

FBG 프리즘과 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 평면 위상 배열 안테나용 광 실시간 지연선로

정병민 · 신종덕[†] · 김부균

승실대학교 정보통신전자공학부
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도동 511

(2005년 12월 12일 받음, 2006년 1월 25일 수정본 받음)

본 논문에서는 FBG 프리즘을 이용한 파장 의존형 광 실시간 지연선로(wavelength-dependent optical true time-delay; WDOTTD)와 2×2 광 스위치의 크로스 포트에 각기 다른 길이의 광섬유 지연선로를 연결한 광섬유 지연선로 행렬인 파장 비의존형 광 실시간 지연선로(wavelength-independent optical true time-delay; WIOTTD)로 구성된 평면 위상 배열 안테나용 OTTD 구조를 제안하였다. 최대 시간 지연 차이가 810 ps인 WDOTTD와 ± 50 ps인 WIOTTD를 직렬 연결하여 10-GHz, 2비트×4비트 2차원 OTTD를 제작하였고, 모든 주사각에 대해서 시간지연과 삽입손실을 측정하였다. 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 4-비트 WIOTTD의 시간 지연 측정 오차는 ± 1 ps이하로 나타났다. 또한, 제안된 광 TTD의 성능을 분석하기 위하여, 8×8 마이크로스트립 안테나 소자들로 구성된 10-GHz 평면 PAA의 방사 패턴을 시뮬레이션으로 측정하고 분석하였다.

주제어 : 위상배열 안테나(Phased Array Antenna), 광 실시간 지연선로(Optical True Time-Delay), 광섬유 지연선로(Fiber-Optic Delay Line), 광섬유 브래그 격자 (Fiber Bragg Grating)

I 서 론

위상배열 안테나(Phased Array Antenna; PAA)로부터 방사되는 빔의 주사 방향을 제어하는 방식 중에서 광 실시간 지연선로(Optical True Time-Delay; OTTD) 주사 방식은 넓은 대역폭, 저 손실, 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^[1-5]. 1차원 선형 TTD에 의해 구동되는 PAA는 안테나 소자들의 중심을 연결하는 직선을 포함하는 평면에서만 주사가 가능하며, 이 평면과 수직한 방향으로의 방사 빔의 폭이 넓기 때문에 안테나 이득이 낮다.

안테나의 이득을 증가시키기 위해서는 2차원 평면 구조의 PAA가 필요하다. 이와 관련하여 PDM(programmable dispersion matrix)과 SODL(switcheed optical delay lines)로 구성된 2차원 다파장 광 제어 PAA(MWOC PAA : multiwavelength optically controlled phased-array antenna)가 제안되었다^[6]. 그러나 이 구조는 PDM을 구성하는 FBG(Fiber Bragg Grating)들 사이의 간격 제한으로 인해 S-밴드 이상에서 사용하는 것이 불가능하며, SODL에서는 스위치들을 개별적으로 제어하여 빔을 주사하기 때문에 스위치 제어 메커니즘이 복잡한 단점을 갖고 있다.

최근에 본 연구팀은 2×2 광 스위치의 크로스(CROSS) 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 광섬유 지연선로 행렬과 다파장 광원을 이용한 평면 PAA용 OTTD 구조를 제안하였고,

파장 의존형(Wavelength-Dependent; WD) OTTD와 파장 비의존형(Wavelength-Independent; WI) OTTD를 결합하여 10-GHz 평면 PAA용 2-비트×4-비트 OTTD에 관한 연구 결과를 발표하였다^[7]. 이 구조는 기존에 제안된 대부분의 OTTD 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 절체하기 때문에, 주사 빔 제어가 빠르고 간단한 장점을 갖고 있다^[8,9].

본 논문에서는 FBG들을 직렬로 연결하여 구성된 FBG 프리즘을 이용한 WDOTTD와 2×2 광 스위치의 크로스 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 WIOTTD를 연결한 평면 PAA용 OTTD 구조를 제안하였고, 10-GHz PAA를 위한 평면 OTTD를 제작하여 그 특성을 살펴보았다. 또한 제작된 TTD로 구동되는 10-GHz 평면 8×8 직사각형 PAA의 방사패턴을 시뮬레이션으로 살펴보았다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 제안된 평면 PAA용 OTTD의 동작 원리에 대하여 간단히 설명하였고, 제 III장에서는 10-GHz 평면 PAA용 2-비트×4-비트 OTTD의 제작 방법 및 실험 결과에 대하여 논하였다. 제 IV장에서는 CST(Computer Simulation Technology) 프로그램을 사용하여 10-GHz 평면 8×8 직사각형 PAA의 방사 패턴을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 마지막으로 제 V장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

[†] E-mail: jdshin@ssu.ac.kr

II. 2차원 위상배열안테나를 위한 파장 의존형 및 파장 비의존형 광 실시간 지연선로의 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.

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

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, OTTD에 의해 k 번째 안테나 소자에 공급되어야 할 시간지연은 다음과 같다.

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

여기서, c 는 진공 중에서 빛의 속도이다. k 번째 안테나 소자의 위상과 원거리 장은 다음과 같다.

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

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

여기서 f_{RF} 는 RF 주파수이다. 식 (4)에서, 각도 $\theta = \theta_0$ 일 때 주파수에 상관없이 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 다음과 같다.

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

이 식에서 안테나 소자의 개수 p 가 증가하면 주 빔의 폭이 감소하게 되어 안테나의 지향성이 향상된다. 그리고 인접 안테나 소자들의 간격이 RF 파장의 절반 길이의 정수배, 즉 N 배이면, 가시영역(visible region)에 N 개의 주 로브(major lobe)가 나타난다. 이 경우에는 OTTD로 부터 인접 안테나 소자들에 공급되는 시간지연 차이가 식 (2)에 의해 다음과 같다.

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

이 식으로부터 인접 안테나 소자들에 공급되는 시간지연 차이는 인접 안테나 소자들의 간격이 증가할수록 늘어나는 것을 알 수 있다.

그림 1은 본 논문에서 제안한 평면 PAA용 OTTD에 대한 개념도이다. p -채널 다파장 광원의 CW 광 출력 신호들 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$)은 광변조기 (Electro-Optic Modulator; EOM)에서 RF신호에 의해 변조된 후 WDOTTD에 입력된다. 이 OTTD에서는 스위치 제어기의 명령에 따라 파장 별로 서로 다른 시간지연을 얻게 되며, 이는 PAA의 방위각을 결정하는데 이용된다. WDOTTD의 출력은 WIOTTD에 입력된다. 이 OTTD에 입력된 모든 파장 신호는 스위치 제어기의 제어에 의해 동일한 시간 지연을 얻게 되며, 이 시간 지연은 PAA의 고도각을 결정하는데 이용된다. q -개의 지연 선로 출력 각각은 p -채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리되어 광검출기에 의해 전기적 신호로 변환되며, RF 증폭기에 의해 증폭된 다음, $p \times q$ 2차원 PAA에 입력된다.

