

Rotman 렌즈의 위상 오차 최소화를 위한 빔 곡선 최적화

Beam Curve Optimization for Minimizing the Phase Errors of Rotman Lens

박 주 래 · 박 동 철*

Joo-Rae Park · Dong-Chul Park*

요 약

본 연구에서는 Rotman 렌즈의 위상 오차를 최소화하는 빔 곡선을 구하는 최적화 방법을 제안하고 있다. 이 방법은 빔 포트로부터 배열안테나의 중심점과 배열안테나를 따라 대칭 또는 비대칭으로 놓인 두 개의 점으로 구성된 동위상점들을 통과하여 대응되는 동위상면까지의 3개의 경로길이는 동일하다는 개념에 근거를 두고 있다. 이 방법을 따르면, 각각의 빔 방향에 대하여 위상 오차를 최소화하는 배열안테나 상의 동위상점 집합을 찾으면 최적의 빔 포트 위치를 직접 구할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 저 위상 오차를 갖는 Rotman 렌즈의 빔 곡선을 구하는 가장 최적이며 효과적인 방법임을 보여준다.

Abstract

In this paper, we propose an optimization method for obtaining beam curve which minimize the phase errors of Rotman lens. This method is based on idea that 3 path lengths from a beam port through equal phase points, which consist of the center point of array antenna and two points placed symmetrically or asymmetrically along array antenna, to the corresponding phase front are equal. According to this method, the optimal locations of beam ports can be obtained directly by finding each equal phase point set on array antenna to minimize the phase errors for each beam direction. Simulation results show that the proposed method is the most optimal and effective method for determining the beam curve of Rotman lens with low phase errors.

Key words: Antenna Arrays, Beam Curve Optimization, Multiple Beam Antennas, Phase Errors, Rotman Lens

I. 서 론

Rotman 렌즈^[1]는 광대역 주파수 범위에서 광각의 스캔이 가능하고, 신뢰성이 높으며, 저 비용으로 제작할 수 있고, 몇 개의 렌즈가 적층되면 이차원 빔을 생성할 수 있기 때문에, 전자전장비, 미사일 탐색기, 자동차 충돌방지장치, 항공기 자동착륙장치, 통신 중계기 등의 다중 빔 형성 회로망으로 널리 사용되고 있다^{[2],[3]}.

Rotman 렌즈는 3개의 초점을 갖는 이차원 평행판 렌즈이다. 빔 곡선 상의 초점에 위치하는 빔 포트는 경로길이 오차가 0인 동위상면을 형성시키지만, 초점 사이 또는 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트는 경로길이 오차를 가지게 된다. 이러한 경로길이 오차로 인한 위상 오차는 스캔 각도가 넓거나 급전하는 배열 안테나의 길이가 길수록 더욱 증가한다. 위상 오차가 커지면 빔 조향 오차, 부엽 레벨, 빔 폭이 증가되어 다중 빔의 품질을 저하시키

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received June 23, 2014 ; Revised July 21, 2014 ; Accepted July 25, 2014. (ID No. 20140623-047)

· Corresponding Author: Dong-Chul Park (e-mail : dcpark@cnu.ac.kr)

므로 저 위상 오차를 갖는 Rotman 렌즈를 설계하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다^{[1][4]~[7]}.

Rotman은 3개의 초점을 포함하는 원형 빔 곡선을 가정하였다^[1]. 원형 빔 곡선은 가장 단순하지만, 위상 오차가 큰 단점이 있다. Katagi는 직선 배열안테나 상에 형성되는 제곱평균제곱근(Root Mean Square) 위상 오차를 감소시키는 빔 곡선을 구하는 방법을 제안하였다^[4]. 이 방법은 적분식으로 표현된 제곱평균제곱근 위상 오차를 최소화 하는 빔 포트의 위치를 이차원 공간에서 반복적으로 찾아야 하므로, 그 복잡성으로 인하여 일반적으로 빔 포트를 구하는 데 사용되지 않고 있으며, 최대 위상 오차를 기준으로 해를 구하는 방법인 참고문헌 [6]에 비해 최대 위상 오차가 큰 단점이 있다. Hansen은 빔 곡선을 원형 대신에 타원형으로 제안하였다^[5]. 타원형 빔 곡선은 원형보다는 위상 오차를 감소시킬 수 있지만, 참고문헌 [4], [6]에 비해 뚜렷한 위상 성능의 개선 효과는 나타나지 않는다. Uyguroglu는 참고문헌 [6]에서 2개의 빔 곡선을 구하는 방법을 제안하였다. 하나는 직선 배열안테나의 중심점과 중심점으로부터 대칭인 양쪽 끝 점을 통과하는 경로들 간의 위상 오차가 0이 되는 조건으로부터 빔 곡선을 구하는 방법이고, 또 다른 하나는 입자 무리 최적화(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 이용하여 이차원 공간에서 반복적으로 최대 위상 오차가 가장 작은 빔 포트를 구하는 빔 곡선 최적화 방법이다. 본 저자들은 빔 곡선의 형상에 관계없이 추가적으로 위상 오차를 감소시킬 수 있는 재초점(refocusing) 방법을 제안하였다^[7]. 이 방법은 주어진 렌즈의 형상에 대하여 위상 오차가 가장 작은 최적의 설계 파라미터를 구하는 방법으로 렌즈의 형상을 변화시키지 않으면서 주로 전송선 길이를 조정하여 위상 오차를 감소시키는 방법이다.

