

광섬유 브래그 격자와 금속 박막이 단면에 증착된 광섬유로 구성된 광 실시간 지연선로

학생회원 배 덕 희, 정희원 신 종 덕, 김 부 균

Optical True Time-Delay Composed of Fiber Bragg Gratings and Metal Film-Coated Fibers

Duk-Hee Bae *Student Member*,
Jong-Dug Shin, and Boo-Gyoun Kim *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자와 Cr/Au 박막이 단면에 증착된 광섬유를 이용하여 위상 배열 안테나를 광학적으로 구동할 수 있는 새로운 구조의 광 실시간 지연 선로를 제안하였다. 이 구조는 각 안테나 소자에 연결된 광 지연선로에서 금속 박막이 광섬유 브래그 격자 한 개를 대체하기 때문에 광섬유 브래그 격자들만으로 구성된 종래의 실시간 지연선로 구조들에 비해 적은 수의 광섬유 브래그 격자를 사용하며, 금속 박막의 반사율이 광범위한 파장대역에서 일정하므로 금속 박막으로부터 반사되는 파장을 선택하기 용이한 장점을 갖고 있다. 0° 와 $\pm 30^{\circ}$ 로 빔 주사가 가능한 10 GHz 선형 위상 배열 안테나를 위한 실시간 지연선로를 구현하였으며, 모든 빔 주사각에서 시간 지연 측정 결과는 계산치와 일치하였다. 또한, 제안된 실시간 지연선로로 구동되는 8개의 안테나 소자로 구성된 10 GHz 선형 배열 안테나를 설계하였으며, 이 안테나의 원거리 방사패턴을 시뮬레이션을 통해 구하였다.

Key Words : Optical True Time-Delay; Phased Array Antenna; Fiber Bragg Grating

ABSTRACT

In this paper, we proposed a novel true time-delay (TTD) feeder for phased array antennas (PAAs) using fiber Bragg gratings (FBGs) and fibers coated with Cr/Au film. This structure requires less number of FBGs than the previously proposed FBG TTD feeders since one FBG is replaced with a metal film reflector in a strand of optical delay line connected to each antenna element and also provides the flexible wavelength selection since the metal film shows wide reflectance spectrum. A TTD for 10 GHz linear PAAs capable of steering beams in three different directions at 0° and $\pm 30^{\circ}$ has been built. Experimental results on time delays are in good agreement with those calculated at all the steering angles. A 10 GHz linear array antenna with eight antenna elements fed from the proposed TTD has been designed and the far-field radiation pattern of this antenna has been obtained by simulation.

송실대학교 정보통신전자공학부(jdshin@ssu.ac.kr)

논문번호 : 030188-0502, 접수일자 : 2003년 5월 2일

※본 연구는 송실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

I. 서 론

위상배열 안테나 (Phased Array Antenna, PAA)는 여러 개의 단위 안테나 소자들을 2-D 평면상이나 1-D 선형적으로 배열하고 안테나 소자들의 위상을 개별적으로 조정하므로써, 안테나를 기계적으로 회전시키지 않고도 빔을 원하는 방향으로 주사시킬 수 있는 시스템으로 빠른 빔 주사 능력, 정확한 빔 포인팅, 안테나 소자간의 정확한 위상 및 진폭제어 등을 통한 빔 성형성이 뛰어난 장점을 갖고 있다. PAA는 주로 지상, 항공기, 또는 선박에 장착된 레이더 시스템, 또는 위성 통신이나 이동 통신에 응용이 되고 있다.

종래의 전자 구동 방식을 이용한 위상 배열 안테나는 마이크로웨이브 위상 천이기와 전력 분리기를 사용하며, 안테나 소자의 위상을 0에서 2π 까지 조절할 수 있기 때문에, 고 지향성 빔 주사가 가능하나 시스템의 부피와 무게, 그리고 전력 소모가 크다. 또한 위상 천이기의 위상이 주파수에 대해서 일정하므로, 주파수에 따라 주 빔의 각도가 변하기 때문에 사용가능한 대역폭이 반송파 주파수의 2%이하로 제한되고 있다[1]. 통신 환경이 점차적으로 광대역화 되고 다중 빔의 송수신을 필요로 하기 때문에, 위상 천이기 대신 주파수에 비례하여 위상이 변하도록 하여, 반송파 주파수가 급변하거나 광대역 신호의 경우에도 주사 각이 변하지 않는 실시간 지연선로 (True Time-Delay, TTD)를 사용하는 PAA 시스템에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 특히, 광섬유를 이용한 광학적 방식의 TTD는 진동 및 온도 변화와 같은 외부 환경에 대한 안정성을 제공하며, 가볍고, 손실이 적으며, 넓은 대역폭에서 신호의 분산이 없이 동작 가능하고, 높은 분해능을 얻을 수 있으며, 또한 전자기파의 간섭이 없는 장점을 갖고 있다.

