(Phased Array Antenna ; PAA) 로부터 방사되는 빔의 주사 방향을 제어하는 방식 중, 광 실시간 지연선로(True Time-Delay ; TTD) 주사 방식은 넓은 대역폭, 저손실, 전자파 간섭에 무관, 경량, 그리고 특히 RF 주파수의 변화에 따른 주 빔의 주사각 변화가 발생하지 않는 장점이 있기 때문에, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 제안된 위상배열 안테나를 위한 광 TTD의 구조는 분산 보상 광섬유(Dispersion Compensation Fiber ; DCF) 프리즘 방식,^[1] PLC(Planar Lightwave Circuit) 방식,^[2] 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating; FBG) 프리즘 방식,^[3] 칩 광섬유 격자(Chirped Fiber Grating ; CFG) 방식,^[4] FBG와 CFG를 조합한 방식^[5] 등이 있다. 그러나 대부분의 방식들에서 파장 가변 광원을 사용해야 하기 때문에 파장 안정화 및 파장 가변 속도 등과 관련된 문제점들이 발생하게 된다.

최근에 본 연구팀은 단일 파장 광원과 크로스(CROSS) 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 2×2 광 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 스위치 행렬로 구성된 선형 PAA용 광 TTD 구조를 제안하였고, 10-GHz PAA용 3-비트 및 4-비트 광 TTD에 관한 결과를 발표하였다.^[6,7] 이 구조는 기존에 제안된 대부분의 TTD 시스템에서 반드시 요구되는 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(column) 단위로 동시에 바(BAR) 또는 크로스(CROSS)로 절제하기 때문에, 주사 빔 제어가 빠르고 간단한 장점을 갖고 있다. 그러나 이러한 1차원 선형 빔 성형기를 이용한 PAA는 안테나 소자들의 중심을 잇는 직선을 포함하는 평면에서만 위상주사가 가능하고, 이 평면에 수직인 평면으로는 안테나 소자에서 방사되는 빔 폭이 크기 때문에 얻을 수 있는 이득이 높지 않다.

최근 다파장 광원 및 PDM(programmable dispersion matrix) 과 SODL(switched optical delay lines)을 사용하여 높은 이득을 얻을 수 있는 2차원 다파장 광 제어 PAA(MWOC PAA : multiwavelength optically controlled phased-array antenna)가 제안되었다.^[8] MWOC PAA는 다파장 광원을 사용한 2차원 PAA이기 때문에 높은 이득을 얻을 수 있으며, 빠르고 안정된 빔 주사가 가능한 장점이 있으나, PDM을 구성하는 FBG들의 최소 간격 제한에 의하여 S-밴드 이상의 시스템 구현이 불가능하며, SODL에서는 스위치들을 개별적으로 제어하여 빔을 주사하기 때문에 스위치 제어가 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 해결할 수 있는 X-밴드 2차원 PAA용 광 TTD 구조를 제안하였고, 2×2 광 스위치와 광섬유 지연선로로 구성된 광섬유 지연선로 행렬과 다파장 광원을 이용한 10-GHz 2-비트×4-비트 광 TTD를 제작하였으며, 그 특성에 대하여 살펴보았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 제안된 2차원 PAA용 광 TTD의 동작 원리에 대하여 간단히 설명하였고, 제III장에서는 10-GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD의 제작 및 실험 결과에 대하여 논하였다. 마지막으로 제IV장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

[†] E-mail: jdshin@ssu.ac.kr

II. 2×2 광 스위치와 광섬유 지연선로로 구성된 2차원 PAA용 광 TTD의 동작원리

각 안테나 소자를 등방성 점 신호원으로 가정하면, 인접 안테나 소자 간격이 d 로 선형 배열된 p 개의 안테나 소자들로부터 각도 θ 에서 측정되는 원거리 장은 다음과 같이 표현된다.

$$E(\theta, t) = \sum_{k=0}^{p-1} a_k e^{i\omega_{RF} t} e^{i(\psi_k + k_{RF} kd \sin \theta)} \quad (1)$$

여기서 a_k 은 k 번째 안테나 소자에 인가되는 전류의 세기, ω_{RF} 는 RF 신호의 각 주파수, ψ_k 은 k 번째 안테나 소자의 위상, k_{RF} 는 RF 주파수의 전파상수이다. 주 빔(main beam)을 θ_0 로 방사하기 위해서는, 각 안테나 소자의 위상을 조정하여 θ_0 에서 보강간섭을 일으켜야 하므로, TTD에 의해 k 번째 안테나 소자에 공급되어야 할 시간지연은 다음과 같다.

$$\Delta\tau_k(\theta_0) = -\frac{k d \sin \theta_0}{c} \quad (2)$$

즉, k 번째 안테나 소자의 위상은

$$\psi_k = 2\pi f_{RF} \Delta\tau_k(\theta_0) = -2\pi f_{RF} \frac{k d \sin \theta_0}{c} \quad (3)$$