본 연구에서는 새로운 빔 곡선 최적화 방법을 제안하고 있다. 제안된 방법은 참고문헌 [6]에서 Uyguroglu에 의해 발표된 방법 중 하나인 엔드 포인트들에 대한 0 경로 길이 오차 방법(이하 “엔드 포인트 방법”이라 한다.)을 개선한 것으로 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합을 배열안테나의 중심점으로부터 비대칭인 경우를 포함하여 적용하고 있으며, 모든 빔 포트에 대하여 한 개의 동위상점 집합을 사용하는 대신에 각각의 빔 포트에 대하여

각각의 동위상점 집합을 사용하는 것을 특징으로 한다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법이 저 위상 오차를 갖는 Rotman 렌즈의 빔 곡선을 구하는 최적이며, 효과적인 방법임을 입증하고 있으며, 제안된 방법에 따라 구해진 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈는 재초점 방법을 적용하여 위상 성능을 극대화 할 수 있음을 보이고 있다.

II. 빔 곡선 최적화 방법

그림 1은 직선 배열안테나용 Rotman 렌즈의 구조이다. 렌즈의 평행판 영역(parallel plate region)에 존재하는 두 개의 곡선 상에 포트들이 위치한다. 렌즈의 배열 곡선에 있는 배열 포트들은 배열안테나에 있는 안테나 소자들과 TEM 모드 전송선에 의해 연결된다. 3개의 초점의 위치는 각각 $F_1(-F\cos\alpha, F\sin\alpha)$, $F_2(-F\cos\alpha, -F\sin\alpha)$, $F_0(-G, 0)$ 이다. 여기서 G 는 정축 초점거리(on-axis focal length)이고, F 는 비축 초점거리(off-axis focal length)이며, α 는 비축 초점 F_1 과 F_2 를 마주 보는 초점각도(focal angle)이다. β 는 α 에 의해 지정된 초점 F_1 에 대응하는 빔 조향 각도이며, β 와 α 의 관계식은 $\sin\beta = \gamma\sin\alpha$ 이다. $2V_m$ 은 직선 배열안테나의 길이이다. 빔 곡선과 배열 곡선의 파라미터는 O_1 을 원점으로 하는 좌표를 사용하며, 배열 안테나의 파라미터는 O_2 를 원점으로 하는 좌표를 사용한다.

3개의 초점으로부터 대응되는 동위상면까지 모든 전자파는 지나온 경로에 무관하게 동위상이라는 조건을 사용하면 배열 곡선 상의 배열 포트의 위치와 전송선의 길이

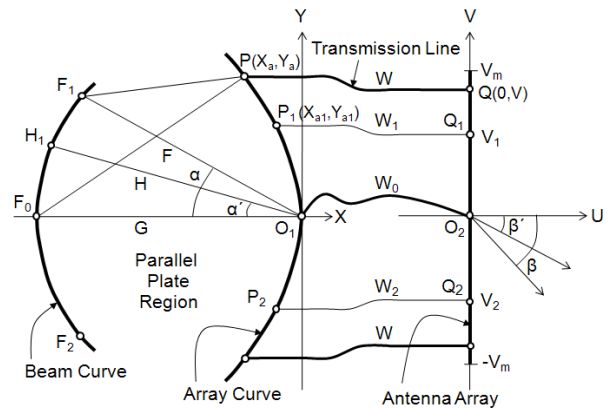


그림 1. Rotman 렌즈 구조
Fig. 1. Rotman lens geometry.

는 아래 제시된 3개의 수식을 이용하여 대수학적 처리방법을 통하여 구해진다.

$$\overline{F_1P} + W + V \sin \beta = F + W_0 \quad (1)$$

$$\overline{F_2P} + W - V \sin \beta = F + W_0 \quad (2)$$

$$\overline{F_0P} + W = G + W_0 \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 P 는 배열 곡선 상의 한 점으로 좌표는 (X_a, Y_a) 이다. V 는 직선 배열안테나 상의 한 점인 Q 의 세로 좌표이다. W 는 P 와 직선 배열안테나 상의 한 점 Q 를 연결하는 전송선의 길이이고, W_0 은 배열 곡선 상의 중심점 O_1 과 곡선 배열안테나 상의 중심점 O_2 를 연결하는 전송선의 길이이다.