현재까지 제안된 광학적 TTD 구조들은 고 분산 보상 광섬유(Dispersion compensation fiber, DCF) 프리즘을 이용하는 방법 [2], 집적화된 실리카 도파로를 이용하는 방법 [3], 여러 개의 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating, FBG)를 이용하는 방법 [4], 칩 광섬유 격자(Chirped Fiber Grating, CFG)를 이용하는 방법 [5,6], CFG와 FBG를 같이 사용하는 방법[7] 등이 있다. DCF를 이용한 TTD 구조는 서로 길이가 다른 고 분산 DCF 프리즘에 입력되는 광원의 파장에 따라 서로 다른 시간지연

을 얻는 방법이다. 집적화된 실리카 도파로를 이용하는 방법은, 평판 도파로로 구성된 시간지연선로와 열 광(Thermo-Optic) 스위치를 실리카 기판에 집적화하여 제작한 TTD구조로서, 불연속적으로 빔 주사 각을 변화시킨다. FBG를 이용한 방법은 브래그 반사파장이 서로 다른 여러 개의 FBG를 직렬 연결한 광섬유 지연선로 다수로 구성되며, 각 지연선로 내에서 FBG들의 간격은 동일하지만, 인접 지연선로들에서는 FBG의 간격이 순차적으로 감소하거나 증가한다. 입사 광원의 파장에 따라 인접 지연선로에 연결된 동일 브래그 파장을 갖는 FBG로부터 반사되는 시간차를 이용하는 방식으로 불연속적인 빔 주사각을 갖는다. CFG를 이용하는 방법은 입력 신호의 파장에 따라 CFG 내에서 반사 위치가 서로 다른 점을 이용한 방식으로 연속적으로 빔 주사 방향을 변화시킬 수 있는 장점이 있지만, 여러 개의 파장 가변 광원을 사용해야만 하는 단점이 있다 [5]. 따라서, 한 개의 파장 가변 광원과 반사 대역폭은 동일하나 길이가 서로 다른 여러 개의 CFG를 사용하여 경제적이며 파장 제어가 간단하고 빔의 주사 방향을 연속적으로 바꿀 수 있는 구조가 제안되기도 하였다 [6].

본 논문에서는 FBG와 금속박막이 단면에 증착된 광섬유를 이용한 새로운 구조의 광 실시간 지연선로를 제안하였다. 서로 다른 반사 파장을 갖는 FBG들을 직렬로 연결한 광 지연선로의 끝에 넓은 파장 대역에서 균일하며 높은 반사율을 갖는 금속 박막이 증착된 광섬유를 접속하여 광섬유 격자의 개수를 줄일 수 있다. 또한, 금속 박막의 반사율이 넓은 파장 대역에서 균일하므로, 금속 박막으로부터 반사되는 파장의 선택에 융통성을 제공할 수 있는 장점을 갖는 구조이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 TTD로 구동되는 PAA의 원리와 제안된 TTD 구조에 대하여 간단히 설명하였고, 제 III장에서는 제안된 TTD 구조를 검증하기 위하여, 0° 와 $\pm 30^\circ$ 로 빔 주사가 가능한 10 GHz 선형 PAA를 위한 TTD를 구현하였고, 각각의 빔 주사 각에서 측정된 시간 지연 결과를 계산 결과와 비교하였다. 제 IV장에서는 제안된 구조의 TTD로 구동되는 8개의 안테나 소자로 구성된 10 GHz 선형 배열 안테나를 설계하였고, 시뮬레이터를 이용하여 설계된 안테나의 원거리 방사 패턴을 분석하였다. 마지막으로 제 V장에서는 연구 결과를 요약 정리하였다.

