

갭 결합된 단향성 유전체 방사체를 적용한 비방사 유전체 로트만 렌즈

Non-Radiative Dielectric(NRD) Rotman Lens with Gap-Coupled Unidirectional Dielectric Radiator(UDR)

이 재 곤 · 이 정 해

Jae-Gon Lee · Jeong-Hae Lee

요 약

본 논문에서는 구조적으로 비방사 유전체 로트만 렌즈에 적절한 갭 결합된 단향성 유전체 방사체를 안테나단으로 갖는 비방사 유전체 로트만 렌즈를 설계하였다. 비방사 유전체 로트만 렌즈는 어레이 팩터의 부엽의 최소화를 위해서 최적화 설계되었고 단향성 유전체 방사체의 공진기와 갭의 길이와 같은 설계 파라미터는 차단 영역 도파관의 등가회로 모델을 이용하여 계산하였다. 동작 주파수는 38 GHz이고 시뮬레이션 되어진 단향성 유전체 방사체의 결과(산란 행렬, 방사 패턴)는 측정되어진 결과와 일치함을 보였다. 단향성 유전체 방사체 안테나단을 포함한 다중빔 피드인 로트만 렌즈의 방사 패턴은 측정되어진 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 방사 패턴에 로트만 렌즈의 최적화된 어레이 팩터를 곱해서 구하였다. 구해진 전체 방사 패턴에서 -60 dB 이상 부엽이 억제되어짐을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, nonradiative dielectric(NRD) rotman lens with a gap-coupled unidirectional dielectric radiator(UDR) has been designed. Gap-coupled UDR is structurally suitable for NRD rotman lens. We have optimized NRD rotman lens for minimizing side-lobe, and calculated design parameters of UDR such as length of resonator and distance of gap using an equivalent circuit model of an evanescent NRD guide. Experimental prototype of UDR is fabricated and measured at the center frequency of 38 GHz. The simulated S-parameter and far-field radiation beam pattern of UDR show good agreements with measured data. Finally, total beam pattern of NRD rotman lens of multi-beam feed has been obtained using a measured pattern of UDR and array factor of NRD rotman lens. The obtained beam pattern shows remarkably suppressed side-lobe.

Key words : Non-Radiative Dielectric(NRD) Rotman Lens, Unidirectional Dielectric Radiator(UDR)

I. 서 론

차량 충돌 방지 레이더는 좌우 및 가운데 차선의 거리를 측정하거나 물체를 감지해야 하므로 최소한 세 개의 빔을 필요로 하게 된다. 다중빔 조향 구조로는 maxon-bluss matrix, butler matrix, ruze 렌즈, 로트

만 렌즈 등이 있다. 여기서 maxon-bluss matrix는 많은 수의 방향성 결합기가 필요하므로 비경제적이다. Butler matrix도 많은 결합기와 위상 변이기로 인해서 가격 상승의 원인이 되고 ruze 렌즈는 두 개의 출력 빔으로 인하여 차량 충돌 방지 레이더에는 적절하지 않다^[1]. 하지만 로트만 렌즈는 저가격으로 만들 수

「본 논문은 2003학년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 수행되었음.」

홍익대학교 전자통신공학과(Department of Radio Science and Communication Engineering, Hong-Ik University)

· 논문 번호 : 20030809-113

· 수정완료일자 : 2003년 11월 21일

있는 장점을 가지고 있기 때문에 차량 충돌 방지 레이더에 적당한 다중 빔 조향 구조 중에 하나이다. 이러한 로트만 렌즈는 평판 도파관이나 마이크로스트립으로 설계를 할 수 있지만 차량 충돌 방지 레이더의 동작 주파수가 밀리미터파 대역이므로 전파 손실이 적은 비방사 유전체 도파로로 설계하는 것이 유리하다. 부연 설명하자면, 평판 도파관으로 설계했을 때에는 부피가 커지고 마이크로스트립으로 설계했을 때에는 전도 손실로 인해 빔 어둡의 감소를 유발시킬 수 있으므로 비방사 유전체 도파로 로트만 렌즈(NRD rotman lens)를 설계하는 것이 적절하다^[2].

