

높은 조향 정확도 및 부엽 제어가 가능한 다중 빔 형성 연구

Study on Multibeam Forming with Improved Accuracy of Steering Angle and Sidelobe Control

지 상 욱 · 이 창 현 · 이 정 해*

Sang Wook Chi · Chang-Hyun Lee · Jeong-Hae Lee*

요 약

본 논문에서는 마이크로파 무선전력전송에 적용될 수 있는 여러 다중 빔 형성 방법을 제안한다. 기존의 다중 빔 형성 방법은 능동소자패턴(active element pattern: AEP)을 고려하지 않기 때문에 실제 시스템에 적용 시 의도한 빔 형성과 오차가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 능동소자패턴의 평균을 고려하는 방법과, 변형된 푸리에 급수 방법을 통해 모든 능동소자패턴을 고려하는 방법이 제안되었다. 또한, 부엽과 null 제어를 위하여 Dolph-Tschebyscheff 방법에 중첩의 원리를 적용하여 다중 빔을 형성하는 방식을 제안하였다. 제안된 방식을 사용하여 다중 빔 형성 시 의도된 빔 형성과의 오차가 감소하는 것을 확인하였으며, 다중 빔 형성을 하며 부엽 제어를 동시에 할 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract

Herein, several multibeam forming methods that can be applied to microwave wireless power transmission are presented. Because the conventional multibeam forming methods do not consider an active element pattern(AEP), an intended beam shape will contain a steering angle error when applied to an actual system. To solve this problem, a method of considering the average of the AEP and a method of considering all the AEPs by the modified Fourier series method have been proposed. We confirmed that the proposed method reduces the error with the intended beam shape in the multibeam formation. In addition, for the side lobe level(SLL) and null control, a method of multibeam forming by applying the superposition principle to the Dolph-Tschebyscheff method is proposed. We also confirmed that SLL control can be simultaneously achieved with the multibeam formation.

Key words: Multibeam Forming, Active Element Pattern, Side Lobe Level, Superposition, Dolph-Tschebyscheff Array

I. 서 론

최근 IoT 기기의 급격한 증가로 인해 이들의 원활한 충전 을 위하여 수 미터 이상에서의 원거리 무선 충전 기술 이 요구되고 있다. 무선 충전 기술은 자기유도방식이나

자기공명방식, 또한 마이크로파 방식으로 구분되며, 자기 유도 및 자기공명 방식은 거리가 증가하면 전송 효율이 급격히 감소하여 수 미터 이내에서의 충전에 적합하며, 마이크로파 방식은 상대적으로 거리 증가에 따른 전송 효율 감소가 적어 원거리 충전에 사용하기 적합하다^[1].

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A6A1A03031833).」

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2017-2016-0-00291).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received December 21, 2017 ; Revised February 2, 2018 ; Accepted May 15, 2018. (ID No. 20171221-125)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

또한 마이크로파 방식을 이용한 충전 시 여러 디바이스에 동시 전력 전송이 가능하다는 장점이 있어 이를 실현하기 위한 효율적인 다중 빔 형성 기술이 매우 중요하다. 또한, 마이크로파를 이용해 상대적으로 큰 전력을 전송 시 인체에 유해할 수 있어, 인체 및 장애물 회피를 위한 null 형성 기술 및 부엽 제어 기술이 요구된다.

기존 다중 빔 형성 방식 중 가장 널리 쓰이는 방법으로는 푸리에 급수를 이용한 다중 빔 형성 기술을 예로 들 수 있다^[2]. 이 방법의 경우, 안테나가 갖는 능동소자패턴을 고려하지 않아 실제 시스템에 적용하여 빔 형성 시 의도한 빔 모양과 오차가 발생하게 된다. 능동소자패턴은 실제 배열 시 커플링 효과를 고려한 실제 방사 패턴으로 *single element pattern*과는 배열 형상에 따라 다르게 형성된다^[3]. 이를 고려하여 빔 형성을 하게 되면 다중 빔 간의 이득 편차 및 조향 정확도가 개선되어 의도한 형상에 더 가까운 빔을 형성할 수 있게 된다^[4]. 능동소자패턴을 고려한 기존 빔 형성 방법으로는 유전자 알고리즘을 이용한 빔 형성 방법이 있다^[5]. 하지만 이 경우 빔 형성 정확도는 개선되지만, 다중 빔 또는 null 구간 형성 시 알고리즘에 필요한 *cost function*이 매우 복잡해져 정의가 어렵고, 결과를 얻기 위한 연산 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 두 가지의 다중 빔 형성 방법을 제시하였다. 첫번째 방법은 능동소자패턴의 평균을 고려하여 이의 역수 형태로 AF를 계산하여 이에 맞는 여기 전압의 크기와 위상을 구하는 것이고, 두번째 방법은 기존 푸리에 급수를 이용한 빔 패턴 형성 식을 모든 능동소자패턴을 고려한 식으로 변형하여 계산하는 방법이다. 이 방법들은 능동소자패턴을 고려할 수 있어 정확도가 개선된 다중 빔을 형성할 수 있는 장점이 있지만 부엽을 제어하는데 어려움이 있다.