II. 광섬유 브래그 격자와 금속 박막이 증착된 광섬유로 구성된 TTD

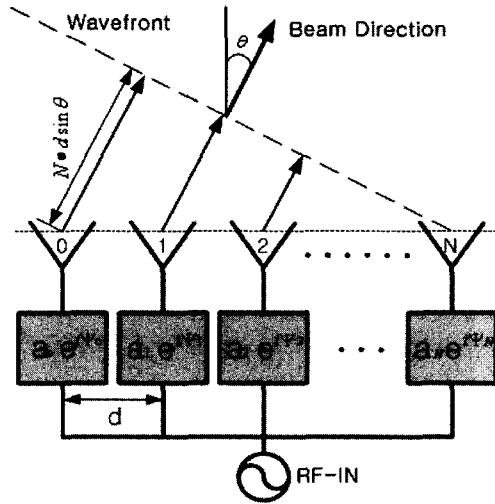


그림 1. TTD를 이용한 PAA 구조

TTD로 구동되는 선형 PAA의 동작원리는 그림 1과 같다. 이 PAA 시스템에서 θ 방향의 원거리 장은 다음 식과 같이 표현된다[1].

$$E(\theta, t) = \sum_{n=0}^N a_n e^{i\omega_{RF}t} e^{i(\psi_n + nk_{RF}d\sin\theta)} \quad (1)$$

이 식에서 각 안테나 소자는 점 전파원으로 가정하였다. a_n 은 n 번째 안테나 소자의 진류 세기, $\omega_{RF} = 2\pi f_{RF}$ 는 RF 각 주파수, f_{RF} 는 RF 주파수, d 는 안테나 소자 간격, ψ_n 은 시간 지연선로로 의해 n 번째 안테나 소자에 인가되는 진류의 위상 지연, k_{RF} 는 RF 신호의 전파 상수이다. 주 빔의 방향을 θ_0 로 할 경우에, n 번째 안테나 소자의 시간 지연은 $\Delta\tau_n(\theta_0) = nd\sin\theta_0/c$ 이 되며, 인접 지연선로간의 길이차이는 $\Delta L(\theta_0) = \Delta\tau_1 v_{RF}$ 가 된다. v_{RF} 는 RF 신호의 군속도이고, c 는 진공 중에서 전파의 속도이다. 이 경우, 지연 선로에 의한 위상 지연은 $\psi_n = -2\pi f_{RF} \Delta\tau_n(\theta_0)$ 이다. 식 (1)을 정리하면, 다음의 식 (2)를 얻는다.

$$E(\theta_0, t) = \sum_{n=0}^N a_n e^{i\omega_{RF}t} e^{ind \frac{2\pi f_{RF}}{c} (\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (2)$$

이 식으로부터 배열 상수 (Array Factor)의 위상 성분 중에서 $(\sin\theta - \sin\theta_0) = 0$ 인 경우에 원거리 장의 세기가 최대가 되므로, 주 빔의 각도는 주파수에 상관없이 θ_0 가 됨을 알 수 있다. 결과적으로, 안테나 소자들을 TTD로 구동하면 반송파 주파수가 급변하거나 광대역 신호의 경우에도 주사 각이 변하지 않게 된다.