동위상면에 대한 경로길이 차이는 Rotman 렌즈 급전 배열안테나의 위상 오차를 결정한다. 배열안테나 소자의 위치 $Q(0, V)$ 에 대하여 빔 포트 H_1 의 경로길이 오차는 점 P 와 점 Q 를 경유하는 H_1 로부터 동위상면까지 경로길이와 점 O_1 와 점 O_2 를 경유하는 H_1 로부터 동위상면까지 경로길이 간의 차이에 의해 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta L = \overline{H_1P} + W + V \sin \beta' - H - W_0 \quad (4)$$

3개의 초점을 포함하여 초점 사이 또는 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트에서 위상 오차가 최소화되도록 빔 곡선을 구하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔으며^{[14]~[16]}, 원형 빔 곡선 방법^[1], 타원형 빔 곡선 방법^[5], 엔드 포인트 방법^[6]이 전형적으로 많이 사용되고 있다.

엔드 포인트 방법은 원형 빔 곡선이나 타원형 빔 곡선을 사용될 때, 비초점 빔 포트들에 대한 경로길이 오차는 배열안테나의 양쪽 끝 또는 양쪽 끝에서 가까운 곳에서 크므로, 이들의 경로길이 오차를 줄이면 전체 위상 성능은 개선될 것이라는 데 바탕을 두고 착안된 방법이다. Uyuguroglu는 직선 배열안테나의 중심점과 중심점으로부터 대칭인 양쪽 끝 점으로 구성된 동위상점들을 통과하는 경로들 간의 위상 오차가 0이 되는 조건으로부터 아래 2개의 경로길이 수식을 사용하여 빔 곡선을 구하는 방법을 제안하였다.

$$\overline{H_1P_1} + W_m + V_m \sin \beta' = H + W_0 \quad (5)$$

$$\overline{H_1P_2} + W_m - V_m \sin \beta' = H + W_0 \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 H_1 은 빔 곡선 상의 한 점으로 좌표는 (X_b, Y_b) 이며, 원점 O_1 로부터 거리는 H 이다. 렌즈의 상단에 위치하는 P_1 은 배열 곡선 상의 최상단 점으로 직선 배열안테나 상의 최상단 점 Q_1 과 전송선으로 연결되고, 전송선의 길이는 W_m 이다. 렌즈의 하단에 위치하는 P_2 는 배열 곡선 상의 최하단 점으로 직선 배열안테나 상의 최하단 점 Q_2 와 전송선으로 연결되고, 전송선의 길이는 W_m 이다. β' 는 α' 에 의해 지정된 빔 포트 H_1 에 대응하는 빔 조향 각도이다. V_m 은 Q_1 의 V 축 좌표 값으로 배열안테나의 최상단에 위치하며, $-V_m$ 은 Q_2 의 V 축 좌표 값으로 배열안테나의 최하단에 위치한다. 따라서 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합은 $(V_m, 0, -V_m)$ 이다.

이 방법은 원형 빔 곡선 방법이나 타원형 빔 곡선 방법에 비하여 위상 성능을 획기적으로 개선시킬 수 있는 방법이나^[6], 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합이 배열안테나의 중심점으로부터 대칭인 경우로 제한되고, 모든 빔 포트에 대하여 한 개의 동위상점 집합을 사용하고 있어서 최적의 빔 곡선을 구하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 Uyuguroglu의 수식^[6]을 개선하여, 빔 포트로부터 대응되는 동위상면까지 배열안테나 상의 중심점과 중심점으로부터 대칭 또는 비대칭인 두 개의 점을 통과하는 경로들은 동위상이라는 조건을 사용한다.

$$\overline{H_1P_1} + W_1 + V_1 \sin \beta' = H + W_0 \quad (7)$$

$$\overline{H_1P_2} + W_2 + V_2 \sin \beta' = H + W_0 \quad (8)$$

엔드 포인트 방법과는 달리, 렌즈의 상단에 위치하는 P_1 은 배열 곡선 상의 한 점으로 직선 배열안테나 상의 한 점 Q_1 과 전송선으로 연결되고 전송선의 길이는 W_1 이다. 렌즈의 하단에 위치하는 P_2 는 배열 곡선 상의 한 점으로 직선 배열안테나 상의 한 점 Q_2 와 전송선으로 연결되고, 전송선의 길이는 W_2 이다. V_1 은 Q_1 의 V 축 좌표 값으로 배열안테나의 상단에 위치하며, V_2 는 Q_2 의 V 축 좌표 값으로 배열안테나의 하단에 위치한다. 따라서 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합은 $(V_1, 0, V_2)$ 이다. 이것은 배열안테나 상의 양쪽에 존재하는 두 개의 점이 배열안테나의 중심점으로부터 대칭이 아닌 경우를 포함하는 것을 의미

한다. 또한, 본 연구에서는 모든 빔 포트에 대하여 한 개의 동위상점 집합을 사용하는 대신에 각각의 빔 포트에 대하여 각각의 동위상점 집합을 사용하고 있다.