최적화 알고리즘을 이용한 방법^{[6],[7]}은 부엽 제어 또한 가능하지만, 앞서 언급한 동일한 문제가 발생하게 되며, 또한 국소값(*local minimum*)을 최적값으로 잘못 인지하여 잘못된 빔이 형성될 가능성이 발생하게 된다.

본 논문에서는 효과적으로 부엽을 제어하며, 다중 빔을 형성하기 위하여 Dolph-Tschebyscheff를 이용한 부엽 제어 방법에 중첩의 원리를 응용하여 다중 빔을 형성하는 방법을 제시한다. Dolph-Tschebyscheff 방법을 이용하여 단

일 빔 조향 시 Tschebyscheff 다항식의 계수를 이용함으로써 쉽게 부엽을 제어할 수 있고, 이 배열이 형성하는 빔 패턴을 이용하여 특정 위치에 null 형성도 가능하다^[8]. 이후 챕터에서는 제안된 빔 형성 방식들에 대해 설명하고, 이들을 이용하여 다중 빔 형성이 되는 것을 확인하였다. 또한 그 결과를 기존 다중 빔 형성 방식의 결과와 비교하여 장단점을 비교하였다.

II. 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성 방법

그림 1에 나타난 일반적인 선형 배열 안테나에서의 전계 패턴은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total}(\theta) = \text{Single Element Pattern} \times \text{Array Factor}$$

$$= SEP(\theta) \times \sum_{k=1}^N A_k e^{j\phi_k} e^{j((k-1)\beta d \sin \theta)} \quad (1)$$

식 (1)은 배열 안테나의 전계 패턴을 나타낸다^[9]. 식 (1)에서 SEP는 *single element pattern*을 나타내고, 이는 단일 안테나의 패턴을 나타내게 된다. 또한 급수로 표현된 식은 *array factor*를 나타내고, 이는 배열 안테나에 인가되는 전압의 크기 위상 즉 A_k , ϕ_k 와 전기적 거리인 βd 를 이용하여 θ 의 함수로 표현된다. 특정 방향에 빔을 형성하고 싶다면 그 방향에서 보강간섭이 발생하는 위상을 계산하여 안테나에 인가하면 해당 방향에 빔을 형성할 수 있다. 식 (1)에서 능동소자패턴을 고려하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안하였다.

그림 2(a)는 기존의 푸리에 급수를 이용한 다중 빔 형성 방법을 보여준다. 이를 이용하여 다중 빔을 형성하였을 경우 능동소자패턴에 따라 형성된 다중 빔 간의 차이

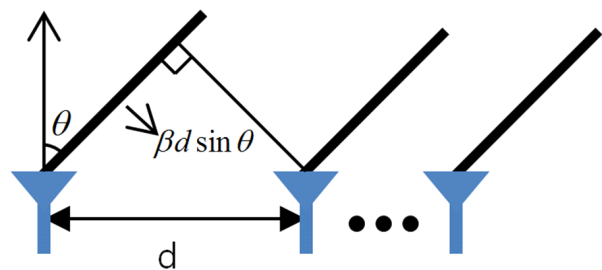


그림 1. 선형 배열 안테나의 개략도
Fig. 1. Geometry of linear array antenna.