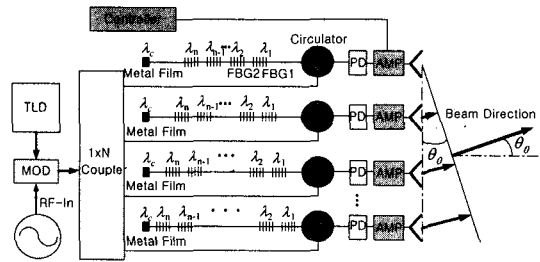


그림 2. 제안된 TTD의 구조

그림 2는 본 논문에서 제안한 TTD로 구동되는 PAA의 구조를 나타내고 있다. 파장 가변 광원 (TLD)에서 발생된 CW 광 신호는, 광 변조기 (MOD)에서 RF 신호에 의해 변조된 다음, 1xN 결합기에서 N개의 동일한 신호로 분리된다. 각 신호들은 서큘레이터를 통해 일련의 FBG들과 금속 박막이 증착된 광섬유가 연결된 해당 광 지연선로에 입력된다. 각 광 지연선로에 연결되어 있는 FBG들은 서로 다른 반사 파장을 갖는다. 그리고 서로 다른 광 지연선로 내에서 동일한 반사 파장을 갖는 FBG들 (예를 들어, 지연선로 1, 지연선로 2, ..., 지연선로 N에서 λ_1 의 반사 파장을 갖는 FBG들)의 상대적인 광 경로 차이 (파장 λ_1 의 경우, 그림 2에서 가장 위의 광 지연선로에서 서큘레이터로부터 FBG1까지의 왕복 광 경로와 위에서 두 번째 광 지연선로의 서큘레이터로부터 이 지연선로의 FBG1까지의 왕복 광 경로와의 차이에 따른 시간지연)에 의해 빔 주사 각이 결정된다. 각 광 지연선로의 끝에 증착되어 있는 금속 박막은 서큘레이터로부터 동일한 거리에 위치하므로, 모든 $\psi_n = 0$ 이 되어 빔의 주사 각이 0° 인 경우에 해당한다. 금속 박막의 반사율이 광범위한 파장 대역에서 일정하기 때문에, 0° 방향의 주사 각에 대하여 FBG의 브래그 파장들을 제외한 파장들을 사용할 수 있으므로, 파장 선택이 매우 용이하며, 온도에 따른 광원의 파장 드리프트에 영향을 받지 않게 된다.

III. 실험 및 분석

제안된 TTD의 개념을 확인하기 위하여, 그림 3의 10 GHz 선형 PAA용 TTD 구조를 구현하였다. 빔의 주사 각은 0°, 30°, 또는 -30° 중의 하나를 선택할 수 있는 구조이다.

파장이 λ₁ (FBG 1) 또는 λ₂ (FBG 2)일 때, 광 지연선로 1과 2의 해당 FBG들로부터 반사되는 파장의 왕복 지연 시간차이는 빔 주사 각이 θ₀ = ±30°인 경우, $\Delta\tau = \frac{1}{2f_{RF}} \sin \theta_0 = \pm 25$ ps가 되며, 이 시간지연에 해당하는 광섬유 길이는 광섬유의 굴절률 1.46을 적용하면 ± 2.568 mm가 된다. λ₁ 또는 λ₂ 이외의 파장 λ_c인 경우에는, 금속 박막으로부터 안테나 소자까지 거리가 동일하므로 0°로 빔이 방사된다.

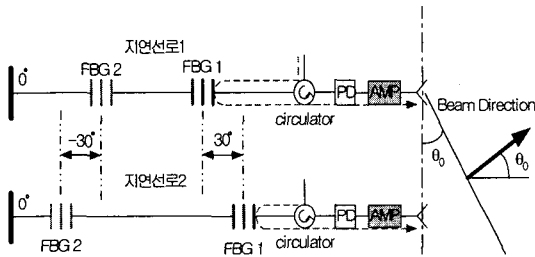


그림 3. 10 GHz 선형 PAA용 TTD

실험에 사용한 FBG 4개의 반사 파장은 각각 1554.8 nm, 1554.9 nm, 1556.4 nm, 1556.7 nm로 측정되었으며, 반사율은 각각 94.5 %와 93.2 %, 그리고 94.0 %와 92.0 %로 측정되었다. 서로 다른 FBG의 브래그 파장은 온도 조절기를 사용하여 1554.9 nm와 1556.7 nm에 일치시켰다.

금속 박막은 전자 빔 증착기를 이용하여 온도 150 °C, 진공 2x10⁻⁵ Torr의 조건하에서, 클리빙된 광섬유 단면에 2-3 Å/sec 으로 Cr을 50 Å 증착한 다음, 이 위에 Au를 4-5 Å/sec으로 1000 Å을 증착하였으며, 측정된 반사율은 그림 4와 같다. 측정 결과로부터 이 금속 박막의 반사율은 넓은 파장대에서 균일한 반사율을 갖는 것을 알 수 있다.

FBG 및 금속 박막의 반사율이 서로 달라 각 안테나 소자에 공급되는 전류의 세기가 다르게 되기 때문에 서큘레이터와 광 검출기 사이에 광 감쇠기를 삽입하여 안테나 소자들에 인가되는 전류의 세

기를 동일하게 만들어 주었다.

