

## 2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 위상배열 안테나용 실시간 지연선로

이갑용 · 최연봉 · 신종덕 · 김부균<sup>†</sup>

숭실대학교 정보통신전자공학부

④ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1

(2002년 4월 27일 받음, 2002년 6월 10일 수정본 받음)

2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로의 조합으로 구성된 위상배열 안테나(Phased-Array Antenna: PAA)용 광학적인 실시간 지연선로(True Time-Delay : TTD)를 제안하였다며, 30°의 분해능을 갖고 최대 120°까지 빔 주사방향을 조정 할 수 있는 선형 PAA 용 실시간 지연선로를 구현하였다. 본 구조는 제어가 간편하며, 한 개의 파장 고정 레이저 다이오드를 사용하기 때문에 기준에 제안된 파장 가변 광원을 사용하는 구조들보다 고속 동작이 가능하고, 경제적이라는 장점을 갖고 있다. 또한, 제안된 실시간 지연선로는 각각 연결된 안테나 소자 4개로 구성된 10 GHz용 PAA를 설계하였다. 전산 모의 실험 결과, 설계된 PAA의 최대 빔 이득은 빔 주사각이 0°인 경우에는 11.6 dB, ±30°일 때 11.2 dB, 그리고 ±60°에서 10.6 dB로 나타났다.

주제어 : phased-array antenna, true time-delay, optical MEMS switch.

### I. 서 론

최근 위성통신 및 정보 통신 산업의 발달로 음성 및 화상 등의 고속 데이터 전송 및 시간과 장소에 구애받지 않는 서비스 제공에 필요한 시스템 구축에 관한 연구가 진행되고 있다. 위성 방송용 안테나의 경우에는 차량이나 선박 등 이동체에 쉽게 탑재 할 수 있고, 언제 어디서나 고품질의 서비스를 받아야 한다. 그러나 날로 열악해져가는 전파환경에서는 원하는 신호외에 고의적인 재밍(jamming) 및 신호간섭, 다중경로 폐이딩, ACI(Adjacent channel interference)와 같은 다양한 잡음과 누화성분이 생겨나고 있다.<sup>[1-5]</sup> 따라서 이러한 잡음과 간섭으로부터 원하는 신호만을 추출할 수 있고, 위성의 방향을 추적 할 수 있는 위상배열 안테나시스템에 관한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다.

위상배열 안테나(Phased-Array Antenna: PAA)란 단일 안테나 소자를 여러 개 배열하여 하나의 안테나처럼 동작하는 구조로써 각 안테나 소자들의 위상을 조정하여 주 빔의 방향을 변화시킬 수 있는 스마트 안테나(Smart Antenna)의 일종이다. PAA의 빔 주사방식은 일반적으로 마이크로웨이브 소자를 이용하는 위상 주사방식 (Phased Shifter Scanning)과 광학적 방법을 이용한 시간지연 주사방식(Time-Delay Scanning)이 있다. 광학적인 제어 방식은 넓은 대역폭, 저 손실, 높은 유연성, 소형화, 무 전자파 간섭 및 위상 제어 방식에서 나타내는 'beam squint' 현상(사용주파수에 따라 주 빔의 방향이 약간씩 틀어지는 현상)이 없다는 장점이 있다. 현재까지 제안된 실시간 지연선로(True Time-Delay: TTD)의 구조는 고 분산 보상 광섬유(High Dispersion Compensation Fiber: DCF) 프리즘을 이

용하는 방법,<sup>[8]</sup> 집적화된 실리카 도파관 스위치를 이용하는 방법,<sup>[9]</sup> 여러 개의 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating: FBG)를 이용하는 방법,<sup>[10]</sup> 칩 광섬유 격자(Chirped Fiber Grating: CFG)를 이용하는 방법<sup>[11,12]</sup> 등이 있다.