이 되며, 원거리 장은

$$E(\theta, t) = \sum_{k=0}^{p-1} a_k e^{i\omega_{RF} t} e^{i\frac{2\pi f_{RF} k d}{c}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (4)$$

와 같이 되어, 주파수에 상관없이 $\theta = \theta_0$ 에서 전계가 최대가 되므로, RF 주파수의 변화에 무관하게 주 빔의 방향은 θ_0 로 일정하게 된다. 각 안테나 소자에 인가되는 전류의 세기가 a 로 동일하다면 $E(\theta, t)$ 는

$$E(\theta, t) = a e^{i\omega_{RF} t} e^{i\frac{\pi f_{RF}(p-1)d}{c}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \frac{\sin \pi f_{RF} d(\sin \theta - \sin \theta_0)/c}{\sin \pi f_{RF} d(\sin \theta - \sin \theta_0)/c} \quad (5)$$

이 된다. 이 식에서 알 수 있듯이 안테나 소자 수, p 가 증가할수록 주 빔의 폭이 감소하게 되어 지향성이 향상된다. 안테나 소자들의 간격 d 를 RF 파장의 1/2로 하는 경우에는 TTD에 의해 인접 안테나 소자들에 공급되어야 할 시간지연 차이는 식 (2)로부터

$$\Delta\tau = -\frac{\sin \theta_0}{2f_{RF}} \quad (6)$$

이 되어, 시간지연 차이가 RF 주파수에 반비례하기 때문에 주파수가 증가할수록 시간지연 차이가 작아져서 광섬유 지연선로의 단위 길이가 짧아진다.

PAA의 최대 빔 주사각이 $\theta_0 = \pm \frac{\pi}{2}$ 인 경우에 인접 안테나에 공급해야 할 최대 시간지연은

$$\Delta\tau_{\max} = \mp \frac{1}{2f_{RF}} \quad (7)$$

이 되어야 하며, 이에 해당하는 광섬유 지연선로 길이 차이는

$$\Delta l_{\max} = \frac{c}{n_{eff} 2f_{RF}}$$

이고, n -비트 동작을 위한 인접 안테나 소자간에 필요로 하는 최소 시간지연은

$$\Delta\tau_{\min} = \mp \frac{1}{2^n f_{RF}} \quad (8)$$

이 되어야 하며, 이에 해당하는 광섬유 지연선로의 길이 차이는

$$\Delta l_{\min} = \frac{c}{n_{eff} 2^n f_{RF}} \quad (9)$$

과 같다. 여기서, c 는 진공 중에서 빛의 속도이고, n_{eff} 는 광원의 동작 파장에서 광섬유의 유효 굴절률이다.

그림 1은 본 논문에서 제안한 2차원 PAA용 광 TTD에 대한 개념도이다. p -채널 다파장 광원의 CW 광 출력 신호들 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$)은 광변조기(Electro-Optic Modulator; EOM)에서 RF 전기 신호에 의해 변조되어, 파장 의존형 광 TTD(wavelength dependent TTD)에 입력된다. 이 TTD에서는 스위치 제어기의 제어에 의해 각 파장 신호가 서로 다른 시간지연을 갖게 되어 파장 정보가 PAA의 방위각을 결정하는데 이용된다. 출력 신호는 p -채널 WDM(wavelength division multiplexing) 다중화기에 의해 다중화된 후 파장 비의존형 광 TTD(wavelength independent TTD)에 입력된다. 이 TTD는 파장에 무관하게 동작하며, 주사 빔의 고도를 결정하기 위한 시간지연을 얻는다. q -개의 지연선로 출력 각각은 p -채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리된 후, p -개의 안테나 소자에 입력된다.

그림 2(a)와 (b)는 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD의 상세도이다. 그림 2(a)의 파장 의존형 광 TTD 구조는 하나의 p -채널 WDM 역다중화기, 크로스(CROSS) 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 2×2 광 스위치들로 구성된 $p \times m$ 광섬유 지연선로 행렬, 그리고 일련의 바이어스 광섬유 지연선로(bias delay)로 구성된다. EOM의 출력 신호는 p -채

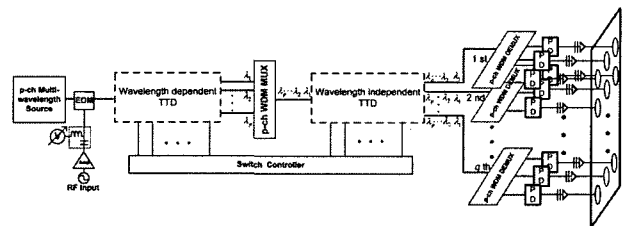
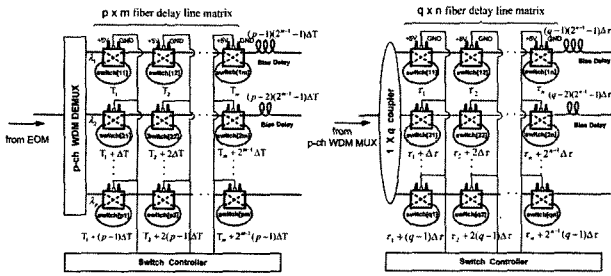


그림 1. 제안된 2차원 PPA용 광 TTD의 개념도.