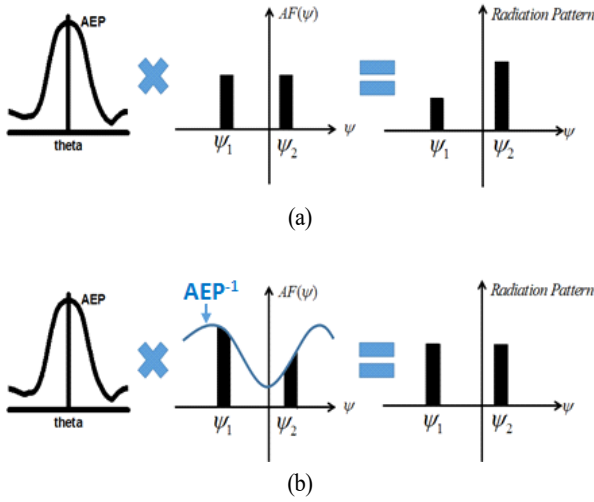


그림 2. 기존 다중 빔 형성 방법(a)와 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성(b)
 Fig 2. Conventional multibeam forming method(a) and multibeam forming considering AEP(b).

가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 그림 2(b)와 같이 능동소자패턴의 평균에 역수를 취한 array factor를 다중 빔 형성에 적용하면 간단한 계산을 통해 빔 간 오차가 적은 균일한 빔을 만들 수 있다.

$$AF(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M AEP_{avg}^{-1}(\theta_i) \delta(\theta - \theta_i) \quad (2)$$

식 (2)는 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성 시 설정되는 array factor를 나타낸다. 식 (2)에 나타난 방법으로 능동소자패턴의 평균이 고려된 array factor를 이용하면 그림 2(b)와 같은 빔 형성을 위해 요구되는 인가 전압의 크기와 위상을 구할 수 있다. 식 (2)에서 M 은 빔의 개수를 나타내고, AEP_{avg} 는 모든 안테나의 능동소자패턴의 평균을 나타낸다. 또한 델타함수를 사용하여 해당 방향에서 가장 큰 이득을 갖는 array factor를 계산하게 된다. 실제 유한한 배열 상황에서는 array factor가 델타 함수로 표현될 수 없다. 따라서 유한한 배열안테나로 위와 같은 방법을 통해 여기 전압을 구하게 된다면 식 (2)와 같은 array factor의 빔이 나오지 않지만, 델타 함수를 사용함으로써 원하는 각 빔들의 이득이 가장 높아지는 결과를 산출하게 된다.

III. 모든 능동소자패턴을 고려한 푸리에 급수 방식의 다중 빔 형성 방법

$$E_{total}(\theta) = \sum_{k=1}^N AEP_k(\theta) A_k e^{j\phi_k} e^{j(k-1)\beta d \sin \theta} \quad (3)$$

식 (3)은 상호 커플링이나 재방사 등이 포함된 능동소자패턴이 고려되지 않은 식 (1)과 달리 N 개의 선형 배열 안테나에서 모든 능동소자 패턴을 고려한 전체 패턴을 보여준다. 이 때 AEP_k 는 k 번째 안테나의 능동소자패턴을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성 방법의 경우 배열 위치에 따라 다른 형태를 갖는 각 안테나의 모든 능동소자패턴이 고려되지 않아, 능동소자패턴을 고려하지 않은 기존 방법보다 빔의 이득 편차가 적어지지만 여전히 오차는 존재한다. 따라서 모든 능동소자패턴을 고려한 식 (3)을 통해 각 안테나에 인가되는 전압의 크기와 위상을 계산하여 적용함으로써 빔 형성 정확도를 더욱 개선할 수 있다. 식 (3)을 통한 인가전압의 크기와 위상은 다음과 같은 과정을 통해 구해진다. 우선 양 변에 식 (3)의 양변에 $e^{-j(k-1)\psi}$ 를 곱하고, 적분을 취하여 식 (4)와 같은 형태로 표현한다.