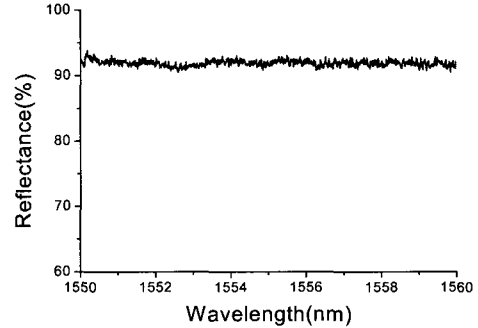


그림 4. 광섬유에 증착된 Cr/Au 박막의 반사 스펙트럼

다른 방법으로는 RF 증폭기의 이득을 조정하여 전류의 세기를 조절할 수도 있다. 그림 5는 온도 조절기로 FBG 반사 파장들을 일치시키고, 광 감쇠기로 광의 세기를 균일하게 만든 후 측정된 FBG들의 반사 스펙트럼이다.

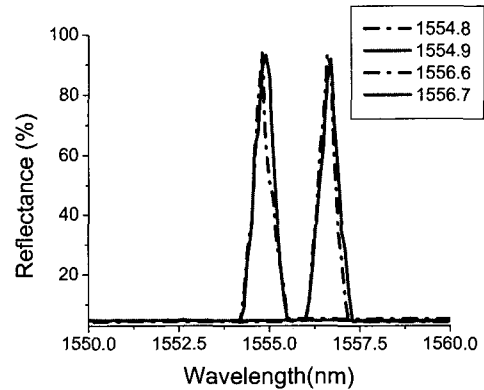


그림 5. 온도조절기와 광 감쇠기를 통과한 후 측정된 FBG의 반사 스펙트럼

표 1. 주 빔의 주사각에 따른 지연선로의 길이 차이 및 시간 지연

파장(nm)	주사각(deg)	측정된 지연선로 길이차이(mm)	시간지연(ps)	
			계산치	측정치
1554.9	30	2.5	25.0	25.0
λ _c	0	0	0.0	0.0
1556.7	-30	-2.5	-25.0	-25.0

그림 6과 7은 각각 빔이 +30°와 +0°로 주사되는 경우의 시간지연을 광 검출기 다음 단에서 측정된 결과로서 지연선로 1과 2에 의한 시간 지연 차이를 보이고 있다. +30°인 경우에는 25 ps, +0°인 경

우에는 0 ps이다. 표 1과 그림 6, 7로부터 각각의 빔 주사각에서 측정된 시간 지연은 계산 결과와 서로 잘 일치하고 있다.

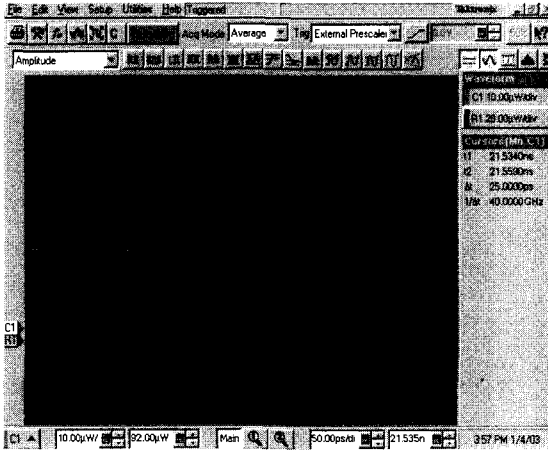


그림 6. 빔 주사각이 +30° 경우의 시간지연

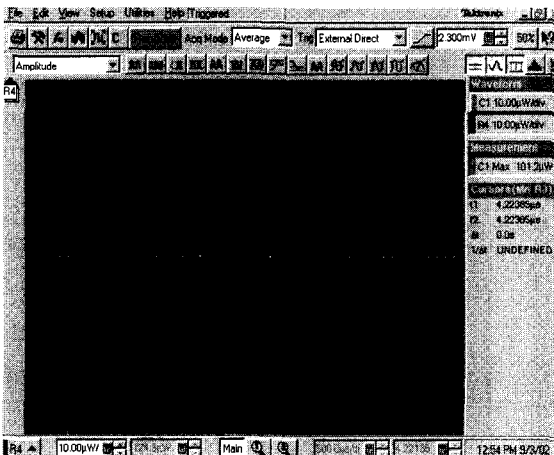
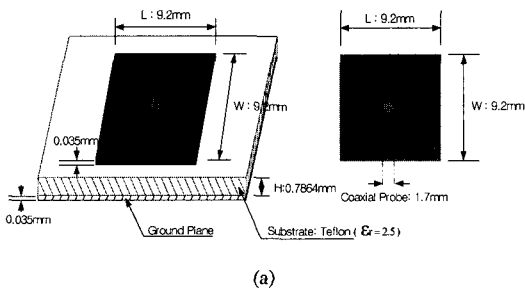


그림 7. 빔 주사각이 0° 경우의 시간지연

IV. 10GHz 선형 PAA의 설계



(a)



(b)

그림 8. 10 GHz 선형 PAA의 (a) 안테나 소자 (b)배열 안테나

본 논문에서 설계한 10 GHz 선형 PAA는 그림 8과 같다. 다음 식을 사용하여 안테나 소자의 패치 한 변의 길이는 9.2 mm로 결정하였다[8].