(a) 파장 의존형 광 TTD (b) 파장 비의존형 광 TTD

그림 2. 2×2 광 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용하여 구현한 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD.

널 WDM 역다중화기를 통해 파장별로 분리되어, $p \times m$ 광섬유 지연선로 행렬로 입력된다. 따라서, 첫 번째 행(row)에는 파장 λ_1 , 두 번째 행에는 파장 λ_2 , 그리고 p 번째 행에는 λ_p 가 나타난다. 각 열(column)에 있는 광 스위치들은 동시에 바(BAR) 또는 크로스(CROSS)로 절체된다. 광 스위치의 크로스 포트에 연결되는 광섬유 지연선로의 길이는 첫 번째 광 스위치 열의 경우에는, 행의 번호가 하나씩 증가할 때마다 단위 시간지연 ΔT 에 해당하는 광섬유 길이만큼 증가하여, 마지막 p 번째 행에는 첫 번째 행보다 $(p-1)\Delta T$ 만큼 긴 광섬유 지연선로가 연결된다. 두 번째 열의 경우에는 시간지연의 증가가 $2\Delta T$ 씩 이루어지며, 이와 같은 방식으로 m 번째 열에서의 시간지연은 $2^{m-1}\Delta T$ 씩 증가한다. 그리고, 각 행의 마지막 광 스위치의 바 포트에는 안테나 면의 수직으로부터 \pm 방향으로 주 빔이 주사되도록 바이어스 광섬유 지연선로가 연결된다. 첫 번째 행에는 $(p-1)(2^{m-1}-1)\Delta T$ 에 해당하는 바이어스 광섬유가, 그리고 행의 번호가 하나씩 증가할 때마다 $(2^{m-1}-1)\Delta T$ 씩 감소하는 바이어스 광섬유가 연결된다. 이 $p \times m$ 광섬유 지연선로 행렬로부터 얻을 수 있는 주사 빔의 방향은 모두 2^m 이 된다. 본 논문에서는 파장 의존형 광 TTD를 방위각 방향의 빔 주사에 이용하였다. 원하는 방위각을 얻도록 시간 지연된 파장 신호들은 p -채널 WDM 다중화기에 의해서 다중화된 후 파장 비의존형 광 TTD에 입력된다.

그림 2(b)의 파장 비의존형 광 TTD는 $1 \times q$ 광 결합기와 $q \times n$ 광섬유 지연선로 행렬 그리고 바이어스 광섬유 지연선로들로 구성된다. $q \times n$ 광섬유 지연선로 행렬은 파장 의존형 광 TTD의 $p \times m$ 광섬유 지연선로 행렬과 구조가 동일하며, 첫 번째 열의 단위 시간 지연은 Δr 이고, 두 번째 열은 $2\Delta r$ 이 되며, 이와 같은 방식을 적용하면 마지막 열의 단위 시간 지연은 $2^{n-1}\Delta r$ 이 된다. 이 TTD에서는 파장에 무관한 시간 지연을 얻게 되며, 가능한 주사 빔의 방향은 모두 2^n 이 된다. 이 논문에서는 파장 의존형 광 TTD는 방위각 방향의 빔 주사에, 그리고 파장 비의존형 광 TTD는 방위각에 수직인 고도 방향의 빔 주사에 이용하였다.

III. 10-GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD 제작 및 실험 결과

그림 3은 10 GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD의 실험 구성도이다. 본 실험에서는 2×2 광 스위치로서 응답속도가 $200 \mu s$ 인 2×2 광 MEMS 스위치를 사용하였다.^[6] 이득 스위칭된 DFB(Distributed FeedBack) LD ($\lambda_1=1553.33 \text{ nm}$)과 LD 2($\lambda_2=1556.55 \text{ nm}$)로부터 반치전폭(FWHM)이 각각 53ps와 43ps인 광 펄스를 발생시킨 후, 이 들을 1×2 광섬유 결합기로 결합하여 파장 의존형 광 TTD에 입력시켰다. 광 TTD의 입력에 위치한 2-채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리된 펄스들은 2×2 광섬유 지연선로 행렬에 입력된다. 광섬유 지연선로 행렬을 구성하는 MEMS 스위치들은 열(column) 단위로 동시에 바 또는 크로스로 절체되기 때문에 4가지, 즉 2-비트, 의 시간 지연을 얻을 수 있다. 첫 번째 열이 크로스이고 두 번째 열은 바인 경우, λ_2 가 진행하는 두 번째 행의(하위)지연선로는 λ_1 이 진행하는 첫 번째 행의(상위)지연선로보다 시간 지연이 ΔT 더 발생하며, 첫 번째 열은 바이고 두 번째 열은 크로스 인 경우는 두 번째 행의 지연선로의 시간 지연이 $2\Delta T$ 더 발생된다. 첫 번째 열과 두 번째 열이 모두 바인 경우는 두 지연선로 간의 시간 지연 차이는 발생하지 않으며, 모두 크로스인 경우에는 두 번째 행의 시간 지연이 $3\Delta T$ 더 발생된다. 주사 빔의 방위각에 따라 시간 지연을 얻은 광 신호는 broadside 방향을 기준으로 \pm