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} E(\theta) e^{-j(k-1)\psi} d\psi &= A_1 e^{j\phi_1} \int_{-\pi}^{\pi} AEP_1(\theta) e^{-j(k-1)\psi} d\psi + \dots + \\ &A_k e^{j\phi_k} \int_{-\pi}^{\pi} AEP_k(\theta) d\psi + \dots + \\ &A_N e^{j\phi_N} \int_{-\pi}^{\pi} AEP_N(\theta) e^{-j(k-1)\psi} e^{j(N-1)\psi} d\psi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_1 e^{j\phi_1} \\ A_2 e^{j\phi_2} \\ \vdots \\ A_N e^{j\phi_N} \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} \int_{-\pi}^{\pi} AEP_1(\theta) d\psi & \int_{-\pi}^{\pi} AEP_2(\theta) e^{j\psi} d\psi & \dots & \int_{-\pi}^{\pi} AEP_N(\theta) e^{j(N-1)\psi} d\psi \\ \int_{-\pi}^{\pi} AEP_1(\theta) e^{-j\psi} d\psi & \int_{-\pi}^{\pi} AEP_2(\theta) d\psi & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \int_{-\pi}^{\pi} AEP_1(\theta) e^{-j(N-1)\psi} d\psi & & & \int_{-\pi}^{\pi} AEP_N(\theta) d\psi \end{bmatrix}^{-1} \\ \times \begin{bmatrix} 1 \\ \int_{-\pi}^{\pi} E(\theta) e^{-j\psi} d\psi \\ \vdots \\ \int_{-\pi}^{\pi} E(\theta) e^{-jN\psi} d\psi \end{bmatrix} & \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)에서 $k=1 \sim N$ 을 대입한 N 개의 식을 만들면 식 (5)와 같은 행렬로 표현되며, 우변을 계산하여 각 안테나에 인가되는 전압의 크기와 위상을 계산할 수 있다. 이때 좌변의 여기 전압을 구하기 위해서는 $E(\theta)$ 를 설정해 주어야 하는데, 원하는 방향의 이득이 가장 높아지는 델타 함수를 다음과 같이 사용하였다.

$$E(\theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta(\theta - \theta_i) \tag{6}$$

식 (6)의 식으로 M 개의 빔을 델타함수로써 정의하면 다중 빔을 형성하기 위해 필요한 복소수로 표현된 여기 전압의 크기와 위상을 모두 구할 수 있다.

IV. Dolph-Tschebyscheff 어레이와 중첩의 원리를 이용한 다중 빔 형성

Dolph-Tschebyscheff 어레이 방법은 부엽을 제어하기 위한 방법으로 많이 사용되고 있다. 이는 각 안테나에 인가되는 전압을 체비셰프 다항식을 통해 계산하는 방법으로 이를 이용하여 부엽을 제어할 수 있다.

그림 3은 1×8 배열을 갖는 원형편파 패치 안테나를 Dolph-Tschebyscheff를 이용하여 SLL을 10~30 dB로 변화시켜 가며 0° 에 단일 빔을 형성하였을 때의 방사패턴을 보여준다. 이를 다중 빔 형성에 이용하기 위해서는 중첩의 원리의 적용이 요구된다.

선형 배열 안테나에서 단일 빔을 형성할 때의 array

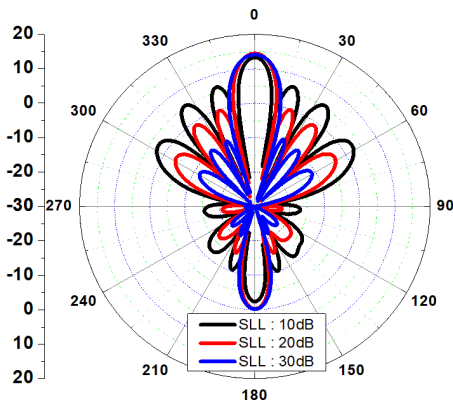


그림 3. Dolph-Tschebyscheff를 이용한 단일 빔 형성
Fig. 3. Single beam forming using Dolph-Tschebyscheff array.

factor는 식 (7)과 같이 표현된다. 이때 각 안테나에 인가되는 전압의 위상은 각각 $\phi_1 = -\beta d \sin \theta_1$, $\phi_2 = -\beta d \sin \theta_2$ 이다.

$$AF_{\theta_1}(\theta) = \sum_{k=1}^N A_k e^{j(k-1)(\beta d \sin \theta + \phi_1)}$$

$$AF_{\theta_2}(\theta) = \sum_{k=1}^N A_k e^{j(k-1)(\beta d \sin \theta + \phi_2)} \tag{7}$$

그림 4와 같이 형성된 단일 빔 패턴은 일정한 위상차를 갖도록 전압을 각 안테나에 인가함으로써 얻을 수 있다. 예를 들어 그림 4의 모의실험조건은 배열간격 $0.5 \lambda_0$ 의 1×8 배열을 갖는 원형편파 패치 안테나를 $\theta_1 = 0^\circ$ 로 빔 조향 시 각 안테나의 위상 차를 0 으로, $\theta_2 = -30^\circ$ 로 빔 조향 시 각 안테나의 위상차를 90° 로 인가하였을 때의 패턴이다.

$$AF_{\theta_1, \theta_2}(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e^{j(k-1)\beta d \sin \theta} (A_k e^{j\phi_{k1}} + B_k e^{j\phi_{k2}})$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e^{j(k-1)\beta d \sin \theta} (C_k e^{j\phi_{kc}}) \tag{8}$$

