

평면 배열 안테나에 의한 다중 빔 복사 패턴의 합성

A Multibeam Pattern Synthesis of Planar Array Antenna

허 문 만 · 이 인 재 · 윤 현 보

Moon-Man Hur · In-Jae Lee · Hyun-Bo Yoon

요 약

임의의 필드 분포를 갖는 단일 패치 안테나를 평면 배열하고 각 소자에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하여, 여러 방향의 지향성과 널을 갖는 다중 빔 복사 패턴의 합성 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 2x2 평면 배열 안테나를 제작하고 원거리 복사 패턴의 계산 결과와 측정 결과를 비교하여 동일한 특성을 확인하였으며, 다중 빔 복사 패턴의 합성은 8x8 배열 안테나 시스템을 이용하여, 시뮬레이션을 통해서 각 소자의 급전 신호의 크기와 위상을 최적화하였다.

Abstract

In this paper, the synthesis method of multibeam radiation pattern with multi-directional beams and nulls is proposed. Genetic algorithm is applied for the optimization of amplitude and phase of the feeding signal into each element that is structured in planar array of single patch antenna with an arbitrary field distribution. To verify the validity of the proposed method, 2x2 planar array antenna is used for the measurement and the measured far field radiation pattern is compared with the simulation result. As a result, the synthesis of multibeam radiation pattern is implemented by the optimization of amplitude and phase of the feeding signal into each element of 8x8 planar array antenna system.

Key words : Pattern Synthesis, Planar Array Antenna, Multibeam Pattern, Genetic Algorithm

I. 서 론

복사 패턴의 합성은 기본적으로 선형 또는 평면형 배열 안테나를 이용하는데, 가장 대표적인 방법으로는 이산 배열 안테나의 binomial 방법과 Dolph-Tschebyscheff 방법^{[1],[2]}, 그리고 연속 배열 안테나의 Schelkunoff 방법^[3], Fourier transform 방법^[4], Woodward-Lawson 방법^[5], Talyor 방법^[6]이 있으며, 기타 다른 연구들은 이 6가지 방법을 기본으로 하여 더 특별한 복사 패턴을 더 효율적으로 합성하는 방법을 제안한 것이다^{[7],[8]}.

그러나 이산 배열 안테나에 의한 합성 방법은 각 소자 안테나의 복사 패턴이 등방성이거나 정현 또는 여현 함수로 표현된다는 조건하에서 구한 것으로 이

러한 복사 패턴을 갖지 않는 단일 안테나에 의한 복사 패턴의 합성이 어려우며, 연속 배열 안테나에 의한 합성 방법들은 최종적으로 선형 또는 평면형 개구면의 전류의 크기와 위상이 1, 2차원의 함수로 구해지기 때문에, 역시 실제 안테나로 구현하기가 매우 어렵다.

또한, 지금까지의 복사 패턴 합성은 한 방향의 주빔, 즉 단일 빔을 대상으로 그 방향을 조종하거나 빔 폭과 부엽의 크기를 조절하여 지향성을 증가시키고, 간섭이 발생하는 방향으로 널을 생기게 하는 것이 주된 목적이었다. 그러나 같은 셀 내에서도 다수의 hot-spot 지역과 여러 방향의 간섭원이 존재하는 RF 환경에서는 하나의 주빔이 아닌 여러 개의 주빔, 즉 여러 방향으로 지향성과 여러 방향의 널을 갖는

동국대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Dongguk University)

· 논문 번호 : 20060918-115

· 수정완료일자 : 2006년 10월 10일

다중 빔 복사 패턴으로 시스템의 용량을 증가시키는 공간 분할 다중 접속(Space-Division Multiple Access: SDMA) 방식에 대한 연구가 필요하다^[9]. SDMA는 하나의 FA를 사용하고 있는 하나의 셀 또는 섹터를 안테나의 복사 패턴을 이용하여 다시 공간으로 분할하고, 각 분할된 공간에서 여러 사용자가 동시에 접속함으로써 시스템 용량을 증가시키는 방식으로, 다중 빔 복사 패턴의 경우 공간의 분할을 여러 방향에서 동시에 수행할 수 있으므로 더 효과적으로 적용할 수 있다.

본 논문에서는 임의의 필드 분포를 갖는 단일 패치 안테나를 평면 배열하고 각 소자(element)에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하여, 여러 방향의 지향성과 널을 갖는 다중 빔 복사 패턴의 합성 방법을 제안하였다.

제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 2x2 평면 배열 안테나를 제작하였으며, 제작된 안테나에 대해서 제안된 방법에 의해 계산된 복사 패턴, 2x2의 평면 배열 안테나의 구조를 모델링하고 FDTD로 전자계를 계산하여 구한 전체 개구면의 필드로부터 푸리에 변환하여 구한 복사 패턴, 안테나 주위의 가상 표면을 설정하고 그 가상 표면의 전류 및 자류 분포를 FDTD로 계산하여 구한 복사 패턴, 그리고 실제 제작하여 측정된 복사 패턴의 4가지 결과를 비교하여 동일한 특성을 확인하였다.

그리고 제안된 방법에 의한, 8x8의 평면 배열 안테나 시스템의 다중 빔 복사 패턴의 합성을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 먼저 한 방향의 주 빔을 갖는 단일 빔 복사 패턴의 합성을 수행하고, 세 방향의 주 빔을 갖는 다중 빔 복사 패턴도 합성하였다.

II. 개구면 필드에 의한 복사 패턴의 계산

일반적인 안테나의 원거리 복사 패턴은 안테나의 전류 분포나 개구면의 필드 분포에 의해 계산된다. 무한 크기의 그라운드에 놓인 사각형 또는 원형 슬롯 안테나가 등방성(homogeneous)의 무손실 매질에 에너지를 복사하는 이상적인 경우에는 개구면 필드 분포로부터 원거리 복사 패턴을 계산하는데 공간 영역(spatial domain) 해석법이 사용되지만, 유한 크기의 그라운드와 비등방성 손실 매질로의 복사와 같은

실제 상황에서는 공간 영역 해석이 매우 복잡하기 때문에, 좀 더 손쉬운 해석을 위해서 주파수 영역(spectral domain) 해석법을 사용한다^[10].

그러므로 이 주파수 영역 해석법에 의한, 원거리 복사 패턴을 구좌표계로 나타내면,

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) \approx j \frac{ke^{jkr}}{2\pi r} \left[\hat{\mathbf{a}}_\theta (f_x \cos \phi + f_y \sin \phi) + \hat{\mathbf{a}}_\phi \cos \theta (-f_x \sin \phi + f_y \cos \phi) \right] \quad (1)$$

그리고 $\mathbf{H}(r, \theta, \phi)$ 는

$$\mathbf{H}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \left[\hat{\mathbf{a}}_r \times \mathbf{E}(r, \theta, \phi) \right] \quad (2)$$

여기서 f_x 와 f_y 는 식 (3), (4)와 같다.

$$f_x(k_x = k_1, k_y = k_2) = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-a/2}^{+a/2} E_{xa}(x', y', z' = 0) e^{+jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (3)$$

$$f_y(k_x = k_1, k_y = k_2) = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-a/2}^{+a/2} E_{ya}(x', y', z' = 0) e^{+jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (4)$$

그러므로, 안테나의 개구면 필드의 접선 성분 E_{xa} 와 E_{ya} 으로부터 원거리 복사 패턴 $\mathbf{E}(r, \theta, \phi)$ 를 구할 수 있다. 식 (1)을 역으로 이용하여, 원하는 복사 패턴 $\mathbf{E}(r, \theta, \phi)$ 를 합성하는 개구면 필드의 접선 성분 E_{xa} 와 E_{ya} 를 구할 수 있다. 다만, 단지 수학적으로 임의의 접선 성분을 계산한다면 실제 안테나로 구현하기 힘들기 때문에, 임의의 필드 분포를 갖는 단일 패치 안테나를 하나의 소자(element)로 하고 이 소자에 공급하는 급전 신호의 크기와 위상을 조정하여, 원하는 목표 패턴을 합성하는 방법을 제안하였다.