식 (7), (8)을 이용하여 대수학적 처리방법을 거치면 빔 포트의 위치는 식 (9), (10)과 같이 정리된다.

$$X_b = -H \cos \alpha' \quad (9)$$

$$Y_b = H \sin \alpha' \quad (10)$$

이때 식 (9), (10)과 연계된 관련 식들은 다음과 같다.

$$A' \sin^2 \alpha' + B' \sin \alpha' + C' = 0$$

$$H = \frac{c'}{2(X_{a1} + X_{a2}) \cos \alpha' - 2(Y_{a1} + Y_{a2}) \sin \alpha' + 2b'}$$

$$a' = -(X_{a1}^2 - X_{a2}^2) - (Y_{a1}^2 - Y_{a2}^2) + (W_1 - W_0)^2 - (W_2 - W_0)^2 + (V_1^2 - V_2^2) \sin^2 \beta' + 2((W_1 - W_0)V_1 - (W_2 - W_0)V_2) \sin \beta'$$

$$b' = W_1 + W_2 - 2W_0 + (V_1 + V_2) \sin \beta'$$

$$c' = -(X_{a1}^2 + X_{a2}^2) - (Y_{a1}^2 + Y_{a2}^2) + (W_1 - W_0)^2 + (W_2 - W_0)^2 + (V_1^2 + V_2^2) \sin^2 \beta' + 2((W_1 - W_0)V_1 + (W_2 - W_0)V_2) \sin \beta'$$

$$d' = W_1 - W_2 + (V_1 - V_2) \sin \beta'$$

$$A' = -(a'(X_{a1} + X_{a2}) - c'(X_{a1} - X_{a2}))^2 - (a'(Y_{a1} + Y_{a2}) - c'(Y_{a1} - Y_{a2}))^2$$

$$B' = -2(c'd' - a'b')(a'(Y_{a1} + Y_{a2}) - c'(Y_{a1} - Y_{a2}))$$

$$C' = -(c'd' - a'b')^2 + (a'(X_{a1} + X_{a2}) - c'(X_{a1} - X_{a2}))^2$$

식 (4)의 경로길이 오차 식과 식 (9), (10)의 수식들을 이용하면, 빔 방향 β' 에 대하여 위상 오차를 최소화하는 동위상점 집합 $(V_1, 0, V_2)$ 을 찾을 수 있으며, 동시에 빔 포트의 좌표 (X_b, Y_b) 를 구할 수 있다.

제안된 방법은 식 (4), (9), (10)을 이용하여 모든 빔 방향에 대하여 최소화된 위상 오차를 주는 동위상점 집합들과 빔 포트의 위치들을 찾는 방법으로 세부 절차는 다음과 같다.

- 1) 빔 방향 β' 에 대하여 V_1 을 V_m 에서부터 0까지, V_2 를 $-V_m$ 에서부터 0까지 가변시키며, 각각의 동위상점에 대한 최대 경로길이 오차들을 구한다.
- 2) 이 최대 경로길이 오차들 중에서 가장 작은 최대 경

로길이 오차를 주는 동위상점과 빔 포트의 위치를 선택한다.

- 3) 이러한 절차로 요구되는 모든 빔 방향들에 대응하는 동위상점들과 빔 포트의 위치들을 구한다.

III. 시뮬레이션 결과

제안된 빔 곡선 최적화 방법의 위상 성능을 입증하기 위하여 기존의 원형 빔 곡선 방법, 타원형 빔 곡선 방법, 엔드 포인트 방법 등을 이용하여 구해진 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈들의 위상 성능과 비교해 보자.

이 렌즈들의 설계 파라미터는 $G/V_m=1/0.675$, $F/V_m=0.85/0.675$, $\beta_m=50^\circ$, $\gamma=1/0.9$ 이고, $\alpha=\sin^{-1}((\sin \beta_m)/\gamma)$ 이다. 이 설계 파라미터는 참고문헌 [6]과 동일하며, 렌즈의 설계 파라미터를 F 대신에 V_m 에 의해 정규화한 차이만 존재한다.

그림 2는 원형 빔 곡선, 타원형 빔 곡선, 엔드 포인트 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 동일한 렌즈들에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 이 그래프는 모든 빔에 대한 위상 오차를 보여주고 있다. 기존의 연구들에서 많이 적용되고 있는 원형 빔 곡선 또는 타원형 빔 곡선에 비하여 Uyuguroglu의 엔드 포인트 방법은 위상 성능을 획기적으로 개선시킴을 알 수 있다. 여기에서 타원형 빔 곡선은 Y축을 장축으로 하는 0.174의 이심률(eccentricity)을 갖는다.