따라서 그림 4에 나타난 두 가지의 빔 패턴을 중첩의 원리로 다중 빔을 형성시키기 위해서 식 (8)을 사용한다. 식 8에서 보인 것과 같이 임의의 θ_1, θ_2 로 빔을 형성하기 위해서는 두 단일 빔을 형성시킬 때 크기와 위상(A_k, B_k, ϕ_1, ϕ_2)을 포함한 여기 전압을 더해 얻어지는 값(C_k, ϕ_c)을 통해 쉽게 다중 빔을 형성시킬 수 있다.

그림 5의 빔 패턴은 1×8 배열을 갖는 원형편파 패치안테나를 이용하여 같은 여기 전압 크기를 갖는 두 가지의

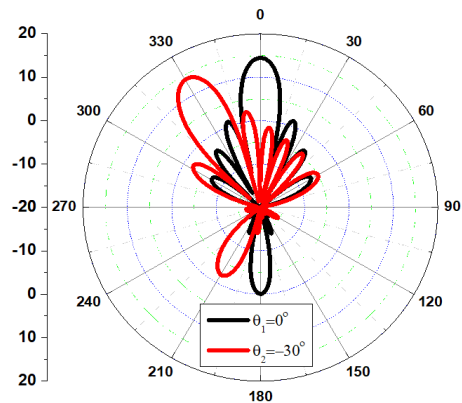


그림 4. $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -30^\circ$ 단일 빔 형성 패턴
Fig. 4. Single beam pattern at $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -30^\circ$.

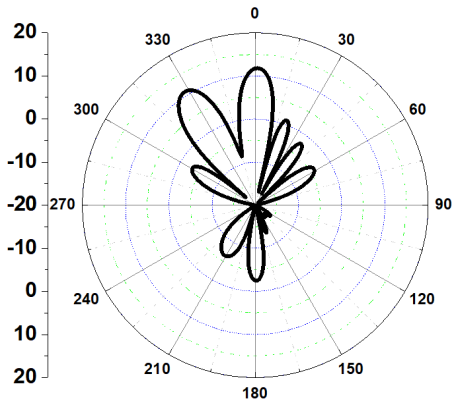


그림 5. 중첩의 원리를 이용한 0°, -30° 이중 빔 형성
Fig. 5. Double beam forming using superposition at 0°, -30°.

단일 빔 형성을 중첩의 원리를 이용하여 형성한 이중 빔 패턴이다. 이를 확장하여 여러 가지 빔을 형성할 수 있고, 본 논문에서는 부엽을 제어하기 위하여 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 빔 형성 방법을 동시에 적용한 방법으로 다중 빔을 형성하였다.

V. 다중 빔 형성 패턴 비교 및 분석

그림 6과 그림 7은 기존 푸리에 급수를 이용한 다중 빔 형성 방법과 본 논문에서 제시된 다중 빔 형성 방법들을 비교한 빔 패턴이다. 모의실험 조건은 5.8 GHz에서 동작

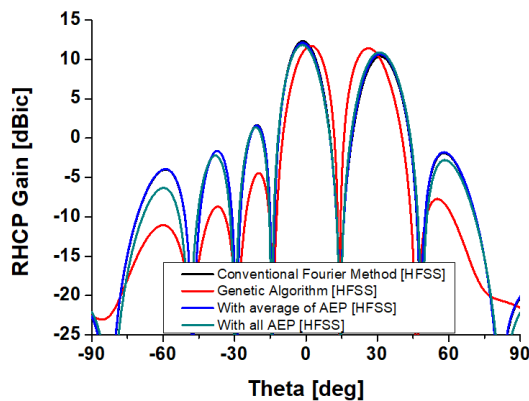


그림 6. 기존 푸리에 급수 이용 및 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성 방법 (0°, 30°)
Fig. 6. Multibeam forming using conventional Fourier series and considering AEP (0°, 30°).