본 논문에서는 기존에 제안된 방식들에서 파장 가변 광원들을 사용함으로 인해 발생되는 고속 파장 제어 및 안정성 문제 등을 해결할 수 있도록 한 개의 단일 고정 파장 광원과 광섬유 지연선로 그리고 2×2 MEMS(Micro-Electro-Mechanical -systems) 스위치들을 조합한 경제적, 안정적, 그리고 제어가 용이한 광학적 TTD를 제안하였다. 또한 2×2 MEMS 스위치 4개와 MEMS 스위치에 연결된 서로 다른 길이의 광섬유 지연선로들로 구성된 실시간 지연선로 2세트를 제작하여 이동통신 및 레이더용으로 사용되는 L-밴드, S-밴드, 그리고 X-밴드에서 각 RF 주파수별로 시간지연을 측정하여 성능을 검증하였다. 실험에 사용된 MEMS 스위치는 일반 기계식 광 스위치보다 응답속도(약 90 μs) 및 스위칭시간(약 200 μs)이 빠르며 삽입손실도 0.8 dB이하로 성능이 우수하다. 특히 스위칭시간은 폴리미 광 스위치보다 약간 느리지만 삽입손실 면에서 우수한 성능을 가지고 있다. 본 논문에서 제안된 TTD 구조로 구동되는 4개의 안테나 소자로 구성된 10 GHz PAA를 설계하여 설계된 PAA의 성능을 전산모의 실험을 통해 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 한 개의 단일 고정 파장 광원, 2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로들을 이용한 TTD 구조에 대하여 간략하게 설명하였고, 제작된 TTD의 각 주파수별 시간 지연 측정 결과에 관하여 논의하였다. 3장에서는 제안된 TTD로 구동되는 4개의 안테나 소자로 구성된 10 GHz 송신용 선형 PAA의 설계에 관하여 설명하였으며, 전산 모의 실험을 통해 설계된 PAA의 성능을 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 연구결과를 요약하였다.

<sup>†</sup>E-mail: bgkim@sunbee.soongsil.ac.kr

## II. 2×2 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용한 광학적인 TTD

### 2.1. 제안된 광학적인 TTD의 구조

그림 1은 본 논문에서 제안된 2×2 MEMS 스위치를 이용한 송신용 선형 PAA의 구조를 나타내는 개념도이다.

TTD는 2×2 MEMS 스위치들과 스위치에 연결된 서로 다른 길이의 광섬유 지연선로들의 조합으로 구성되며, 단일 고정 파장을 가지는 DFB(Distributed feedback) 레이저 다이오드 하나로 구동된다. 레이저 다이오드의 CW 광 출력은 RF 신호로 변조된 후, 1×N 광 결합기를 통하여 N개의 광 경로로 분기된다. 각 광 경로에서는 MEMS 스위치의 ON/OFF 상태에 따라 스위치에 연결된 광섬유 지연선로가 선택되며, RF 변조된 광 신호는 선택된 지연선로들의 길이 합에 해당되는 시간 지연을 갖고 안테나 소자에 도착한다. 광 경로들 간의 길이 차이는 인접 안테나 소자들에 도착하는 광 신호들 간에 시간 지연 차이( $\Delta\tau$ )를 발생시켜 결과적으로 PAA의 빔 주사방향을 변화시킬 수 있다.

인접한 두 개의 TTD 광 경로 사이에 필요한 시간 지연 차이와 PAA의 빔 주사각(scan angle)과의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\Delta\tau = \frac{d}{c} \sin \theta \quad (1)$$

여기서,  $d$ 는 배열 안테나 소자간의 간격,  $c$ 는 공기 중에서 전파 속도,  $\theta$ 는 PAA의 빔 주사각이다. 따라서 본 논문에서 제안한 광학적인 TTD에 의해 구동되는 PAA의 최소 빔 주사각은 인접한 두 개의 TTD 광 경로 사이에 필요한 시간 지연 차이의 최소 값에 의해 결정된다. 이는 인접된 TTD의 MEMS 스위치에 연결된 지연선로들의 길이 차이의 최소값에 의해 결정됨을 의미한다.

본 구조에서는 동작의 제어를 단순화하기 위하여 PAA의 빔 주사각이 결정되면 그림 1의 MEMS 스위치 행렬의 특정 열(column)에 해당하는 MEMS 스위치들을 ON시키고 다른 열

에 해당하는 MEMS 스위치들은 OFF 시켜 특정 열에 해당되는 MEMS 스위치에 연결된 지연선로의 길이 차이에 의하여 인접된 TTD 사이의 시간 지연 차이가 식 (1)을 만족하도록 설계하였다.