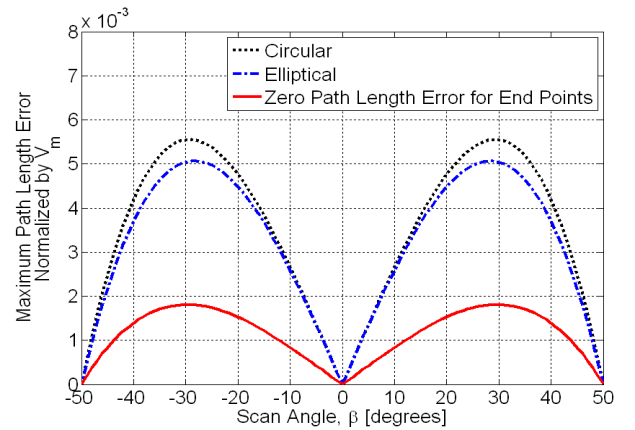


그림 2. 스캔 각도에 따른 최대 경로길이 오차
Fig. 2. Maximum path length error versus scan angle.

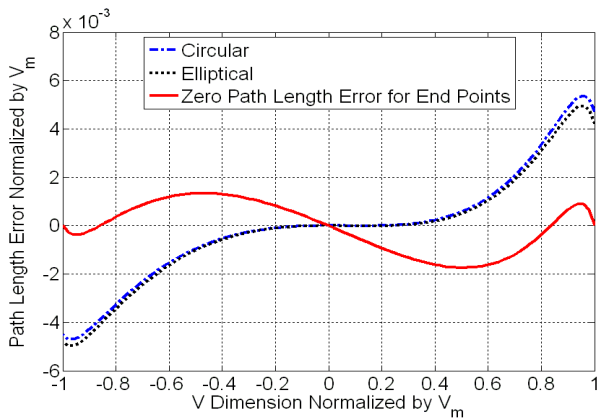


그림 3. 25° 빔의 경로길이 오차
Fig. 3. Path length error of 25° beam.

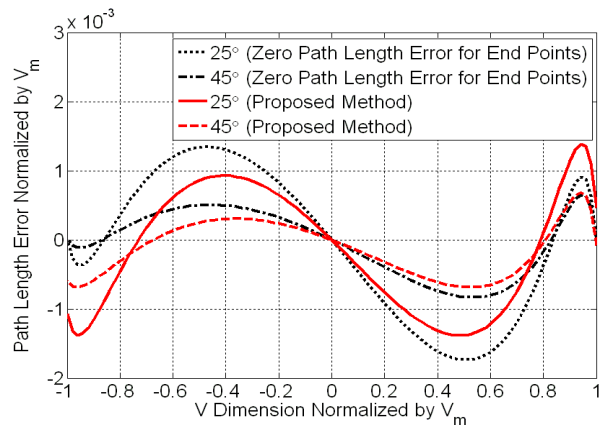


그림 5. 25°, 45° 빔의 경로길이 오차
Fig. 5. Path length error of 25°, 45° beams.

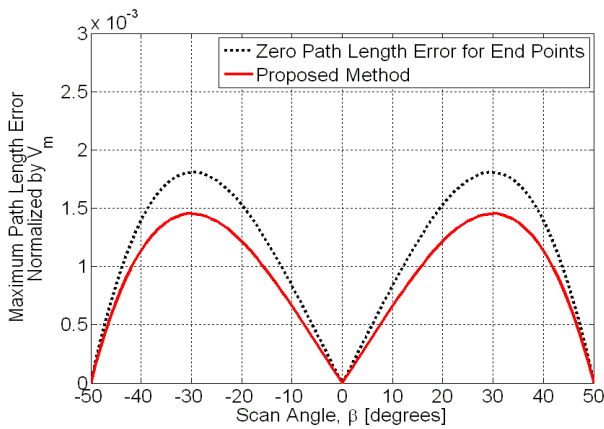


그림 4. 스캔 각도에 따른 최대 경로길이 오차
Fig. 4. Path length error versus scan angle.

그림 3은 원형 빔 곡선, 타원형 빔 곡선, 엔드 포인트 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 동일한 렌즈들의 25° 빔에 대한 정규화된 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 이 그래프는 한 개의 빔에 대하여 배열안테나 소자를 경유하는 경로들 간의 상세한 위상 오차를 보여주고 있다.

원형 빔 곡선이나 타원형 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈의 경로길이 오차는 배열안테나의 양쪽 끝 또는 양쪽 끝에서 가까운 곳에서 뚜렷하게 큰 것을 알 수 있다. 반면에 엔드 포인트 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈의 경로길이 오차는 배열안테나의 양쪽 끝에서 0이며, 배열안테나의 중심점에 가까운 곳에서 오차가 약간 증가하지

만 전반적인 위상 성능이 개선된 것을 알 수 있다.