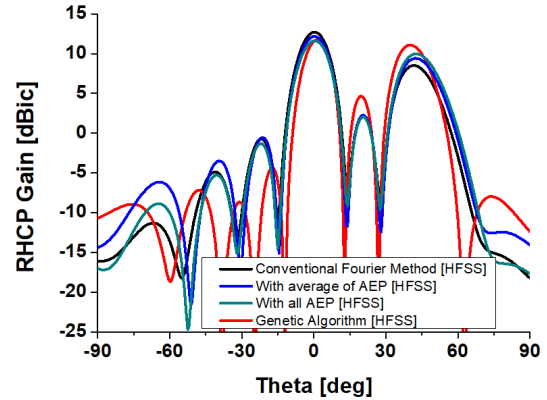


그림 7. 기존 푸리에 급수 이용 및 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성 방법 (0°, 45°)
Fig 7. Multibeam forming using conventional Fourier series and considering AEP (0°, 45°).

하는 1×8 원형편파 패치 안테나를 HFSS를 통해 설계하고, 그에 따른 8개의 능동소자패턴을 얻는다. 또한 입력 전력은 모든 배열 안테나에 총 8 W를 인가하였다. 이를 통해 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성과, 모든 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성을 비교하였다.

표 1과 표 2는 HFSS 시뮬레이션을 통해 구현된 1×8 원형편파 패치 안테나로 앞서 언급된 방법에 따른 여러 다

표 1. 0°, 30° 이중 빔 형성 시 이득 비교
Table 1. Gain comparison in double beam forming 0°, 30°.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Gain at 0°	12.33	12.12	11.83	11.73
Gain at 30°	10.38	10.66	10.91	11.41
Gain difference	1.95	1.46	0.92	0.32
SLL	10.67	10.5	10.44	16.17

표 2. 0°, 45° 이중 빔 형성 시 이득 비교
Table 2. Gain comparison in double beam forming 0°, 45°.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Gain at 0°	12.68	12.16	11.61	11.73
Gain at 45°	8.50	9.40	9.96	11.08
Gain difference	4.18	2.76	1.65	0.65
SLL	10.58	9.9	9.58	7.09

중 빔 형성 방법의 이득 및 두 빔의 이득 차이, SLL을 나타내는 표이다. 이때 각 주엽에서의 이득의 단위는 dBic 이고, 이득 차와 SLL의 단위는 dB로써 나타내었다. 또한 표 1과 표 2에서의 (1)은 기존 푸리에 급수를 이용한 다중 빔 형성이고, (2)는 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성이다. 또한 (3)은 모든 능동소자패턴을 이용한 푸리에 급수 방식의 다중 빔 형성 방법이고, (4)는 유전자 알고리즘을 통해 빔을 형성한 방법이다. 이때 유전자 알고리즘의 시뮬레이션 환경은 다중 빔에서 각 빔의 이득 값을 조화평균한 값을 cost function으로 설정하였다. 그 이유는 산술평균이 표본 중 몇 개의 값이 매우 작아져도 나머지 몇 개의 값이 클 때 최댓값을 가질 수 있으므로 각 빔 간의 이득 편차를 줄이기 위하여 각 표본들의 값이 비슷해지며, 그 표본들의 값이 가장 높아지는 조화평균을 사용하였다. 또한 유전자 알고리즘을 통해 최적화를 진행할 때 또한 모든 능동소자패턴을 고려함으로써 가장 최적화된 다중 빔이 나올 수 있게 설정하였다.

(1)의 경우, 능동소자패턴이 고려되지 않아 패치 안테나의 지향성이 가장 큰 방향(0°)에서 빔의 이득이 더 크게 형성된 것을 확인하였다. 또한 능동소자패턴의 평균을 고려한 다중 빔 형성에 비해 모든 능동소자패턴을 고려한 빔 형성이 두 방향에서의 이득 차이가 보다 개선된 것을 알 수 있었다. 이는 능동소자패턴의 평균을 고려한 경우, 배열에 쓰인 안테나의 지향성을 보정해주는 역할을 하지만, 모든 능동소자패턴을 고려하지 않았기 때문에 (1)의 결과보다 이득 차이가 줄었지만 (3)의 결과보다는 이득 차이가 높아지게 된다. 또한 조화평균을 cost function으로 사용한 (4)의 경우, 이득 차이가 (1)~(3)의 이득 차에 비해 약 1~3.5 dB까지 매우 우수해진 특성을 보이는 것을 확인하였다. 하지만 이 방법들을 이용하면 표 1 및 표 2와 같이 SLL이 특정한 값을 갖게 되지만, 이를 제어할 수 없기 때문에 제어하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안하였다.