그림 2(a)와 (b)는 각각 WDOTTD와 WIOTTD의 구조를 나타내고 있다. 그림 2(a)의 WDOTTD는 MWOC PAA에 사용한 PDM과 동일한 구조로서 입력단과 출력단에 연결되어 있는 2개의 1×2 광 결합기, m 개의 써큘레이터, $(m-1)$ 개의 2×2 광 스위치, 그리고 $p \times m$ 개의 FBG로 구성된다. EOM의 출력 신호는 WDOTTD 입력단의 1×2 광 결합기를 통해 FBG 프리즘으로 입력된다. 열 번호 m 이 하나씩 증가할 때마다 FBG의 중심과 중심사이 거리가 $2^{m-1} \lambda_0$ 씩 증가되도록 구성되어 있는 FBG 프리즘에서는 주사 빔의 방위각에 따라 광 스위치들이 절체 되어 주사 빔의 개수가 2^m 개의 경우의

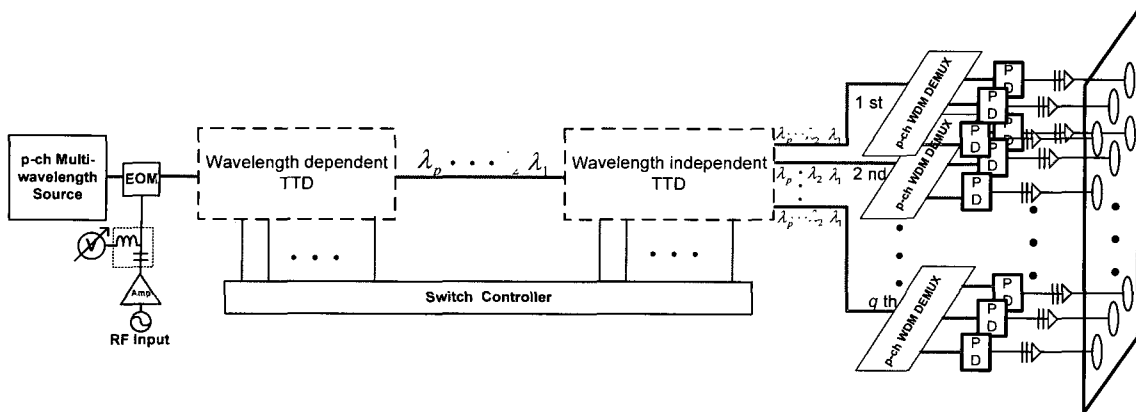


그림 1. 제안된 평면 PAA용 OTTD의 개념도.

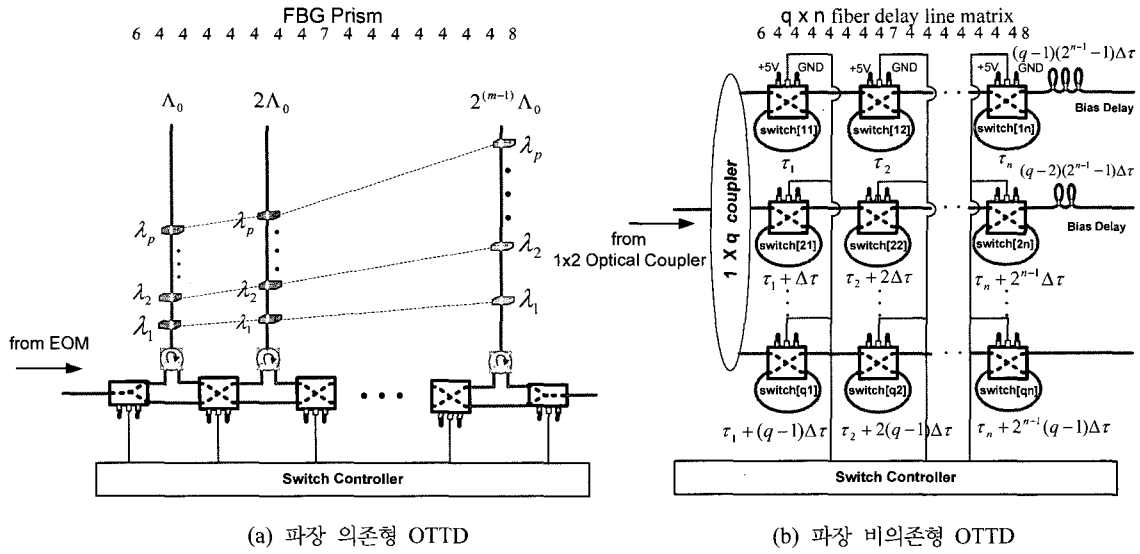


그림 2. FBG 프리즘을 이용한 WDOTTD와 2x2 광 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 WIOTTD.

수를 갖도록 FBG 지연선로가 선택된다. 예를 들어, 첫 번째 FBG 지연선로가 선택된 경우에는 파장 신호 간의 시간 지연 차이가 $2^0 \cdot 2\Lambda_0 n_{eff}/c = \Delta T$ 이 되고, 두 번째 지연선로의 경우에는 $2^1 \cdot 2\Lambda_0 n_{eff}/c = 2\Delta T$, 그리고 첫 번째와 두 번째 FBG 지연선로가 모두 선택된 경우에는 $(2^0 + 2^1) \cdot 2\Lambda_0 n_{eff}/c = 3\Delta T$ 이 된다. 이와 같은 방식으로 m 번째 FBG 지연선로의 경우에는 파장 신호간의 시간 지연차이가 $2^{m-1} \cdot 2\Lambda_0 n_{eff}/c = 2^{m-1} \Delta T$ 이므로, $p \times m$ FBG 프리즘으로부터 얻을 수 있는 주사 각의 해상도는 m -비트가 된다. PAA의 최대 빔 주사각이 90° 인 경우에 인접 안테나에 공급해야 할 최대 시간지연은 식 (6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_{\max} = -N \frac{1}{2f_{RF}} \quad (7)$$

이에 해당하는 지연선로의 길이 차이 $2\Delta L_{\max}$ (모든 FBG 지연선로 중심과 중심사이의 왕복 거리의 합= $(2^0 + 2^1 + 2^2 + \dots + 2^{m-1}) \cdot 2\Lambda_0$)는 다음과 같다.

$$2\Delta L_{\max} = \Delta T_{\max} \cdot v \quad (8)$$

여기서, v 는 광섬유에서 빛의 속도이다. 원하는 방위각을 위해 시간 지연된 파장 신호들은 차례대로 $1 \times q$ 광 결합기에 의해 분리된 후 WIOTTD에 입력된다.