III. 2x2 평면 배열 안테나의 복사 패턴

3-1 안테나 구조

제안된 복사 패턴 합성 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 2x2의 평면 배열 안테나를 제작하였으며, 각 소자에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상에 따라 합성되는 배열 안테나의 복사 패턴을 제안된 방법에 따라 계산하고, 이 결과를 기존의 계산 방법에 의한 복사 패턴, 그리고 실제 측정된 복사 패턴과 비교하였다.

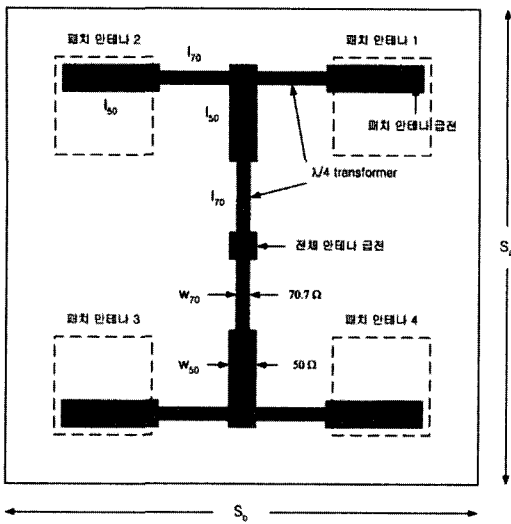


그림 1. 급전부 디바이더의 구조
Fig. 1. The structure of divider in the feeding part.

설계, 제작된 안테나의 구조는 각 소자에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상을 조정하는 급전부와 동작 주파수에서 전자계 에너지를 복사하기 위한 패치 안테나, 그리고 복사 패턴 합성을 위하여 필드 분포를 얻는 개구부로 나뉜다.

급전부는 그림 1과 같이 4개의 슬롯 안테나에 각각 신호를 공급하기 위해서 1:1:1:1(4-way)의 디바이더로 구성하였다. 각각의 소자에 공급되는 급전 신호는 각 분배 선로의 $\lambda/4$ 변환기의 너비를 변화하여 양쪽 선로로 분배되는 전력의 크기비를 조정함으로써 신호의 크기를 조정하고, 패치 안테나로 급전하는 부분의 50 Ω 전송 선로의 길이를 변화하여 전송 지연을 발생시킴으로써 신호의 위상을 조정하도록 하였다. 그리고 일반적인 2-way 디바이더의 경우, 두 분배 선로에 크기는 동일하고 위상은 역위상(180° 차)인 신호로 나누어진다. 그러므로 그림 1과 같은 1:1:1:1(4-way)의 디바이더에서 각각의 패치 안테나는 모두 동일한 크기의 신호가 공급되며, 위상은 패치 안테나 1을 기준으로 패치 2는 역위상(180° 차), 패치 3도 역위상(180° 차), 그리고 패치 4는 동위상(0° 차)이 된다. 그리고 급전부 디바이더의 정중앙에서 하부의 접지면 사이에 프로브로 급전하는 방식을 채택하였다.

패치 안테나 및 개구부는 다음의 두 가지 구조에

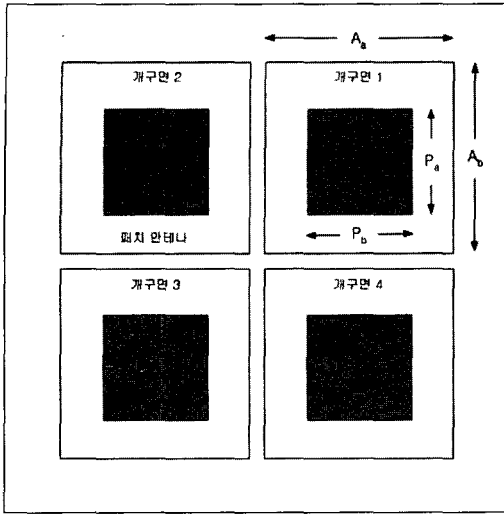
대해 각각 설계, 제작되었다. 첫 번째는 4개의 소자에 각각 동일한 패치 안테나의 모양과 급전 위치, 같은 모양의 개구면을 설정하여 패치 안테나를 통해서 복사되는 필드가 동일 크기를 갖고 위상은 급전부 디바이더에 의해 2개는 동위상, 나머지 2개는 역위상을 갖도록 하는 구조이고, 두 번째는 개구부에서 개구면 1을 완전히 제거한 구조로서, 제거된 개구면의 필드는 크기와 위상이 모두 0인 상태가 되며, 나머지 3개의 개구면은 단일 패치 안테나의 개구면 필드에 비해서 임의의 크기비와 위상차가 생기게 된다. 이는 개구면 1을 제거함으로써 개구면 1에 연결된 디바이더의 분배 선로가 오픈된 상태가 되기 때문에, 여기서 반사되는 신호가 다시 전송 선로를 따라서 나머지 패치에 여기되어 필드의 크기 및 위상이 변하게 되는 것이다. 이때, 반사되는 신호의 크기와 위상은 디바이더의 격리도(isolation)에 따라 변하게 된다.

4개의 개구면으로 구성된 첫 번째 구조와 3개의 개구면으로 구성된 두 번째 구조의 패치 안테나와 개구부의 모양은 그림 2와 같으며, 급전부와 패치 안테나 및 개구부의 세부적인 길이와 너비는 표 1에 나타내었다.

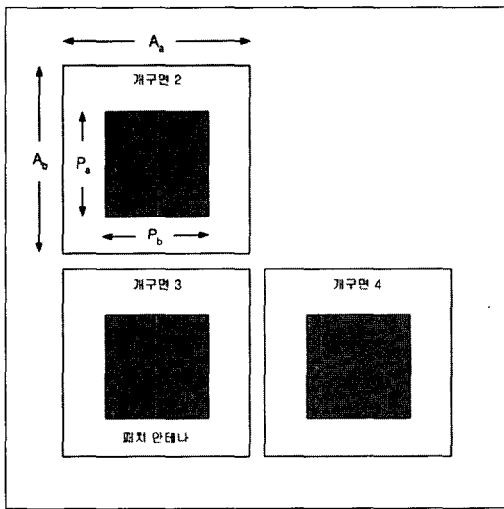
그리고 하부의 급전부와 상부의 패치 안테나는 그 사이에 도체판을 두어 전자계 차폐(shield)를 하고, 급전 위치에 구멍을 뚫어서 도체선으로 연결하는 구조로 하였다. 이는 급전부의 전송 선로에서 복사되는 미약한 에너지가 직접 여기됨으로써 개구면 필드의 크기 및 위상에 영향을 주는 것을 방지하기 위해서이다. 즉, 급전부 디바이더의 구조에 의해서 원하는 크기비와 위상차를 갖도록 조정하고, 그 외 개구면의 필드에 영향을 미칠 수 있는 요인을 제거하였다. 또한 개구부의 패치 안테나 주위에 도체판을 두어 각 패치 안테나로부터 형성된 필드가 구분하여 각 소자의 개구면 필드를 얻을 수 있도록 하였다. 이렇게 구한 각 소자의 개구면 필드는 정해진 크기와 위상을 갖도록 급전 신호에 의해 조정된다.

제작된 안테나의 옆면 구조는 그림 3과 같다.

2×2의 평면 배열 슬롯 안테나는 2.34 GHz의 동작 주파수를 갖도록 설계되었으며, 설계된 각 파라미터는 표 1과 같다.