따라서 본 구조에서는 각 TTD에 사용되는 MEMS 스위치 중 ON 되는 MEMS 스위치는 1개이고 다른 MEMS 스위치는 OFF 되므로 사용되는 MEMS 스위치들이 같은 삽입손실을 가진다면 각 TTD의 최종단에서 균일한 출력 광 파워를 얻을 수 있다. 그러나 실험에 사용된 MEMS 스위치들이 서로 다른 삽입손실을 가지고 있기 때문에, 균일한 출력 광 파워를 얻기 위해서 각 TTD의 최종단에 가변형 광 감쇄기(Variable Optical Attenuator: VOA)를 연결하여 균일한 광 파워를 얻을 수 있도록 하였다.

### 2.2. TTD의 시간 지연 측정 및 결과분석

그림 2는 MEMS 스위치와 광섬유 지연선로를 이용하여 제작한 TTD의 구조 및 특성 측정을 위한 실험 구성도이다.

각 TTD는 4개의 2×2 MEMS 스위치와 각 스위치에 연결된 광섬유 지연선로들의 조합으로 이루어져있다. 동작 가능성을 확인하기 위하여 - TTD 1과 TTD 2 - 2개의 세트로 배열 안테나용 실시간 지연선로를 구성하였다.

사용된 광섬유의 유효 굴절률은 측정 결과 1.46이었다. 또한 실험에 사용된 광 변조기  $V_x$  값은 3.8 V이었고, 동작 점은 약 2.6 V이었다. MEMS 스위치의 삽입손실은 각 스위치와 스위치의 동작상태에 따라 조금씩 차이가 있지만 측정결과 약 0.8 dB이하였다. 측정된 MEMS 스위치의 스위칭시간은 약 200  $\mu$ s이었고 상승시간은 약 90  $\mu$ s이었다. 사용된 MEMS 스위치들의 삽입손실이 일정하지 않으므로 균일한 광 출력 파워를 얻기 위해서 TTD 1과 TTD 2의 끝단에 VOA를 연결하였다. 사용된 VOA의 응답속도는 1.5 ms이었으며, DSP 보드의 제어입력신호에 따라 입력데이터의 offset binary 정수 값이 0 V에서 5 V까지 변하는 특성을 가지고 있는 Analog Device사의 병렬 접속형 AD664JIN-UNI형을 사용했다.<sup>[14,15]</sup>

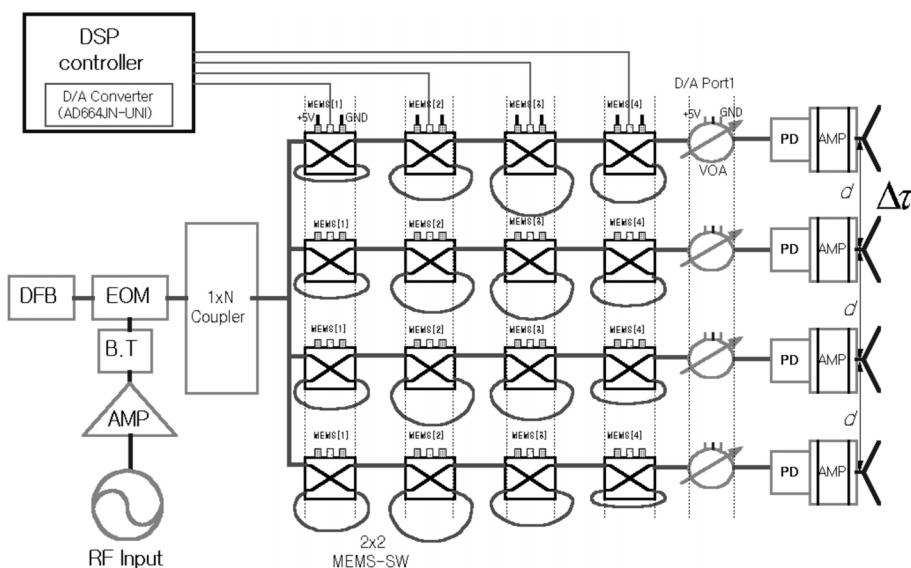


그림 1. 2×2 MEMS 스위치를 이용한 송신용 선형 PAA의 구조를 나타내는 개념도.