그림 2(b)의 WIOTTD는 최근 본 연구팀이 제안한 구조로서^[8] $1 \times q$ 광 결합기, 2×2 광 스위치의 크로스 포트에 광섬유 지연선로를 연결한 $q \times n$ 광섬유 지연선로 행렬, 그리고 일련의 바이어스 광섬유 지연선로(bias delay)로 구성된다^[8-9]. $q \times n$ 광섬유 지연선로 행렬의 각 열에 있는 2×2 광 스위치들은 동시에 바(BAR) 또는 크로스(CROSS)로 절체 된다. 광 스위치의 크로스 포트에 연결되는 광섬유 지연선로의 길이는 첫

번째 광 스위치 열의 경우에는, 행의 번호가 하나씩 증가할 때마다 단위 시간지연 $\Delta \tau$ 에 해당하는 광섬유 길이만큼 증가하여, 마지막 q 번째 행에는 첫 번째 행보다 $(q-1)\Delta \tau$ 만큼 긴 광섬유 지연선로가 연결된다. 두 번째 열의 경우에는 시간지연의 증가가 $2\Delta \tau$ 씩 이루어지며, 이와 같은 방식으로 n 번째 열에서의 시간지연은 $2^{n-1} \Delta \tau$ 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 $(q-1)(2^{n-1}-1)\Delta \tau$ 에 해당하는 광섬유가, 그리고 행의 번호가 하나씩 증가할 때마다 $(2^{n-1}-1)\Delta \tau$ 씩 감소하는 광섬유가 연결된다. 따라서 $q \times n$ 광섬유 지연선로 행렬로부터 얻을 수 있는 주사 각의 해상도는 n -비트가 된다. 이 때, PAA의 최대 빔 주사각이 $\theta_0 = \pm 90^\circ$ 인 경우에 인접 안테나에 공급해야 할 최대 시간지연은 식 (6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \tau_{\max} = \mp N \frac{1}{2f_{RF}} \quad (9)$$

이에 해당하는 광섬유 지연선로 길이 차이는 다음과 같다.

$$\Delta L_{\max} = N \frac{c}{n_{eff} 2f_{RF}} \quad (10)$$

본 논문에서는 WDOTTD는 방위각 방향의 빔 주사에, 그리고 WIOTTD는 고도각 방향의 빔 주사에 이용하였다.

III. 10-GHz 평면 PAA용 2-비트 x 4-비트 광 TTD 제작 방법 및 실험 결과

그림 3은 10-GHz 평면 PAA용 2-비트 x 4-비트 OTTD의 실험 구성도이다. 본 실험에서는 응답속도가 200 μs 인 2×2 광

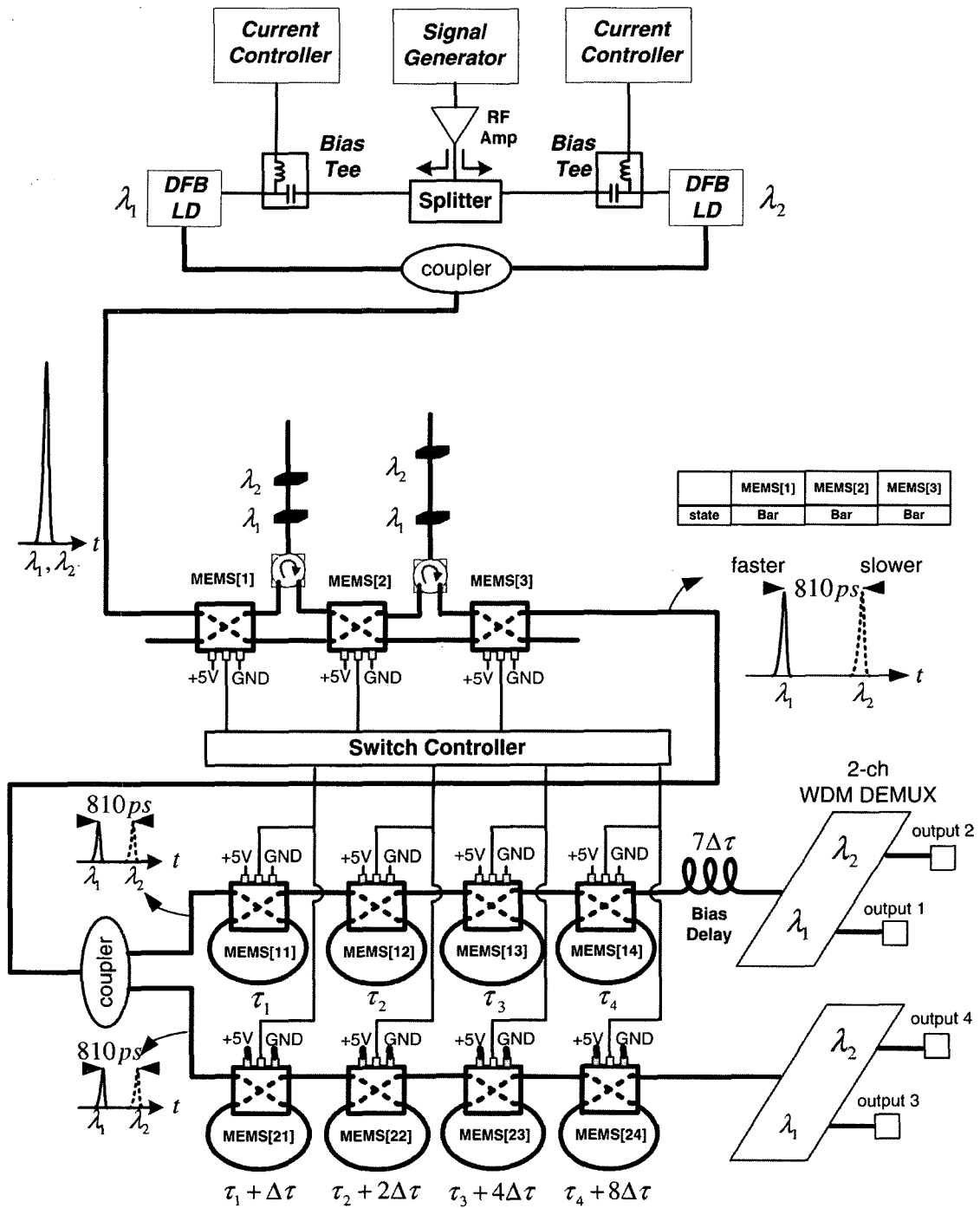


그림 3. 10-GHz 평면 PAA용 2-비트×4-비트 OTTD의 실험 구성도.

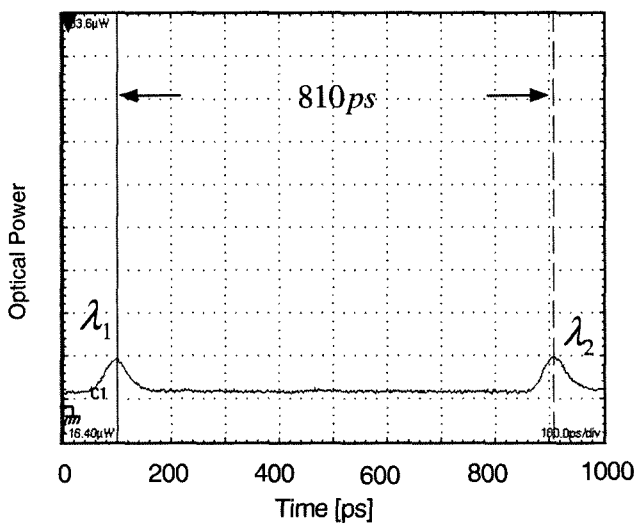
MEMS 스위치를 사용하였다. 이득 스위칭된 DFB(Distributed Feed-Back) LD 1($\lambda_1=1553.33$ nm)과 LD 2($\lambda_2=1556.55$ nm)로부터 반치전폭(FWHM)이 각각 53 ps와 43 ps인 광 펄스를 발생시킨 후, 이 들을 1×2 광섬유 결합기로 결합하여 WDOTTD 인 FBG 프리즘에 입력시켰다. FBG 프리즘은 2개의 FBG 지연선으로 구성되어 있고, 첫 번째 FBG 지연선로의 격자 중심 간격은 약 3.42 cm, 두 번째 FBG 지연선로의 격자의 중

