

경계적분법과 세그멘테이션 기법을 이용한 광대역 지수함수 테이퍼 로트만렌즈의 해석 및 설계

*이 광 일, **이 일 규, ***오 승 업
*국방과학연구소, **한국전자통신연구원, ***충남대학교
전화 : 042-821-2486/ 핸드폰 : 017-671-6340

Analysis and Design of Wideband Rotman Lens with Exponential Taper Using Contour Integral and Segmentation Method

Kwang Il Lee, Il Kyu Lee, Seung Hyeub Oh
Agency for Defense Development, ETRI
Dept. of Electronics Chungnam National University
E-mail : kilee11@netian.com

Abstract

This paper has been studied analysis and design of microstrip Rotman lens operating over wide band and wide steering angle by the contour integral method along with the segmentation method. All mutual coupling, internal reflections between ports with exponential taper are taken into account. Equally spaced ports are designed and realized which gives less amplitude ripple at array ports. The measured results of 12 input and 12 output lens show ± 1.8 dB insertion loss deviation over 6~18GHz wide frequency range and beam steering accuracy less than 1° over $\pm 53^\circ$ angle and agrees well with the analysis results.

I. 서론

송신 빔의 제어를 위해 초고주파 로트만 렌즈[1]를 사용하는 다중빔 배열 송신기는 고가의 위상변이기를 사용하여 송신기 복사 빔의 방향을 제어하는 일반적인 위상배열 송신기에 비해 적은 비용으로 제작이 가능하

며, 광대역 주파수 범위에서 사용할 수 있고 구조가 간단한 장점을 가지고 있어서 군사용 전자전장비를 비롯하여 레이더 및 민수용으로는 자동차 충돌방지장치와 통신 중계기 등에도 이용 범위가 확대되고 있다[2].

마이크로스트립 로트만 렌즈는 많은 입출력 포트를 가지고 있는 다중포트 회로망으로서 상용으로 판매되고 있는 모멘트 기법과 FEM 기법을 이용한 해석 소프트웨어를 이용하여 산란계수 해석이 가능하나, 많은 시간이 소요되는 단점이 있어서 다중포트 로트만 렌즈의 해석을 위해서는 보다 효율적인 해석 방법이 요구된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 경계적분법과 세그멘테이션 기법을 이용하여 마이크로스트립 렌즈를 2차원의 평행판 다중포트 회로망으로 모델링하고 해석을 위한 영역을 평행판 영역인 렌즈 캐비티 영역과 테이퍼 영역으로 분할하여 경계적분을 수행하였다. 얻어진 2개 영역의 임피던스 행렬은 세그멘테이션 기법에 의해 합성된 후 렌즈 전체에 대한 산란행렬로 변환하고, 빔포트의 반사계수, 포트간 결합계수, 모든 배열포트로 전달되는 진폭 분포 특성과 위상 특성을 분석한다. 해석결과는 렌즈 내부 포트간 상호결합 현상과 다중 반사 현상을 포함한 특성을 포함하고 있으며, 실험을 위해 지수함수 테이퍼를 갖는 12 빔포트 12 배열포트의 6GHz~18GHz에서 동작하는 마이크로스트립 렌즈를 제안하고

설계하였으며, 실험결과와 해석결과와 잘 일치함을 확인하였다.

II. 경계적분법과 세그멘테이션 기법에 의한 렌즈 해석

2.1 경계적분법

그림1에 제시한 것과 같은 마이크로스트립 선로를 이용한 렌즈의 경우, 마이크로스트립의 두께가 동작주파수에서의 파장에 비해 매우 작기 때문에 두께 방향으로 전계의 변화가 없다고 가정할 수 있다. 그러므로 렌즈를 2차원 구조의 다중포트를 갖는 평행판으로 보고 경계적분법을 적용할 수 있다[3].

마이크로스트립 평행판 회로의 가장자리에서의 산란된 전자계를 고려하여 경계 C의 안쪽에 있는 한 점 s에서의 전압은 Kirchhoff의 적분식에 의해 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(s) = \frac{1}{2j} \int_C [k \cos \theta H_1^{(2)}(kr) v(s_0) + jw\mu h J_n(s_0) H_0^{(2)}(kr)] ds_0 \quad (1)$$

여기서, $k = w\sqrt{\mu\epsilon_0\epsilon_{eff}}$, r는 관찰점 s와 급전점 s_0 를 잇는 직선거리이며, θ 는 이 직선과 s_0 에서 돌레