그림 4는 엔드 포인트 방법과 제안된 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 동일한 렌즈들에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 최대 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 엔드 포인트 방법은 동위상점 집합이 $(V_m, 0, -V_m)$ 이고, 모든 빔 포트에 대하여 한 개의 동위상점 집합을 사용하였으며, 제안된 방법은 동위상점 집합이 $(V_1, 0, V_2)$ 이고, 각각의 빔 포트에 대하여 각각의 동위상점 집합을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 제안된 방법은 엔드 포인트 방법보다 위상 성능이 뚜렷하게 개선된 것을 볼 수 있다.

그림 5는 엔드 포인트 방법과 제안된 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 동일한 렌즈들의 25°와 45° 빔에 대한 정규화된 경로길이 오차를 나타낸 것이다.

그림 5를 통하여 엔드 포인트 방법은 모든 빔이 배열안테나의 양쪽 끝 점을 반드시 경유하지만, 제안된 방법은 배열안테나의 양쪽 끝 점과 중심점 간의 사이점을 경유하고, 빔 방향에 따라 경유하는 점이 상이함을 알 수 있다. 또한, Rotman 렌즈의 모든 경로길이 오차 곡선은 배열안테나의 중심점을 기준으로 점대칭이 아님을 알 수 있다. 따라서, Rotman 렌즈의 위상 오차를 최소화하기 위해서는 동위상점 집합은 비대칭인 경우를 포함하여야 하고, 각각의 빔 포트에 대하여 각각의 동위상점 집합을 가져야 함을 알 수 있다.

그림 6은 엔드 포인트 방법과 제안된 방법에 의한 빔

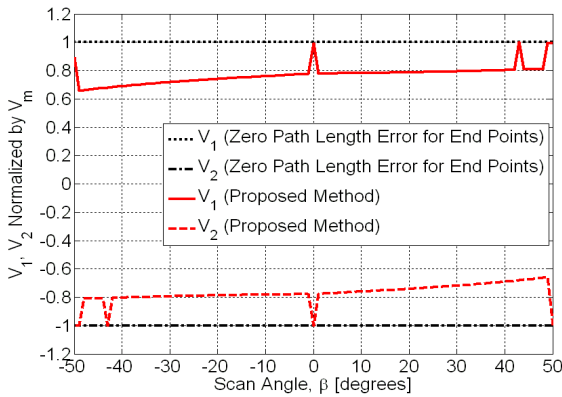


그림 6. 스캔 각도에 따른 V_1, V_2
 Fig. 6. V_1, V_2 versus scan angle.

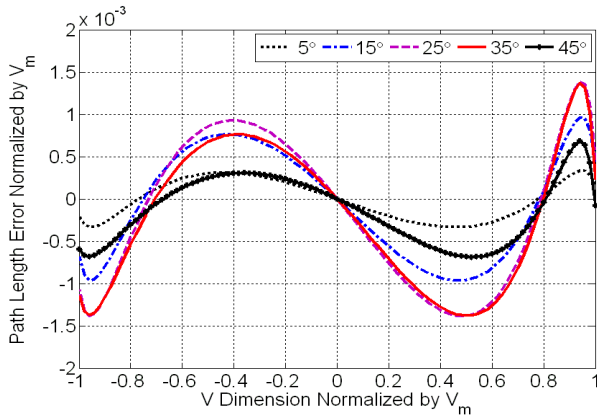


그림 7. 5°, 15°, 25°, 35°, 45° 빔의 경로길이 오차
 Fig. 7. Path length error of 5°, 15°, 25°, 35°, 45° beams.

곡선을 갖는 동일한 렌즈들에 대하여 스캔 각도, β 에 따른 정규화된 V_1, V_2 를 나타낸 것이다. 각각의 빔 방향에 대하여 엔드 포인트 방법은 상하 대칭인 한 개의 동위상점 집합을 갖는데 비하여, 제안된 방법은 상하 비대칭인 각각의 동위상점 집합을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 6에 나타나 있는 불연속점은 초점 빔 포트에 대응하는 스캔 각도이거나 배열안테나 상의 동위상점이 4개 이상 존재할 때 발생할 수 있다.

그림 7은 제안된 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈의 5°, 15°, 25°, 35°, 45° 빔에 대한 정규화된 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 이 결과는 참고문헌 [6]에 제시된 입자 무리 최적화 방법과 정확히 일치하는 위상 성능

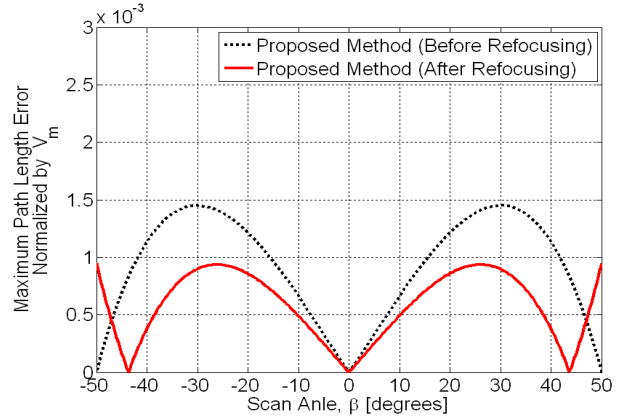


그림 8. 스캔 각도에 따른 최대 경로길이 오차
 Fig. 8. Path length error versus scan angle.