심 간격은 약 4.68 cm 로서 각각 342 ps 와 468 ps 만큼의 왕복 시간지연 차이를 얻을 수 있다. MEMS[1], MEMS[2], MEMS[3] 스위치 상태가 각각 BAR-BAR-BAR 인 경우는 첫 번째와 두 번째 FBG 지연선로에 의하여 두 파장 펄스의 간격이 810 ps 로 측정되었고, 손실은 MEMS 스위치, 두 개의 써큘레이터, 그리고 첫 번째 FBG 지연선로($\lambda_1=5.55$ dB, $\lambda_2=2.96$ dB), 두 번째 FBG 지연선로($\lambda_1=3.02$ dB, $\lambda_2=4.20$ dB)

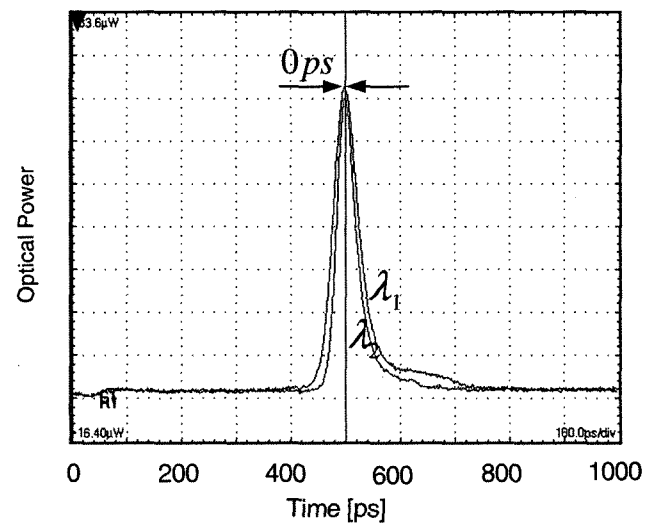
에 의해 λ_1 신호는 13.07 dB, λ_2 신호는 11.66 dB의 손실이 발생하였다. BAR-CROSS-CROSS 인 경우는 첫 번째 FBG 지연선로에 의하여 펄스의 간격이 342 ps로 측정되었으며, 손실은 MEMS 스위치에 의한 손실과 한 개의 써큘레이터 손실과 첫 번째 FBG 지연선로 손실을 합쳐 λ_1 신호는 9.34 dB, λ_2 신호는 6.75 dB로 나타났다. CROSS-CROSS-BAR 인 경우는 두 번째 FBG 지연선로에 의하여 펄스의 간격이 468 ps, 그리고 손실은 MEMS 스위치에 의한 손실과 한 개의 써큘레이터 손실과 두 번째 FBG 지연선로 손실을 합쳐 λ_1 신호는 6.57 dB, λ_2 신호는 7.75 dB로 측정되었다. 마지막으로 CROSS-BAR-CROSS 인 경우는 아무런 FBG 지연선로도 통과하지 않기 때문에 두 파장 신호의 시간 차이는 발생하지 않았고, 손실은 MEMS 스위치에 의해서만 결정되었다. 그림 3은 WDOTTD의 MEMS 스위치 상태가 모두 BAR인 경우를 예로 보이고 있는데, λ_1 신호가 λ_2 신호보다 810 ps 앞서 출력되고 있다. WDOTTD의 출력은 WIOTTD의 입력에 위치한 1×2 광섬유 결합기에 의해 두 개의 동일한 광 신호로 분리된 다음, 2×4 광섬유 지연선로 행렬에 입력된다. 광섬유 지연선로 행렬을 구성하는 MEMS 스위치들은 열(column) 단위로 동시에 BAR 또는 CROSS로 절체 되기 때문에 16가지, 즉 4-비트, 의 시간 지연을 얻을 수 있다. 첫 번째 열만 CROSS이고 나머지가 모두 BAR인 경우에는, 두 번째 행의 지연선로가 첫 번째 행의 지연선로보다 시간 지연이 $\Delta\tau$ 더 발생되며, 그리고 두 번째, 세 번째, 네 번째 열 만이 CROSS 상태인 경우는 $2\Delta\tau$, $4\Delta\tau$, 그리고 $8\Delta\tau$ 의 시간 지연이 발생된다^[7]. 주사 빔의 고도 각에 따라 시간 지연을 얻은 광 신호는 첫 번째 행에서는 $7\Delta\tau$ 그리고 두 번째 행에서는 0의 시간 지연에 해당하는 바이어스 광섬유를 통과한 다음, 주사 빔의 방위각에 따른 시간 지연을 얻기 위해 각각 2-채널 WDM 역다중화기에 의해 파장별로 분리된다^[7].

$f_{RF} = 10$ GHz로 동작하는 PAA 시스템을 위한 WDOTTD와 WIOTTD에 의해 빔의 최대 주사 각도가 ϕ_{\parallel} 방위각, W-D = 90° , θ_{\parallel} 고도, W-I = $\pm 90^\circ$ 인 평면 위상 배열 안테나의 인접 안테나 소자들에 공급되어야 할 최대 시간 지연은 식 (7)과 (9)로부터 $\Delta T_{\max} = -N_{WD} \cdot 50$ ps, $\Delta\tau_{\max} = \mp N_{WI} \cdot 50$ ps 로 구할 수 있다. 안테나 소자들의 간격을 $\lambda_{RF}/2$ 로 하는 경우, 즉 $N_{WD}=1$, $N_{WI}=1$ 이면, WIOTTD는 최대 시간 지연이 $\Delta\tau_{\max} = \mp 50$ ps 가 되어 4-비트로 동작하는 OTTD에 대한 각 열의 시간 지연 차이를 각각 6 ps, 12 ps, 24 ps, 48 ps 로 설정하였고, 이에 해당하는 광섬유 지연선로 길이들은 1.2 mm, 2.4 mm, 4.8 mm, 9.6 mm 로서 1 ps와 0.2 mm 이내의 오차를 갖도록 제작하였다. 그러나 FBG 프리즘으로 구성되어 있는 WDOTTD에서는 FBG의 최소한의 격자 길이가 약 10 mm 이고, 격자간의 최소 간격이 있어야 하기 때문에 인접 안테나 소자의 간격을 $\lambda_{RF}/2$ 로 할 경우 원하는 방향으로 단일 주 빔을 얻기 어렵다. 제작된 FBG WDOTTD의 최대 시간 지연이 $\Delta T_{\max} = -810$ ps 으로 측정되었기 때문에, 10-GHz PAA 시스템을 위해서는 인접 안테나 소자들의 간격을 RF 파장의 절반 길이의 16 배 ($N_{WD}=16$) 인 $d_{WD} = 16 \cdot \lambda_{RF} / 2$ 로 증가시켰다.