이러한 비방사 유전체 로트만 렌즈에 적용할 수 있는 안테나를 살펴보면 슬롯 어레이 안테나^[3], 로드 (rod) 안테나^[4], 단방향성 유전체 방사체(unidirectional dielectric radiator)^[5] 등이 있다. 슬롯 어레이 안테나는 비방사 유전체 로트만 렌즈의 출력 전송 선로가 휘어짐으로 인해서 안테나 설계가 복잡해지고 로드 안테나는 유전체가 평판 전도체 외부에 존재하므로 충격에 취약하다는 단점이 있다. 단방향성 유전체 방사체는 구조적으로 단순하고 방사체가 평판 전도체 내부에 존재하므로 비방사 유전체 로트만 렌즈에 매우 적합한 구조이다. 본 논문에서는 단방향성 유전체 방사체를 비방사 유전체 로트만 렌즈의 안테나로 이용하기 위해서 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체를 제안하였고 설계하였다.

갭 결합된 단방향성 유전체 방사체와 갭 결합된 비방사 유전체 필터와 구조적 유사성을 이용하여 유전체 방사체의 설계 등가회로 모델을 제안하였다. 단방향성 유전체 방사체의 설계 파라미터인 공진기와 갭의 길이는 등가회로 모델로 계산되어졌고 전도 평판 끝단에서 공진기의 위치는 임피던스 정합을 위해서 안소프트사의 high frequency structure simulator (HFSS)를 이용해서 최적화시켰다. 비방사 유전체 로트만 렌즈는 도체 평판 사이에 타원형 타입의 유전체가 삽입된 형태이다. 본 논문에서 설계된 렌즈는 세 개의 입력 포트와 29개의 출력 포트에 이루어져 있고 각각의 출력 포트에는 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체가 연결되어 있다. 이러한 비방사 유전체 로트만 렌즈의 어레이 팩터는 부엽의 최소화를 목적으로 최적화하였다. 시제품으로 제작된 단방향성 유전체 방사체의 중심주파수는 38 GHz이고 유전체는 유

전율이 2.08인 테프론을 사용하였다. 또한 단방향성 유전체 방사체의 입력 포트에 LSM₁₀ 모드를 인가시키기 위해서 비방사 유전체 도파로와 90° 회전된 직각 도파관의 변이기를 제작하였다. 전체적인 로트만 렌즈의 빔 패턴은 단방향성 유전체 방사체의 측정된 빔 패턴과 비방사 유전체 로트만 렌즈의 최적화된 어레이 팩터를 고려해서 계산되어졌는데 그 결과 -60 dB 이상 부엽이 억제됨을 알 수 있었다.

II. 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체

그림 1은 직각 도파관과 비방사 유전체 도파로 변이기를 포함한 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체 구조이다. 공진기의 길이, 갭의 길이와 공진기의 위치를 각각 R, G, P로 나타내었고 이러한 파라미터들은 각각 중심 주파수, 임피던스 정합, 유효 안테나 개구면 크기와 관련되어 있다. 직각 도파관과 비방사 유전체 도파로 변이기를 살펴보면 비방사 유전체 도파로의 LSM 모드는 평판 전도체와 평행하지만 도파관의 기본 모드인 TE₁₀ 모드는 수직하므로 도파관을 90° 회전시킨 후 연결시킨다. 이로써 비방사 유전체 도파로에 LSE 모드는 입사되지 않고 LSM 모드만 입사시킬 수 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체의 설계를 위하여 등가회로 모델을 제시하였다. 방사되는 중심주파수에서 유전체 방사체에 입사되는 전파가 반사 없이 외부로 방사되므로 그림 2와 같이 가상 유전체를 삽입하여 단방향성 유전체 방사체 설계에 이용하였다. 물론 임피던스 정합 측면에서 보면 가상 유전체는 실제로 존재하지 않으므로 유전체 방사체의 정합이 완벽하지 않아서 등가