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

여기서, ϵ_r 은 테프론 기판의 비유전율(=2.5), L 과 W 는 각각 안테나 패치의 가로와 세로 길이이고, λ_{RF} 은 RF 파장이다. 그림 8 (b)는 그림 8 (a)의 안테나 소자 8개를 RF 파장의 1/2인 1.5 cm 간격으로 선형 배열한 PAA 구조이다. 부엽의 크기를 감소시키기 위하여 시뮬레이션에서는 표 2와 같은 돌프-체비셰프(Dolph-Tschebyscheff) 배열 계수를 사용하였다.

표 2. 안테나 소자에 인가된 a_n 과 ψ_n

안테나 소자 #	a_n	ψ_n (deg)		
		$\theta_0=30^\circ$	$\theta_0=0^\circ$	$\theta_0=-30^\circ$
1	0.262	-45	0	45
2	0.518	-135	0	135
3	0.811	135	0	-135
4	1.0	45	0	-45
5	1.0	-45	0	45
6	0.811	-135	0	135
7	0.518	135	0	-135
8	0.262	45	0	-45

그림 9는 $\theta_0=30^\circ$ 의 경우, 8개의 안테나 소자에 표 2에 주어진 a_n 과 ψ_n 인가시 Ensemble 시뮬레이터로 구한 배열 계수 그래프이다. 최대 부엽의 크기는 주엽보다 약 29 dB 정도 낮게 나타났다. 그림 10 (a)와 (b)는 주 빔의 방향이 각각 $\theta_0=0^\circ$ 와 30° 인 경우의 방사 패턴이다.

빔 주사 각이 $0^\circ, \pm 30^\circ$ 인 경우 2차원 시뮬레이션 결과는 그림11과 같다.

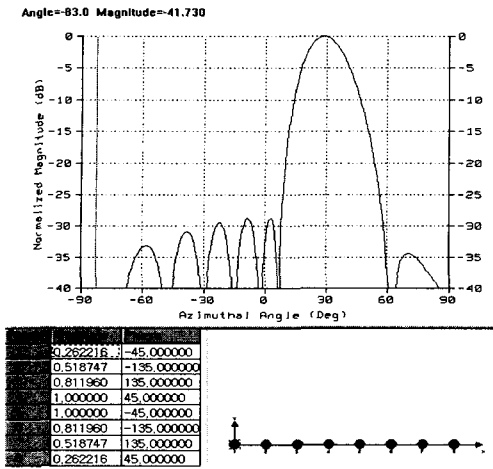
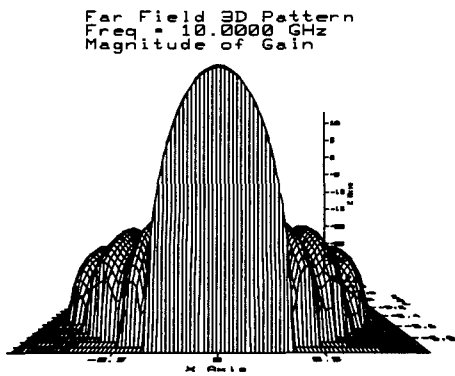
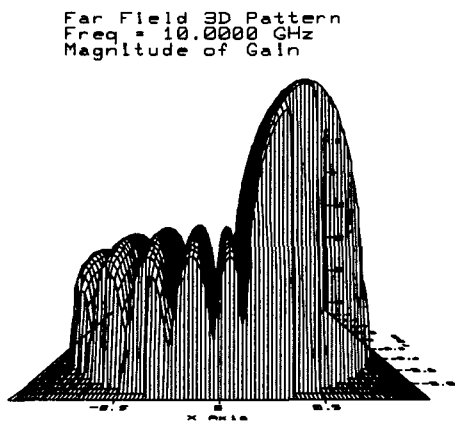