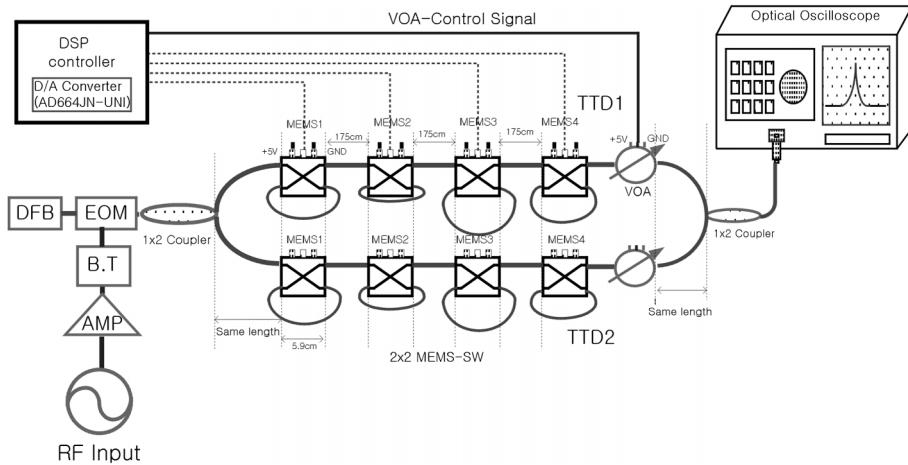


그림 2. 제작된 TTD 구조 및 특성 측정을 위한 실험 구성도.

선행 PAA의 빔 주사각을 얻기 위한 인접된 TTD 사이에 필요한 시간 지연 차이는 식 (1)과 같으므로, 빔 주사각에 대응되는 시간 지연 차이를 얻기 위하여 ON 되는 MEMS 스위치의 옆에 해당하는 인접된 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로의 길이 차이( $\Delta L$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta L = \frac{c}{n} \Delta \tau \quad (2)$$

여기서,  $c$ 는 빛의 속도,  $n$ 은 광섬유의 유효 굴절률이다.

안테나의 사용 주파수가 10 GHz인 경우 선행 PAA가 최대 빔 이득을 가질 수 있는 배열 안테나 소자간의 간격은 1.5 cm이다. 따라서 선행 PAA가 빔 주사각을  $\pm 30^\circ$ 로 가지기 위하여 TTD 1과 TTD 2사이에 필요한 시간 지연 차이는 25 ps이다. 식 (2)를 이용하면 ON 되는 MEMS 스위치의 옆에 해당하는 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로의 길이 차이는 약 0.51 cm이다. 빔 주사각이  $\pm 60^\circ$ 인 경우에는 TTD 1과 TTD 2사이에 필요한 시간 지연 차이는 43.3 ps이며 광섬유 지연선로의 길이 차이는 약 0.89 cm이다.

표 1은 두 세트의 TTD에 연결된 각 MEMS 스위치의 옆에 해당하는 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로의 실제 길이와 두 개의 TTD 사이에 측정된 시간 지연 차이를 측정한 값이다. 측정된 시간 지연 차이가 목표로 했던 시간 지연 차이와 차이가 나는 이유는 광섬유 지연선로의 실제 길이 차이가 목표로 했던 광섬유 지연선로의 길이와 다르고 또한 각 TTD의 MEMS 스위치들을 연결하는 광섬유 길이의 차이가 발생하기 때문이라고 생각된다.

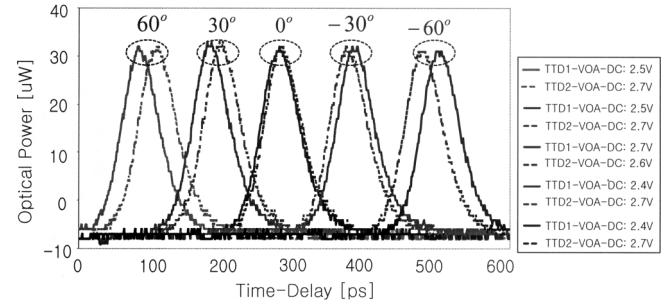


그림 3. 여러 개의 빔 주사각에 대응되는 측정된 TTD 사이의 시간 지연 차이와 광 출력 파워.