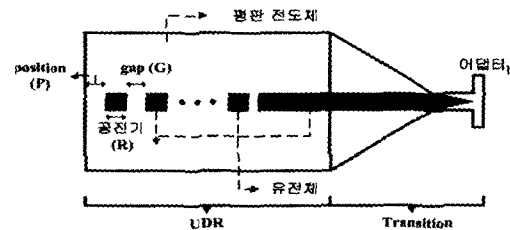


그림 1. 직각 도파관과 비방사 유전체 도파로 변이기를 포함한 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체
Fig. 1. Structure of a gap-coupled UDR with waveguide to NRD guide transition.

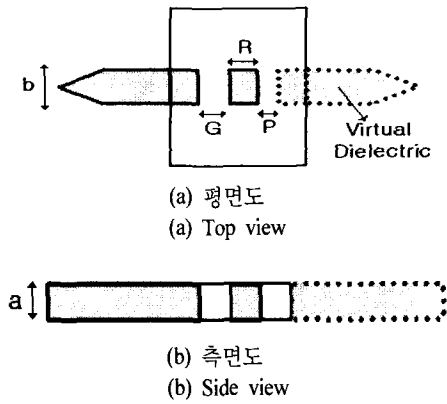


그림 2. 가상 유전체를 가진 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체

Fig. 2. Schematic diagram of gap-coupled UDR with a virtual dielectric.

회로 모델로 갭 길이(G)와 공진기 길이(R)를 결정 한 후 공진기의 위치(P)를 안소프트사의 HFSS를 이용하여 최종 임피던스 정합을 하였다. 그림 2에서와 같이 가상 유전체를 갖는 갭 결합된 단방향성 유전체 방사체는 구조적으로 갭 결합된 비방사 유전체 필터와 유사하므로 비방사 유전체 필터 설계시 이용되는 차단 영역 도파관의 모델을 사용하였다⁶⁾.

비방사 유전체 도파관의 유전체의 높이와 너비는 식 (1a)와 식 (1b)에 의해서 계산되어진다.

$$a/\lambda_0 = 0.45 \quad (1a)$$

$$(b/\lambda_0)\sqrt{\epsilon_r - 1} = 0.4 \sim 0.6 \quad (1b)$$

여기서 a 는 유전체의 높이, b 는 유전체의 너비, ϵ_r 은 유전체의 유전율이다. 그림 3에서의 에어 갭 구역은 비방사 유전체 도파로는 유전체 도파로와 구조적

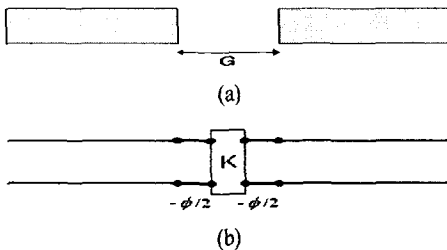


그림 3. (a) 갭을 가진 유전체, (b) K-인버터의 등가 회로

Fig. 3. (a) Dielectric pair separated by gap, (b) Equivalent circuit of K-inverter

으로 유사하므로 차단 영역 도파관의 K-인버터로 나타낼 수 있다. 이 때 K 와 ϕ 는 식 (2), (3), (4)로 주어 진다⁷⁾.

$$\frac{K}{Z_g} = \left| \tan \left(-\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2X_b}{Z_g} + \frac{X_a}{Z_g} \right) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{X_a}{Z_g} \right) \right) \right| \quad (2)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \left(\frac{2X_b}{Z_g} + \frac{X_a}{Z_g} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_a}{Z_g} \right) \quad (3)$$

여기서 $X_a = jZ_e \tanh(\alpha l/2)$, $X_b = jZ_e \sinh(\alpha l)$ 이다. 이 때 $Z_e = \omega\mu/\alpha$ 이고 $Z_g = \omega\mu/\beta$ 이다.

