

광 2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 10 GHz 선형 위상배열 안테나용 광 실시간 지연선로

이백송 · 신종덕[†] · 김부균

승실대학교 정보통신전자공학부

Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

(2003년 5월 14일 받음, 2003년 7월 1일 수정본 받음)

본 논문에서는 서로 다른 길이의 광섬유 지연선로를 광 2×2 MEMS 스위치로 선택하여 위상 배열 안테나의 각 안테나 소자에 급전되는 RF 신호의 위상을 고속으로 제어할 수 있는 광 실시간 지연선로의 구조를 제안하였다. RF 신호의 주사 방향이 8개인 10 GHz 선형 위상 배열 안테나용 광 실시간 지연선로를 구현하였으며, 실험 결과 최대 시간 지연 오차가 0.2 ps 이하, 즉 최대 주사 각 오차 0.84°로 측정되었다. 또한 제안된 실시간 지연선로에 의해 구동되는 8개의 마이크로 스트립 패치 안테나 소자로 구성된 10 GHz용 선형 위상배열 안테나를 설계하였고, 시뮬레이션을 이용하여 이 안테나의 방사 패턴을 분석하였다.

주제어 : phased array antenna, true time-delay, optical MEMS (micro-electro-mechanical system) switch.

I. 서 론

위성통신 및 이동통신에서 안테나 신호의 송수신 성능을 향상시키기 위한 노력이 계속되어 왔다. 그 중에서 안테나의 지향성을 높이기 위하여 다수 개의 동형 안테나 소자를 선형적으로 또는 2차원 평면상에 배열하여 안테나를 기계적으로 회전시키지 않고도, 고정된 안테나로부터 방사되는 전파의 위상을 전자적으로 변화시켜서 방사 빔을 주사하는 방법인 위상배열안테나(Phased Array Antenna, PAA)를 널리 사용하고 있다. 현재 PAA는 운항중인 항공기에서 통신 서비스를 제공하기 위한 항공 PAA, 위성간의 내부 통신을 위한 S-밴드 PAA, 2차 감시 레이더 안테나용 PAA, 위성 무선단말기 서비스 시스템을 위한 다중 빔 성형 네트워크용 PAA 등 다방면에서 사용되고 있으며, 앞으로 위성 및 이동통신 그리고 레이더에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.^[1]

PAA로부터 방사되는 빔의 주사 방향을 제어하는 방식에는 위상천이 주사방식(Phase Shift Scanning)과 시간지연 주사방식(Time Delay Scanning)이 있다. 위상 천이 주사방식은 안테나 소자에 연결되어 있는 위상 천이기의 위상이 RF 주파수 변화에 무관하게 일정하기 때문에, 안테나로부터 방사되는 주빔의 방향이 RF 주파수에 따라 변화하는 현상이 발생하여, 광대역 신호나 RF 반송파 주파수의 급격한 변화를 필요로 하는 시스템에서는 적합하지 않다.^[2] 시간지연 주사방식은 각 안테나 소자에 급전되는 RF 신호들을 시간 지연선로를 통해 공급하므로, 각 안테나 소자의 위상이 RF 주파수에 비례하여 변하게 되어 PAA에서 방사되는 빔의 주사 방향은 주파수와 무관하게 일정하다. 따라서, 시간지연 주사방식만 이용하거나 시간지연 주사방식과 위상 주사방식을 혼용한 연구가 진행되어 왔고, 특히 광학적인 시간지연 주사방식은 넓은 대역폭, 저 손

실, 높은 유연성, EMI(Electro-Magnetic Interference)에 무관, 소형, 경제적인 장점 때문에 활발한 연구가 진행되고 있다. 현재까지 광 실시간 지연선로(True Time-Delay, TTD)들의 구조는 분산 보상 광섬유(Dispersion Compensation Fiber: DCF) 프리즘 방식,^[3] PLC(Planar Lightwave Circuit) 방식,^[4] 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating: FBG) 프리즘 방식,^[5] 칩 광섬유 격자(Chirped Fiber Grating: CFG) 방식^[6] 등이 제안되었다. DCF 프리즘의 경우, 서로 다른 길이의 DCF에서 파장 가변 광원의 출력 파장에 따라 시간 지연을 발생시키는 방식이다. PLC 방식은 지연선로와 열광 (Thermo-Optic) 스위치를 실리카 기판에 집적화한 구조로써 불연속적으로 빔 주사 각을 변화시킬 수 있는 구조이다. FBG 프리즘 방식은 다른 브래그 파장을 갖는 FBG들을 프리즘 형태로 배열하여 입력 파장에 따라 다른 시간지연을 얻는 방식이다. CFG 방식은 CFG 한 개에 다수 개의 파장 가변 광원을 연결하고 파장 다중화된 CFG 출력 신호를 WDM 복조기로 파장별로 분리하여 시간지연을 발생하는 방식이다. 이와 같은 시스템들은 파장 가변 광원이나 다파장 광원을 필요로 하기 때문에 파장 안정화 및 파장 가변 속도 등의 문제가 발생한다.

본 논문에서는 단일 파장의 광원 한 개를 사용하고, 광 2×2 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System) 스위치와 서로 다른 광섬유 지연선로 들의 조합을 이용한 선형 PAA용 광학적 TTD를 제안하였고, RF 신호의 주사 방향이 8개인 10 GHz 선형 PAA용 광 TTD를 구현하였으며, 이 TTD의 성능을 측정하였다. 또한 제안된 TTD에 의해 구동되는 8개의 안테나 소자로 구성된 10 GHz용 선형 PAA의 설계 결과를 분석하였다. 본 연구의 TTD는 기존에 제안된 대부분의 TTD 시스템에서 요구되는 파장 가변 광원이 필요하지 않고 단일 파장 광원을 사용하기 때문에 경제적이며, 파장제어에 따른 기술적 문제 등이 발생하지 않고 고 신뢰도의 시스템 구축이 가능하고, MEMS 스위치들을 전기적인 방법으로 제어하기 때문

[†]E-mail: jdshin@ssu.ac.kr

에 고속 빔 주사 방향 변환이 가능한 장점을 갖고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 제안된 TTD의 동작원리를 간단히 설명하였고, 제 III장에서는 구현한 10 GHz PAA용 3-비트 TTD의 실험 결과를 정리하였다. 제 IV장에서는 제안된 TTD를 이용하는 여덟 개의 마이크로 스트립 안테나 소자로 구성된 PAA를 설계하였고, 빔 주사 각에 따른 안테나 방사 패턴을 구하여 안테나의 성능을 분석하였다. 마지막으로 본 연구의 결과를 간단히 요약하였다.

II. 제안된 광 TTD

그림 1은 시간지연 주사 방식을 이용한 선형 PAA의 원리를 나타내고 있다.^[7] 안테나 소자들을 점 전파원으로 가정할 경우, 안테나 소자들의 간격이 d 이면, 안테나 배열 축으로부터

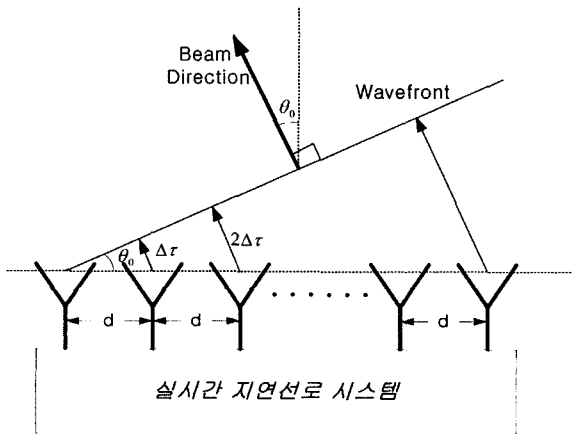


그림 1. 선형 위상배열 안테나의 원리.

θ_0 의 각도로 빔이 방사되기 위해서는, 인접 안테나 소자들에 급전되는 RF 신호들 사이에 $\Delta\tau = d\sin\theta_0/c$ 의 시간 지연이 필요하며, 이로 인한 위상 차이는 $\Delta\psi = -2\pi f_{RF}\Delta\tau$ 이다. 여기서, c 는 진공 중에서 전파의 진행속도, f_{RF} 는 RF 주파수이다. d 를 RF 파장의 1/2로 한 경우에는, $\Delta\tau = \sin\theta_0/(2f_{RF})$, $\Delta\psi = -\pi\sin\theta_0$, 그리고 지연선로의 길이 차이는 $\Delta L = [c/(2n_g f_{RF})]\sin\theta_0 = (\lambda_{RF}/2n_g)\sin\theta_0$ 가 된다. 여기서, n_g 는 RF 주파수에서 지연선로의 군굴절률(group index)이다.

본 연구에서 제안된 PAA용 광 TTD의 구조는 그림 2와 같다. m 개의 안테나 소자로 구성된 PAA를 위한 광 TTD의 동작 원리는 다음과 같다. 레이저 다이오드에서 발생하는 CW 광 신호가 광 변조기에서 전기적 RF 신호에 의해 변조된 후 $1 \times m$ 광 결합기에 의해 m 개의 동일한 신호로 분리된다. 결합기 출력은 광 2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로들로 구성된 TTD에 입력된다. TTD의 MEMS 스위치들의 상태는 PAA의 주사 각에 따라 MEMS 제어기의 제어에 의해 변환된다. TTD 출력에 나타나는 RF 변조되고, 시간 지연된 광 신호는 광 검출기에 의해 다시 전기적 신호로 변환된 후 전기적 증폭기를 통해 각 안테나 소자에 입력된다. 이 신호들은 시간 지연에 따른 위상 변화에 의해 정해진 주사 각으로 방사된다.

TTD는 m 개의 지연선로로 구성되며, 각 지연선로는 n 개의 MEMS 스위치가 직렬로 연결되어 있다. MEMS 스위치에는 그림과 같이 서로 다른 길이의 단일모드 광섬유 지연선로가 연결되어 있어 스위치가 CROSS 상태일 때 해당 시간 지연을 갖는 광섬유 지연선로가 선택된다. 첫 번째 열(column)에서 첫 번째 행(row) MEMS 스위치, 즉 MEMS^[11]에는 스위치가 CROSS 상태일 경우 시간 지연 τ_1 에 해당하는 광섬유 지연선로가 선택된다. 또한, 첫 번째 열(column)에서 두 번째 행(row) MEMS 스위치 MEMS^[21]에는 MEMS^[11] 보다 시간 지

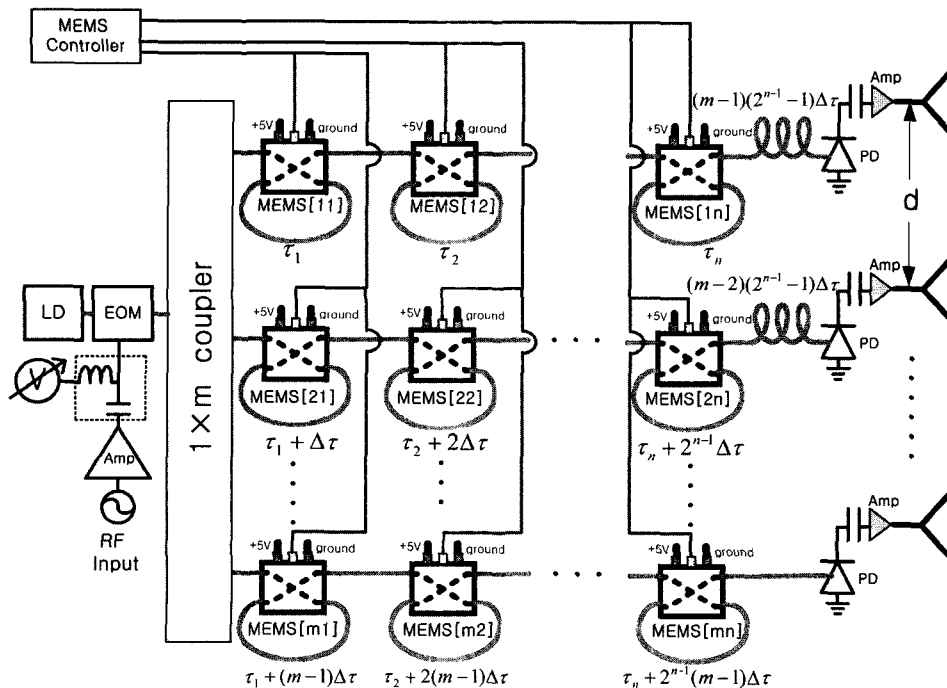


그림 2. 제안된 광 TTD의 구조.

연이 $\Delta\tau$ 만큼 큰 광섬유 지연선로가 연결되어 있다. 마찬가지로 MEMS[m1]에는 $\tau_1 + (m-1)\Delta\tau$ 에 해당하는 광섬유 지연선로가 연결되어 있다. 두 번째 열(column)의 첫 번째 행 MEMS 스위치, 즉 MEMS^[12]에는 시간 지연 τ_2 에 해당하는 광섬유 지연선로가 연결되어 있으며, MEMS^[22]에는 시간 지연이 $\tau_2 + 2\Delta\tau$ 인 광섬유 지연선로가, MEMS[m2]에는 시간지연이 $\tau_2 + 2(m-1)\Delta\tau$ 인 지연선로가 연결되어 있어 두 번째 열에서는 행이 하나씩 증가할 때 마다 시간지연이 $2\Delta\tau$ 씩 증가한다. 따라서, MEMS[mn]에는 $\tau_n + 2^{n-1}(m-1)\Delta\tau$ 에 해당하는 광섬유 지연선로가 연결되어 있다. 결국 첫 번째 열의 모든 스위치가 CROSS 상태이고, 다른 모든 스위치들이 BAR 상태인 경우에는 두 번째 행에 연결되어 있는 안테나 소자에 공급되는 RF 신호는 첫 번째 열의 안테나 소자에 공급되는 신호보다 $\Delta\tau$ 늦게 도착하며, 세 번째 열의 안테나 소자에는 $2\Delta\tau$ 늦은 신호가 도착하게 된다. 두 번째 열의 모든 스위치가 CROSS 상태이고, 다른 모든 스위치들이 BAR 상태인 경우에는 두 번째 행의 안테나 소자에는 첫 번째 행의 안테나 소자보다 $2\Delta\tau$ 지연되어 도착하며, 세 번째 열의 안테나 소자에는 $4\Delta\tau$ 지연된 신호가 도착하게 된다. 따라서, n개의 열로 구성된 TTD는 MEMS 스위치 상태의 조합에 따라 2^n 가지(n-비트)의 서로 다른 빔 주사 각을 얻을 수 있다. 빔 주사 각을 안테나 배열 축의 수직선을 기준으로 \pm 방향으로 설정할 수 있도록, 첫 번째 행의 n번째 MEMS의 출력 단자와 광 검출기(PD) 사이에는 시간 지연 $(m-1)(2^{n-1}-1)\Delta\tau$ 를 발생시키는 광섬유 지연선로를 삽입하였고, 다음 행들에는 순차적으로 시간지연이 $(2^{n-1}-1)\Delta\tau$ 씩 감소되는 광섬유 지연선로를 삽입하였다.

본 구조는 한 개의 고정 파장 광원을 사용하므로 파장 제어 및 선택의 문제점이 없어 고 신뢰도의 시스템 구축이 가능하

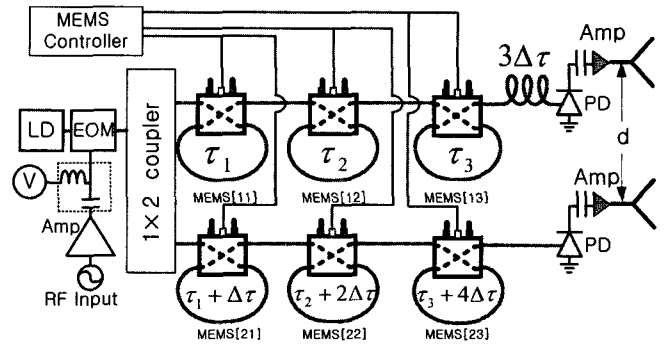


그림 3. 10 GHz용 PAA를 위한 3-비트 TTD.

고, 전자 제어 방법으로 MEMS 스위치들을 구동시켜 시간지연을 제공하기 때문에 고속으로 빔 주사 방향을 변환할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

III. 10 GHz용 PAA를 위한 3-비트 광 TTD

그림 3은 본 연구에서 구현된 10 GHz용 PAA를 위한 3-비트 TTD의 구조이다. 각각의 안테나 소자에 일렬로 3개의 2×2 MEMS 스위치를, 그리고 각각의 스위치에는 광섬유 지연선로를 연결하였다.

10 GHz 시스템에서 인접 안테나 소자간의 최대 시간지연 $\Delta\tau_{max}(=\sin\theta_{max}/(2f_{RF}))$ 는 ± 50 ps(즉, $\theta_{max} = \pm 90^\circ$)이다. 따라서, 3-비트 TTD 구현을 위하여, MEMS^[21]에 연결된 광섬유 지연선로의 길이는 MEMS^[11]에 연결된 광섬유 지연선로의 길이보다 시간상으로 12 ps, MEMS^[22]에 연결된 광섬유 지연선로는 MEMS^[12]에 연결된 광섬유 지연선로 보다 24 ps, MEMS^[23]에

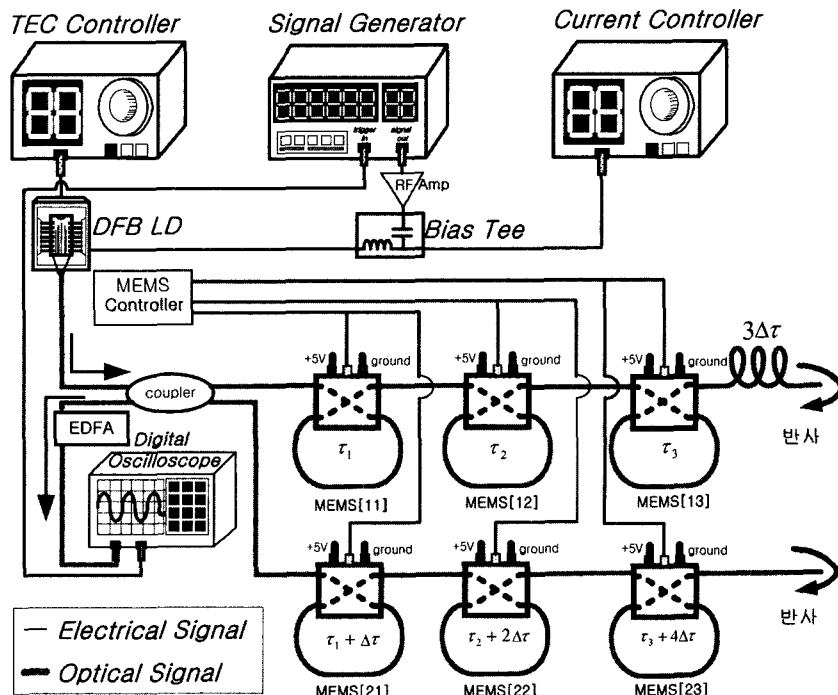
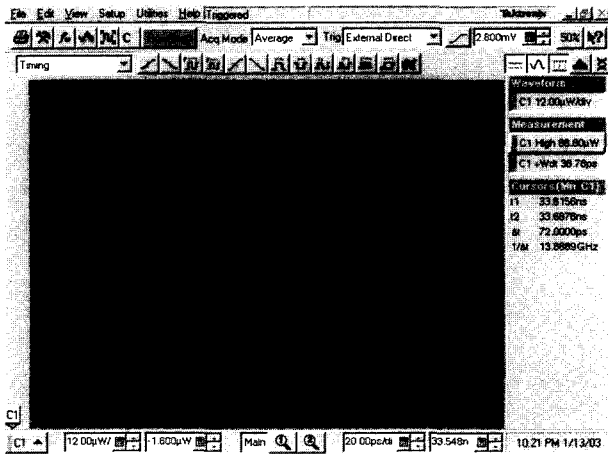
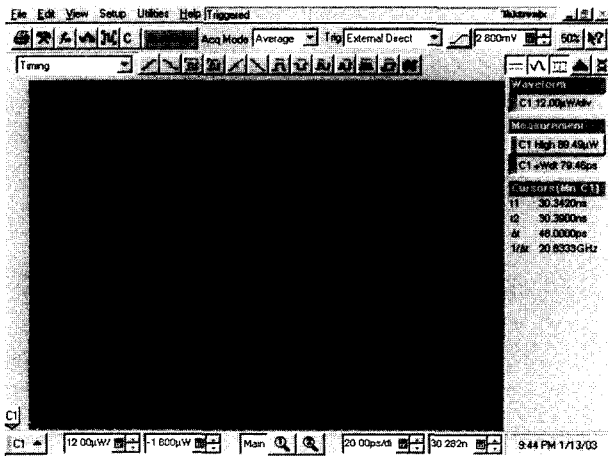


그림 4. 지연시간 측정 실험 구성도.



(a)



(b)

그림 5. 측정된 지연시간 (a) 36 ps의 경우와 (b) 24 ps의 경우.

연결된 광섬유지연선로는 MEMS^[13]에 연결된 광섬유 지연선로보다 48 ps 더 길게 설계하였다. 상위 지연선로의 종단에 3Δτ의 광섬유 지연선로를 삽입하여 안테나 배열 축의 수직선을 기준으로 ±방향으로 주사 각을 조절할 수 있게 하였다.

그림 4는 제작된 TTD의 각각의 주사 각 방향에 대한 시간지연을 측정하기 위한 실험 구성도이다. 이득 스위칭으로 발생시킨 반치전폭(FWHM) 43 ps의 광 펄스를 2×2 광섬유 결합기의 한 쪽 입력 포트에 입력시켰다. 이 광 펄스는 TTD를

구성하고 있는 두 개의 지연선로에 입력된다. 주사 각에 따라 MEMS 스위치 상태를 변화시킴으로써 각각의 지연선로가 선택된다. 각각의 경우에 대해 TTD의 최종단에 위치하는 클리빙된 광섬유의 단면에서 프레넬(Fresnel) 반사되어 다시 광섬유 결합기의 나머지 입력 포트에 되돌아오는 펄스들의 시간 차이를 오실로스코프로 측정 한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 오실로그래프는 두 개의 지연선로들의 왕복 지연시간 차이를 나타내므로 실제 지연시간은 오실로그래프에서 측정된 시간의 1/2이다. 모든 MEMS 스위치를 CROSS 상태로 하였을 경우에 광섬유 지연선로의 총 오차는 0.2 ps 이내로 측정되었으며 이로 인한 주사 각의 오차는 약 0.84°로 계산되었다. MEMS 스위치의 전파 지연 및 상승 시간의 합은 200 μsec 이하로 측정되었다. 표 1에 계산된 빔 주사 각을 얻기 위한 MEMS 스위치들의 상태와 광섬유 지연선로에 의한 시간지연의 계산치와 측정치를 정리하였으며, 측정결과가 계산치와 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

IV. 10 GHz 선형 PAA

본 논문에서 제안된 TTD로 구동되는 PAA의 성능을 분석하기 위하여, 다음 그림 6과 같이 10 GHz 선형 PAA를 설계하였다. 각 안테나 소자의 패치 한 번의 길이는 다음 식을 사용하여 9.2 mm로 결정하였다.^[7]

$$L = W = 0.49 \times \frac{\lambda_{RF}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

여기서, ε_r은 테프론 기판의 비유전율(=2.5), L과 W는 각각 안테나 패치의 가로와 세로 길이이고, λ_{RF}은 RF 파장이다.

그림 6(b)는 그림 6(a)의 안테나 소자 8개를 RF 파장의 1/2인 1.5 cm 간격(d)으로 선형 배열한 PAA 구조이다. 부엽의 크기를 감소시키기 위하여 시뮬레이션에서는 돌프-체비셰프(Dolph-Tschebyscheff) 배열 계수를 사용하였다. 그림 7(a)는 모든 주사 각에 대한 10 GHz PAA의 2차원 방사 패턴의 시뮬레이션 결과이고, 그림 7(b)는 개별 주사 각에 대한 시뮬레이션 결과이다. 표 2에는 주사 각에 따른 최대 이득, 반 전력 빔 폭, 그리고 부엽 레벨(SLL)을 정리하였다. 그림 7과 표 2로부터, 안테나 배열 축의 수직선에 가까운 주사 각의 경우에는 설계된 각도와 거의 일치하였으나 θ₀=±90°에 가까운 경우에는 설계된 각도보다 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 각

표 1. 주사 각에 따른 시간 지연

주사 각 [deg]	MEMS[11] & MEMS[21]	MEMS[12] & MEMS[22]	MEMS[13] & MEMS[23]	시간지연		
				Time Delay	계산치 [ps]	측정치 [ps]
-46.1	bar	bar	bar	-3Δτ	-36	-36.0
-28.7	cross	bar	bar	-2Δτ	-24	-24.0
-13.9	bar	cross	bar	-Δτ	-12	-12.0
0	cross	cross	bar	0	0	0.0
13.9	bar	bar	cross	Δτ	12	12.0
28.7	cross	bar	cross	2Δτ	24	24.0
46.1	bar	cross	cross	3Δτ	36	36.0
73.7	cross	cross	cross	4Δτ	48	48.2

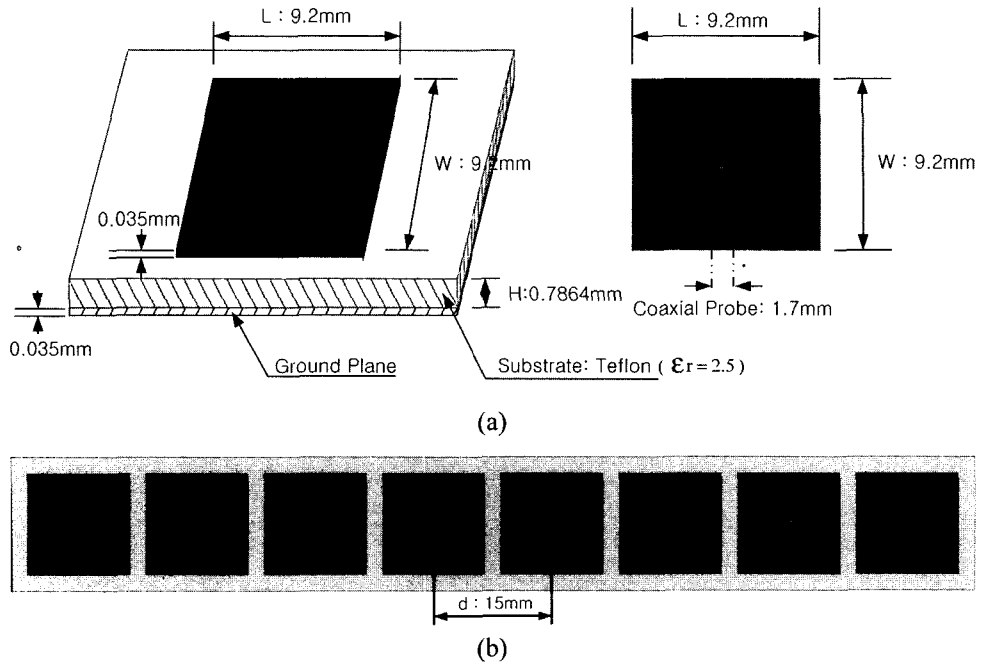


그림 6. 설계된 10 GHz 선형 PAA의 (a) 안테나 소자와 (b)배열 안테나.

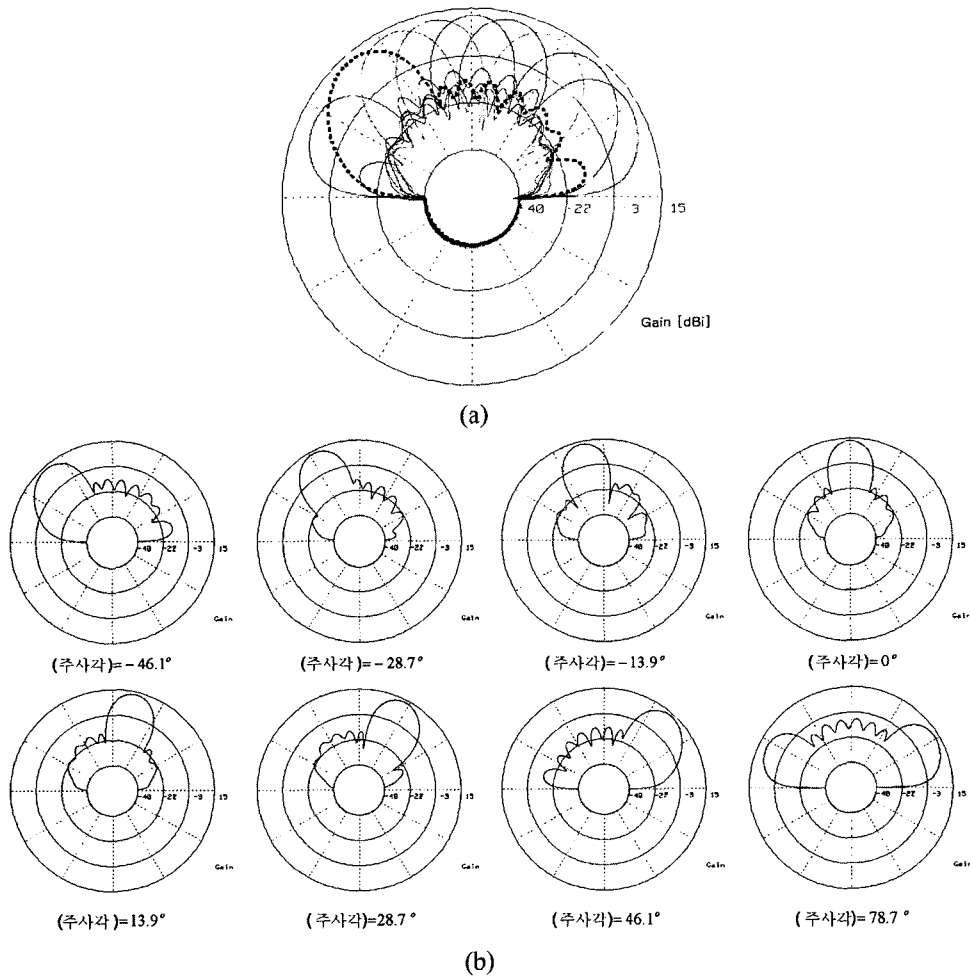


그림 7. 돌프-체비셰프 배열 계수를 사용한 10 GHz PAA의 2차원 방사 패턴 (a) 모든 주사 각의 경우와 (b) 개별 주사 각의 경우

표 2. 주사 각에 따른 최대 이득, 반 전력 빔 폭, SLL

주사 각 [deg]	최대이득을 얻은 각 도 및 이득	반 전력 빔 폭	SLL [dB]
-46.1	-42.75°, 13.01[dBi]	-54.10°~33.30° (20.80°)	-26.90
-28.7	-27.45°, 13.02[dBi]	-36.60°~19.00° (17.60°)	-26.77
-13.9	-13.45°, 13.08[dBi]	-21.90°~5.40° (16.50°)	-27.79
0	0.00°, 13.11[dBi]	-8.04°~8.06° (16.10°)	-30.30
13.9	13.50°, 13.08 [dBi]	5.4°~21.90° (16.50°)	-28.68
28.7	27.50°, 13.02[dBi]	19.00°~36.90° (17.90°)	-27.41
46.1	42.75°, 13.02[dBi]	33.50°~53.75° (20.25°)	-26.88
78.7	58.95°, 12.12 [dBi]	48.60°~71.60° (23.00°)	-2.85

안테나소자를 점 전파원으로 가정하여 설계하였으나, 시뮬레이션에서는 각 안테나 소자의 패턴 효과가 점 전파원에 곱하여진 실제 방사패턴을 보이기 때문에 주사 각이 증가할수록 마이크로 스트립 안테나 소자로부터의 반사에 의한 방사 패턴의 변화가 크게 발생하였기 때문이라고 판단된다. 0°에서 안테나의 이득은 13.11 dBi, 반 전력 빔 폭은 16.10°, 그리고 SLL은 -30.30 dB은 나타났다. 안테나의 이득과 SLL은 각도가 증가하면서 감소하였고, 반 전력 빔 폭은 각도의 증가에 따라 증가하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 파장 고정 광원 한 개와 MEMS 스위치, 그리고 각 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로 들로 구성된 위상 배열 안테나용 광 실시간 지연선로의 구조를 제안하였다. 각 안테나 소자에 연결된 지연선로에 사용한 MEMS 스위치 개수, n ,의 2ⁿ개에 해당하는 빔 주사 각들을 얻을 수 있도록 설계하였다. 본 논문에서 제안된 실시간 지연선로의 구조는 파장 고정 광원을 사용하기 때문에 파장 가변 광원을 사용하는 시스템과 비교하여 파장 안정화 및 가변속도 등의 문제가 없는 고 신뢰도의 시스템 구축이 가능하고, MEMS 스위치의 신속한 제어를 통해 고속으로 빔 주사 방향을 선택할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한, 실험적으로는 두 개의 안테나

소자로 구성된 10 GHz 위상 배열 안테나용 3-비트 실시간 지연선로를 구현하였으며, 모든 각각의 주사 각에서 지연시간의 오차는 최대 1% 이내로 측정되었다. 마지막으로, 제안된 광 실시간 지연선로를 사용하는 여덟 개의 마이크로 스트립 안테나 소자로 구성된 10 GHz 선형 위상 배열 안테나를 설계하였고, 이 안테나의 방사 패턴을 시뮬레이션으로 구하였다. 시뮬레이션 결과 0°에서 안테나의 이득은 13.11 dBi, 반 전력 빔 폭은 16.10°, 그리고 SLL은 -30.30 dB로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] S. Samejima, "Phased Array Antenna Systems for Commercial Applications in Japan," *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, pp. 237-242, Oct. 15-18, 1996.
- [2] W. W. Ng, A. Walston, G. L. Tangonan, J. J. Lee, I. Newberg, and N. Bernstein, "The First Demonstration of an Optically Steered Microwave Phased Array Antenna Using True-Time-Delay," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pp. 1124-1131, 1991.
- [3] 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, 1995.
- [4] 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, 1995.
- [5] A. Molony, L. Zhang, J. A. R. Williams, I. Bennion, C. Edge, and J. Fells, "Fiber Bragg-Grating True Time-Delay Systems: Discrete-Grating Array 3-b Delay Lines and Chirped-Grating 6-b Delay Lines," *IEEE MTT*, vol. 45, pp. 1527-1530, Aug. 1997.
- [6] J. L. Corral, J. Marti, S. Regidor, J. M. Foster, R. Laming, and M. J. Cole, "Continuously variable true time-delay optical feeder for phased-array antenna employing chirped fiber grating," *IEEE MTT*, vol. 45, pp. 1531-1536, 1997.
- [7] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.

An optical true time delay for 10 GHz linear phased array antennas composed of optical 2×2 MEMS switches and fiber delay lines

Back-Song Lee, Jong-Dug Shin[†], and Boo-Gyoun Kim

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: jdshin@ssu.ac.kr*

(Received May 14, 2003, Revised manuscript July 1, 2003)

In this paper, we proposed an optical true time-delay (TTD) feeder system for phased array antennas (PAAs). The system possesses high-speed beam scan capability since, in this scheme, different lengths of fiber delay-lines are selected by optical 2×2 MEMS switches at high speed. An optical TTD capable of beam scanning in one of eight different directions has been built for 10 GHz linear PAA systems. Experimental results on time delay measurements show that the maximum time delay error is less than 0.2 ps corresponding to a scan angle error of less than 0.84°. We have also designed a 10 GHz linear PAA composed of eight micro-strip patch antenna elements driven by the proposed TTD, and the radiation patterns of this PAA have been analyzed by simulation.

OCIS Codes : 280.5110, 220.4830, 350.4010.