그림 3은 그림 2의 실험 구성도를 이용하여 측정한 여러 개의 빔 주사각에 대응되는 TTD 1과 TTD 2의 출력시간 지연 차이와 출력 광 파워를 보여준다. 빔 주사각이 커질수록 두 TTD 사이의 출력시간 지연 차이가 증가함을 볼 수 있다. 또한 VOA를 이용하여 TTD 1과 TTD 2의 출력 광 파워를 보상하였기 때문에 출력 광 파워는 약 33 μW이었고 광 파워의 변화는  $\pm 0.25\%$ 로 측정되었다.

그림 4는 사용되는 RF 주파수의 변화에 따른 TTD 1과 TTD 2사이에 발생되는 시간 지연 차이의 변화를 측정하기 위한 실험 구성도이다.

RF 주파수를 고정시킨 후 TTD를 구성하는 MEMS 스위치의 옆을 ON/OFF시키면서 발생되는 각각의 시간 지연을 통신 링분석기(HP8719D)로 측정한 후, 같은 방법으로 RF 주파수를 변화시키면서 시간 지연을 측정하였다. 표 2는 여러 개의

표 1. 두 개의 TTD를 구성하는 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로 길이와 측정된 TTD 사이의 시간 지연 차이

	MEMS1에 연결된 지연선로길이(cm)	MEMS2에 연결된 지연선로길이(cm)	MEMS3에 연결된 지연선로길이(cm)	MEMS4에 연결된 지연선로길이(cm)
TTD1	178.0	181.0	182.5	185.1
TTD2	178.9	181.5	182.0	184.2
측정된 시간 지연 차이[ps] (오차)	47.68 ( $\pm 1.9\%$ )	27.93 ( $\pm 1.5\%$ )	25.48 ( $\pm 0.2\%$ )	47.04 ( $\pm 1.9\%$ )

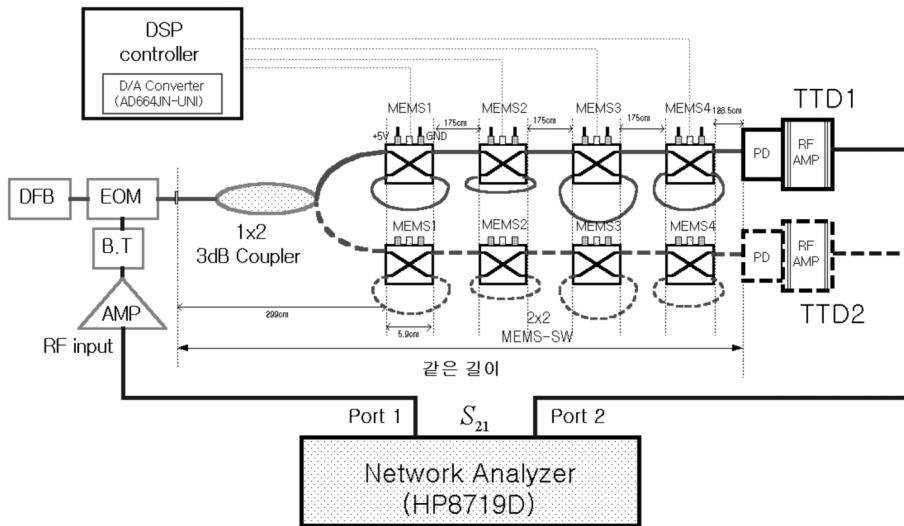


그림 4. RF 주파수에 따른 TTD 사이의 시간 지연 차이의 변화를 측정하기 위한 실험 구성도.

