

4개의 기생 소자를 이용한 전자적인 빔 조향 배열 안테나 설계

The Design of Electronically Beam Steering Array Antenna Using 4 Parasitic Elements

김영구 · 최익권* · 김태홍 · 유종준 · 강상기**

Young-Goo Kim · Ik-Guen Choi* · Tae-Hong Kim · Jong-Jun You · Sang-Gee Kang**

요 약

본 논문에서는 단일 급전 능동 소자와 4개의 기생 소자로 구성된 5.8 GHz ISM 대역에서 동작하는 전자적인 빔 조향 배열 안테나를 제안하였다. 빔 조향은 고가의 위상 변위기를 이용하지 않고, 기생 소자의 부하에 연결된 가변 리액턴스 제어 회로의 리액턴스를 제어하여 얻을 수 있다. 제안한 안테나는 빔 조향 각도에 따라 ISM 대역 내에서 -10 dB 이하의 반사 손실을 가지면서도 E-평면과 H-평면으로 각각 $\pm 30^\circ$ 의 빔 스캔을 실현하였다. 스캔 범위에서 이득은 E-평면에서 6.18~7.53 dBi, H-평면에서 7.022~7.779 dBi를 보였다.

Abstract

This paper proposes an electronically beam steering array antenna, consisting of single fed active element and 4 parasitic elements, operating in 5.8 GHz ISM band. Beam steering can be achieved by controlling the reactance of the variable reactance control circuit connected to the load of the parasitic elements without using the high cost phase shifters. The proposed antenna realizes $\pm 30^\circ$ beam scanning of E-plane and H-plane with the below -10 dB return loss in ISM band. The gain of the 6.18~7.53 dBi in E-plane and 7.022~7.779 dBi in H-plane is shown in the scanning range.

Key words : Antenna, Beam Steering, Varactor, Array Antenna

I. 서 론

미래의 이동 통신 및 무선 통신 시스템의 가장 중요한 기술적 과제는 한정된 전파 자원을 효율적으로 이용함으로써 보다 많은 데이터를 신뢰성 있게 전송하는 것이다. 원하는 빔을 형성할 수 있는 적응형 안테나(adaptive antenna)와 디지털 빔 형성 안테나(DBF: Digital BeamForming Antenna)와 같은 스마트 안테나(smart antenna)는 이러한 기술적 과제를 해결할 수 있는 방법 중에 하나로 많은 연구가 이루어지고 있다^[1]. 이러한 스마트 안테나 중에서 대

표적인 위상 배열 안테나의 사용은 다양한 부품 및 복잡한 시스템의 사용으로 고 중량, 고 전력 소비 그리고 고 제작 비용 등의 단점으로 인하여 고가의 상용화 제품들과 국방 분야에 제한되고 있다. 위상 배열 안테나의 가장 중요한 핵심 부품 중에 하나는 위상 변위기로 원하는 방향으로 안테나의 빔을 조향하는 중요한 소자이다. 대부분의 경우, 위상 변위기의 가격은 위상 배열 안테나의 전체 가격의 거의 반 이상의 값을 차지한다. 이에 저가의 차세대 위상 변위기의 개발은 지속적으로 이루어지고 있으나, 아직까지 일반적인 상용화 제품에 적용하기 위해서

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

*충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(School of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University)

**군산대학교 전자정보공학부(Department of Electronic & Information Engineering, Kunsan National University)

· 논문 번호 : 20081128-17S

· 수정완료일자 : 2009년 2월 10일

는 여전히 가격이 고가이다^[2].

전자적인 빔 조향을 위한 아날로그 빔 형성에 관한 연구는 1970년대에 Roger F. Harrington에 의해 다이폴을 복사기로 이용하여 처음 소개되어지고 이론적으로 증명되었으며^[3], 이후 Dinger RJ에 의해 1984년에 보고된 안테나의 구조는 같은 평면에 급전된 마이크로스트립 소자와 리액턴스 부하를 갖는 기생 마이크로스트립 소자들을 같은 평면에 위치시켰으며, 부하로는 슬라이딩 로드를 이용하여 빔 포밍을 구현하였다^[4].

Ad-hoc 무선 네트워크 적용을 위해 T. Ohira에 의해 제안된 ESPAR(Electronically Steerable Passive Array Radiator)은 위상 변위기 없이 빔 형성을 성취할 수 있음을 제시하고 성공적으로 실험되었다^{[5],[6]}. 그러나 ESPAR 또한, 현재 상태로는 위상 배열 안테나 적용을 위해서는 적합하지 않다. 최대 제한요소는 수동 방사기들의 수에 따라 빔 조향 방향이 크게 좌우된다는 것이다. 또한, 선형 방사기의 사용으로 비용도 고가인 단점도 있다.

최근 보고된 안테나 소자로 우수한 저가의 마이크로스트립 패치 안테나를 사용하여 방사 패턴의 변화를 구현한 연구에서는 2개의 기생 소자의 부하에 단순히 각기 다른 집중 소자 캐패시터를 연결하여 빔이 $\pm 20^\circ$ 로 조향 가능함을 보고하였으나, 집중 소자 캐패시터 부하의 사용으로 고정된 빔 조향만을 구현하여 실제 적응형 안테나의 적용에는 부적합하다^[7].

본 논문에서는 원형 마이크로스트립 패치 안테나를 가지고 위상 변위기의 사용 없이 바랙터 다이오드를 이용하여 2차원적으로 빔 조향을 할 수 있는 배열 안테나의 설계 방법에 대하여 제시하고, 시제품을 제작하여 $\pm 30^\circ$ 의 빔 조향을 증명하였다. 또한, 제안된 구조의 안테나의 빔 조향 시 고려해야 하는 다양한 안테나의 반사 손실 및 방사 패턴 등을 측정하여 성능을 검증하였다.

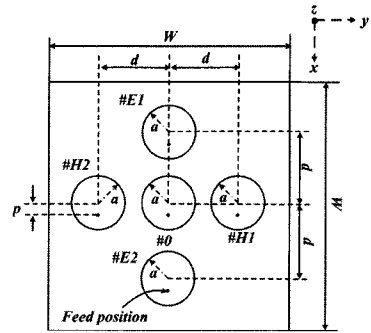
II. 안테나 설계 및 제작

본 논문에서 제안된 안테나의 구성은 그림 1에 나타난 바와 같이 단일 급전 능동 소자와 4개의 기생 소자로 구성된 배열 안테나와 각각의 기생 소자의 부하에 연결된 바랙터 다이오드와 컨트롤러로 구성된 가변 리

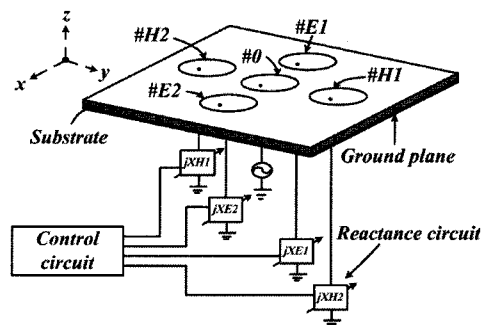
액턴스 제어 회로로 구성된다. 안테나와 리액턴스 회로는 60-mil(1.524 mm) 두께의 Rogers ULM-2000 기판($\epsilon_r=2.5, \tan \delta=0.0013$)을 사용하여 설계하고 제작하였다. 제안된 안테나의 설계를 위한 중요한 설계 파라미터로는 안테나의 공진 주파수를 결정하는 안테나 소자의 반지름 a , 안테나의 반사 손실 특성을 결정하는 안테나 소자의 급전 위치 p , 상호 결합 레벨과 빔 조향 범위를 결정하는 능동 소자와 기생 소자 간의 거리 d 등이 있으며, 안소프트사의 3D 시뮬레이터 HFSS(High Frequency Structure Simulator)와 2.5 D 시뮬레이터 Designer를 이용하여 최적화하였다. 최적화된 설계 파라미터의 값들은 표 1과 같다.

표 1에서와 같이 최적화된 설계 파라미터를 가지고 제작한 빔 조향 배열 안테나는 그림 2와 같다.

그림 1의 능동 소자 #0은 50 Ω SMA 커넥터(내심 0.3 mm)를 통해 RF 신호가 인가되고, 기생 소자 #E1, #E2, #H1 그리고 #H2는 50 Ω SMA 커넥터로 가변 리



(a) 제안된 안테나의 레이아웃
(a) Layout of the proposed antenna



(b) 제안된 안테나의 구조
(b) Configuration of the proposed antenna

그림 1. 전자적인 빔 조향 배열 안테나
Fig. 1. Electronically beam steering array antenna.

표 1. 제안된 안테나의 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of the proposed antenna.

Parameter	Dimension	Unit
W	90	mm
a	8.95	mm
d	20	mm
p	2.775	mm

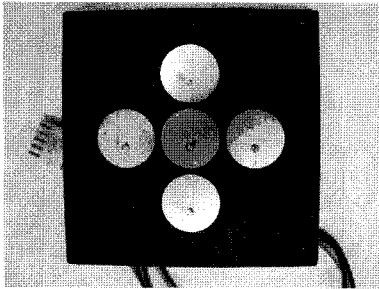
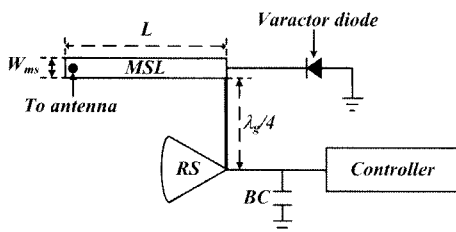


그림 2. 제작된 안테나 사진
Fig. 2. Photograph of the fabricated antenna.

액턴스 제어 회로와 연결된다. 가변 리액턴스 제어 회로는 바랙터 다이오드에 인가하는 역 바이어스 전압의 전압 제어를 통하여 리액턴스를 조절하여 원하는 빔 조향을 얻을 수 있도록 설계하였다. 그림 3은 가변 리액턴스 제어 회로의 기본적인 구성도로 바랙터 다이오드는 Metelics사의 MGV-075-08-E28를 사용하였으며, 다이오드에 인가되는 역바이어스 전압의 제어를 위한 컨트롤러는 Atmel사의 8 bit ATMEGA-128을 이용하여 0.015 V 간격으로 전압 제어할 수 있



RS : Radial Stub
MSL : Microstrip Line
BC : Bypass Capacitor
 λ_g : Guide wavelength(at 5.775 GHz)

그림 3. 가변 리액턴스 제어 회로 구성
Fig. 3. Configuration of the variable reactance control circuit.

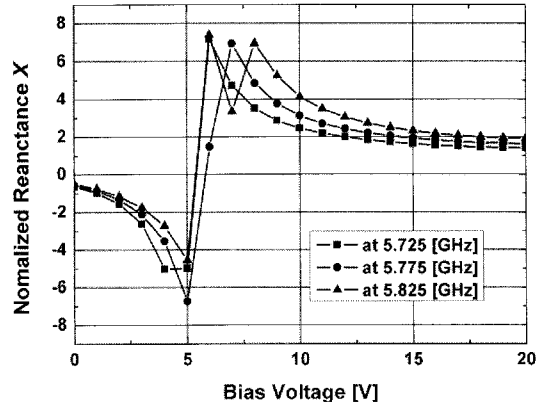


그림 4. 가변 리액턴스 제어 회로의 전압에 따른 정규화된 리액턴스 특성
Fig. 4. Normalized reactance characteristic versus bias voltage of the variable reactance control circuit.

게 설계하였다. 원하는 리액턴스 범위는 그림 3의 마이크로스트립 라인(MSL)의 길이 L 을 조절하여 얻을 수 있다.

본 논문에서는 제안된 구조에서 $\pm 30^\circ$ 빔 조향을 성취하기 위하여 $L=18.3$ mm, $W_{ms}=1.5$ mm인 가변 리액턴스 제어 회로를 그림 3과 같이 설계하였으며, 제작된 가변 리액턴스 제어 회로의 리액턴스 특성은 그림 4에 나타내었다.

III. 측정 결과 및 고찰

제작된 안테나의 반사 손실과 상호결합 특성은 Agilent사의 8364A 네트워크 분석기를 이용하여 측정하였다. 안테나의 반사 손실은 4개의 기생 소자의 부하에 50 Ω 종단 후 측정하였으며, 능동 소자와 각 기생 소자의 상호결합은 측정하고자 하는 기생 소자의 부하 커넥터와 능동 소자 입력 포트에 네트워크 포트를 연결하고, 나머지 기생 소자의 부하는 50 Ω 종단 후 측정하였다. 능동 소자 입력 포트를 1 포트 로 하여 측정된 반사 손실과 상호결합 특성은 그림 5에서 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었다.

그림 5에서 반사 손실 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 안테나의 공진 주파수는 약 0.65 %의 오차를 보인다. 그리고 상호결합 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 #E2로의 커플링 이외에 거의 동일한 결과 값을 보였

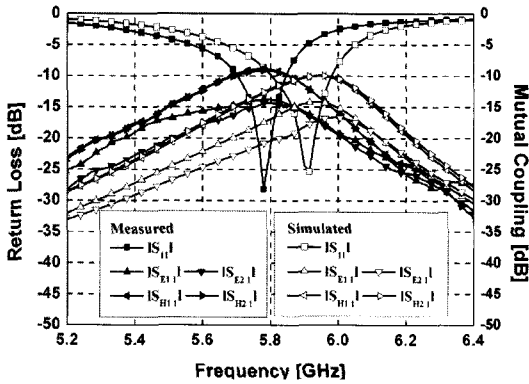


그림 5. 시뮬레이션과 측정된 반사 손실 및 상호 결합
Fig. 5. Measured and simulated return loss and mutual coupling.

표 2. 빔 조향 각도에 따른 정규화된 리액턴스(5.775 GHz)

Table 2. Normalized reactance corresponding to beam steering angle(at 5.775 GHz).

Steering angle [deg]		Passive elements			
		#H1	#H2	#E1	#E2
		Normalized X	Normalized X	Normalized X	Normalized X
E-plane	-30	6.5	6.5	-0.5	1.6
	-20	-2.5	-2.5	-0.5	1.6
	-10	-1.75	-1.75	2.2	-1
	0	-1.2	-1.2	5.58	-3.5
	10	-3	-3	-2	2.4
	20	-4	-4	1.6	-0.5
	30	0.5	0.5	1.6	-0.5
H-plane	-30	1.6	-0.5	6.8	3
	-20	1.9	-1.2	5	-3
	-10	3.75	-2.2	5	-3
	0	-3	-3.5	5	-3
	10	-6.5	5.5	5	-3
	20	-2.8	2.2	5	-3
	30	-0.5	1.6	3.5	6.5

다. 이것은 제작상의 오차와 시뮬레이션 시 기생 소자의 부하에 중심 주파수의 리액턴스만 적용하여 차이를 보인 것으로 사료된다.

E-평면, H-평면으로 10°씩 ±30°의 빔 조향을 위한 가변 리액턴스 제어 회로의 리액턴스는 시뮬레이터

및 측정을 통하여 표 2와 같이 최적의 리액턴스를 얻을 수 있었다. 바랙터 다이오드의 리액턴스 가변을 위상 변위기로 이용하는 아날로그 빔 조향의 경우, 안테나 간 상호결합의 변화는 기생 소자의 리액턴스 부하의 가변에 따라 변하고, 이는 기생 소자의 표면 전류 분포를 변화시켜 빔을 조향할 수 있게 하는 메카니즘이다.

표 2에서 H-평면으로 ±30° 조향 시에만 #E1과 #E2의 리액턴스를 다르게 사용한 것은 #E1의 정규화된 리액턴스가 5 그리고, #E2는 -3일 때 ±30°까지 빔을 조향할 수 없어 #E1과 #E2의 리액턴스를 조절하여 H-평면의 상호 결합 특성을 변화시켜 ±30°의 빔 조향을 가능하게 한다. 또한, E-평면 빔 조향 시에 #H1과 #H2의 리액턴스를 조절하여 E-평면으로의 상호 결합 특성을 변화시켜 원하는 빔 조향이 가능하게 한다.

리액턴스 부하를 위상 변위기로 이용하는 빔 조향 안테나의 경우, 실제 무선 통신 시스템의 적용을 위해서는 빔 조향에 따른 반사 손실 특성의 저하가 발생하지 않아야 한다. 표 2의 리액턴스를 각각의 기생 소자의 부하에 연결된 가변 리액턴스 제어 회로를 이용하여 구현했을 때 제안된 배열 안테나의 빔 조향에 따른 반사 손실 측정 결과는 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 H-평면과 E-평면으로의 ±30° 범위에서 10°씩 빔 조향을 수행할 경우, 제안된 안테나는 5.8 GHz ISM 대역(5.725~5.825 GHz)에서 -10 dB 이하의 반사 손실 특성을 잘 유지함을 확인할 수 있다. 반사 손실 특성은 설계 파라미터에서 능동 소자와 기생 소자간의 거리 d 에 따라서 현저하게 차이를 보이므로 설계 시 중요하게 고려되어야 한다.

그림 7은 표 2의 리액턴스에 따른 5.775 GHz에서 H-평면과 E-평면으로 양각(θ) -30°에서 30°까지 10°씩 빔 스캔을 수행한 방사 패턴 측정 결과를 나타내었다. 측정 결과에서 E-평면으로 빔 조향은 H-평면으로의 빔 조향시의 부엽 특성보다 좋지 않은 결과를 보였다. 이것은 그림 5에서처럼 H-평면 기생 소자와 E-평면 기생 소자와의 약 5 dB 정도의 상호결합의 차이에 의한 것이다. 그러나 빔 조향에 따른 이득평탄도 특성은 ±0.7 dB 이하로 양호한 특성을 보였다.

제안된 안테나 구조의 경우, 큰 각도의 빔 조향 시에 부엽이 커지는 문제는 근본적으로 발생하는 문제이므로 해결하기는 쉽지 않지만, 단일 급전 능동 소자

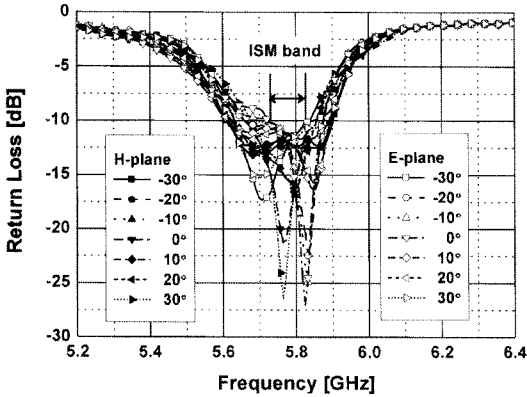


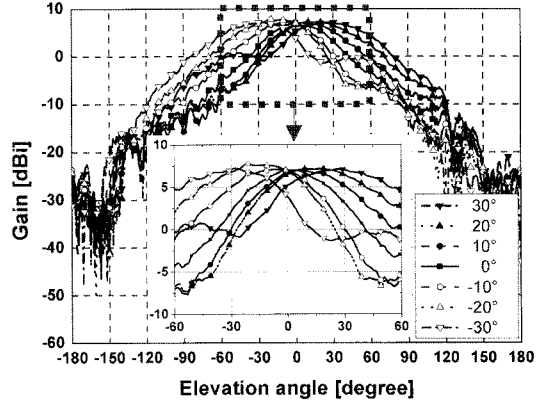
그림 6. 빔 조향 각도에 따른 측정된 반사 손실
Fig. 6. Measured return loss corresponding to beam steering angle.

와 기생 소자간의 간격(d)과 기생 소자의 부하 리액턴스를 조절하여 일정 레벨은 해결할 수 있는 있을 것으로 사료되며, 부엽의 최소화를 통한 지향성 향상을 위한 연구는 필요하다.

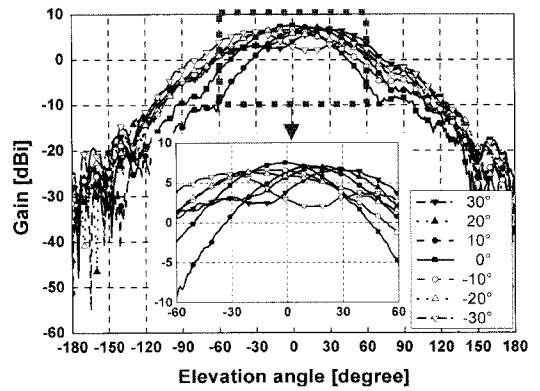
그림 5에서 H-평면의 기생 소자의 상호 결합 특성은 거의 동일하고 E-평면에서는 E1이 E2보다 상호 결합 특성이 우수하므로 표 2에서의 같이 E-평면 조향 시에는 #H1과 #H2의 리액턴스는 동일한 값을 그리고 H-평면 조향 시에는 #E1과 #E2의 리액턴스는 다른 값을 가지게 하여 동일한 상호 결합 특성을 가지게 하기 때문에 H-평면으로 스캔 시 E-평면의 방사 패턴의 변화와 E-평면 스캔 시 H-평면의 방사 패턴의 변화는 거의 차이가 없었다.

제안된 안테나의 구조에서 다른 ϕ 방향에 대하여 빔 조향은 가능하다. 예를 들어, 대각선 $\phi=45^\circ$ 의 빔 조향을 하기 위해서는 #E1, #H1 그리고 #E2, #H2의 리액턴스를 조절하여 얻을 수 있다. 그러나 기생 소자가 있는 방향으로 빔을 조향하는 경우보다 빔 조향 각도 범위와 지향성은 더 작아지는 문제점이 있다.

표 3은 빔 조향 각도에 따른 이득 및 반치 전력 빔 폭의 측정 결과를 나타내었다. 여기서, #H1과 #H2의 상호결합은 그림 5에서처럼 동일한 특성을 보이므로 H-평면 +와 -방향 빔 조향은 서로 대칭적인 이득 및 반치 전력 빔 폭 특성을 보인다. 그러나 E-평면으로는 #E1과 #E2의 상호결합의 차이에 따라 대칭적인 결과를 얻을 수 없음을 실험 결과를 통해 확인하였다.



(a) H-평면
(a) H-plane



(b) E-평면
(b) E-plane

그림 7. 빔 스캔 각도에 따라 측정된 방사 패턴
Fig. 7. Measured radiation pattern corresponding to beam scanning angle.

표 3. 제안된 안테나의 이득 및 반치 전력 빔 폭
Table 3. Gain and HPBW of the proposed antenna.

Steering angle [deg]	E-plane		H-plane	
	Gain [dBi]	HPBW [deg]	Gain [dBi]	HPBW [deg]
-30	6.18	68	7.261	62
-20	6.39	78	7.779	59
-10	6.63	78	7.129	52
0	7.53	58	7.022	47
10	7.1	59	7.052	52
20	6.87	64	7.192	62
30	6.78	60	7.157	65

IV. 결론

본 논문에서는 단일 급전 능동 소자와 4개의 기생 소자로 구성된 5.8 GHz ISM 대역에서 2차원적으로 빔을 제어할 수 있는 저가의 전자적인 빔 조향 배열 안테나를 제안하였다.

시뮬레이션 툴을 이용하여 설계하고 제작된 안테나는 기생 소자의 부하에 연결된 리액턴스를 조절하여 -10 dB 반사 손실 특성을 유지하며, H-평면과 E-평면으로 양각(θ) -30°에서 30°까지의 범위에서 만족할만한 빔 스캔 및 조향 성능을 구현하였다.

제안된 구조의 안테나는 향후 저가의 아날로그 빔 조향 배열 안테나로써 다양한 분야에 응용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] H. Steyskal, J. F. Rose, "Digital beamforming for radar systems", *Microwave J.*, vol. 32, no. 1, pp. 121-136, Jan. 1989.
- [2] K. Nobuyoshi, F. Mitosh, "Adaptive antennas", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 3, pp. 968-979, Mar. 2003.
- [3] R. Harrington, "Reactively controlled directive arrays", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-26, no. 3, pp. 390-395, May 1978.
- [4] R. J. Dinger, "A planar version of a 4.0 GHz reactively steered adaptive array", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-34, no. 3, pp. 427-431, Mar. 1986.
- [5] R. Schlub, T. Ohira, "Seven element ground skirt monopole ESPAR antenna design from a genetic algorithm and the finite element method", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, pp. 3033-3039, Nov. 2003.
- [6] H. Kawakami, T. Ohira, "Electrically steerable passive array radiator(ESPAR) antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 2, pp. 43-50, Apr. 2005.
- [7] Y. Yusuf, X. Gong, "A low-cost patch antenna phased array with analog beam steering using mutual coupling and reactive loading", *IEEE Trans. Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 81-84, 2008.

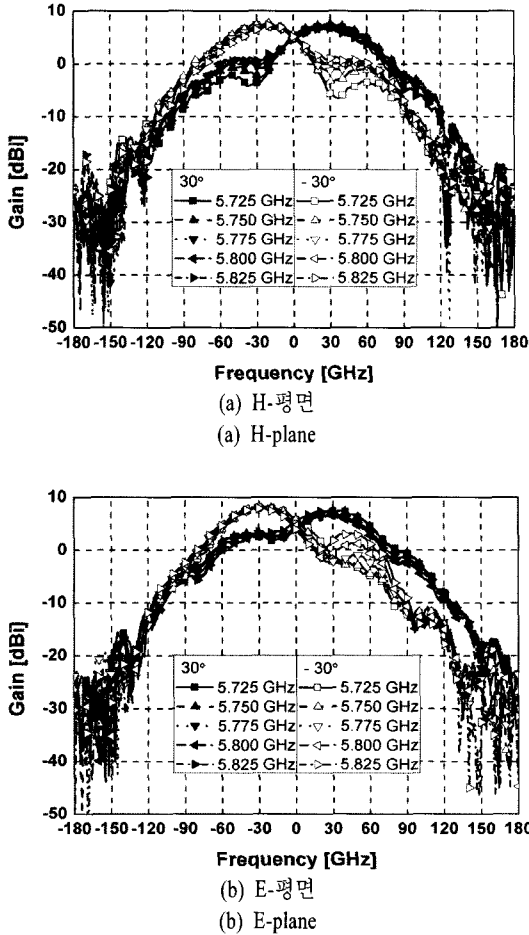
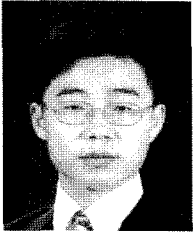


그림 8. 대역 내 주파수에 따라 측정된 방사패턴
Fig. 8. Measured radiation pattern corresponding to each frequency in band.

리액턴스 부하를 이용한 빔 조향 안테나에서 중요하게 고려할 성능 평가 항목 중 하나는 사용 주파수 대역 내에서 각각의 주파수에 따라 동일한 빔 조향 특성을 나타내는가이다. 그림 8은 $\pm 30^\circ$ 도 조향 시에 ISM 대역 내에서 25 MHz 간격의 주파수에 따른 방사 패턴 측정 결과를 나타내었다. 측정 결과에서 빔 조향 각도는 지향성이 낮은 안테나 특성을 고려할 때 동일한 빔 조향 성능을 보였으나, 부엽 특성은 측정 주파수에 따라 차이를 보였다. 차이를 보이는 이유는 그림 4의 가변 리액턴스 제어 회로의 주파수에 따른 리액턴스 차이 때문이며, 실제 안테나 설계 시에는 5.775 GHz의 리액턴스를 가지고 최적화하여 설계하였기 때문이다.

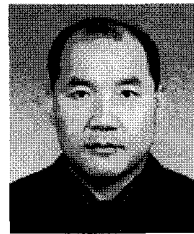
김 영 구



1999년 2월: 청주대학교 반도체공학과 (공학사)
 2002년 2월: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
 2002년 9월~현재: 충북대학교 전파공학과 박사수료
 2002년 3월~현재: 한국전자통신연구원 근무

[주 관심분야] 위성 배열 안테나, 스마트 안테나, RF/MW 부품 및 시스템

유 종 준



1984년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학사)
 1986년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학박사)
 1989년~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원 팀장
 [주 관심분야] RF/MW 소재 및 부품, RF 소재 측정기법

최 익 권



1974년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사)
 1976년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 오하이오 주립대학교 전자공학과 (공학박사)
 1976년 3월~1979년 6월: 육군 3사

관학교 교수부 물리학교관
 1982년 10월~1986년 8월: 미국 오하이오 주립대학교 Electro Science Laboratory 연구조교
 1986년 9월~1987년 8월: 미국 메사추세츠 주립대학교 Antenna Laboratory 연구원
 1987년 9월~1993년 8월: 한국전자통신연구원 이동통신연구단 전파공학연구실 실장
 1993년 9월~1994년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 조교수
 1994년 3월~현재: 충북대학교 전기 전자 컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] DBF 배열안테나, 위성 배열 안테나, 휴대단말용 소형안테나

강 상 기



1988년 2월 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2004년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
 1989년: 삼성반도체통신

1989년~1992년: 해군통신장교
 1994년~2005년: 한국전자통신연구원 선임연구원
 2005년~현재: 군산대학교 전자정보공학부 조교수
 [주 관심분야] RF/MW 부품 및 시스템

김 태 홍



1985년 2월: 경북대학교 금속공학과 (공학사)
 1987년: 포항제철(주)
 1989년 2월: 경북대학교 금속공학과 (공학석사)
 2002년 2월: 연세대학교 세라믹공학과 (공학박사)

1989년~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 [주 관심분야] RF/MW 소재 및 부품, RF 소재 측정기법