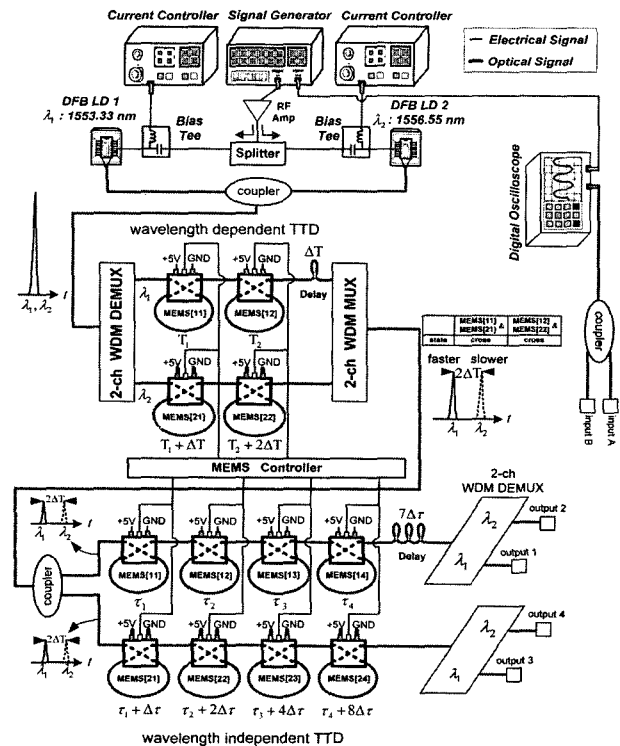
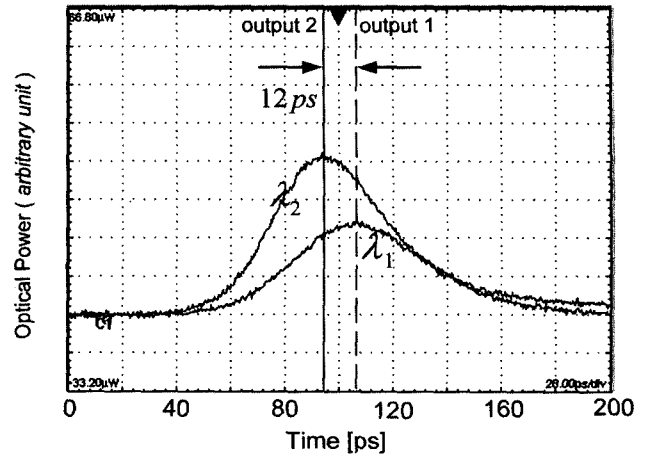


그림 3. 10-GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD의 실험 구성도.

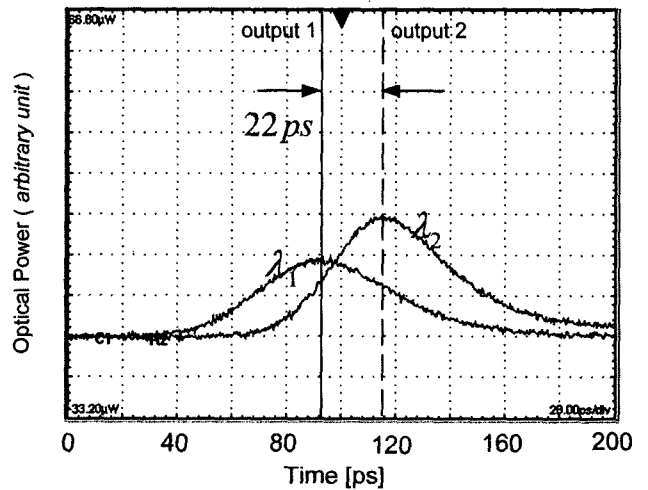
방향으로 빔 주사를 하기 위해 λ_1 은 ΔT 그리고 λ_2 는 0의 시간 지연을 갖는 바이어스 지연선로를 통과한 다음 2-채널 WDM 다중화기에 의해 결합된다. 그림 3에는 파장 의존형 광 TTD의 첫 번째 열과 두 번째 열의 모든 스위치가 크로스 상태인 경우를 예로 보이고 있는데, 두 번째 열의 지연선로는 첫 번째 열의 지연선로보다 $3\Delta T$ 더 시간 지연이 생기지만, 바이어스 지연선로에 의한 시간 지연이 $-\Delta T$ 이므로, 2-채널 WDM 다중화기 출력에는 λ_1 이 λ_2 보다 $2\Delta T$ 앞서 출력된다.