그림 8과 그림 9는 5.8 GHz에서 동작하는 1×8 원형편파 패치 안테나를 통해 HFSS와 MoM 방식의 모의실험 툴인 FEKO에서 각각 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 방법을 이용하여 합성에 사용된 단일 빔의 SLL을 각각 20 dB, 28 dB로 설정하였을 때 계산되는 전압을 이용하여 형성되는 다중 빔 패턴이다. 또한 그림 6 및 그림 7에서와

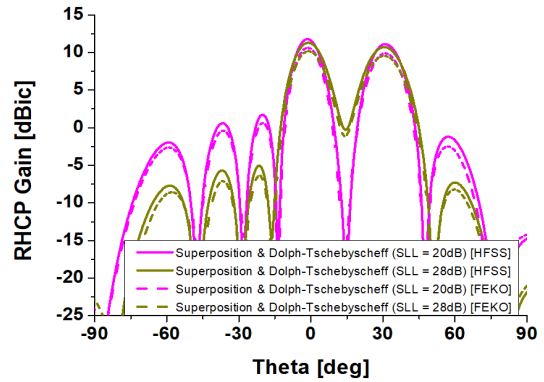


그림 8. 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 방법을 이용한 다중 빔 형성(0°, 30°, SLL=20, 28 dB)

Fig. 8. Multibeam forming using superposition applying Dolph-Tschebyscheff array(0°, 30°, SLL=20, 28 dB).

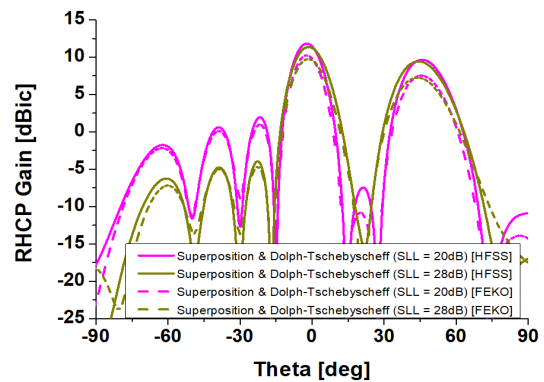


그림 9. 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 방법을 이용한 다중 빔 형성(0°, 45°, SLL=20, 28 dB)

Fig. 9. Multibeam forming using superposition applying Dolph-Tschebyscheff array(0°, 45°, SLL=20, 28 dB).

같이 입력 전력은 모든 배열 안테나에 총 8 W를 인가하였다. 두 결과가 잘 일치하였고, 이로부터 제안된 방법이 유효함을 검증하였다. 또한 부엽을 제어함에 따라 빔의 폭이 변하며, 이를 이용하여 null의 각도도 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

표 3은 HFSS 시뮬레이션을 통해 구현된 1×8 원형편파 패치 안테나로 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 방법을 비교한 것이다. (5)와 (6)은 0°와 30°로 이중 빔을 형성하였을 때 SLL을 각각 20 dB, 28 dB로 설정했을 때의 이득이고, (7)과 (8)은 0°와 45°에 이중 빔을 형성하였을 때 부

표 3. 중첩의 원리와 Dolph-Tschebyscheff 방법을 이용한 다중 빔 형성 이득 비교

Table 3. Gain comparison of multibeam forming using superposition applying Dolph-Tschebyscheff array.

	(5)	(6)	(7)	(8)
Gain at 0°	11.77	11.30	11.81	11.37
Gain at θ_2	11.10	10.72	9.65	9.44
Gain difference	0.67	0.58	2.16	1.93
SLL	10.03	16.34	9.86	15.33

엽을 각각 20 dB, 28 dB로 설정했을 때의 이득이다. 이때 부엽을 제어할 수 있으며, 두 빔의 이득 또한 (1)~(4)의 방법과 비교하였을 때 이득의 dB 합이 약 22.7 dBic 정도로 일정한 수준임을 알 수 있다. 또한 이득 차도 0°와 45°일 때 모든 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성보다 약 0.3~0.5 dB 높은 결과를 보여 이득 차는 좀 늘어나는 결과를 보인다. 하지만 0°와 30°에 이중 빔을 형성한 경우에는 모든 능동소자패턴을 고려한 방법보다도 이득 차가 매우 적어지는 특성을 보이는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 Dolph-Tschebyscheff와 중첩의 원리를 이용한 다중 빔 형성은 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성보다 이득 차가 크거나 작을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 표 3에 나타난 SLL은 다중 빔을 형성하였을 때 가장 높은 이득의 주엽과 가장 높은 이득의 부엽의 차를 나타낸다. 이는 합성 전 단일 빔 형성 시 SLL과 합성 후 SLL의 값이 차이가 나는 것을 확인하였다. 예를 들어 이중 빔이 합성될 때, 전력량 보존법칙에 의해 최대 이득이 합성 전에 비해 3 dB 정도 낮아지는 영향과 동시에 합성 전의 부엽레벨에도 영향을 미쳐 나타나게 된다. 또한 합성 전 SLL을 높일수록 합성 후 실제 나타나는 SLL도 같이 높아지는 경향성을 확인하였고, 이를 통해 다중 빔에서의 SLL을 제어할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 다양한 다중 빔 형성 방법을 제시하고, 그 방식을 이용하여 이중 빔을 형성하여 각 성능을 비교하였다. 기존 푸리에 급수를 이용한 다중 빔 형성 방법은 능동소자패턴이 고려되지 않아 다중 빔을 형성 시 정확

도가 떨어지고, 이는 형성된 각 빔의 이득 차이를 만든다. 이를 보완하기 위하여 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성 방법을 제안하였다. 이 중 능동소자패턴의 평균을 고려한 방법은 각 빔의 이득 차가 개선되었지만, 모든 능동소자패턴이 고려되지 않아 여전히 빔 정확도가 정밀하지 못하다는 단점이 확인되었다. 이를 보완하기 위해 고안된 모든 능동소자패턴을 고려한 다중 빔 형성 방법은 빔 간 이득 차를 개선할 뿐 아니라, 보다 정확한 빔을 얻을 수 있다. 하지만 위 방법들은 부엽을 제어할 수 없다는 단점이 있다. 부엽 제어를 위해, 단일 빔을 형성할 때의 방법 중 하나로 Dolph-Tschebyscheff 방법에 중첩의 원리를 응용하여 다중 빔 형성에 사용하였다. 이 방법을 이용하면 다중 빔을 형성하며, 동시에 부엽을 제어할 수 있을 뿐 아니라, 빔 폭을 제어하여 null의 위치를 제어하는 것도 가능하다. 이러한 다양한 다중 빔 형성 방법을 1×8 배열의 우수원형편파를 갖는 패치 안테나를 통하여 구현하였고, 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 HFSS, FEKO 두 가지의 모의실험 도구를 이용하였다. 본 논문에서 제안한 다양한 다중 빔 형성 방법들은 기존 방법에 비해 정확도 개선 및 연산시간 감소의 장점이 있으며, 추가로 부엽 및 null의 제어까지 가능하다. 이러한 빔 형성 방법들의 장점을 살려 요구되는 상황에 맞추어 적절히 사용하면 차세대 배열안테나 응용 전파 산업인 마이크로파 무선전력전송 및 5G 통신에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] Y. C. Kim, B. H. Choi, and J. H. Lee, "Comparative study on the power transfer efficiency of magnetic resonance and radio frequency wireless power transmission," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 4, pp. 232-234, Oct. 2016.
- [2] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] D. M. Pozar, "The active element pattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 8, Aug. 1994.
- [4] J. Kim, J. So, W. Jang, and C. Cheon, "Gain estimation by convergence of active element pattern for E-plane notch

phased array antenna," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 1047-1049, Mar. 2007.

[5] 허문만, 이인재, 윤현보, "평면 배열 안테나에 의한 다중빔 복사 패턴의 합성," *한국전자과학회논문지*, 17(10), pp. 1007-1019, 2006년 10월.

[6] S. Caorsi, A. Lommi, A. Massa, and M. Pastorino, "Peak sidelobe level reduction with a hybrid approach based on GAs and difference sets," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 4, pp. 1116-1121, Apr. 2004.

[7] M. M. Khodier, C. G. Christodoulou, "Linear array geo-

metry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 8, Aug. 2005.

[8] C. L. Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beam width and side-lobe level," in *Proceedings of the IRE*, Jun. 1946, vol. 34, no. 6, pp. 335-348.

[9] C. A. Balanis, *Antennas Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2005, pp. 283-286.

지 상 욱



2017년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2017년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] 배열 안테나, 능동 위상 배열 시스템

이 정 해

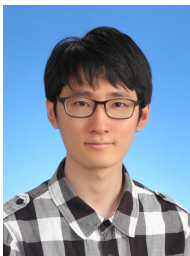


1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
 1996년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환연구원
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학

과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] Metamaterial/Metasurface 안테나 및 무선전력전송

이 창 현



2013년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] Metamaterial 안테나 및 RF 소자