(a) 첫 번째 구조
(a) The first structure



(b) 두 번째 구조
(b) The second structure

그림 2. 패치 안테나와 개구부
Fig. 2. The structure of patch antennas and apertures.

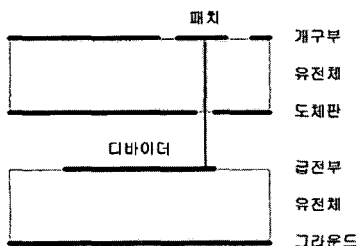


그림 3. 설계된 안테나의 옆면 모양
Fig. 3. The side view of the designed antenna.

표 1. 설계된 안테나의 파라미터
Table 1. The parameters of the designed antenna.

	파라미터	설계값
급전부	유전체 크기($S_a=S_b$)	200 mm
	비유전율(ϵ_r)	4.6 mm
	유전체의 높이(h_s)	3.16 mm
	50 Ω 라인의 너비(w_{50})	5.6 mm
	50 Ω 라인의 길이(l_{50})	33 mm
	70.7 Ω 라인의 너비($w_{70.7}$)	3.6 mm
패치 안테나	70.7 Ω 라인의 길이($l_{70.7}=\lambda/4$)	18 mm
	패치 안테나의 크기($P_a=P_b$)	30 mm
개구부	Air의 높이(h_a)	12 mm
	개구부의 크기($A_a=A_b$)	76 mm

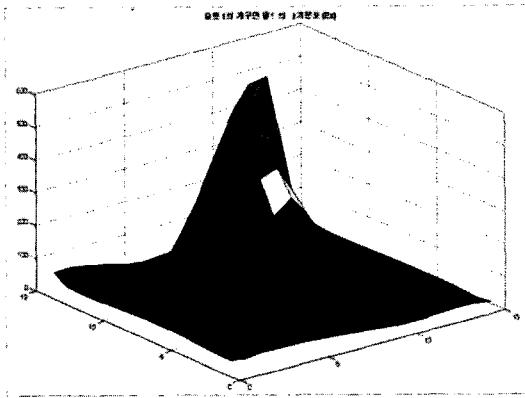
3-2 안테나 복사 패턴의 계산

첫 번째 구조에서, 급전부는 1:1:1:1 디바이더로 구성되어 있고 패치 안테나와 개구부는 4개의 개구면에서 모두 동일한 구조로 되어 있기 때문에, 각 개구면의 필드는 동일한 크기를 갖고 위상은 2개는 동위상, 나머지 2개는 역위상을 갖는다. 그러므로, 개구면 1의 필드를 단일 개구면 필드로 설정하고 이 개구면 필드를 계산하였다.

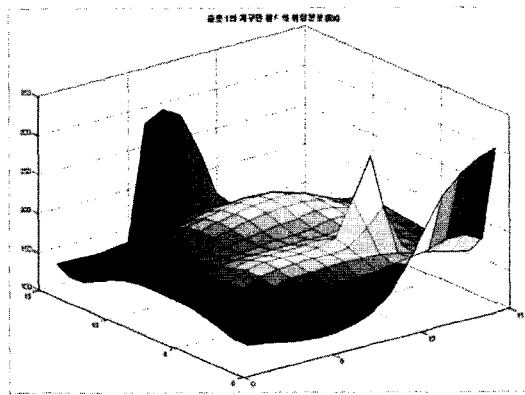
급전부와 패치 안테나 및 개구부의 안테나 전체 구조를 모델링하고 FDTD로 안테나 주위의 전자계를 계산하여, 개구면 1의 접선 필드를 구한다. 그림 4에 계산된 개구면 필드의 E_x 성분의 크기와 위상 분포를 나타내었다.

급전 신호가 급전부 디바이더를 통해서 정사각형 패치 안테나에 의해 정사각형 개구면에 여기되기 때문에, 개구면의 E_y 의 크기와 위상 분포는 E_x 필드 분포를 y방향으로 회전한 것과 동일한 분포를 갖는다. 그림 4의 개구면 1의 필드는 2x2의 평면 배열 안테나의 원거리 복사 패턴을 합성하는 기준이 되는 단일 패치 안테나의 필드로서, 이 필드를 기준으로 각 개구면에서의 필드의 크기비 및 위상차를 구한다.

4개의 개구면을 갖는 첫 번째 구조의 경우, 각 소자의 급전부와 패치 안테나 및 개구부가 모두 동일한 구조이기 때문에, 각 개구면 필드와 단일 개구면 필드의 크기비는 모두 1.0으로 균일하며, 위상차는 급전부의 4-way 디바이더의 특성에 따라 동위상 또



(a) 크기 분포
(a) The amplitude distribution



(b) 위상 분포
(b) The phase distribution

그림 4. 개구면 1의 E_x 필드 분포
Fig. 4. The E_x field distribution on the aperture 1.

는 역위상으로 균일하게 나타낸다. 3개의 개구면을 갖는 두 번째 구조는 첫 번째 구조와는 달리, 각 개구면 필드의 크기비가 일정하지 않으며, 위상도 서로 동위상(0°)이거나 역위상(180°)이 되지 않는다. 그러므로 안테나 구조를 모델링하고 FDTD로 안테나 주위의 전자계를 계산하여, 개구면 1, 2, 3, 4의 E_x 와 E_y 필드를 각각 구하고 그림 4의 단일 패치 안테나의 필드 분포와 비교하여 크기비 및 위상차를 구한다. 첫 번째 구조와 두 번째 구조에서, 각 소자 개구면의 필드와 단일 패치 안테나의 개구면 필드의 크기비와 위상차를 표 2에 나타내었다.

그러므로 그림 4의 단일 개구면 필드를 표 2에 나타난 크기비와 위상차를 가지고 2×2 로 평면 배열하면, 전체 개구면의 필드를 구성할 수 있다. 이렇게 구

표 2. 기준 필드와 각 개구면 필드의 크기비 및 위상차

Table 2. The amplitude and phase difference between reference field and each aperture field.

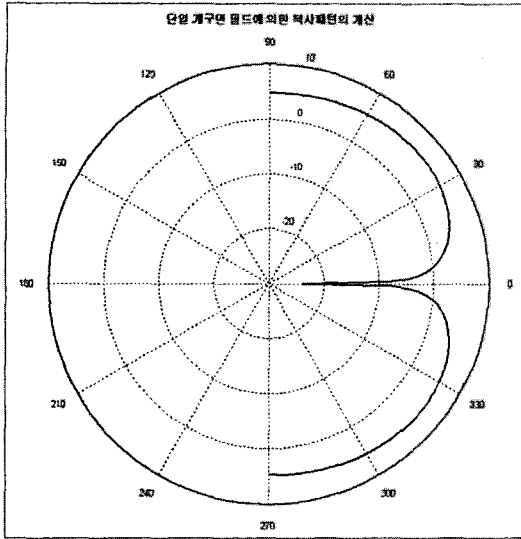
기준 개구면 필드와의 비		첫 번째 구조	두 번째 구조
슬롯 1의 개구면 필드	크기비	1.0	0
	위상차	0°	N/A
슬롯 2의 개구면 필드	크기비	1.0	0.8
	위상차	180°	-160°
슬롯 3의 개구면 필드	크기비	1.0	1.15
	위상차	180°	-200°
슬롯 4의 개구면 필드	크기비	1.0	0.85
	위상차	0°	-180°

성된 전체 개구면 필드를 푸리에 변환하여 안테나의 원거리 복사 패턴을 계산하면 그림 5(a)와 같다. 이 복사 패턴은 $\phi=90^\circ$ 일 때, θ 에 대한 E면의 패턴을 나타낸 것이다.