WDM 다중화기 출력은 파장 비의존형 광 TTD의 입력에 위치한 1×2 광섬유 결합기에 의해 두 개의 동일한 광 신호로 분리된 다음, 2×4 광섬유 지연선로 행렬에 입력된다. 이 TTD에 의해서는 모두 16가지, 즉 4-비트의 시간 지연을 얻을 수 있다. 첫 번째 열만 크로스이고 나머지가 모두 바인 경우에는, 두 번째 열의 지연선로가 첫 번째 열의 지연선로보다 Δt 만큼의 시간 지연을, 각각 두 번째, 세 번째, 그리고 네 번째 열이 크로스 상태인 경우는 $2\Delta t$, $4\Delta t$, 그리고 $8\Delta t$ 의 시간 지연이 발생된다. 첫 번째 열의 지연선로에는 $7\Delta t$, 두 번째 열의 지연선로에는 0의 바이어스 지연선로가 연결되어 있다. 각 지연선로 출력은 2-채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리된 후 출력된다. 파장 의존형 광 TTD의 시간 지연(2-비트)과 파장 비의존형 광 TTD의 시간 지연(4-비트) 각각에 대해 WDM 역다중화기의 출력포트들(output 1, 2, 3, 그리고 4)로 출력되는 펄스들 중, 파장 의존형 TTD에 대한 성능을 측정하기 위해서는 output 1과 output 2(output 3과 output 4)를, 그리고 파장 비의존형 TTD의 성능을 측정하기 위해서는 output 1과 output 3(output 2와 output 4)을 1×2 광 결합기로 결합한 후, 펄스들의 시간 지연 차이를 측정하였다. 안테나 소자들의 간격을 RF 파장의 1/2로 하는 경우, $f_{RF} = 10$ GHz로 동작하는 PAA 시스템을 위한 파장 의존형(파장 비의존형) 광 TTD에 의해 빔의 최대 주사 각도가 ϕ_0 방위각 = $\pm 30^\circ$ (θ_0 고도 = $\pm 90^\circ$)인 배열 안테나의 인접 안테나 소자들에 공급되어야 할 최대 시간 지연은 $\Delta T_{max} = \pm \sin \phi_0 / (2f_{RF}) = \pm 25$ ps ($\Delta t = \pm \sin \theta_0 / (2f_{RF}) = \pm 50$ ps) 이다. 따라서 본 실험에서는 2-비트(4-비트)로 동작하는 파장 의존형(파장 비의존형) 광 TTD에 대한 단위 시간 지연 차이, ΔT (Δt), 는 12 ps(6 ps)로 설정하였다.

그림 4(a)는 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치를 바 (BAR)로 하고 2-채널 WDM 파장 역다중화기의 출력인 output 1(λ_1)과 output 2(λ_2)의 시간 지연 차이를 측정한 결과이고, 그림 4(b)는 파장 의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치는 크로스(CROSS), 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치는 바(BAR)로 하고 output 1(λ_1)과 output 2(λ_2)의 시간 지연 차이를 측정한 결과이다. 이 결과들은 파장 비의존형 광 TTD의 두 번째 열에 연결된 2-채널 WDM 파장 역다중화기의 출력인 output 3(λ_1)과 output 4(λ_2)에서 측정한 시간 지연 차이와 동일하다. 그림 4(a)는 모든 광 MEMS 스위치가 바 상태이므로 파



(a) 모든 광 MEMS 스위치가 바 상태인 경우



(b) 모든 광 MEMS 스위치가 크로스 상태인 경우

그림 4. 파장 의존형 광 TTD의 시간 지연 차이.

장 의존형 광 TTD의 첫 번째 열과 두 번째 열의 시간 지연 차이는 없으나 바이어스 광섬유 지연 선로에 의한 시간 지연 차이가 발생하여 결과적으로 λ_1 신호가 λ_2 신호보다 ΔT , 즉 12 ps 늦게 나타났다. 그림 4(b)는 파장 의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치가 크로스이므로 파장 의존형 광 TTD의 첫 번째 열과 두 번째 열의 시간 지연 차이로 인해 λ_1 신호가 λ_2 신호보다 $3\Delta T$ 앞서며, 바이어스 광섬유 지연 선로를 통과하여 WDM 다중화기의 출력에서는 λ_1 신호가 λ_2 신호보다 $2\Delta T$, 즉 24 ps 빠르게 나타난다. 측정된 시간 지연은 22 ps로 약 2 ps의 오차가 발생하였다. 레이저 다이오드를 이득 스위칭하면 생성된 펄스들 간에는 지터가 나타나게 되는데, 두 개의 독립된 DFB LD들을 이득 스위칭하면 두 LD에서 발생하는 펄스들의 시작점이 시간에 따라 다르기 때문에 광섬유 지연선로의 길이는 정확하여도, 서로 다른 파장 펄스 간의 지터로 인해 위와 같은 오차가 발생된다. 파장 의존형 광 TTD의 각 광 MEMS 스위치의 크로스 포트에 광섬

유 지연선로를 연결할 때는, 2-채널 WDM 역다중화기 대신에 1×2 광섬유 결합기를 사용하고, 하나의 DFB LD를 이득 스위칭시켜 얻은 펄스들을 입력시키고 광섬유를 연결하므로써 지터로 인한 광섬유 지연선로의 길이 오차가 발생하지 않도록 주의하였다. 그림에서는 1553.33 nm(λ_1)의 신호 레벨이 1556.55 nm(λ_2)의 신호 레벨에 비해 작게 나타났다. 이는 광 소자들, 특히 2-채널 WDM 역다중화기와 다중화기의 손실이 파장에 따라 일정하지 않기 때문이다. 따라서 안정적인 펄스 발생 메커니즘과 동작 파장 범위에서 손실이 균일한 광소자를 사용할 경우에 이와 같은 현상들을 현저히 감소시킬 수 있으리라 예상된다.

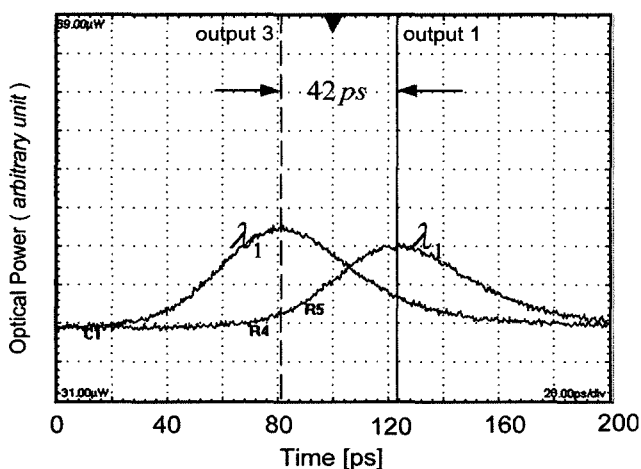
그림 5(a)는 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치를 바 (BAR)로 하고 파장 비의존형 광 TTD의 첫 번째 행과 두 번째 행의 2-채널 WDM 파장 역다중화기 출력인 output 1(λ_1)과 output 3(λ_1)의 시간 지연 차이를 측정된 결과이고, 그림 5(b)는 파장 의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치는 바(BAR), 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치를 크로스(CROSS)로 하고 output 1(λ_1)과 output 3(λ_2)의 시간 지연 차이를 측정된 결과이다. 이 결과들은 output 2(λ_2)와 output 4(λ_2)의 시간 지연 차이와 동일하다. 그림 5(a)는 모든 광 MEMS 스위치가 바 상태이므로 파장 비의존형 광 TTD의 모든 열의 시간 지연 차이는 발생하지 않으나 바이어스 광섬유 지연 선로에 의한 시간 지연 차이가 있어 결과적으로 $-7\Delta\tau$, 즉 -42 ps의 시간 지연이 나타난다. 그림 5(b)는 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치가 크로사이므로 모든 열의 시간 지연 차이는 $15\Delta\tau$ 이지만 바이어스 광섬유 지연 선로에 의한 시간 지연 차이가 $-7\Delta\tau$ 이므로 결국 $8\Delta\tau$, 즉 48 ps의 시간 지연이 발생되어 output 1의 신호가 output 3의 신호보다 48 ps 빠르다. 측정된 시간 지연 차이는 48 ps이다. 파장 비의존

형 광 TTD의 시간 지연을 측정된 경우는 한 개의 DFB LD를 통해 이득 스위칭으로 발생시킨 신호만이 사용되었고, 파장 특성이 같은 소자들이 사용되었기 때문에 지터 현상과 신호 크기의 차이가 나타나지 않았다.

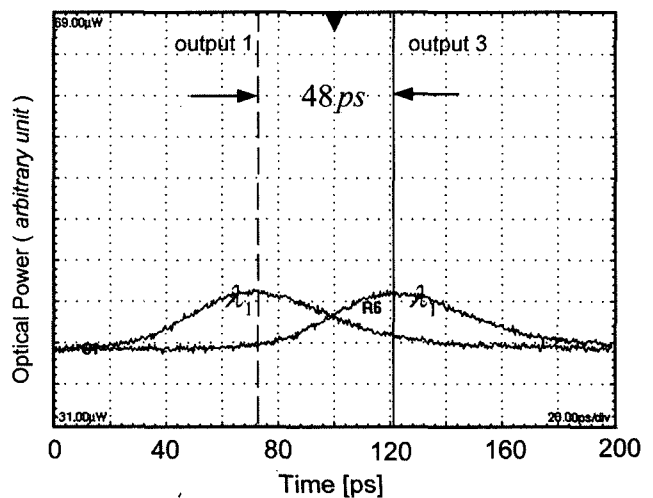
표 1과 표 2는 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD에서, 빔 주사각을 구하기 위한 광 MEMS 스위치들의 상태와 광섬유 지연선로에 의한 시간지연의 계산 값과 측정치를 정리하였다. 표 1의 파장 의존형 광 TTD 실험 결과, 지터에 의한 오차는 최대 3 ps로 나타났으나, 표 2의 파장 비의존형 광 TTD 실험에서는 지터에 의한 영향이 나타나지 않기 때문에, 오차는 ± 1 ps 이하로 나타났다.

IV. 결 론

본 논문에서는 크로스 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 2×2 광 스위치들로 구성된 광섬유 지연선로 행렬과 다파장 광원을 이용한 2차원 PAA용 광 TTD의 구조를 제안하였고, 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD를 결합하여 10-GHz 2차원 PAA용 2-비트×4-비트 광 TTD를 제작하였다. 단위 시간 지연 차이가 각각 $\Delta T = 12$ ps와 $\Delta\tau = 6$ ps인 파장 의존형 광 TTD와 파장 비의존형 광 TTD의 모든 주사각에 대해서 시간지연을 측정하였다. 파장 비의존형 광 TTD의 시간 지연 측정 오차는 ± 1 ps인 반면에, 파장 의존형 광 TTD의 시간 지연 측정 시, 서로 다른 레이저로부터 발생하는 이득 스위칭 펄스 간의 지터에 의해 측정 오차가 최대 3 ps나 발생하였고, 실험에 사용한 광소자들의 손실이 파장에 따라 균일하지 않아 신호 레벨의 차이가 발생함을 볼 수 있었다. 안정된 펄스 발생 메커니즘과 파장에 따른 손실이 일정한 광소자를 사용할 경우에 이와 같은 현상들을 제거할 수 있으리라 예상된다.



(a) 모든 광 MEMS 스위치가 바 상태인 경우



(b) 모든 광 MEMS 스위치가 크로스 상태인 경우

그림 5. 파장 비의존형 광 TTD의 시간 지연 차이.

표 1. 파장 비의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태일 때, 파장 의존형 광 TTD에 대한 광 MEMS 스위치 상태와 시간 지연 차이.

주사 각 [deg]	스위치 상태		시간지연				삽입손실	
	MEMS[11] & MEMS[21]	MEMS [12] & MEMS [22]	Time Delay	이론치 [ps]	실험치 [ps]		TTD 선로1 [dB]	TTD 선로2 [dB]
					output 1 & output 2	output 3 & output 4		
+6.9	BAR	BAR	-1 ΔT	-12	-12	-12	0.71	1.10
0	CROSS	BAR	0	0	3	1	1.34	1.55
-6.9	BAR	CROSS	+1 ΔT	+12	10	11	1.12	1.87
-13.9	CROSS	CROSS	+2 ΔT	+24	22	23	1.75	2.32

표 2. 파장 의존형 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태일 때, 파장 비의존형 광 TTD에 대한 광 MEMS 스위치 상태와 시간 지연 차이.

주사 각 [deg]	스위치 상태				시간지연				삽입손실	
	MEMS [11] & MEMS [21]	MEMS [12] & MEMS [22]	MEMS [13] & MEMS [23]	MEMS [14] & MEMS [24]	Time Delay	이론치 [ps]	실험치 [ps]		TTD 선로1 [dB]	TTD 선로2 [dB]
							output 1 & output 3	output 2 & output 4		
+57.1	BAR	BAR	BAR	BAR	-7 Δr	-42	-42	-42	1.60	1.40
+46.1	CROSS	BAR	BAR	BAR	-6 Δr	-36	-36	-35	2.08	1.67
+36.9	BAR	CROSS	BAR	BAR	-5 Δr	-30	-30	-30	2.00	1.88
+28.7	CROSS	CROSS	BAR	BAR	-4 Δr	-24	-24	-24	2.48	2.15
+21.1	BAR	BAR	CROSS	BAR	-3 Δr	-18	-18	-18	2.03	1.98
+13.9	CROSS	BAR	CROSS	BAR	-2 Δr	-12	-12	-12	2.51	2.25
+6.9	BAR	CROSS	CROSS	BAR	-1 Δr	-6	-6	-6	2.43	2.46
0	CROSS	CROSS	CROSS	BAR	0	0	0	0	2.91	2.73
-6.9	BAR	BAR	BAR	CROSS	+1 Δr	+6	+6	+6	1.89	2.63
-13.9	CROSS	BAR	BAR	CROSS	+2 Δr	+12	+12	+12	2.37	2.90
-21.1	BAR	CROSS	BAR	CROSS	+3 Δr	+18	+18	+19	2.29	3.11
-28.7	CROSS	CROSS	BAR	CROSS	+4 Δr	+24	+24	+24	2.77	3.38
-36.9	BAR	BAR	CROSS	CROSS	+5 Δr	+30	+30	+30	2.32	3.21
-46.1	CROSS	BAR	CROSS	CROSS	+6 Δr	+36	+36	+36	2.80	3.48
-57.1	BAR	CROSS	CROSS	CROSS	+7 Δr	+42	+42	+43	2.72	3.69
-73.7	CROSS	CROSS	CROSS	CROSS	+8 Δr	+48	+48	+48	3.20	3.96

본 논문에서 제안된 2차원 PAA용 광 TTD의 구조는 1차원 선형 PAA와 비교하여 높은 이득을 얻을 수 있고, 다파장 광원을 사용하므로 광 파워 및 파장의 안정성을 확보할 수 있으며, 전기적 스위치 제어기를 이용하여 2×2 광 스위치 행렬을 열 단위로 절체하기 때문에 주사 빔 제어 속도가 빠르고 구동이 간단한 장점을 갖고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-10231-0)지원과 광주 과학 기술원 초고속 광 네트워크 연구 센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Y. Frankel, R. D. Esman, and M. G. Parent, "Array Transmitter/Receiver Controlled by a True Time-Delay Fiber-Optic Beamformer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 1216- 1218, Oct. 1995.
- [2] K. Horikawa, I. Ogawa, H. Ogawa, and T. Kitoh, "Photonic Switched True Time Delay Beam Forming Network Integrated on Silica Waveguide Circuits," *IEEE MTT-S*, vol. 1. pp. 65- 68, May 1995.
- [3] Henry Zmuda, Richard A. Soref, Paul Payson, Steven Johns, and Edward N. Toughlian, "Photonic Beamformer for Phased Array Antennas Using a Fiber Grating Prism," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 241-243, Feb. 1997.

- [4] J. L. Corral, J. Marti, S. Regidor, J. M. Fuster, R. Laming, and M. J. Cole, "Continuously Variable True Time-Delay Optical Feeder for Phased-Array Antenna Employing Chirped Fiber Gratings," *IEEE MTT*, vol. 45, pp. 1531-1536, Aug. 1997.
- [5] Y. Liu, J. Yao, and J. Yang, "Wideband true-time-delay unit for phased array beamforming using discrete-chirped fiber grating prism," *Opt. Commun.*, vol. 207, pp. 177-187, June 2002.
- [6] Jong-Dug Shin, Back-Song Lee, Boo-Gyoun Kim, "Optical True Time-Delay Feeder for X-Band Phased Array Antennas Composed of 2×2 Optical MEMS Switches and Fiber Delay Lines," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1364-1366, May 2004.
- [7] 정병민, 윤영민, 신종덕, 김부균, "2×2 광 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 위상배열 안테나용 4-비트 광 실시간 지연선로," *한국광학회지*, 15권, 4호, pp. 385-390, 2004.
- [8] Dannis T. K. Tong and Ming C. Wu, "Multiwavelength Optically Controlled Phased-Array Antennas," *IEEE MTT*, vol. 46, pp. 108-115, Jan. 1998.

An Optical True Time-Delay for Two-Dimensional X-Band Phased Array Antennas

Byung Min Jung, Sung Chul Kim, Jong Dug Shin[†] and Boo Gyoum Kim

School of Electronic Engineering, Soongsil University 1-1 Sangdo-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-743, Korea

[†]*E-mail: jdshin@ssu.ac.kr*

(Received March 30, 2005, Revised manuscript May 26, 2005)

In this paper, an optical true time-delay (TTD) for two-dimensional (2-D) phased array antennas (PAAs), composed of a multi-wavelength optical source and a fiber optic delay line matrix consisting of 2×2 optical switches with optical fiber connected between cross ports, has been proposed. A 2-bit \times 4-bit optical TTD for 10-GHz 2-D PAAs has been implemented by cascading a wavelength dependent TTD (WD-TTD) and a wavelength independent TTD (WI-TTD). The unit time delay for WD-TTD and WI-TTD have been chosen as $\Delta T = 12ps$ and $\Delta \tau = 6ps$, respectively. Time delay have been measured at all radiation angles. The maximum delay error for WD-TTD was measured to be 3 ps due to jitter incurred from gain switching. For the case of WI-TTD, error was within ± 1 ps. The proposed optical TTD for a 2-D PAA has the following advantages: 1) higher gain compared to one-dimensional linear PAAs, 2) stabilization of optical power and wavelength by using a multi-wavelength optical source, and 3) fast beam scan and simple operation due to electronic control of the 2×2 optical switches matrix on a column-by-column basis.

OCIS Codes : 280.5110, 220.4830, 350.4010