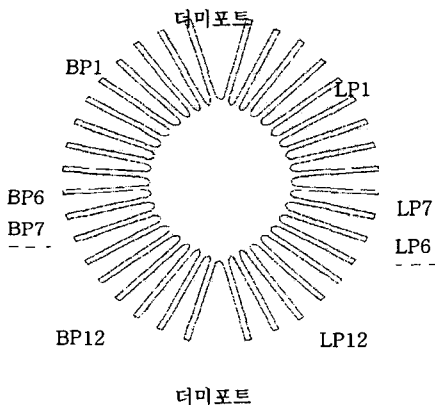


그림 1 12-입력 12-출력 지수함수 테이퍼 포트와 3- 다미포트를 갖는 로트만 렌즈의 형상

경계의 바깥쪽으로 수직인 선에 의해 만들어진 각이다. $H_1^{(2)}$ 는 제2종 1차 Hankel 함수이고, $H_0^{(2)}$ 는 제2종 0차 Hankel 함수이다. J_n 은 s_0 에서 평행판 쪽으로

흐르는 전류밀도이다. 식(1)에 따른 계산을 위해 평행판의 경계를 N 개의 분할 구간으로 나눈다. 이 때, 각 구간들의 폭 W_m ($m=1,2 \dots, N$)은 파장에 비해 상당히 작아야 한다. 여기서는 $0.02\lambda_{dh}$ (λ_{dh} 는 유전체에서의 실효파장)으로 하였다. 전압 [V]는 [Z]행렬과 전류[I]행렬로 나타낼 수 있다.

$$[V] = [A]^{-1}[B] [I] \quad (2)$$

여기서 [V]와 [I]는 각 구간에서의 전압과 전류로 구성되는 열벡터이다. [A]와 [B]는 회로의 형상에 의해 정해지는 $N \times N$ 행렬이다.

마이크로스트립 렌즈가 입력포트인 빔포트와 출력포트인 배열포트를 합쳐서 N 개의 포트를 갖고 있고 각 포트가 N_i 개의 서브포트로 나뉘어 진다면 렌즈 캐비티의 임피던스 행렬 Z_i 은 $N \cdot N_i \times N \cdot N_i$ 행과 열을 갖는 행렬이 된다.

마찬가지로, 테이퍼 영역에 대한 경계적분은 다중 회로망으로 다룰 수 있으며, 각 테이퍼의 임피던스 Z_i 는 따로 계산한다. 테이퍼의 측면 벽을 따라서는 결합포트가 없으며, 해당 구간의 전압 V는 경계조건 $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ 을 만족한다. 따라서 계산된 각 i 번째 테이퍼의 임피던스 Z_i^i 에서 해당되는 열과 행을 제거할 수 있다.

2.2 세그멘테이션 기법

세그멘테이션 기법을 로트만 렌즈에 적용하면 경계적분을 렌즈의 전 돌레 구간에 대해 수행할 때에 비해 상당히 시간을 줄일 수 있으며, 이로 인해 성능 최적화를 위한 반복 해석작업이 용이하다[4]. 로트만 렌즈의 경우, 포트의 개구면만으로 구성된 N 포트의 렌즈 캐비티 영역 r과 테이퍼와 전송선로로 구성된 N 개의 테이퍼 영역인 두 개의 세그먼트로 나누었다. 테이퍼 영역 중 전송선로가 커넥터와 연결되는 부분은 p 영역, 렌즈 캐비티의 개구면과 만나는 영역은 q 영역으로 명명하였다. 따라서, 그림 2와 같이 q_1 은 r_1 과 q_2 는 r_2 와 q_N 은 r_N 과 서로 결합한다. 빔포트와 배열 포트의 테이퍼는 포트의 개구면과 커넥터 부분을 동일하게 N_i 개로 분할한다. 또한, 테이퍼의 측면과 전송선로의 측면 부분도 $0.02\lambda_{dh}$ 이하의 간격으로 분할하여 경계적분시 각 구간에서는 동일한 전압을 갖는다고 가정한다. 테이퍼의 개구면은 렌즈 세그먼트와 테이퍼 세그먼트가 만나는 부분으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{q_n} = V_{r_n} \text{ and } i_{q_n} = -i_{r_n} \quad (3)$$

; $n = 1, 2, \dots, N$

세그먼트 l과 t의 Z-행렬은 다음과 같이 결합할 수 있다.