$$\frac{K_{01}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi\omega\lambda}{2g_0g_1\omega_1}} \quad (4a)$$

$$\frac{K_{j,j+1}}{Z_0} \mid_{j=1,\dots,n-1} = \frac{\pi\omega\lambda}{2\omega_1} \frac{1}{\sqrt{g_jg_{j+1}}} \quad (4b)$$

$$\frac{K_{n,n+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi\omega\lambda}{2g_n g_{n+1} \omega_1}} \quad (4c)$$

$$\omega_\lambda = \left[\frac{\lambda_{g1} - \lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \right] \approx \left(\frac{\lambda_{g1}}{\lambda_0} \right)^2 \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \right) \quad (4d)$$

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} \quad (4e)$$

여기서 g_0, g_1, \dots, g_{n+1} 은 저역통과 필터의 소자 값, ω_1 은 정규화된 차단 주파수, ω_0 는 필터의 중심 주파수, ω_1 과 ω_2 는 통과대역의 아래와 위의 주파수, $\lambda_{g0}, \lambda_{g1}, \lambda_{g2}$ 는 $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 일 때의 관내 파장이다. 식 (2)와 식 (4)로부터 갭의 길이 (G)를 계산할 수 있고 공진기 길이(R)은 식 (3)과 식 (5)를 이용해서 계산할 수 있다.

$$R = \frac{[\pi + 0.5(\phi_1 + \phi_2)]}{\beta_0} \quad (5)$$

단방향성 유전체 방사체의 동작 주파수는 38 GHz이고 유전체의 유전율은 2.08이며 유전체의 높이와 너비는 각각 3.55 mm와 4.175 mm이다. 위의 과정으로 구한 갭의 길이(G)는 4.59 mm, 공진기의 길이(R)는 2.89 mm로 계산되어졌다. 공진기 위치(P)는 앞에서 기술한 바와 같이 가상 유전체는 실제로 존재하지 않으므로 유전체 방사체의 정합이 이루기 위해서 안소프트사의 HFSS를 이용하여 최적화한 결과 3.6 mm로 결정되었다.

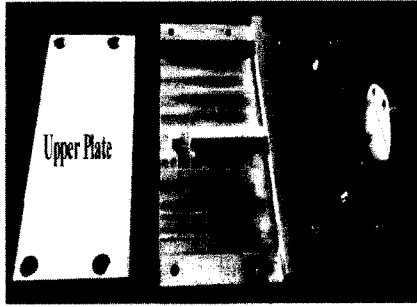


그림 4. 직각 도파관과 비방사 유전체 도파로 변이기를 포함한 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 실물 사진

Fig. 4. Photograph of gap-coupled UDR with transition.

그림 4는 시제품으로 제작된 비방사 유전체 방사체의 실물사진이다. 그림에는 LSM₁₁ 모드를 인가시키기 위한 직각 도파관과 비방사 유전체 도파로 변이기가 포함된 것을 알 수 있다. 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 반사 계수는 그림 5에 나타내었다. 측정된 동작 주파수는 38.6 GHz이고 반사 계수는 -35 dB임을 알 수 있다. 제작된 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 특성을 측정하기 위해서 25 dBi Q-밴드 혼 안테나와 HP8510C 회로 분석기가 사용되어졌고 원거리 방사 패턴은 5° 간격으로 측정하였다. 38.6 GHz에서 반사계수는 약 -30 dB였고 3 dB 빔폭은 E-평면에서 30°이고 H-평면에서 60°이었다. 그리고 단향성 유전체 방사체의 이득은 13.1 dBi이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 매우 일치함을 알 수 있고 공극 편파와 교차 편파의 분리도는 25 dB 이상이므로 단향성 유전체 방사체가 선형 편파를 가짐을 확인하였다.

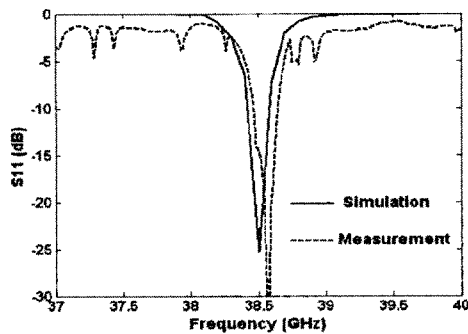
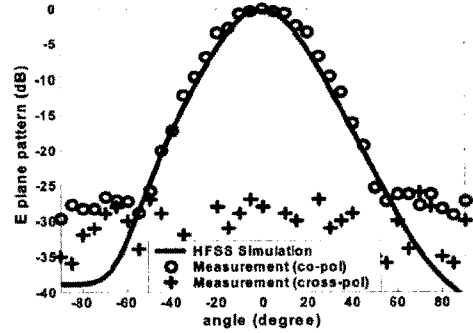
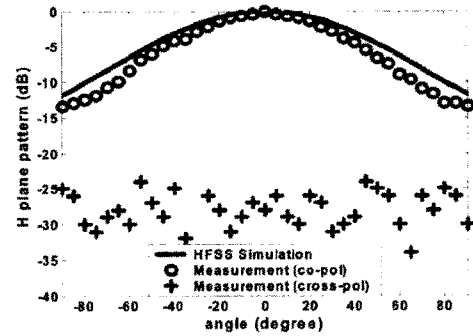


그림 5. 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 반사 계수

Fig. 5. Reflection coefficient of gap-coupled UDR.



(a) 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 E-평면 패턴
(a) E-plane pattern of gap-coupled UDR



(b) 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 H-평면 패턴
(b) H-plane pattern of gap-coupled UDR

그림 6. 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 패턴

Fig. 6. Pattern of gap-coupled UDR.

Ⅲ. 비방사 유전체 로트만 렌즈의 어레이 팩터

그림 7은 단향성 유전체 방사체가 연결된 비방사 유전체 로트만 렌즈의 구조이다. 본 논문에서는 이러한 비방사 유전체 로트만 렌즈의 어레이 팩터를 부엽의 최소화를 목적으로 최적화하기 위해서 원거리 근사화에 기초한 2-D 그린 함수^[8]와 2-D Friis 전송식을 이용했다. 비방사 유전체 로트만 렌즈의 내부에서의 전계는 식 (6)과 식 (7)에 의해서 주어진다.

$$E(\rho, \theta) = E_0 D \sqrt{\frac{k}{2\pi\rho}} E^\circ(D, \theta) \quad (6)$$

$$E^\circ(D, \theta) = \frac{\cos \theta + \cos \theta_i}{2} \frac{\sin\left(\frac{kD}{2}(\sin \theta - \sin \theta_i)\right)}{\frac{kD}{2}(\sin \theta - \sin \theta_i)} \exp\left(-jk\rho + j\frac{\pi}{4}\right) \quad (7)$$

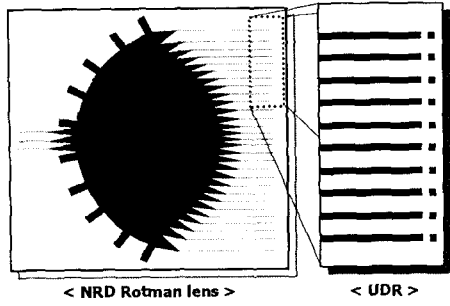


그림 7. 단향성 유전체 방사체가 연결된 비방사 유전체 로트만 렌즈의 구조

Fig. 7. Structure of an NRD rotman lens with gap-coupled UDR.