그림 9. 주사각이 30°인 경우 1-D 배열 계수의 시뮬레이션 결과



(a)



(b)

그림 10. 10GHz 선형 PAA의 원거리 방사 패턴 (a) $\theta_0=0^\circ$ (b) $\theta_0=30^\circ$

그림 11로부터 PAA의 이득과 반 전력 빔 폭, 그리고 부엽 레벨(SLL)은 0°에서 각각 13.1 dBi, 16.1°, -31.6 dB이고 ±30°에서는 13.0 dBi, 18.1°, -28.9 dB로 나타났다.

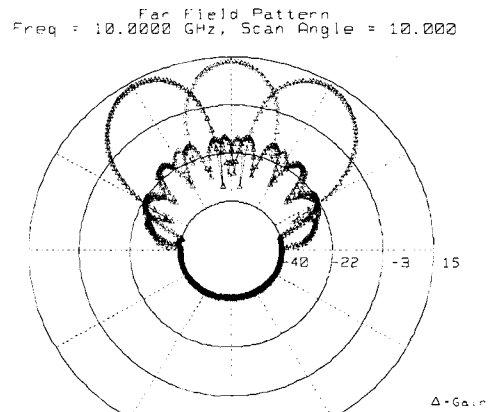


그림 11. 빔 주사 각이 0°, ±30°인 경우 2차원 시뮬레이션 결과

V. 결 론

본 논문에서는 PAA를 광학적인 방법으로 구동시키기 위하여, FBG들과 Cr/Au 박막이 단면에 증착된 광섬유로 구성된 새로운 광 TTD 구조를 제안하였고, 0°와 ±30°로 빔 주사가 가능한 10 GHz 선형 PAA를 위한 광 TTD를 구현하였다. 각 빔 주사각에서 측정된 시간 지연은 계산치와 일치하였다. 제안된 TTD 구조는 종래의 FBG들만으로 구성된 TTD 구조 보다 적은 수의 FBG들을 사용할 수 있으며, 또한 금속 박막이 넓은 파장 대역에서 균일한 반사율을 갖고 있기 때문에, 금속 박막으로부터 반사되는 빔의 주사각에 대해서는 정확한 파장을 선택할 필요가 없으며, 광원의 파장 드리프트에 따른 성능 열화 가능성이 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. 또한, 마이크로 스트립 안테나 소자 8개로 구성된 10 GHz 선형 PAA 구조를 설계하였으며, 방사 패턴 시뮬레이션 결과는 0°의 빔 주사각에서 부엽 레벨이 -31.6 dB, 반 전력 빔 폭은 16.1°, 그리고 최대 이득은 13.1 dBi로 나타났다.

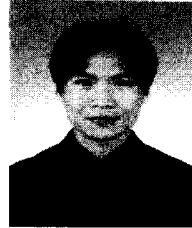
참 고 문 헌

- [1] W. W. Ng, A. Walston, G. L. Tansonan, J. J. Lee, I. Newberg, and N. Berstein, "The First Demonstration of an Optically Steered Microwave Phased Array Antenna Using True-Time-Delay," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 9, pp. 1124-1131, 1991.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Gab-Yong Lee, Yeon-Bong Choi, Jong-Dug Shin, Boo-Gyoun Kim, and Sang-Bae Lee, "Optical True Time-Delay Feeder for Linear Phased-Array Antennas Implemented with Chirped Fiber Gratings," *IEEE LEOS 2001*, pp. 255-256, 2001.
- [7] Y. Liu, J. Yao, and J. Yang, "Wideband True-Time-Delay Unit for Phased Array Beamforming Using Discrete -Chirped Fiber Grating Prism," *Optics Communications*, pp. 177-187, June 2002.

- [8] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.

배 덕 희 (Duk-Hee Bae)

학생회원



2001년 8월 : 숭실대학교 물리
학과졸업

2001년 9월 ~ 현재 : 숭실대학
교 전자공학과 석사과정

<주관심분야> 광학적 실시간 지연선로, 위상 배열
안테나

신 종 덕 (Jong-Dug Shin)

정회원

한국통신학회 논문지 제 27권 제 3C호 참조

김 부 균 (Boo-Gyoun Kim)

정회원

한국통신학회 논문지 제 27권 제 3C호 참조