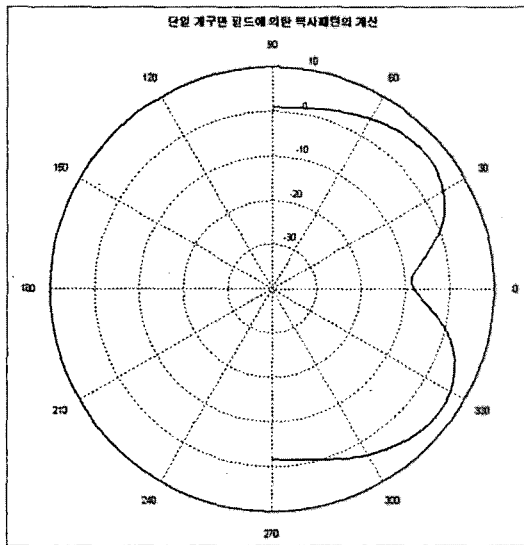
또한, 2×2 의 평면 배열 슬롯 안테나의 전체 구조를 모델링하고, FDTD로 안테나 주위의 전자계를 계산하여, 전체 배열 안테나의 개구면의 전체 필드를 구할 수 있다. 이렇게 계산된 전체 개구면 필드를 푸리에 변환하여 안테나의 원거리 복사 패턴을 계산하면 그림 6과 같다.

그림 5(a)의 제안된 방법에 의해 구한 전체 개구면 필드에 의한 복사 패턴과 그림 6(a)의 전체 개구면 필드에 의한 복사 패턴의 계산 결과는 완전히 동일하다. 이것은 4개의 개구면을 갖는 첫 번째 구조의 경우, 각 개구면의 필드 크기비가 1.0으로 균일하게 동일하고 위상차 또한 0° 또는 180° 로 균일하게 차이가 나기 때문에, 단일 개구면으로 구성된 전체 개구면 필드와 FDTD로 계산한 전체 개구면 필드가 완전히 같기 때문이다.

또한, 그림 6(b)에서 실선으로 나타난 값은 전체 개구면 필드에 의한 복사 패턴이고, 점선으로 나타난 값은 그림 5(b)의 제안된 방법에 의한 복사 패턴의 계산 결과이다. 두 복사 패턴의 계산값은 약간의 오차를 보이며, 이는 단일 개구면 필드에 의해 전체 개구면 필드를 구성할 때, 적용한 표 2의 각 개구면



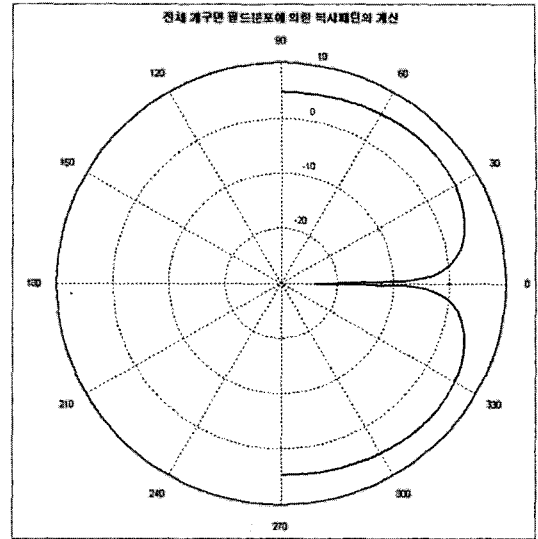
(a) 첫 번째 구조
(a) The first structure



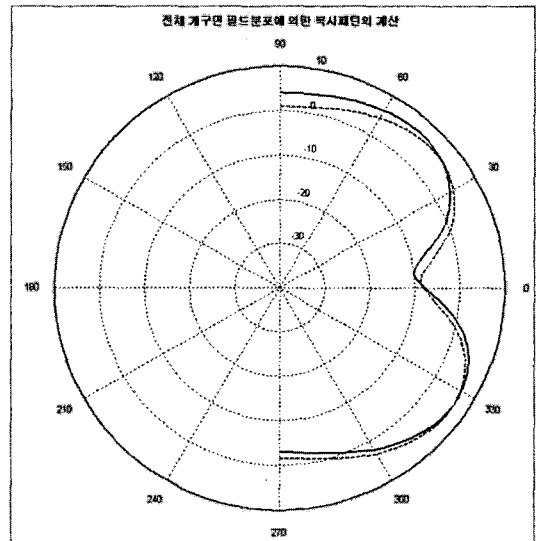
(b) 두 번째 구조
(b) The second structure

그림 5. 제안된 방법에 의한 원거리 복사 패턴의 계산
Fig. 5. The calculated radiation pattern by the proposed method.

필드의 크기비와 위상차가 하나의 개구면에서 균일한 분포를 나타내지 않고 근사적인 값을 사용했기 때문이다. 즉, 개구면 필드 2의 크기비는 표 2에서 0.8을 적용했지만, 실제 개구면 2의 전체에서 균일하게 0.8이 되지 않는기 때문이다. 이것은 각 소자간의 상호 결합(mutual coupling)에 의한 것으로 첫 번째



(a) 첫 번째 구조
(a) The first structure



(b) 두 번째 구조
(b) The second structure

그림 6. 전체 개구면 필드에 의한 원거리 복사 패턴의 계산
Fig. 6. The calculated radiation pattern by the whole aperture field.

구조에서는 이 상호 결합까지 고려한 개구면 1의 필드를 단일 개구면 필드로 설정하였으며, 두 번째 구조는 모든 패치 안테나에 균일하게 급전 신호가 공급되지 않기 때문에, 상호 결합 효과에 의해서 하나의 개구면에서 균일하지 않은 크기비와 위상차가 발

생하게 된다. 그러나, 두 복사 패턴의 비교에서 보듯이, 각 방향에서의 복사 패턴의 크기가 거의 유사함을 알 수 있다. 그러므로 복사 패턴의 계산에서 상호 결합에 의한 영향은 미비하기 때문에 무시한다.

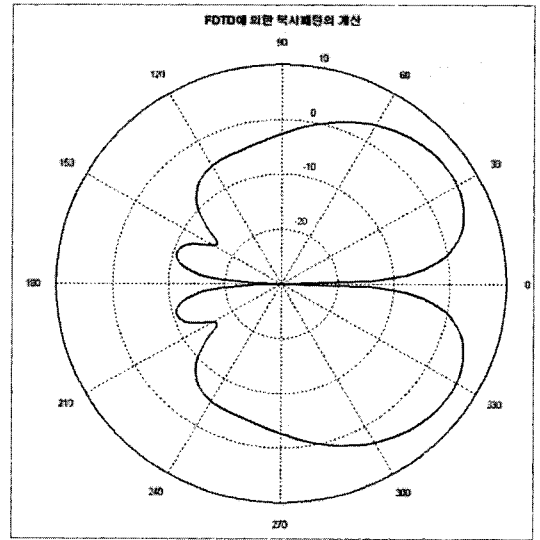
그리고 세 번째 복사 패턴의 계산 결과는 FDTD 이용한 일반적인 계산 방법으로 계산 영역 내에 안테나 구조를 포함하는 가상 표면을 설정하여 각 면에서의 전자계 성분을 구한다. 이 전자계 성분은 호이겐스(Huygens)의 등가 원리를 적용하여 표면 전류 및 자류로 계산한 후에, 근원거리 복사 패턴으로 변환하게 된다. 이 방법으로 구한 원거리 복사 패턴은 그림 7과 같다.

첫 번째 구조에서, 그림 7(a)의 FDTD 방법에 의해 계산된 복사 패턴과 그림 5(a)의 푸리에 변환으로 구한 복사 패턴을 비교하면, $\theta=0^\circ$ 에서의 널과 $\theta=0^\circ$ 를 기준으로 $\theta=\pm 30^\circ$ 방향에서의 대칭 모양의 주 빔이 잘 일치하고 있음을 확인하였으며, 두 번째 구조에서는 $\theta=-30^\circ$ 부근에서 최대 복사가 일어나며, $\theta=0^\circ$ 부근에서 복사 패턴이 약간 감소하는 등의 거의 동일함을 확인할 수 있다.

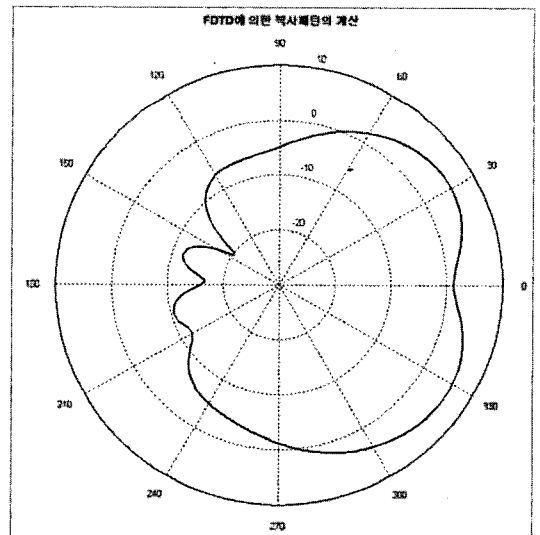
다만, 푸리에 변환에 의한 계산은 개구면을 기준으로 아래쪽 영역($z < 0$)은 소스가 없다(source-free)고 가정하기 때문에 개구면의 위쪽 영역만 계산된다. 또한, FDTD 방법은 패치 안테나가 아닌 급전부의 전송 선로로부터 방사되어 안테나의 위, 아래, 옆면에서 나오는 미약한 필드의 영향이 고려되지만, 푸리에 변환에 의한 계산은 오직 개구면에서 복사되는 필드에 의해서만 복사 패턴이 계산되기 때문에 $\theta = \pm 90^\circ$ 부근에서의 두 계산 결과의 오차가 발생하는 것이다.

3-3 안테나의 제작 및 특성 측정

제안된 2x2의 평면 배열 안테나는 이중 기판 구조로서, 하부 기판의 급전부 디바이더와 상부 기판의 패치 안테나가 도체선으로 연결되어 급전 신호가 전달되기 때문에, 두 기판이 위치가 정확하게 일치해야 한다. 그러므로 두 기판에 급전부와 패치 안테나 부분을 각각 광에칭(photo-etching)하는 과정에서 네모서리에 기판의 연결을 위한 마커를 함께 제작하였다. 이 마커에 구멍을 뚫어 연결함으로써, 제작에서



(a) 첫 번째 구조
(a) The first structure

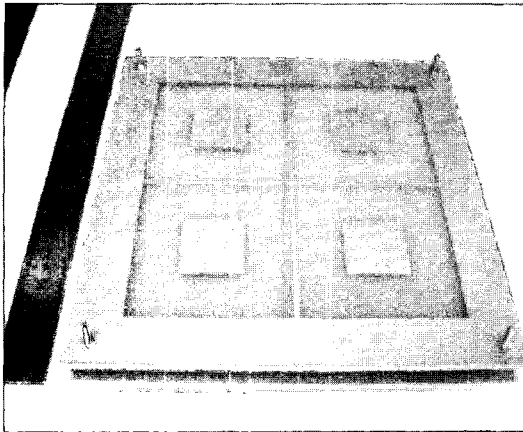


(b) 두 번째 구조
(b) The second structure

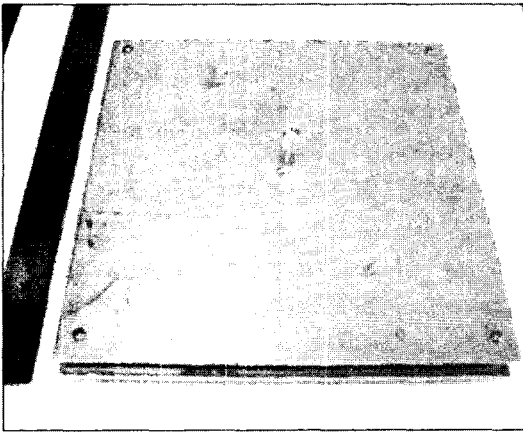
그림 7. FDTD에 의한 원거리 복사 패턴의 계산
Fig. 7. The calculated radiation pattern by FDTD method.

발생할 수 있는 편이 오차를 제거하였다.

제작에 사용한 유전체 기판은 앞서 설계된 바와 같이, 비유전율이 4.6이고 높이가 3.16 mm인 에폭시 기판을 사용하였으며, 가로와 세로가 각각 200 mm 크기인 정사각형 기판 3장을 사용하여 각각 급전부, 개구면 4개를 갖는 첫 번째 구조, 그리고 개구면 3개



(a) 패치 안테나와 개구부(앞면)
(a) The patch antennas and apertures(front side)



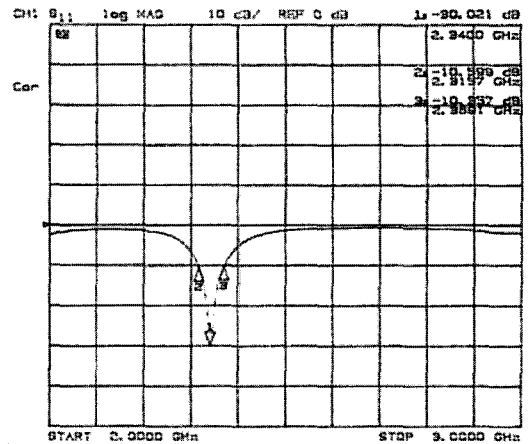
(b) 접지면(뒷면)
(b) Ground plane(back side)

그림 8. 전체 안테나의 완성된 모양
Fig. 8. The completed prototype of the whole antenna.

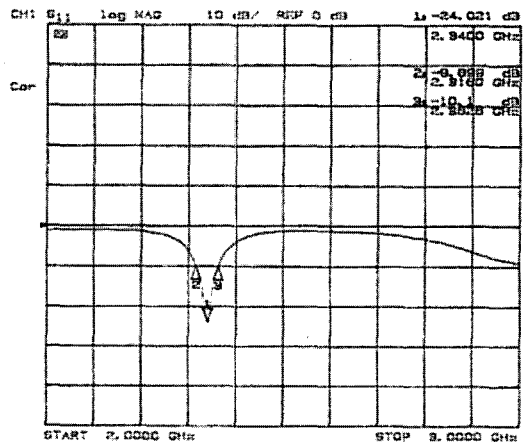
를 갖는 두 번째 구조를 각각 제작하였다. 설계한 바와 같이 첫 번째와 두 번째 구조의 급전부는 동일하며, 두 번째 구조는 개구면 1을 제거했기 때문에, 급전부의 분배 선로 1에서 도체선을 연결하지 않고 오픈된 상태로 제작하였다.

그림 8은 급전부, 패치 안테나와 개구부를 조립한 완성된 안테나의 사진을 나타내었다.

제작된 2x2의 평면 배열 안테나는 두 가지 구조에 대해서, 각각 기본적인 안테나 특성인 반사 손실을 HP8722A 네트워크 분석기(network analyzer)를 이용하여 측정하였으며, 각 구조에 대해서 그림 9에 나타내었다.



(a) 첫 번째 구조
(a) The first structure



(b) 두 번째 구조
(b) The second structure

그림 9. 반사 손실의 측정 결과
Fig. 9. The measured results of the return loss.

첫 번째 구조의 경우, 2.34 GHz의 동작 주파수에서 반사 손실이 -30.021 dB이며, 2.3157 GHz에서 2.3691 GHz까지 53.4 MHz(2.28 %)의 대역폭을 가진다. 두 번째 구조의 경우, 2.34 GHz의 동작 주파수에서 반사 손실은 -24.021 dB로 분배 선로 1의 오픈 상태로 인한 임피던스 부정합에 의해 반사 손실이 감소되며, 대역폭은 2.3160 GHz에서 2.3626 GHz까지 46.6 MHz(1.99 %)로 측정되었다.

3.4 원거리 복사 패턴의 측정 및 결과 비교

본 논문에서 제안한 복사 패턴의 합성 방법에 대

한 유효성을 확인하기 위해서, 안테나의 복사 패턴은 매우 중요하며 정확하게 측정되어야 한다. 따라서, 제작된 안테나의 복사 패턴의 측정은 Satimo사의 스타게이트(stargate) 장비를 이용하여 측정하였다.

스타게이트는 무반사실(chamber) 내에 설치되어 주변 전파 환경에 영향을 받지 않으며, 안테나 주위의 16개의 전자계 프로브를 설치하고 안테나를 회전시켜서, 전방향의 근거리 전자계를 측정한다. 이렇게 측정된 근거리 전자계 데이터는 원거리 전자계로 변환하여, 원거리 복사 패턴을 측정하는 시스템이다.

원거리 복사 패턴의 측정은 계산 결과와 동일하게 하기 위해서, 평면 배열 슬롯 안테나에 의해 합성되는 복사 패턴인 $\phi=90^\circ$ 일 때, $E(\theta)$ 를 측정하였다.

먼저, 4개의 슬롯을 갖는 첫 번째 구조에 대한 복사 패턴의 측정 결과는 그림 10과 같다. 측정은 동작 주파수 2.34 GHz에서 시행되었으며, 3-2절에서의 세 가지 계산 결과와 비교하였다.

첫 번째 구조의 경우, 측정 결과는 세 가지 계산 결과와 마찬가지로 $\theta=0^\circ$ 에서의 널 방향과 $\theta=0^\circ$ 를 기준으로 좌우 대칭의 패턴 모양, 그리고 $\theta=\pm 30^\circ$ 부근에서의 주 빔 방향의 동일한 특성을 나타냄을 확

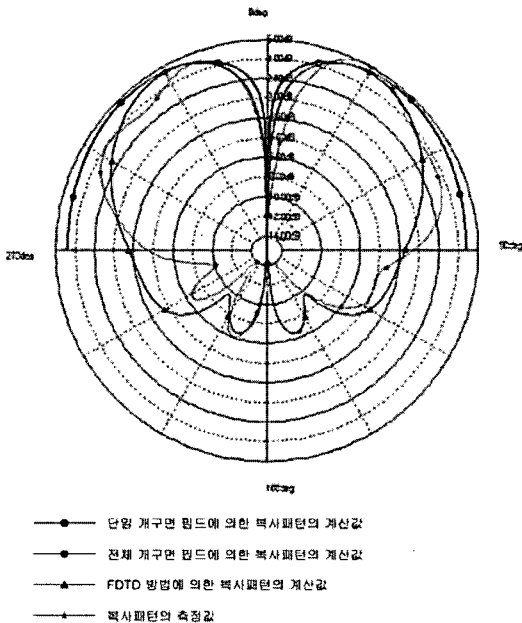


그림 10. 첫 번째 구조 안테나의 복사 패턴 비교
Fig. 10. The comparison between radiation patterns of first structure.

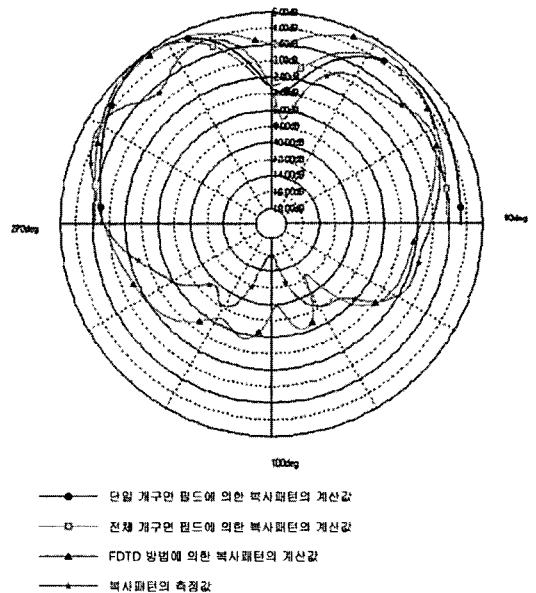


그림 11. 두 번째 구조 안테나의 복사 패턴 비교
Fig. 11. The comparison between radiation patterns of second structure.

인할 수 있었다. 그러나 제작상의 오차, 특히 급전부에서 패치 안테나로 신호를 공급하는 도체선의 조립 과정에서의 오차에 의해 특정 방향에서 복사 패턴의 크기가 약간의 차이를 나타내고 있다.

두 번째 구조의 경우, 그림 11의 첫 번째 구조와 비교해서 $\theta=0^\circ$ 에서의 널의 감소와 $\theta=-30^\circ$ 부근의 패턴이 상대적으로 증가하는 현상 등, 널 방향과 주 빔 방향의 네 가지 복사 패턴에서 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

그러므로 두 가지 구조의 계산 및 실험에 의해서, 본 논문에서 제안하는 방법인 평면 배열 안테나의 각 급전 신호의 크기 및 위상을 조정하여, 각 개구면 필드의 크기 및 위상을 조정하고 이 조정된 필드에 의해 복사 패턴을 합성할 수 있다는 것에 대한 유효성을 확인할 수 있다. 따라서, 원하는 복사 패턴을 합성하기 위해서 필드의 크기와 위상, 궁극적으로는 급전 신호의 크기 및 위상을 조정하는 것이 가능하다.

IV. 유전자 알고리즘을 이용한 다중 빔 복사 패턴의 합성

개구면 필드로부터 원거리 복사 패턴을 구하는 방

법은 푸리에 변환이기 때문에, 단순하게 보면 복사 패턴으로부터 개구면 필드를 구하는 방법은 역푸리에 변환이다. 하지만, 원하는 임의의 복사 패턴을 수식으로 표현하는 것이 거의 불가능하기 때문에 역푸리에 변환은 불가능하다. 그러므로, 본 논문에서는 사전에 알고 있는 필드 분포, 즉 단일 패치 안테나의 필드를 평면 배열하고, 원하는 복사 패턴을 합성하도록 각 패치에 급전되는 신호의 크기와 위상을 변수로 하여 최적화하였다. 다만, 가장 단순한 최적화 방법인 시행 착오(trial and error)법으로는 임의의 복사 패턴을 합성하도록 하는 크기와 위상을 찾기는 거의 불가능하기 때문에, 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 사용하였다.

유전자 알고리즘은 자연계의 진화 현상을 공학의 최적화 문제에 적용한 알고리즘으로, 적자 생존과 자연 도태를 기본 원리로 한다. 급전 신호의 크기와 위상변수를 염색체로 표현하고 진화 현상인 선택, 교배, 돌연변이를 이용하여 점차 나은 형질의 염색체, 즉 점차 최적화된 해로 진화해 가는 것이다. 즉, 임의의 크기와 위상으로 합성된 복사 패턴과 합성하고자 하는 목표 패턴이 점차 동일해지는 방향으로 변수들이 진화해 가도록 설정하여 최적화하는 것이다.

4-1 시스템 구성

여러 방향의 지향성과 널을 갖는 다중 빔 복사 패턴의 합성을 위한 평면 배열 안테나 및 급전부의 전체 시스템 구성은 그림 12와 같다.

안테나 부분은 가로와 세로에 각각 8개씩 총 64개의 패치 안테나가 평면 배열되었으며, 전자계 에너지를 복사시키는 패치 안테나와 개구면의 구조는 사전에 계산된 단일 패치 안테나의 구조와 동일하게 하였다. 그리고 가로와 세로의 각 개구면의 간격은 5 mm로 동일하게 하였다. 또한, 각 개구면의 필드의 크기와 위상을 조정하기 위해서, 급전 신호의 크기와 위상을 조정할 수 있는 감쇠기(attenuator)와 위상 천이기(phase shifter)를 각 패치 안테나의 급전부에 연결하였다.

그러므로, 8×8의 평면 배열 안테나의 각 급전 선로에 연결된 감쇠기와 위상 천이기가 급전 신호의 크기 및 위상을 조정하고, 그 급전 신호가 사전에 계

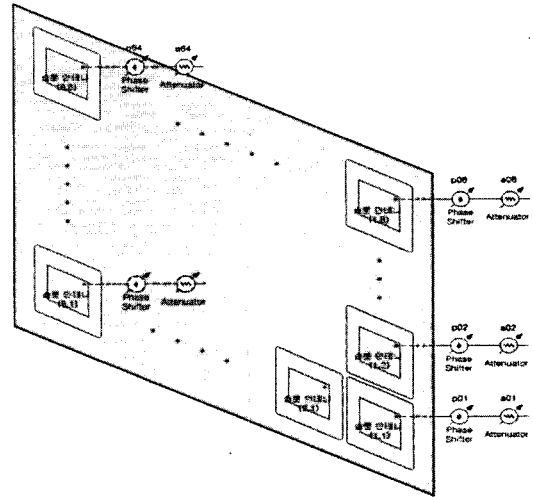


그림 12. 복사 패턴 합성을 위한 배열 안테나의 시스템 구성도

Fig. 12. The system diagram of array antenna for pattern synthesis.

산된 단일 패치 안테나의 개구면 필드의 크기와 위상을 조정하는 것이다. 이렇게 크기와 위상이 조정된 64개의 개구면 필드가 분포되어, 전체 개구면 필드를 구성하고 이 개구면 필드로부터 원거리 다중 빔 복사 패턴이 합성되는 것이다.

본 논문에서는 이러한 방법을 역으로 적용하여, 사전에 정의된 목표 패턴이 합성되도록 각 패치 안테나에 공급되는 총 128개의 급전 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하였다.

4-2 목표 복사 패턴의 표현 및 합성

유전자 알고리즘을 이용하여, 원하는 다중 빔 복사 패턴을 합성하도록 각 슬롯의 급전 신호의 크기와 위상을 최적화하기 위해서는 합성하고자 하는 복사 패턴을 수학적으로 표현하여야 한다. 이렇게 표현된 복사 패턴은 유전자 알고리즘의 최적화 단계에서 각 염색체들의 합성 패턴과 비교하여 적합도를 계산하고, 적합도가 낮은 것은 버리고(자연도태), 높은 것은 다음 세대로 이어지는(진화) 것을 결정하는 기준이 된다.

그러나 여러 방향의 지향성과 널을 갖는 다중 빔 복사 패턴은 수학적으로 표현하는 것이 불가능하기 때문에 유전자 알고리즘의 적합도 계산을 위해서는

특별한 방법을 사용하여야 하며, 이를 위해서 샘플링(sampling) 기법을 사용하였다. 샘플링 기법이란, 복사 패턴의 전체를 각도에 대한 수학 함수로 표현하는 것이 아니고, 몇몇 각도에 대한 복사 패턴의 값을 샘플링하고 그 각도에서만 샘플링된 값과 합성된 복사 패턴 값을 비교해서 오차 또는 적합도를 계산하는 것이다.

물론 샘플링된 각도의 수가 많을수록, 복사 패턴을 세분화하여 표현할 수 있기 때문에 더 정확한 적합도 계산이 가능하지만, 그만큼 계산 시간이 증가하게 된다. 반대로 샘플링된 각도의 수가 적을수록 계산시간은 줄어들지만, 정확하지 않은 복사 패턴을 표현할 가능성을 가지고 있다. 그러므로, 합성 목표의 복사 패턴을 특징에 따라, 주 빔의 개수와 방향, 그리고 널(null) 방향을 모두 표현할 수 있는 최소한의 샘플링 각도의 수를 찾는 것이 중요한 일이다.

4.3 단일 빔 복사 패턴의 합성

다중 빔 복사 패턴을 합성하기에 앞서, 임의의 한 방향으로 에너지를 복사하는 일반적인 단일 빔 복사 패턴을 합성하였다. 합성 목표는 $\theta = -50^\circ$ 에서 주 빔을 갖고 3 dB 빔 폭이 약 18° 인 복사 패턴이다.

안테나의 복사 패턴은 주 빔과 널의 방향이 중요한 요소이기 때문에, 합성하고자 하는 목표 패턴은 주 빔의 방향을 0 dB로 하고 그에 비해서 상대적인 값으로 복사 패턴을 표현하였으며, 유전자 알고리즘의 적합도 계산을 위해서, 최종 단일 빔 복사 패턴을 2° 간격으로 샘플링하였다.

8×8 의 평면 배열 슬롯 안테나로 단일 빔 복사 패턴을 합성하기 위한 각 슬롯 안테나의 급전 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하였다. 그러므로, 최적화 되는 변수는 128개이며, 단일 패치 안테나의 개구면 필드는 사전에 계산된 그림 4의 필드 분포를 사용하였다.

유전자 알고리즘에서 급전 신호의 크기비와 위상차는 실제 감쇠기나 위상 천이기로 구현하기 위해서 염색체로 구현할 때, 3비트로 설정하여 각 변수를 2^3 개로 정형화하였다. 즉, 크기비는 0부터 1 사이를 8 개로 나누어서 그 값만 갖도록 설정하였고, 위상은 0에서 360° 까지를 8개로 나누어서 그 값만 갖도록

하였다. 또한, 교배 확률은 60 %로 하여 부모 세대의 24개의 염색체가 교배 대상이 되도록 설정하였다. 또한, 돌연변이 확률은 0.1 %로 설정하여 총 $128 \times 30 \times 40$ 개의 비트 중에서 153개의 비트가 0에서 1로, 1에서 0으로 바뀌도록 하였다.

그리고 세대수는 유전자 알고리즘의 가장 중요한 요소로서, 세대수를 많이 설정하면, 가장 최적화된 변수를 찾을 수 있지만 계산 시간이 많이 소요된다. 반대로 세대수를 적게 하면 계산 시간은 단축되지만, 전역적(global) 최적값이 아닌 국부적(local) 최적값을 찾을 확률이 높아진다. 그러므로 단일 빔 복사 패턴의 경우, 목표 패턴이 복잡하지 않기 때문에 세대수를 감소해도 최적값을 찾을 수 있다. 그러므로 세대수를 10,000번으로 하여 유전자 알고리즘을 실행하였다.

유전자 알고리즘으로 최적화된 크기와 위상으로 공급되는 급전 신호에 의해 구성된 64개의 개구면 필드, 즉 패치 안테나를 8×8 로 평면 배열하여 구성된 전체 개구면 필드를 푸리에 변환하여 계산된 복사 패턴과 합성 목표인 단일 빔 복사 패턴을 그림 13에 나타내었다.

그림 13의 결과에서, 합성된 복사 패턴과 목표 복사 패턴은 거의 완벽하게 동일하므로 8×8 의 평면 배

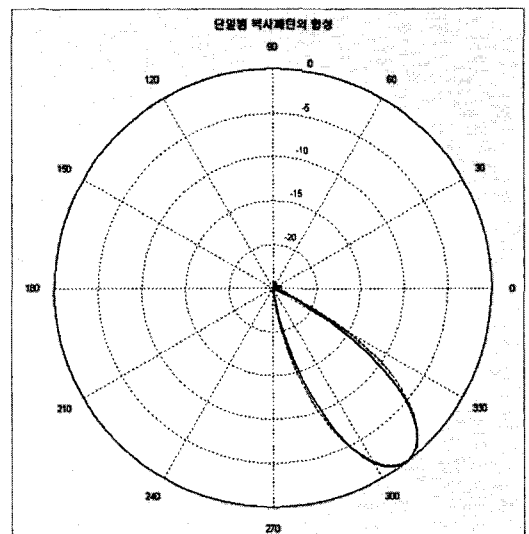


그림 13. 단일 빔 목표 복사 패턴과 합성된 복사 패턴
Fig. 13. Single beam target radiation pattern and synthesized radiation pattern.

열 안테나에 의한 단일 빔 복사 패턴의 합성이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

4.4 다중 빔 복사 패턴의 합성

제안된 방법에 의해서 단일 빔과 같은 방법으로 다중 빔 복사 패턴을 합성하였다. 합성 목표는 $\theta = -60^\circ, 10^\circ, 70^\circ$ 에서 3개의 주 빔을 갖고 3 dB 빔 폭이 모두 18° 인 복사 패턴이다. 샘플링 각도는 2° 간격으로 설정하였다.

각 패치 안테나의 급전 신호의 크기비 및 위상차를 최적화 하기 위한 유전자 알고리즘의 설정은 단일 빔의 합성과 동일한 방법으로 하였다. 다만, 단일 빔과는 다르게 복잡한 다중 빔 합성 목표를 최적화해야 하기 때문에, 크기와 위상 변수를 염색체로 구현할 때, 4비트로 설정하고 각 변수를 2^4 개로 정형화하여 크기비는 0부터 1 사이를 16개로 나누어서 그 값만 갖도록 설정하였고, 위상은 0에서 360° 까지를 16개로 나누어서 그 값만 갖도록 하였다. 또한, 세대수의 경우에도 10,000번으로 설정하였다.

다중 빔 복사 패턴의 합성에 대해서도, 유전자 알고리즘으로 최적화된 크기와 위상에 의해 구성된 전체 개구면 필드를 푸리에 변환하여 계산된 복사 패턴과 목표 다중 빔 복사 패턴을 비교하여 그림 14에

나타내었다.

그림 14의 결과에서, 합성된 복사 패턴은 목표 다중 빔 복사 패턴에 비해 주 빔의 크기와 빔 폭에서 오차가 발생한다. 이 오차의 주된 원인은 급전 신호의 크기와 위상을 16개로 한정된 조건하에서 패턴 합성을 시행했기 때문이며, 또 다른 원인으로는 유전자 알고리즘의 세대수를 충분히 설정하지 못했기 때문에, 전역적(global) 최적화가 아닌 국부적(local) 최적화를 시행했을 가능성이 있다. 그러나 유사한 특징의 패턴 합성 결과를 보이기 때문에, 평면 배열 슬롯의 개수나 크기 및 위상 조건을 확대한다면, 다중 빔 복사 패턴의 합성이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 임의의 필드 분포를 갖는 단일 패치 안테나를 평면 배열하고 각 소자에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상을 조정하여 원거리 복사 패턴을 합성하는 방법을 제안하였다. 또한, 제안된 방법을 이용하여 여러 방향의 지향성과 널을 갖는 다중 빔 복사 패턴을 합성하기 위해서, 8×8 평면 배열 안테나의 각 소자에 공급되는 급전 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하였다.

제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 2×2 의 평면 배열 안테나를 두 가지 구조에 대해 설계, 제작하여, 제안된 방법에 의한 복사 패턴의 계산 결과, 기존 방법에 의한 복사 패턴의 계산 결과, 그리고 측정된 복사 패턴을 비교하고 동일한 특성을 나타냄을 확인하였다.

그리고 임의의 개구면 필드 분포를 갖는 패치 안테나를 8×8 로 평면 배열하고 각 소자에 급전되는 신호의 크기와 위상을 유전자 알고리즘으로 최적화하여, 여러 가지 모양의 다중 빔 복사 패턴을 합성하였다.

본 논문에서 제안된 방법에 의해 합성된 다중 빔 복사 패턴은 현대의 복잡한 RF 환경에서 주파수 이용 효율과 이동 통신의 시스템 용량을 높이는 공간 분할 다중 접속의 방식으로 응용이 가능할 것이다. 향후, 실시간으로 다중 빔 복사 패턴의 합성이 진행될 수 있도록, 최적화 알고리즘에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

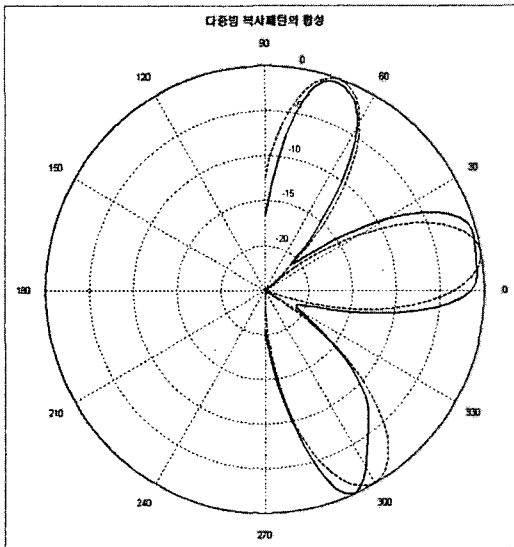


그림 14. 다중 빔 목표 복사 패턴과 합성된 복사 패턴
Fig. 14. Multi-beam target radiation pattern and synthesized radiation pattern.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Stone, *United States Patents*, no. 1,643,323 and no. 1,715,433.
- [2] C. L. Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and side lobe level", *IRE Proceedings on Waves and Electronics*, Jun. 1946.
- [3] S. A. Schelkunoff, "A mathematical theory of linear arrays", *Bell System Technical Journal*, vol. 22, pp. 80-107, 1943.
- [4] H. G. Booker, P. C. Clemmow, "The concept of an angular spectrum of plane waves, and its relation to that of polar diagram and aperture distribution", *IEE Proceedings on Radio Section*, vol. 97, pp. 11-17, Jan. 1950.
- [5] P. M. Woodward, J. D. Lawson, "The theoretical precision with which an arbitrary radiation pattern may be obtained from a source of a finite size", *IEE Journal*, vol. 37, pp. 363-370, Sep. 1948.
- [6] T. T. Talyor, "Design of line source antennas for narrow beam width and low side lobes", *IRE Transactions on Antennas and Propagat.*, vol. 3, no. 1, pp. 16-28, Jan. 1955.
- [7] H. G. Hoang, H. D. Tuan, B. Vo, and H. H. Kha, "Beam pattern synthesis for large symmetric arrays with bounds on sidelobe and mainlobe levels", *IEEE Asia Pacific Conference on Comm.*, pp. 1014-1018, Oct. 2005.
- [8] A. Trastoy, F. Ares, "Phase only synthesis of continuous linear aperture distribution patterns with asymmetric side lobes", *IEE Electronics Letters*, vol. 34, issue 20, pp. 1916-1917, Oct. 1998.
- [9] K. N. Chee, M. Ismail, B. M. Ali, S. Khatun, and S. S. Jamuar, "Impact of inter cell interference on capacity in the joint multiple access(CDMA and SDMA) system", *IEEE Asia Pacific Conference on Comm.*, pp. 435-439, Oct. 2005.
- [10] C. A. Balanis, *Antennas Theory, Analysis and Design*, Wiley, 2nd Ed., pp. 620-630, 1997.

허 문 만



1997년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2004년 2월: 동국대학교 전자공학과 박사 수료
 [주 관심분야] 안테나, 전자파 수치

해석, 이동통신

윤 현 보

1979년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, 안테나 설계 및 해석, 이동통신

이 인 재



1993년 8월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 8월: 동국대학교 전자공학과 박사 수료
 2003년 5월~현재: STMicroelectronics

사업개발담당 부장

[주 관심분야] 안테나, 전자파 수치해석, 이동통신