이며, F 대신에 V_m 에 의해 정규화된 차이만 존재할 뿐이다.

참고문헌 [6]에서 제안된 입자 무리 최적화 방법은 식 (4)에 의해 정의된 경로길이 오차 식과 원형 빔 곡선 방법에 의한 빔 포트의 위치를 이용하며, 최대 경로길이 오차를 최소화하는 각각의 빔 포트의 위치를 원형 빔 곡선 방법에 의해 구해진 빔 포트 좌표를 중심으로 2차원 공간에서 반복적으로 찾으므로 시간이 많이 소모되지만, 결국에는 최적의 결과를 찾게 된다. 따라서 제안된 방법에 의해 구해진 빔 곡선은 최소의 최대 경로길이 오차를 제공할 수 있다.

그림 8은 제안된 빔 곡선 최적화 방법에 의한 빔 곡선에 따라 초점을 이동시키며 최대 경로길이 오차를 최소화하는 최적의 α, F, γ 값을 구하는 방법인 재초점 방법을 적용한 후에 최대 경로길이 오차의 영향을 나타낸 것이다. 여기에서 재초점 방법에 의해 구해진 최적 설계 파라미터는 $\alpha=38.54^\circ, F=1.3054, \gamma=1.1082$ 이다.

그림 8에 나타나 있듯이 재초점 방법을 적용하면 적용 전에 비하여 최대 경로길이 오차가 크게 감소함을 알 수 있다. 재초점 방법은 빔 곡선을 따라 초점을 재설정함으로써 초점 사이에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차와 초점을 지나 외각에 위치하는 빔 포트의 최대 위상 오차를 균등화하여 Rotman 렌즈의 최대 위상 오차를 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 따라서 제안된 방법에 따라 구해진 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈에 재초점 방법을 적용하면 위상 성능이 극대화됨을 알 수 있다.

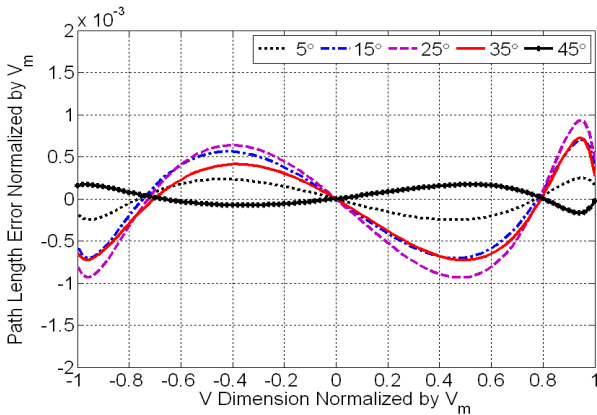


그림 9. 5°, 15°, 25°, 35°, 45° 빔의 경로길이 오차
Fig. 9. Path length error of 5°, 15°, 25°, 35°, 45° beams.

그림 9는 제안된 방법에 의한 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈에 재초점 방법을 적용한 후에 5°, 15°, 25°, 35°, 45° 빔에 대한 정규화된 경로길이 오차를 나타낸 것이다. 그림 8에서도 알 수 있듯이 재초점 방법을 적용하기 전에 비하여 최대 경로길이 오차 뿐만 아니라, 전반적인 경로길이 오차가 뚜렷하게 감소함을 알 수 있다.

표 1은 위에 언급된 설계 파라미터를 갖는 Rotman 렌즈에 대하여 엔드 포인트 방법과 제안된 방법이 기존의 원형 빔 곡선과 타원형 빔 곡선에 비하여 최대 경로길이 오차가 얼마나 감소되었는지를 정리한 것이다. 표 1에서 감소율 75 %의 의미는 최대 경로길이 오차가 1/4의 수준으로 감소함을 의미한다. 엔드 포인트 방법은 원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 67.4 %, 타원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 64.3 %의 감소율을 나타내고, 제안된 빔 곡선 최적화 방법은 원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 73.9 %, 타원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 71.4 %의 감소율을 나타내고

표 1. 최대 경로길이 오차의 감소율
Table 1. Reduction ratio of maximum path length error.

| Methods | Circular | Elliptical |
|-----------------------------|----------|------------|
| Elliptical | 8.8 % | 0 % |
| End points | 67.4 % | 64.3 % |
| Proposed | 73.9 % | 71.4 % |
| Proposed (After refocusing) | 82.9 % | 81.3 % |