여기서 (ρ, θ) 는 렌즈 내부의 관찰점이고, D 는 출력 포트의 개구면 너비이다. 그리고 입력과 출력 전송선을 고려한 i 번째 입력 포트에서 j 번째 출력 포트까지의 전달 계수는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{kD_j D_i}{2\pi\rho}} E_j(D_j, \theta_j) E_i(D_i, \phi_i) \cdot \exp(-jk\rho_{ij} + k_c \rho_c) \quad (8)$$

여기서 ρ_{ij} 는 i 번째 입력 포트에서 j 번째 출력 포트까지의 거리, ρ_c 는 출력 전송선의 길이, k_c 는 전송선에서의 유효 유전율을 고려한 파수이다.

$$AF = \left| \sum C_i \exp(ja_i + jk_0 a_i \cdot r_i) \right| \quad (9)$$

최종적으로 어레이 팩터는 식 (9)로 계산할 수 있고 C_i 와 a_i 는 식 (8)의 크기와 위상, a_i 과 r_i 는 관찰점의 단위 벡터와 소스 점에서의 위치 벡터를 나타낸다. 이 때의 어레이 팩터는 렌즈내의 다중반사나 출력 전송 선로의 커플링 등을 고려하지 않은 근사 결과이다.

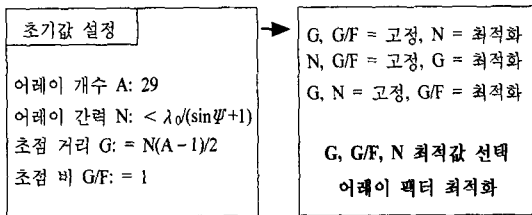


그림 8. 부엽의 최소화를 위한 어레이 팩터 최적화 과정

Fig. 8. Flowchart for optimization of array factor to obtain minimum side-lobe.

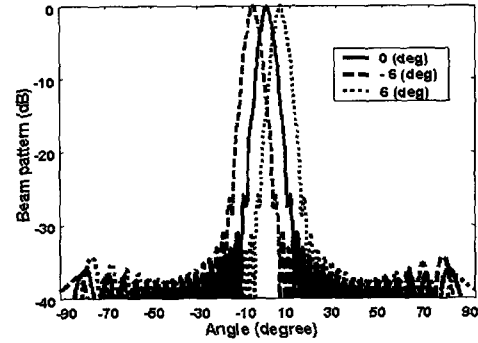


그림 9. 최적화된 어레이 팩터(어레이 간격=5 mm, 초점거리=16 λ₀, 초점 비=0.997)

Fig. 9. Optimized array factor(array spacing=5 mm, focal length=16 λ₀, focal ratio=0.997).

어레이 팩터는 그림 8과 같이 초기값을 설정하고 각각의 파라미터에 대해서 반복적인 계산을 통해서 최적화하였는데, 그 파라미터는 어레이 간격, 초점 거리, 초점 비로 이루어져 있다. 어레이 개수는 29로 고정하였고 빔 각도는 ±6°로 하였다. 계산 결과, 빔 폭은 초점 비와 정비례, 어레이 간격과는 반비례 관계를 가지고 있었다. 그리고 부엽은 어레이 간격과 연관이 있다. 그림 8을 통해서 구한 각 파라미터의 최적값은 어레이 간격은 5 mm, 초점 거리는 16 λ₀, 초점 비는 0.997이다. 그림 9를 보면 메인 빔과 부엽의 차가 34 dB 이상 됨을 알 수 있다.

IV. 전체 비방사 유전체 로트만 렌즈의 방사 패턴

앞에서 구한 단향성 유전체 방사체와 비방사 유

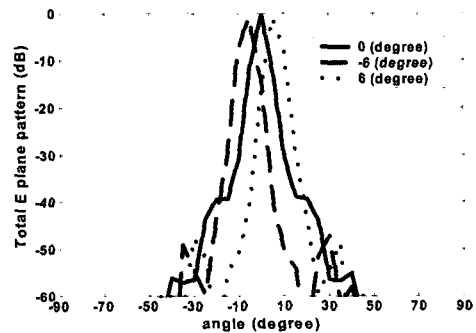


그림 10. 전체 로트만 렌즈의 E-평면 방사 패턴

Fig. 10. Total E-plane radiation pattern of rotman lens.

표 1. 단향성 유전체 방사체와 비방사 유전체 로트만 렌즈의 파라미터

Table 1. Parameters of UDR and NRD rotman lens.

동작 주파수	38 GHz	유전율	테프론 2.08
단향성 유전체 방사체	G (갭 길이)	R (공진기 길이)	P (공진기 위치)
	4.59 mm	2.89 mm	3.6
비방사 유전체 로트만 렌즈	N (어레이 간격)	G (초점 거리)	G/F (초점 비)
	5 mm	$16 \lambda_g$	0.997

전체 로트만 렌즈의 파라미터는 표 1과 같다. 다중 빔 피드인 로트만 렌즈의 전체 방사 패턴은 측정되어진 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 방사 패턴에 최적화된 이론치인 로트만 렌즈의 어레이 팩터를 곱으로 구하였다. 그림 10은 전체 로트만 렌즈의 E-평면의 방사 패턴을 보여주고 있다. 3 dB 빔 폭은 5°이고 부엽은 -60 dB 이상 감소함을 알 수 있다.

V. 결 론

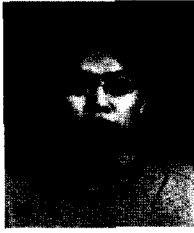
본 논문에서는 비방사 유전체 로트만 렌즈의 어레이 팩터를 부엽의 최소화를 위해서 최적화하였고 렌즈의 안테나로 적합한 갭 결합된 단향성 유전체 방사체를 제안, 설계하였다. 어레이 팩터 계산을 위해서 원거리 근사화에 기초한 2-D 그린 함수와 2-D Friis 전송식을 이용했다. 갭 결합된 단향성 유전체 방사체의 파라미터인 공진기 길이와 갭의 길이는 차단 영역 도파관의 등가회로 모델을 통해서 설계되었고 공진기의 위치는 임피던스 정합을 목적으로 FEM 시뮬레이터로 계산하였다. 단향성 유전체 방사체의 동작 주파수는 38 GHz이고 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 전체 비방사 유전체 로트만 렌즈의 방사 패턴은 단향성 유전체

방사체의 측정된 빔 패턴과 비방사 유전체 로트만 렌즈의 계산되어진 어레이 팩터를 고려해서 구했는데 그 결과 -60 dB 이상 부엽이 억제됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. T. Lo, S. W. Lee, *Antenna handbook*, Ch. 17, Ch. 19, ITP, 1993.
- [2] Jae-Gon Lee, Jeong-Hae Lee and Heung-Sik Tae, "Design of a multi beam feed using a nonradiative dielectric rotman lens", *IEICE Trans. Communication*, vol. E85-B, no. 6, pp. 1178-1184, Jun. 2002.
- [3] Johannes A. G. Malherbe, "The design of a slot array in nonradiating dielectric waveguide, Part 2: experiment", *IEEE Trans. AP*, vol. AP-32, no. 12, pp. 1341-1344, 1984.
- [4] Yih Shiau, "Dielectric rod antennas for millimeter-wave integrated circuits", *IEEE Trans. MTT*, vol. 24, no. 11, Nov. 1976.
- [5] Ke Wu, Ji Li and Renato G. Bosisio, "A low-loss unidirectional dielectric radiator(UDR) for antenna and space power combining circuits", *IEEE Trans. MTT*, vol. 42, no. 2, Feb. 1994.
- [6] 김소영, 이정해, "차단주파수 영역 도파관 등가회로 모델을 이용한 gap-coupled NRD guide 대역통과 여파기의 설계", 한국전자파학회 논문지, 11 (6), pp. 990-995, 2000년 9월.
- [7] G. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Micro-wave filters, impedance matching networks, and coupling structures*, Artech House, 1980.
- [8] M. S. Smith, A. K. S. Fong, "Amplitude performance of Ruze and Rotman lens", *The Radio and Electronic Engineer*, vol. 53, no. 9, pp. 329-336, Sep. 1983.

이재곤



1999년: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)

2001년: 홍익대학교 대학원 전파공학과 (공학석사)

2001년 3월~현재: 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리

미터파 회로 설계, Meta-materials

이정해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)

1993년 3월~1996년 2월: General

Atomics 교환 연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 부교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 밀리미터파 진단