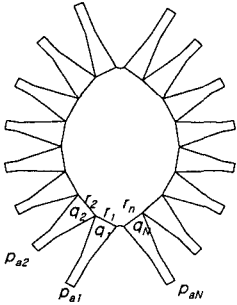


그림 3 로트만 렌즈 경계의 세그멘테이션

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_q \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pq} & Z_{pr} \\ Z_{qp} & Z_{qq} & 0 \\ Z_{rp} & 0 & Z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 행렬요소로서 0은 null 행렬을 가리킨다. 식 (9)을 식 (11)에 대입하여 V_r, V_q, i_q, i_r 을 제거하면

$$V_p = [Z] i_p \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 결국, 경계적분법으로 렌즈 캐비티와 테이퍼를 각각 계산한 후, 이를 세그멘테이션으로 결합할 경우, 테이퍼의 측면은 경계조건에 의해 해당 행과 열이 제거되므로, 테이퍼의 커넥터 부분과 포트 개구면의 분할을 N_i 로 동일하게 나누면, 임피던스 행렬의 크기는 $(N \times N_i) \times (N \times N_i)$ 가 된다.

다음으로 렌즈의 전체 산란 계수를 구하기 위해 인접 서브포트들 간에 전압이 서로 같다는 가정에 근거를 두고 서브포트들의 결합은 어드미턴스들의 합으로 나타낼 수 있으므로 이를 구하기 위해 다음과 같이 $[Z]$ 행렬의 역 행렬을 계산한다.

$$[Y] = [Z]^{-1} \quad (6)$$

렌즈 전체의 산란행렬은 다음의 관계식을 사용하여 어드미턴스 행렬로부터 직접 구할 수 있다

$$[S] = [Y_0]^{-1/2} ([Y_0] - [Y]) \cdot ([Y_0] + [Y])^{-1} [Y_0]^{1/2} \quad (7)$$

여기서 $[Y_0]$ 는 대각행렬로 대각원소들은 각 포트

에서의 어드미턴스로서 $1/Z_{01}, 1/Z_{02}, \dots, 1/Z_{0N}$ 이다.

II. 지수함수 테이퍼 렌즈의 설계와 해석

본 논문에서는 12 빔포트, 12 배열 포트 렌즈의 설계를 위해 포트 중심간의 간격을 $0.52 \lambda_{dl}$ 로 균일하게 하면서, 최대 조향각이 $\pm 53^\circ$ 가 되도록 하였으며, 주파수는 5GHz에서 18GHz 까지 동작하도록 지수함수 테이퍼를 사용하여 포트 간의 상호결합을 최적화하였다. 렌즈의 구조는 대칭형 구조를 택하였으며, 테이퍼의 길이는 6GHz에서 $0.08 \lambda_{dl}$ 로 하였다. 제작할 렌즈를 고려하여 $\epsilon_r=2.33, H=0.7874\text{mm}, t=0.03556\text{mm}, \tan\delta=0.0012$ 인 RT-Duroid 5870 Rogers사 기판을 사용하였고, 마이크로 스트립 선로에서의 프링징 필드(Fringing field)를 고려하여 실효 선로폭을 적용하였다.

그림 4에 제작된 12 빔포트, 12 배열 포트 마이크로 스트립 렌즈의 형상을 도시하였다. 그림 4의 아래쪽이 빔포트들이고, 위쪽이 배열포트들이다. 지수함수 테이퍼와 연결되는 50Ω 전송선로의 길이는 SMA 동축 커넥터를 배치할 수 있도록 30mm로 하였다. 각각의 배열 포트 출력은 동일한 길이 동일한 위상지연을 갖는 동축 케이블을 사용하여 선형 배열된 각각의 안테나까지 연결된다. 기판과 커넥터 고정을 위한 케이스로서는 알루미늄을 사용하였고, 제작된 렌즈의 크기는 17.7 cm x 14.6 cm 이다.

그림 5 ~ 그림6 에 설계된 등간격 지수함수 테이퍼 렌즈의 해석결과와 실험결과를 비교 도시하였다. 그림 5는 6GHz에서 가장자리 빔포트로부터 배열포트로의 삽입손실 및 위상을 도시하였다. 그림 6은 18GHz에서의 결과를 나타내고 있다. 가장자리 빔포트는 가장 큰 53° 의 조향각을 이루는 포트로서 배열포트로 분포되는 진폭의 리플이 가장 큰 곳이다. 그러나, 그림에 나타난 것처럼 6GHz에서는 ± 0.9 dB, 12GHz에서는 ± 1.35 dB, 최고 주파수인 18GHz에서는 ± 1.8 dB의 적은 리플을 보이고 있으며 해석결과와 잘 일치하고 있다. 가장자리 빔포트에서 배열포트로 전달되는 위상도 매우 선형적인 변화를 보이고 있으며, 해석결과와도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 7 에 12 GHz에서 가장자리 빔포트와 가운데 빔포트로 급전될 때 빔조향 패턴을 해석결과를 측정결과와 함께 도시하여 비교하였다.

IV. 결론

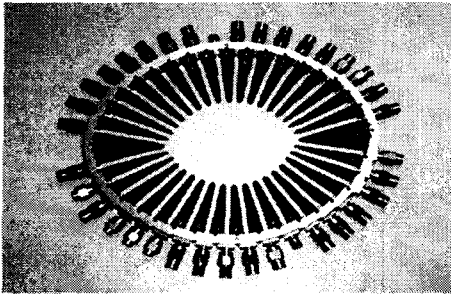


그림 4 제작된 등간격 12x12 포트 마이크로 스트립 렌즈

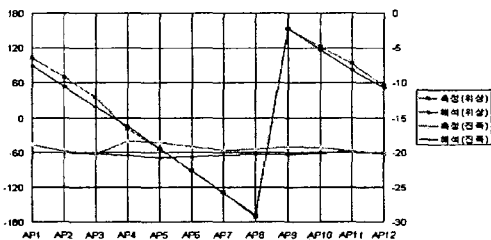


그림 5 가장자리 포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상 (6GHz)

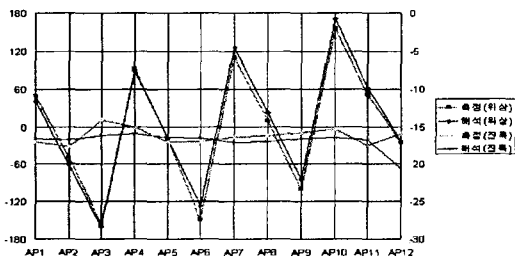


그림 6 가장자리 포트에서 배열포트로의 삽입손실 및 위상(18GHz)

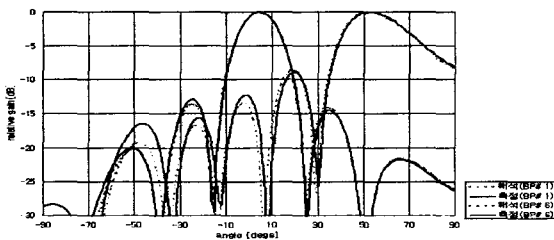


그림 7 12GHz에서의 빔조향 패턴(BP#1, BP#6)

본 논문에서는 경계적분법과 세그멘테이션 기법을 적용하여 광대역 마이크로스트립 로트만 렌즈를 해석하였다. 제시된 해석방법을 적용하여 3:1의 광대역 주파수와 $\pm 53^\circ$ 의 광 조향각 범위에서 동작하는 마이크로스트립 렌즈를 설계하고 배열포트로 전달되는 삽입손실의 리플과 위상오차를 최적화하였다. 측정결과 전 대역에 걸쳐 가장자리 포트에서 $\pm 1.8\text{dB}$ 이내의 리플특성을 얻었으며, 18GHz에서의 빔조향 오차는 0.9° 로서 좋은 결과를 얻었다. 빔포트와 배열포트의 경계면에 더미포트를 사용하여 내부 반사를 흡수하고 배열포트에의 리플을 최소화 할 수 있었다. 해석결과와 측정결과와의 비교를 통해 제시된 해석방법이 신뢰성있게 마이크로스트립 렌즈의 성능을 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 추후 포트와 포트 사이의 프런징 필드 교차영역에 대해 고차모드의 해석과 복사손실등을 고려한 정확한 모델링이 이루어진다면 마이크로스트립 렌즈의 설계 및 해석이 더욱 정확해지고 유용한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌(또는 Reference)

- [1] W. Rotman and R. F. Turner, "Wide-angle Microwave Lens for Line Source Application," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. AP-11, pp 623-632, November 1963
- [2] A. F. Peterson and E. O. Rausch, "Scattering Matrix Integral Equation Analysis for the Design of a Waveguide Rotman Lens," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, pp 870-878, May 1999
- [3] P. C. Scharma, K. C. Gupta, C. M. Tsai, J. D. Bruce, and R. Presnell, "Two-dimensional field analysis for CAD of Rotman-type beam-forming lenses," *Int. Jour. of MIMICAE*, Vol. 2. no. 2, pp 90-97, 1992
- [4] T. Okoshi, Y. Uehara, T. Takeuchi, "The segmentation method - An approach to the analysis of microwave planar circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 23, No.10, pp. 662-669, 1976