그림 4(a)는 WIOTTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태일 때, WDOTTD의 광 MEMS 스위치를 BAR-BAR-BAR로 하고 λ_1 신호와 λ_2 신호의 시간 지연 차이를 측정할 결과이고, 그림 4(b)는 WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 CROSS-BAR-CROSS 일 때의 결과이다. 두 가지 경우 모두 W-I 광 TTD의 첫 번째 행에 연결된 2-채널 WDM 파장 역다중화기의 입력포트를 디지털 오실로스코프에 연결하여 시간 지연을 측정하였다. 이 결과들은 WIOTTD의 두 번째 행을 이용하여 측정한 시간 지연 차이와 동일하다. 그림 4(a)는 WDOTTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태이므로 첫 번째 FBG 지

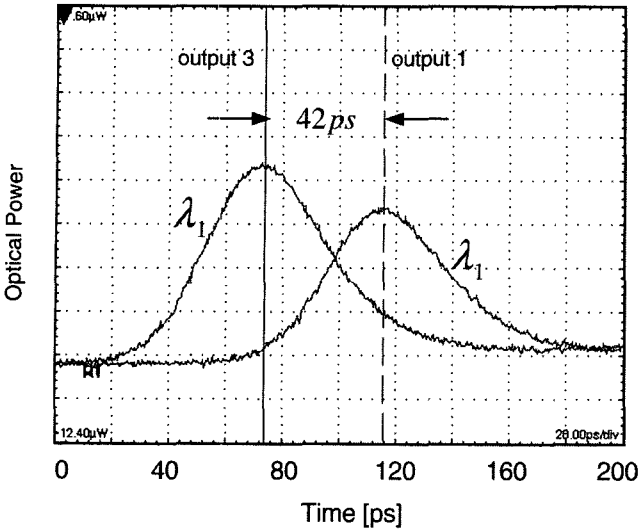


(a) WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 BAR-BAR-BAR 상태인 경우

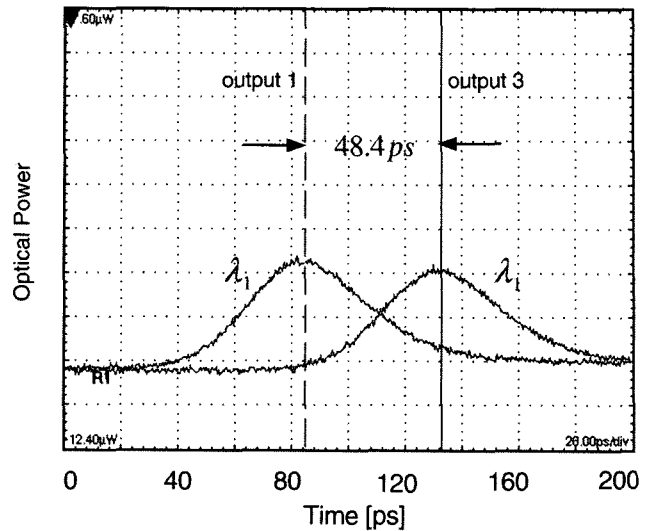


(b) WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 CROSS-BAR-CROSS 상태인 경우

그림 4. WDOTTD의 시간 지연 차이.



(a) WIOTTD의 광 MEMS 스위치가 모두 BAR 상태인 경우



(b) WIOTTD의 광 MEMS 스위치가 모두 CROSS 상태인 경우

그림 5. WIOTTD의 시간 지연 차이.

표 1. WIOTTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태일 때, WDOTTD에 대한 광 MEMS 스위치 상태와 시간 지연 차이 및 삽입손실.

스위치 상태			시간지연		삽입손실	
MEMS[1]	MEMS[2]	MEMS[3]	실험치 [ps]		λ_1 신호 [dB]	λ_2 신호 [dB]
			output 1 & output 2	output 3 & output 4		
BAR	BAR	BAR	810	810	13.07	11.66
CROSS	CROSS	BAR	468	468	6.57	7.75
BAR	CROSS	CROSS	342	342	9.34	6.75
CROSS	BAR	CROSS	0	0	2.62	2.62

연선로와 두 번째 FBG 지연선로에 의해 시간 지연 차이가 발생하여, 결과적으로 λ_1 신호가 λ_2 신호보다 810 ps 빠르다. 그림 4(b)는 WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 CROSS-BAR-CROSS 상태이므로 FBG들을 통과하지 않으므로 λ_1 신호와 λ_2 신호간의 시간 지연 차이가 없음을 보이고 있다. 그림 4(a)의 신호들이 그림 4(b)의 신호들에 비해 λ_1 신호는 약 10.45 dB, λ_2 신호는 약 9.04 dB 작은 이유는 FBG 손실 때문이다.

그림 5(a)는 WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 CROSS-BAR-CROSS 상태일 때, WIOTTD의 모든 광 MEMS 스위치를 BAR로 하고 WIOTTD의 첫 번째 행과 두 번째 행의 2-채널 WDM 파장 역다중화기 출력인 output 1(λ_1 신호)과 output 3(λ_2 신호)의 시간 지연 차이를 측정된 결과이고, 그림 5(b)는 WIOTTD의 모든 광 MEMS 스위치를 CROSS로 하고 output 1(λ_1 신호)과 output 3(λ_2 신호)의 시간 지연 차이를 측정된 결과이다. 이 결과들은 output 2(λ_2 신호)와 output 4(λ_2 신호)의 시간 지연 차이와 동일하다. 그림 5(a)는 WIOTTD의 모든 광 MEMS 스위치가 BAR 상태이므로 바이어스 광섬유

지연 선로에 의한 시간 지연 차이만이 발생하여 $-7\Delta\tau$, 즉 -42 ps의 시간 지연이 측정되었다. 그림 5(b)는 W-I 광 TTD의 모든 광 MEMS 스위치가 CROSS 상태이므로 모든 열에 의한 시간 지연 차이 $15\Delta\tau$ 와 바이어스 광섬유 지연 선로에 의한 시간 지연 차이 $-7\Delta\tau$ 가 더해진 $8\Delta\tau$ 으로서 측정 결과는 48.4 ps로 나타났다. WIOTTD의 시간 지연은 한 개의 DFB LD를 통해 이득 스위칭으로 발생된 신호를 사용하여 측정된 것이며, FBG 프리즘을 통과하지 않기 때문에 신호 크기의 차이가 크게 발생하지 않았다. 그러나 그림 5(b)의 경우가 그림 5(a)의 경우에 비해 output 1은 약 1.60 dB, output 3은 약 2.56 dB 낮게 출력되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 그림 5(b)의 경우가 그림 5(a)의 경우보다 4개의 MEMS 스위치를 더 통과하였기 때문이다.

표 1과 표 2에는 방위각과 고도 각의 빔 주사각을 구하기 위한 WDOTTD와 WIOTTD에서의 광 MEMS 스위치 상태와 그에 해당하는 시간지연 차이와 삽입손실 측정치를 정리하였다. 표 1의 WDOTTD의 실험 결과, 인접 안테나에 입력

표 2. WDOTTD의 광 MEMS 스위치가 CROSS-BAR-CROSS 상태일 때, WIO TTD에 대한 광 MEMS 스위치 상태와 시간 지연 차이 및 삽입손실.

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		
BAR	BAR	BAR	BAR	$-7\Delta\tau$	-42	-42	-42	1.60	1.40
CROSS	BAR	BAR	BAR	$-6\Delta\tau$	-36	-36	-35	2.08	1.67
BAR	CROSS	BAR	BAR	$-5\Delta\tau$	-30	-30	-30	2.00	1.88
CROSS	CROSS	BAR	BAR	$-4\Delta\tau$	-24	-24	-24	2.48	2.15
BAR	BAR	CROSS	BAR	$-3\Delta\tau$	-18	-18	-18	2.03	1.98
CROSS	BAR	CROSS	BAR	$-2\Delta\tau$	-12	-12	-12	2.51	2.25
BAR	CROSS	CROSS	BAR	$-1\Delta\tau$	-6	-6	-6	2.43	2.46
CROSS	CROSS	CROSS	BAR	$0\Delta\tau$	0	0	0	2.91	2.73
BAR	BAR	BAR	CROSS	$+1\Delta\tau$	+6	+6	+6	1.89	2.63
CROSS	BAR	BAR	CROSS	$+2\Delta\tau$	+12	+12	+12	2.37	2.90
BAR	CROSS	BAR	CROSS	$+3\Delta\tau$	+18	+18	+19	2.29	3.11
CROSS	CROSS	BAR	CROSS	$+4\Delta\tau$	+24	+24	+24	2.77	3.38
BAR	BAR	CROSS	CROSS	$+5\Delta\tau$	+30	+30	+30	2.32	3.21
CROSS	BAR	CROSS	CROSS	$+6\Delta\tau$	+36	+36	+36	2.80	3.48
BAR	CROSS	CROSS	CROSS	$+7\Delta\tau$	+42	+42	+43	2.72	3.69
CROSS	CROSS	CROSS	CROSS	$+8\Delta\tau$	+48	+48	+48	3.20	3.96

되어야 하는 최대 시간 지연이 810 ps이기 때문에 10-GHz PAA 시스템 구동을 위해서는 인접 안테나 소자 사이의 간격을 $\lambda_{RF}/2$, 시간 차이로는 50ps, 의 16배로 하였다. 주사 빔의 각도가 증가할수록 더욱 큰 시간지연을 발생시키기 위해 보다 많은 FBG 지연선로를 통과하여야 하므로 삽입 손실이 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 제작된 FBG 지연선로의 특성이 파장에 따라 크게 다르기 때문에 λ_1 신호와 λ_2 신호의 삽입손실의 차이가 크게 발생하였다. 그러나 광 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로로 구성된 WDOTTD의 경우에는 광섬유 지연선로 길이 차이만을 이용하여 시간 지연을 조절하는 장점 때문에 제작이 용이하였으며, 시간 지연 오차는 1 ps 미만으로 측정되었다. 또한 파장에 따른 삽입 손실의 변화가 작은 광소자를 사용하였기 때문에 상대적으로 손실이 작게 나타났다.

IV. 위상 배열 안테나 시뮬레이션

본 논문에서 제작된 2차원 광 TTD에 의해 구동되는 평면 PAA의 성능을 분석하기 위해서 CST(Computer Simulation Technology) 프로그램을 사용하여 그림 6과 같은 10-GHz 평면 PAA를 위한 Probe Feed 단위 패치 안테나를 설계하였다. 안테나 설계 파라미터는 다음과 같다. 테프론 기판을 가정하여 유전율 ϵ_r 은 2.5, 유전체 두께는 0.7864 mm, 패치와 접지면의 두께는 각각 0.035 mm로 결정하였다. 패치 한 변의 길

이는 다음 식을 사용하여 초기 값을 설정한 후 튜닝 과정을 통해 8.28 mm로 결정하였다. 또한, 공진 주파수에서 반사 손실을 감소시키기 위하여 Feed Point의 위치는 중앙에서 1.35 mm 만큼 이동하여 위치시켰다.

$$L = W = 0.49 \times \frac{\lambda_{RF}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

그림 6은 평면 8×8 직사각형 PAA의 방사패턴 시뮬레이션 일레이드이다. 그림 6(a)는 WDOTTD와 WIO TTD의 시간 지연이 각각 $\Delta T=0ps$ (방위각 = 0°)와 $\Delta\tau=0ps$ (고도 각= 0°)일 때, $d_{WD}=16 \cdot \lambda_{RF}/2$ 와 $d_{WI}=\lambda_{RF}/2$ 인 평면 8×8 직사각형 PAA의 3차원 방사 패턴이다. 그림 6(b)는 broadside에서 본 방사 패턴이고, 그림 6(c)는 방위각 방사 패턴, 그리고 그림 6(d)는 고도각 방사 패턴을 나타내고 있다. 방위각과 고도각이 모두 0° 이고, $N_{WD}=16$, $N_{WI}=1$ 인 경우이기 때문에 방위각 방사 패턴은 16개의 주 로브(1개의 주엽과 15개의 그레이팅 로브)와 96개의 부엽이 발생하고, 고도 각 방사패턴에서는 1개의 주엽과 6개의 부엽이 발생하였다.

그림 7은 WIO TTD의 $\Delta\tau=0ps$ 일 때, 2-비트 WDOTTD의 ΔT 에 의해 얻을 수 있는 평면 8×8 직사각형 PAA의 방사각 방사 패턴이다. 4가지 경우 모두 16개의 주 로브와 96개의 부엽이 존재하며, 주엽의 최대 이득은 23.3 dBi~24.4 dBi, 반 전력 빔 폭은 모두 0.8o, Side Lobe Level (SLL)은 -1.4 dB~-1.0 dB로 측정되었다.

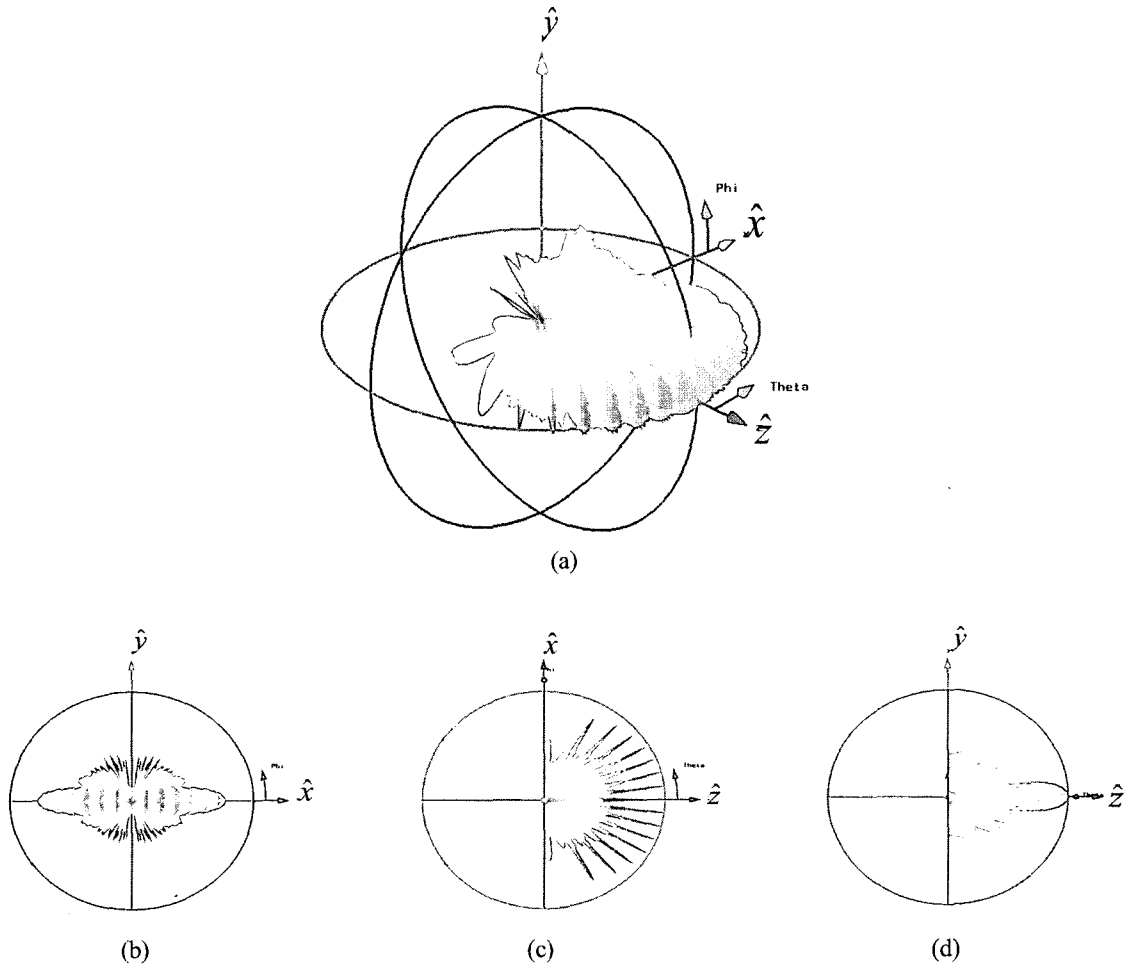


그림 6. 10-GHz 평면 8×8 직사각형 PAA의 인접 안테나 소자 간격이 각각 $d_{WD} = 8\lambda_{RF}$, $d_{WJ} = \lambda_{RF}/2$ 일 때, 방위각 = 0°, 고도 각 = 0°에 대한 (a) 3차원 방사패턴, (b) broadside에서 본 방사패턴, (c) 방위각 방사패턴, (d) 고도각 방사패턴.

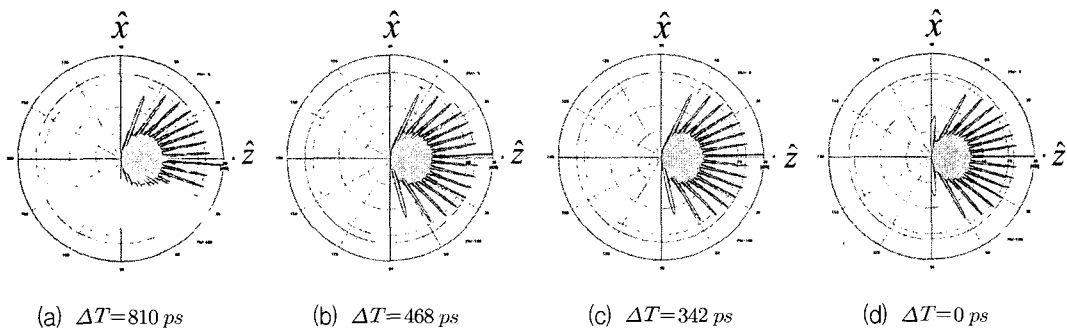


그림 7. WIOTTD의 $\Delta\tau = 0\text{ ps}$ 일 때, WDOTTD의 ΔT 에 의해 얻을 수 있는 평면 8×8 직사각형 PAA의 방사각 방사 패턴.

표 3은 WIOTTD의 $\Delta\tau = 0\text{ ps}$ 일 때, 2-비트 WDOTTD의 ΔT 각각에 대하여 평면 8×8 직사각형 PAA의 16개 주 로브의 방사 각도이다. ΔT 가 감소할수록 방사 빔의 각도는 점점 감소하였다. 그리고 4가지 경우 모두 8번째 로브의 방향으로 방사되는 1개의 주 로브와 6개의 부엽의 빔 폭은 약 7.2° 이

고 각도가 ± 방향으로 증가할수록 주 로브의 방사 각도가 arcsine 형태로 증가하기 때문에 그레이팅 로브와 그에 해당하는 부엽의 빔 폭은 증가되었다.

그림 8은 WDOTTD의 $\Delta T = 0\text{ ps}$ 일 때, 4-비트 WIOTTD의 ΔT 에 의해 얻을 수 있는 평면 8×8 직사각형 PAA의 고도각

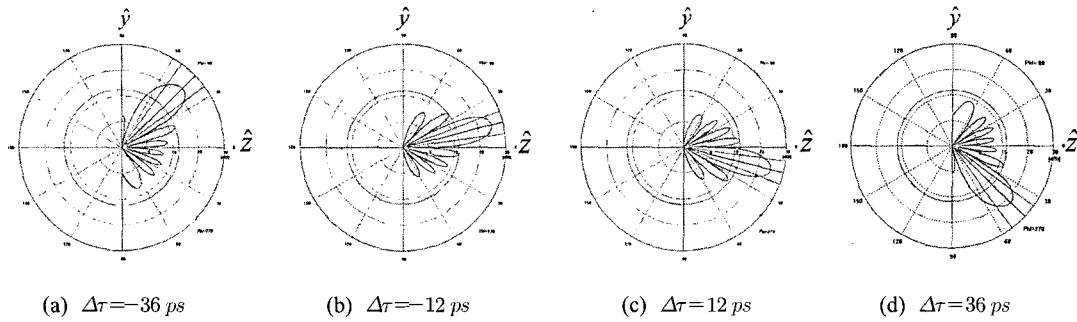


그림 8. WDOTTD의 $\Delta T=0 ps$ 일 때, WIOTTD의 $\Delta\tau$ 에 의해 얻을 수 있는 평면 8x8 직사각형 PAA의 고도각 방사 패턴.

표 3. WIOTTD의 $\Delta\tau=0 ps$ 일 때, WDOTTD의 ΔT 에 의해 x-z 평면으로 방사되는 평면 8x8 직사각형 PAA의 16개 주 로브의 방사 각도

WDOTTD의 ΔT	810[ps]	468[ps]	342[ps]	0[ps]
1번째 로브	69.4°	65.6°	64.3°	60.9°
2번째 로브	54.3°	51.8°	50.7°	48.5°
3번째 로브	43.4°	41.4°	40.6°	38.6°
4번째 로브	34.2°	32.4°	31.8°	30.0°
5번째 로브	25.9°	24.3°	23.7°	22.0°
6번째 로브	18.2°	16.6°	16.1°	14.5°
7번째 로브	10.8°	9.3°	8.7°	7.2°
8번째 로브	3.6°	2.1°	1.5°	0°
9번째 로브	-3.6°	-5.1°	-5.6°	-7.2°
10번째 로브	-10.8°	-12.3°	-12.9°	-14.5°
11번째 로브	-18.2°	-19.8°	-20.4°	-22.0°
12번째 로브	-25.9°	-27.6°	-28.2°	-30.0°
13번째 로브	-34.2°	-36.0°	-36.7°	-38.6°
14번째 로브	-43.4°	-45.5°	-46.3°	-48.5°
15번째 로브	-54.3°	-56.9°	-57.9°	-60.9°
16번째 로브	-69.4°	-74.1°	-76.3°	-84.5°, 84.5°

표 4. WDOTTD의 $\Delta T=0 ps$ 일 때, WIOTTD의 $\Delta\tau$ 에 의해 y-z 평면으로 방사되는 주 빔의 최대 이득을 얻은 각도 및 최대 이득과 반 전력 빔 폭과 SLL.

WIOTTD의 $\Delta\tau$	최대이득을 얻은 각도 및 이득	반 전력 빔 폭	SLL[dB]
-7 $\Delta\tau$	55.3°, 21.7[dBi]	26.3°	-8.5
-6 $\Delta\tau$	43.9°, 23.0[dBi]	18.0°	-10.5
-5 $\Delta\tau$	35.5°, 24.3[dBi]	15.2°	-12.1
-4 $\Delta\tau$	28.1°, 25.0[dBi]	13.9°	-13.4
-3 $\Delta\tau$	21.2°, 25.4[dBi]	13.3°	-14.0
-2 $\Delta\tau$	14.4°, 25.5[dBi]	13.0°	-13.6
-1 $\Delta\tau$	7.4°, 24.3[dBi]	13.0°	-12.2
0 $\Delta\tau$	0.2°, 23.3[dBi]	13.1°	-11.6
+1 $\Delta\tau$	-7.1°, 23.9[dBi]	13.1°	-11.9
+2 $\Delta\tau$	-14.2°, 24.8[dBi]	13.1°	-12.7
+3 $\Delta\tau$	-21.1°, 24.7[dBi]	13.3°	-13.2
+4 $\Delta\tau$	-28.1°, 24.3[dBi]	13.9°	-13.0
+5 $\Delta\tau$	-35.4°, 23.5[dBi]	15.1°	-11.9
+6 $\Delta\tau$	-43.7°, 22.1[dBi]	17.6°	-10.4
+7 $\Delta\tau$	-54.5°, 20.5[dBi]	25.0°	-5.5
+8 $\Delta\tau$	-90.0°, 21.5[dBi]	21.7°	-1.6

방사 패턴이다. 안테나 소자 간격이 $d_{WT} = \lambda_{RF} / 2$ 이므로 1개의 주엽과 6개의 부엽이 존재한다. 주엽의 최대 이득은 21.5 dBi ~ 25.5 dBi, 반 전력 빔 폭은 13.0° ~ 26.3°, SLL은 -1.6 dB ~ -14.0 dB로 측정되었다.

WDOTTD의 $\Delta T=0 ps$ 일 때, WIOTTD의 $\Delta\tau$ 에 의해 y-z 평면으로 방사되는 주 빔의 최대 이득을 얻은 각도 및 최대 이득, 반 전력 빔 폭, SLL을 표 4에 정리하였다. Broadside에 가깝게 빔이 주사되면, 이득은 증가하고, 반 전력 빔 폭과 SLL은 감소한다. 주사 각이 +8 $\Delta\tau$ 일 때에는 -90° 방향의 주 로브와 +90° 방향의 그레이팅 로브가 모두 가시영역에 존재하기 때문에 SLL 값이 크게 증가하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 FBG 프리즘을 이용한 파장 의존형 OTTD와 2x2 광 스위치의 크로스 포트에 광섬유 지연선로가 연결된 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 파장 비의존형 OTTD로 구성된 2차원 PAA용 OTTD의 구조를 제안하였다. 최대 시간 지연 차이가 810 ps인 WDOTTD와 ± 50 ps인 WIOTTD를 결합한 평면 PAA용 OTTD를 제작하였고, 모든 주사각에 대해서 시간 지연과 삽입손실을 측정하였다. 광섬유 지연선로 행렬을 이용한 4-비트 WIOTTD의 시간 지연에 대한 오차는 ± 1 ps이하로 측정되었다. 주된 삽입 손실은 MEMS 스위

치에 의해 발생했으며, 최저 1.40 dB에서 최대 3.96 dB의 범위로 나타났다. WDOTTD에서는 FBG를 직렬로 연결한 지연선로의 손실이 가장 큰 영향을 미쳤으며, 삽입 손실의 범위는 2.62 dB에서 13.07 dB로 나타났다. 제안된 FBG 프리즘 구조는 직렬 연결된 FBG들로 구성되므로, 격자간 최소 간격에 제한이 발생하기 때문에 10-GHz에서 사용하기 위하여 안테나 소자 간격을 RF 파장 절반 길이의 16배로 하였다. 제작된 광 TTD의 성능을 분석하기 위하여 방위각 방향으로 안테나 소자 간격을 RF 파장 절반 길이의 16배, 고도각 방향으로 안테나 소자 간격을 RF 파장 절반 길이를 갖는 10-GHz 평면 8×8 직사각형 PAA에 대하여 방사 패턴을 시뮬레이션으로 측정하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10231-0) 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] Dannis T. K. Tong and Ming C. Wu, "Multiwavelength Optically Controlled Phased-Array Antennas," *IEEE MTT*, vol. 46, pp. 108-115, Jan. 1998.
- [7] 정병민, 김성철, 신종덕, 김부균, "2차원 X-밴드 위상 배열 안테나용 광 실시간 지연선로," *한국광학회지*, 제16권, 제3호, pp. 287-294, 2005.
- [8] 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.
- [9] 정병민, 윤영민, 신종덕, 김부균, "2×2 광 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 위상배열 안테나용 4-비트 광 실시간 지연선로," *한국광학회지*, 제15권, 제4호, pp. 385-390, 2004.

Optical True Time-Delay for Planar Phased Array Antennas Composed of a FBG Prism and a Fiber Delay Lines Matrix

Byung-Min Jung, Jong-Dug Shin[†] and Boo-Gyoun Kim

School of Electronic Engineering, Soongsil University, 511 Sangdo-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-743, Korea

[†]*E-mail: jdshin@ssu.ac.kr*

(Received December 12, 2005, Revised manuscript January 25, 2006)

In this paper, we proposed an optical true time-delay (TTD) for planar phased array antennas (PAAs), which is composed of a wavelength-dependent optical true time delay (WDOTTD) followed by a wavelength-independent optical true time delay (WIOTTD). The WDOTTD is a fiber Bragg gratings (FBGs) prism and the WDOTTD is a fiber delay-lines matrix of which each component consists of a certain length of fiber connected to cross-ports of a 2×2 MEMS switch. A 10-GHz 2-bit×4-bit two-dimensional optical TTD has been fabricated by cascading a WDOTTD with a maximum time delay of 810 ps to a WIOTTD of ± 50 ps. Time delay and insertion loss for each radiation angle have been measured. Time delay error for the WIOTTD has been measured to be less than ± 1 ps. We have also designed a two-dimensional 10-GHz PAA composed of 8×8 microstrip patch antenna elements driven by the proposed TTD. The radiation patterns of this PAA have been obtained by simulation and analyzed.

OCIS Codes : 280.5110, 220.4830, 350.4010, 050.1950.