RF 주파수에 대하여 각각의 범주사각(대응되는 MEMS 위치 열을 ON)에서 발생하는 TTD 1과 TTD 2의 시간 지연 차이를 측정한 결과이다. 실험에 사용된 RF 주파수는 이동통신 및 레이더에 사용되는 1.8 GHz, 2.2 GHz, 8 GHz 그리고 10 GHz를 사용했으며, PAA의 설계 범주사각인 60°, 30°, -30°와 -60°에 대하여 측정된 평균 시간 지연 차이는 표 2와 같다. RF 주파수를 1.8 GHz에서 10 GHz까지 변화 시켰을 때 발생하는 시간 지연 차이의 오차는 최대 ±2.3%로서 예측한 대로 RF 주파수 변화에 대하여 시간 지연 차이 변화가 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다. 광섬유를 이용한 시간 지연 소자를 만드는 것은 광섬유 길이를 정확하게 조절해야 하는 어려움이 있다. 본 연구 결과에서 볼 수 있듯이 정확한 시간 지연 차이를 얻기 위해서는 광섬유의 길이를 정확히 조절해야 할 필요가 있다. 따라서 광섬유의 길이를 정확히 조절할 수 있는 방법에 대한 연구는 광섬유 지연선로를 이용한 소자와 시스템의 특성 향상에 중요한 요소라고 생각된다.

### III. 10 GHz 송신용 선형 PAA의 설계 및 전산 모의 실험

10 GHz 송신용 선형 PAA 설계를 위한 단일 안테나 소자 길이에 대한 근사 값은 식 (3)으로 결정할 수 있다.<sup>[1]</sup>

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

여기서,  $L$ 과  $W$ 는 각각의 단일 안테나 소자의 가로와 세로 길이,  $\epsilon_r$ 은 기판의 상대유전상수,  $\lambda_m$ 은 자유공간에서 RF 파장을 나타낸다. 설계된 10 GHz 송신용 선형 PAA를 위한 단일 안테나 소자는 한 변의 길이가 9.2 mm인 정사각형 구조로서, 두께가 0.7864 mm이고, 상대유전상수가 2.5인 테프론을 기판으로 사용하였다.

전산 모의 실험 결과 단일 안테나 소자의 최대 이득은 6.8 dB이었다. 또한 이 단일 안테나 소자 4개를 선형 배열하고, 인접 안테나 소자간의 간격  $d$ 를  $0.5 \lambda_m$ 으로 설계한 선형 PAA의 주 범의 최대 이득은 11.6 dB이었다.<sup>[16]</sup>

그림 5는 MEMS 스위치의 열이 ON 되는 위치에 따른 10 GHz 선형 PAA의 범주사각의 변화를 원거리 방사패턴으로 보인 것이다. 범주사각이 ±30°로 변할 때 4개의 안테나 소자로 구성된 PAA의 주 범 최대 이득은 11.2 dB로서, 0°일 때의 주 범 최대 이득과는 0.4 dB의 차이가 났고, ±60°로 변할 때는 주 범 최대 이득은 10.6 dB로 1.0 dB 차이가 났다.

### IV. 결 론

본 논문은 2×2 MEMS 스위치들과 광섬유 지연선로들의

표 2. 여러 개의 RF 주파수를 사용하여 측정한 TTD 사이의 시간 지연 차이

MEMS 위치 $f_{RF}$ (GHz)	MEMS1 열		MEMS2 열		MEMS3 열		MEMS4 열	
	$\Delta\tau$ [ps]	오차(%)						
1.8	47.68	±1.9	28.13	±1.9	25.73	±0.7	46.80	±1.5
2.2	47.72	±2.0	28.21	±1.9	25.53	±0.6	47.00	±1.6
8.0	48.20	±2.2	28.73	±2.2	26.33	±1.0	47.80	±2.0
10.0	48.88	±2.5	29.13	±2.4	26.73	±1.2	48.20	±2.2
시간 지연 차이의 평균값[ps] 및 평균오차(%)	48.12	±1.3	28.55	±1.8	26.08	±2.3	47.45	±1.5

Far Field Pattern

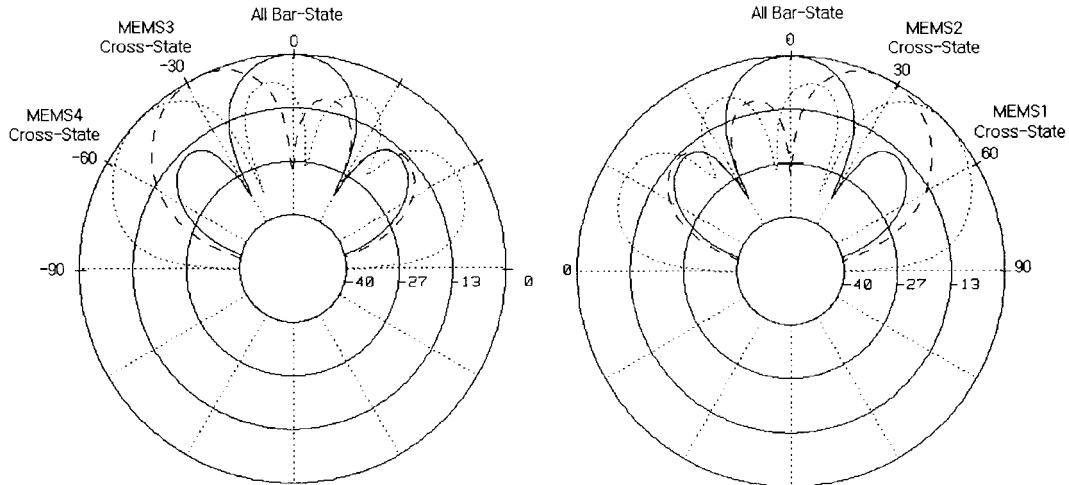
(a) 빔 주사각이  $0^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-60^\circ$ 일 때(b) 빔 주사각이  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ 일 때

그림 5. 선형 PAA 빔 주사각에 따른 주 빔의 원거리 방사패턴.

조합으로 구성된 위상배열 안테나용 광학적인 실시간 지연선로를 제안하였으며,  $30^\circ$ 의 분해능을 갖고 최대  $120^\circ$ 까지 빔 주사방향을 조정 할 수 있는 선형 PAA용 실시간 지연선로를 구현하였다. 또한 실험적으로 구현한 실시간 지연선로가 각각 연결된 안테나 소자 4개로 구성된 10 GHz용 선형 PAA를 설계하여 전산 모의 실험을 통하여 그 특성을 분석하였다.

제안된 구조는 한 개의 고정된 1,550 nm 파장을 가지는 DFB 레이저 다이오드를 광원으로 사용하기 때문에 파장 가변 광원들을 사용하는 기준에 제안된 방식들에서 발생되는 고속 파장 제어 및 안정성 문제 등을 해결할 수 있었다. 또한 DSP 보드의 제어신호로 동작이 제어되는 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로 길이의 차이에 의하여 빔 주사각이 제어되기 때문에 본 논문에서 제안된 실시간 지연선로는 기존에 제안된 구조에 비하여 안정적인 동작을 하며 경제적이라고 생각된다.

제안된 실시간 지연선로의 동작 가능성을 확인하기 위하여 4개의 2×2 MEMS 스위치와 각 스위치에 연결된 광섬유 지연선로들의 조합으로 이루어진 TTD 두 개의 세트를 구성하였고, 여러 개의 RF 주파수에 대한 여러 개의 빔 주사각에 의해 발생하는 시간 지연 차이를 측정하였다. 두 개의 TTD 세트에서 발생된 시간 지연차이는 RF 주파수와는 무관하게 동일한 시간 지연 차이를 가지며, PAA의 빔 조절 각이  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $-30^\circ$  그리고  $-60^\circ$ 일 때 평균 시간 지연 차이는 각각  $1.96 \text{ ps} \pm 1.0\%$ ,  $47.68 \text{ ps} \pm 1.9\%$ ,  $27.93 \text{ ps} \pm 1.5\%$ ,  $25.48 \text{ ps} \pm 0.2\%$ 와  $47.04 \text{ ps} \pm 1.9\%$ 로 측정되었다. 또한 10 GHz 단일 안테나 소자의 전산 모의 실험 결과로 얻은 주 빔 최대 이득은  $6.8 \text{ dB}$ 이었고, 4개의 단일 안테나 소자들이 최대 이득을 가지도록 선형 배열된 선형 배열 안테나구조에서 전산 모의 실험 결과로 얻은 빔 주사 각이  $0^\circ$ 일 때 주 빔 최대 이득은  $11.6 \text{ dB}$ 이었으며,  $\pm 30^\circ$ 일 때는  $11.2 \text{ dB}$ ,  $\pm 60^\circ$ 일 때는  $10.6 \text{ dB}$ 를 얻었다.

본 논문에서 제안된 구조에서 얻을 수 있는 최소 빔 주사각은 MEMS 스위치 열의 인접된 MEMS 스위치에 연결된 광섬유 지연선로의 최소 길이 차이에 의해서 결정됨을 알 수 있었다. 또한 사용하는 MEMS 스위치의 삽입손실 특성이 동일한 경우 각 TTD의 출력 광 파워를 동일하게 유지하기 위하여 끝단에 사용한 VOA는 필요없게 된다. 따라서 선형 PAA의 빔 조절각 변환시간은 MEMS 스위치의 스위칭시간에 의하여 제한됨을 알 수 있었다.

본 연구는 광주과학기술원 초고속 광 네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 두뇌한국 21 사업에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 1997.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGRAW-HILL, International Edition, 1981.
- [3] Rappaport, *Smart Antenna for Wireless Communication*, Prentice Hall, 1999.
- [4] T. Ojanpera and R. Prasad, *Wideband CDMA for Third Generation Mobil Communications*, Artech Housel, 1998.
- [5] Jhong Sam Lee and Leonard E. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Artech Housel, 1998.
- [6] R. J. Mailoux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech Housel, 1994.
- [7] N. A. Riza and B. J. Thompson, *Selected Paper on Photonic Control Systems for Phased Array Antennas*, SPIE Mileston Series, 1997.
- [8] R. D. Esman, M. Y. Frankel, J. L. Dexter, L. Goldberg, M. G. Parent, D. Stilwell, and D. G. Cooper, "Fiber-optic prism true time-delay antenna feed," *IEEE Photon. Technol.*

- Lett.*, vol. 5, pp. 1347-1349, 1993.
- [9] 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 Symposium Digest*, vol. 1, pp. 65-68, May. 1995.
- [10] 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 and chirped-grating 6-b delay line," *IEEE MTT*, vol. 45, pp. 1527-1530, Aug. 1997.
- [11] J. Marti, J. L. Corral, F. Ramos, V. Polo, and J. M. Fuster, "Millimeter-wave optical beam forming network for phased-array antenna employing optical up-conversion and wideband chirped fiber gratings," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 517-518, 1999.
- [12] G.-Y. Lee, Y.-B. Choi, J.-D. Shin, B.-G. Kim, and S.-B. Lee, "Optical true time-delay feeder for linear phased-array antennas implemented with chirped fiber gratings," *LEOS'01 Annual Meeting, San Dieg, CA*, pp. 255-256, Nov. 2001.
- [13] G. K. Gopalakrishnan, W. K. Burns, R. W. McElhanon, C. H. Bulmer, and A. S. Greenblatt, "Performance and modeling of broadband linbo<sub>3</sub> traveling wave optical intensity modulators," *IEEE MTT-S Symposium Digest*, vol. 1, pp. 1807-1819, Oct. 1994.
- [14] 윤덕용, *DSP 마스터시리즈1 TMS320C31 마스터*, Ohm사, 1998.
- [15] R. Chassaing, *Digital Signal Processing with C and the TMS320C30*, John Wiley & Sons, 1992.
- [16] 이갑용, 최연봉, 신종덕, 김부균, 이상배, "CFG 실시간 지연 선로를 사용한 10 GHz 위상 배열안테나의 설계," *한국통신학회논문지* 제27권 3C호, pp. 241-247, 2002.

## Optical true time-delays for phased-array antennas using 2×2 MEMS switches and fiber delay lines

Gab-Yong Lee, Yeon-Bong Choi, Jong-Dug Shin, and Boo-Gyoun Kim<sup>†</sup>

*School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: [bgkim@sunbee.ssu.ac.kr](mailto:bgkim@sunbee.ssu.ac.kr)

(Received April 27, 2002; Revised manuscript received June 10, 2002)

We propose optical true time-delays (TTDs) for phased-array antennas (PAAs) composed of 2×2 MEMS switches and fiber delay lines, and implement a TTD which shows a maximum scan angle of 120° with 30° resolution. Since this structure uses only one fixed wavelength laser diode, it provides several advantages such as easy control, high speed operation, and low cost compared with those of the optical TTDs using tunable laser sources. We design a four element linear PAA using the proposed TTDs at 10 GHz. Simulation results show that the maximum gain is 11.6 dB at the radiation angle 0°, 11.2 dB at ±30°, and 10.6 dB at ±60°.

*Classification code :* OC.010.