있다. 제안된 방법은 엔드 포인트 방법에 비하여 6.5 % 이상 감소율이 증가됨을 알 수 있다. 특히, 제안된 빔 곡선 최적화 방법에 재초점 방법을 적용하면 원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 82.9 %, 타원형 빔 곡선 방법에 비하여 약 81.3 %의 감소율을 나타낸다. 이 수치는 최대 경로길이 오차가 1/5(감소율: 80 %) 이하의 수준으로 감소함을 나타내며, Rotman 렌즈의 경로길이 오차는 급전하는 배열안테나의 길이가 길어지면 선형적으로 증가하므로 동일한 급전 위상 오차 조건에서 5배 이상 긴 배열안테나를 급전할 수 있음을 의미한다.

제안된 빔 곡선 최적화 방법은 참고문헌 [6]에 제시된 입자 무리 최적화 방법과 동일하게 최적의 위상 성능을 주지만, 입자 무리 최적화 방법보다 훨씬 빠르고 쉽게 최적화된 빔 곡선을 구할 수 있다. 왜냐하면 제안된 방법은 배열안테나를 따라 위상 오차가 0인 배열안테나의 중심점과 배열 안테나의 양쪽에서 각각 1개의 점을 구하면, 최적의 빔 포트 위치를 직접 정할 수 있지만, 입자 무리 최적화 방법은 빔 포트 주변의 이차원 공간에서 반복적인 방법으로 최적의 빔 포트 위치를 찾기 때문이다. 따라서 제안된 방법은 저 위상 오차를 갖는 Rotman 렌즈의 빔 곡선을 구하는 최적이며, 효과적인 방법임을 알 수 있다.

빔 곡선의 위상 오차가 작으면 작을수록 재초점을 통하여 빔 곡선과 배열 곡선의 변동 없이 추가적으로 위상 오차를 감소시킬 수 있는 최적의 설계 파라미터를 구할 수 있으므로 최적화된 빔 곡선은 재초점에 의한 배열 곡선의 변화를 더욱 더 최소화할 수 있는 장점이 있다. 즉, 렌즈의 진폭 성능의 변동 없이 위상 특성을 개선할 수 있어 극대화된 위상 성능을 갖는 Rotman 렌즈를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

3초점 Rotman 렌즈에 대하여 비초점 포트의 위상 오차를 최소화할 수 있는 새로운 빔 곡선 최적화 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 Uyuguroglu의 엔드 포인트 방법을 개선한 것으로, 배열안테나 상에 존재하는 동위상점 집합을 배열안테나의 중심점으로부터 비대칭인 경우를 포함하여 적용하고 있으며, 각 빔 포트에 대하여 각각의 동위

상점 집합을 사용하여 빔 곡선을 구하는 것을 특징으로 하고 있다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방법은 저 위상 오차를 갖는 Rotman 렌즈의 빔 곡선을 구하는 최적이며, 효과적인 방법임을 입증하였고, 제안된 방법에 따라 구해진 빔 곡선을 갖는 Rotman 렌즈에 재초점 방법을 적용하면 최대 위상 오차가 기존의 원형 빔 곡선이나 타원형 빔 곡선에 비하여 1/5 이하의 수준으로 감소시킬 수 있음을 보였다.

References

[1] W. Rotman, R. F. Turner, "Wide angle microwave lens for line source applications", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-11, pp. 623-632, Nov. 1963.
 [2] D. H. Archer, "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave J.*, vol. 27, pp. 171-195, Sep. 1984.
 [3] A. F. Peterson, E. O. Rausch, "Scattering matrix integral

equation analysis for the design of a waveguide Rotman lens", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 870-878, May 1999.

[4] T. Katagi, S. Mano, and Shin-Ichi Sato, "An improved design method of Rotman lens antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-32, pp. 524-527, May 1984.
 [5] R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lenses", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 464-472, Apr. 1991.
 [6] R. Uyguroglu, A. Y. Oztoprak, and C. Ergun, "Improved phase performance for Rotman lens", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 23, pp. 634-638, Nov. 2013.
 [7] Joo-Rae Park, Dong-Chul Park, "Phase error minimization by refocusing Rotman lens", *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, pp. 1097-1099, Nov. 2013.

박 주 래



1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1993년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임 연구원
 2004년 3월 ~ 현재: 충남대학교 전자공학

과 박사과정

[주 관심분야] 다기능 RF 시스템, 배열 안테나

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: University of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년 ~ 1978년: Ruhr University, Bochum,

Germany 방문교수

1994년 ~ 1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairman
 1998년 ~ 2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairman
 2000년 ~ 2001년: 한국전자과학회 회장
 2005년 ~ 2007년: 대덕 Wireless 포럼 회장
 1976년 ~ 현재: 충남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC