

BPM을 이용한 안테나 배열의 집속 빔 전파 해석

A Calculation of the Propagation for Focused Beams Using BPM

김 재 흥 · 조 춘 식* · 이 재 옥*

Jaehung Kim · Choon Sik Cho* · Jae W. Lee*

요 약

본 논문에서는 빔 전파법(BPM: Beam Propagation Method)을 이용하여 안테나 배열에서 발생된 집속된 빔의 전파 또는 집속 현상을 파악하는 방법을 제시하였다. 대물 쪽(object side)으로 적응적 집속을 위해 로트맨 렌즈를 이용하는 경우에 대해 회절이론을 바탕으로 집속 현상을 이론적으로 고찰하였다. 이를 검증하기 위해 상용 EM simulation tool을 이용하여 분석하기에는 구조물의 복잡성과 집속된 빔의 입진 설정 등 몇 가지 어려움이 있기에 이의 차선택(alternative solution)으로 푸리에 회절 이론에 기초한 빔 전파법을 이용하여 집속 현상을 계산하는 방법인 BPM을 소개하였다. 즉, 개구면을 통한 빔 전파는 Fresnel Diffraction Integral(FDI)에서 푸리에 변환 형태로 표현될 수 있으며 이는 BPM으로 발전시켜 개구면 형(aperture-type) 안테나로부터 전파되는 파의 빔 폭 (beam width or spot size), 세기(intensity or gain), 그리고 실제 초점거리를 산출하였다. 10λ 의 배열 크기를 갖는 안테나에 대해 20λ , 30λ , 그리고 50λ 의 기하 초점거리(geometrical focal length)를 갖는 파에 대해 BPM을 통해 계산한 결과, 빔 폭은 차례로 1.1λ , 1.3λ , 1.9λ 이 산출되었다.

Abstract

A method of calculation for propagating and focusing of focused beams generated in antenna arrays, using BPM(Beam Propagation Method), is presented in this paper. Based on the diffraction theory, the beam focusing and propagation is studied specially for the case of the antenna array fed by the Rotman lens that is able to focus microwave power on its focal arc or generate multiple beams. There are difficulties in performing a full-wave simulation using a commercial EM simulation tool for propagating and focusing of beams because of the structural complexity and the feeding assignment of the antenna array. Therefore, as an alternative solution, the BPM is presented to calculate the beam propagation from the aperture-type antennas. From the point of view of optics, the propagations of the lens have been simplified from the Fresnel diffraction integral to the Fourier transform. Using Fourier Transform, a beam propagation method is developed to show improvement of the resolution by controlling the wavefront of wave propagating from an aperture-type antenna array. The beam width(or spot size) and the intensity are calculated for a focused beam propagating from an array having 10λ of its size. For the beams with 20λ , 30λ , and 50λ of geometrical focal length, the half-power beam widths(or spot size) are about 1.1λ , 1.3λ , and 1.9λ , respectively.

Key words : Focused Beam, Beam Propagation Method, Rotman Lens

I. 서 론

레이더 시스템은 목표물로부터 산란되어 수신된 신호를 LMS(Least Mean Square) 등의 공간 신호 처리

「이 연구는 IC Design Education Center(IDEC) 지원으로 연구되었음.」

강원대학교 전기전자정보공학부(School of Electrical, Electronic, and Information Engineering, Kangwon National University)

*한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics, Telecommunications and Computer Engineering, Hankuk Aviation University)

· 논문 번호 : 20050118-005

· 수정완료일자 : 2005년 4월 21일

(spatial signal processing) 알고리즘을 통해 처리한다^[1]. 이러한 공간 신호 처리 기술은 스마트안테나 시스템에도 빔 패턴의 합성을 통해 신호 대 잡음비(S/I)를 증대시키기 위해 적용된다^[2]. 레이더 시스템의 해상도는 안테나 크기뿐만 아니라 공간 신호 처리 기술에 따라 달라진다. 근거리 장(near-field) 탐지에서 해상도를 증대시키기 위해 파전 면(wavefront)을 탐지거리에 따라 적응적으로 조절할 필요가 있다. 공간 예비 여파(spatial pre-filtering)는 적응 배열 시스템을 구현하는데 소요되는 비용과 난점을 경감하는데 효과적인 기술인데 이러한 예비 여파를 구현하기 위해서 간단한 설계 구조와 광대역 특성으로 널리 연구되어 온 로트맨 렌즈를 이용할 수 있다^{[3],[4]}. 일반적으로 로트맨 렌즈는 원거리장의 목표물로부터 산란되어 오는 파를 수신하거나 원거리 장을 지향하는 빔을 형성하는데 사용된다. 만약 로트맨 렌즈와 안테나 사이에 전압 조절형 위상 변화기(voltage-tunable phase shifter)를 삽입한다면 안테나와 목표물간의 파전 면을 조절하여 근거리 장에서 초점거리를 조절할 수 있는데 이는 궁극적으로 이미지의 해상도나 빔의 전력밀도를 증가시킬 수 있을 것이다. 이는 각각의 안테나에서 파의 위상을 조절함으로써 원하는 초점으로 수렴하는 파전 면을 형성할 수 있는데, 즉 파전 면 변조(wavefront modulation)를 달성할 수 있는데 결과적으로 목표물의 이미지는 렌즈의 초점 호(focal arc)에 맺히거나 역으로 목표물을 전자기적으로 밝게 비추게 된다. 응용의 예로서 낮은 깊이로 매설된 지뢰나 구조물을 탐지하거나 RF 전력으로 구동되는 무인 비행체에 무선 전력 전송 등에 적용될 수 있을 것이다. 푸리에 광학이론^[5]을 기초로 빔 전파 기법(BPM: Beam Propagation Method)을 적용하여 빔 폭(half-power beam width or spot size) 등을 계산하였다.

II. Fresnel Diffraction Integral & Fourier Transform

푸리에 광학 이론에 따르면 개구면(aperture)에서 파의 전파는 식 (1)과 같이 Fresnel Diffraction Integral (FDI)로 표현된다. 식 (1)로부터 개구면 바로 앞의 장(field)과 2차 위상요소(quadratic phase factor)의 곱의 공간에 대한 푸리에 변환으로 인식될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \{u(\xi, \eta) e^{j\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)}\} e^{-j\frac{2\pi}{z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \tag{1}$$

식 (1)로부터 개구면 입구의 장(field: $u(\xi, \eta)$)과 2차 위상요소(quadratic phase factor: $e^{j\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)}$)의 곱의 공간에 대한 푸리에 변환으로 인식될 수 있다. 1-D 스캐닝 로트맨 렌즈에 대해 적용하기 위해 주어진 2-D FDI에서 변수 y 와 η 를 제거하여 식 (2)와 같이 간소화하였다.

$$U(x) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}x^2} \int_{-\infty}^{\infty} \{u(\xi) e^{j\frac{k}{2z}\xi^2}\} e^{-j\frac{2\pi}{z}x\xi} d\xi \tag{2}$$

만약 그림 1(a)와 같이 개구면과 렌즈가 결합될 경우 렌즈의 전면부의 장 분포와 초점($z=f$)에서 장 분포는 푸리에 변환 쌍을 이룬다. FDI의 2차 위상요

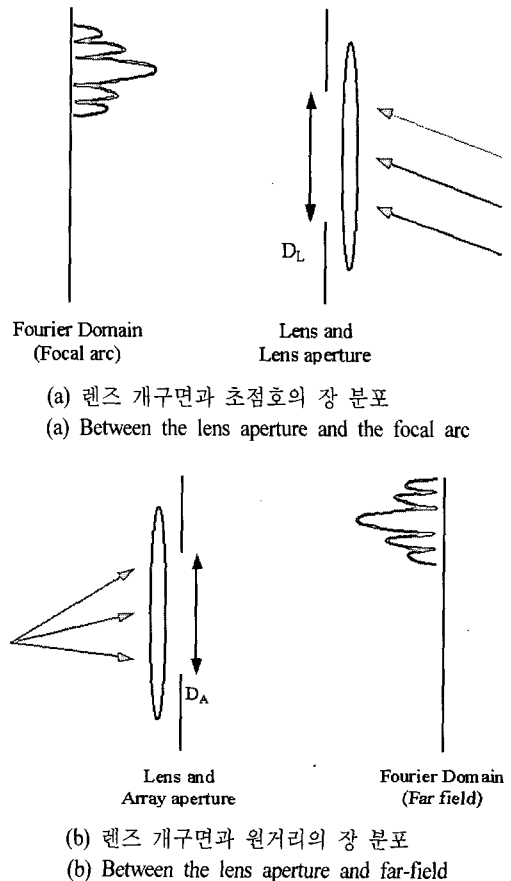


그림 1. 푸리에 변환 쌍
Fig. 1. Fourier transform pairs.

소는 렌즈의 위상함수($e^{-j\frac{k}{2f}\xi^2}$)와 서로 상쇄되어 결과적으로 식 (4)와 같이 렌즈의 전면부의 장 분포에 대한 푸리에 변환의 형태로 간소화된다.

$$U_{ff}(x) = \frac{e^{jkf}}{j\lambda f} e^{j\frac{k}{2f}x^2} \int_{-\infty}^{\infty} \{u(\xi) e^{j\frac{k}{2f}\xi^2} e^{-j\frac{k}{2f}\xi^2}\} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x\xi} d\xi \quad (3)$$

$$= \frac{e^{jkf}}{j\lambda f} e^{j\frac{k}{2f}x^2} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x\xi} d\xi \quad (4)$$

또 다른 푸리에 변환 쌍은 그림 1(b)에서와 같이 개구면의 장 분포와 원거리 장(Fraunhofer region, $z > 2D^2/\lambda$)의 관계로 이루어진다. 즉 FDI 내의 2차 위상요소($e^{j\frac{k}{2f}\xi^2}$)는 개구면으로부터 거리(z)가 멀어질수록 1의 값에 가까워진다. 앞선 경우와 달리 렌즈는 푸리에 변환기로서의 역할을 하는 것이 아니라 파전 면을 원형파에서 평면파로 변환시키는 콜리메이터(collimator) 역할을 한다는 점이다. 본 논문에서는 전자의 경우에 대해 푸리에 변환을 이용한 BPM을 통해 분석해 보았다.

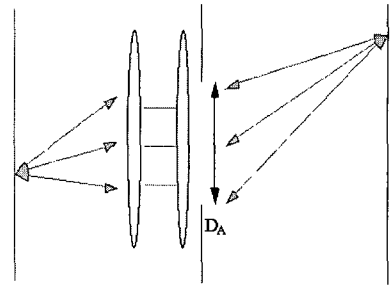
$$U_{ff}(x) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}x^2} \int_{-\infty}^{\infty} \{u(\xi) e^{j\frac{k}{2z}\xi^2}\} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x\xi} d\xi \quad (5)$$

$$\cong \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}x^2} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x\xi} d\xi \quad (6)$$

III. 빔의 집속

3-1 로트맨 렌즈를 이용한 빔의 집속의 활용

근거리 장의 목표물로부터 산란되어 오는 파를 집속하기 위해 로트맨 렌즈와 안테나 요소 사이에 가변 위상변환기를 삽입하여 대물측면(object side)과 대상측면(image side)을 동시에 집속시킬 수 있는 방법을 제시한다. 로트맨 렌즈는 반사된 전파를 집속, 다시 말해서 공간 여파를 통해 지향 각도 또는 위치를 파악할 수 있는 장치이다. 이 렌즈의 장점으로 다중 초점렌즈(3개의 초점)가 갖는 특징으로 넓은 스캐닝 각도, 광대역 특성 등을 꼽을 수 있다. 위상변환기를 이용, 근거리에 분포된 목표물을 탐지할 경우 해상도를 더욱 높일 수 있으며 RF 전력으로 구동되는 무인 비행체 등에 원격으로 RF 전력을 전달할 경우 더욱 높은 밀도의 전력을 전달할 수 있을 것이다. 그림



Fourier Domain (Focal arc) Additional lens having a variable focal length Fourier Domain (Focal plane on object side)

그림 2. 가변초점거리를 갖는 렌즈를 통한 대물 및 대상측의 집속

Fig. 2. Focusing both object side and image side.

2와 같이 목표물로부터 반사된 전자기파를 렌즈의 초점 호에 장착된 탐지기를 통해 상을 형성할 수 있거나 역으로 초점 호에 장착된 전력 원으로부터 집속된 RF 전력을 무인 비행체 등에 전달할 수 있다.

그림 3에서와 같이 주변물질에 비해 유전율이 현저히 차이가 나는 물체 또는 도전 물체, 예를 들어 지뢰 등 불발된 폭발물(UXO: Unexploded Ordinance)을 탐지하는 경우 유용하게 적용될 수 있을 것이며 또한 무선통신의 경우 채널 용량은 안테나 이득에 비례하여 증대될 수 있는데 더욱 집속된 빔을 사용함으로써 추가적인 집속 이득^[6]을 얻을 수 있으며 결과적으로 채널 용량을 증대시킬 수 있을 것이다.

3-2 Beam Propagation Method

앞서 제시한 집속 현상을 확인하기 위해 FDI로부터

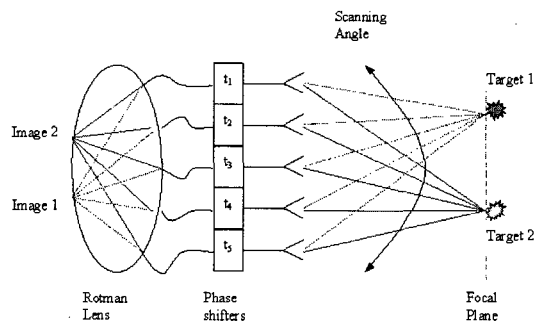


그림 3. 로트맨 렌즈를 이용한 근거리 탐지시스템의 간단한 모형

Fig. 3. Schematic view of the short range detecting system using a Rotman lens.

터 수치 해석적 방법인 BPM(Beam Propagation Method)을 적용하였다. 이미 언급된 FDI는 전파의 편파(polarization) 요소를 포함하지 않기에 정확도가 매우 높다고 할 수는 없다. 그러나 광학 분야에서 광학 시스템의 파의 전파를 파악하기 위해 사용되고 있다. 본 논문에서는 개구면 형태의 안테나로부터 전파되는 빔의 집속 현상을 살펴보기 위해 BPM을 적용 발전시켰다. 푸리에 광학이론에 따르면 이 경우 빔의 전파가 레이저와 달리 전파 축(propagation axis)에 집중되지 않기에 non-paraxial 경우로 가정하여 MATLAB을 이용 프로그램을 작성하였다. 우선 2-D non-paraxial FDI를 1-D 형태로 바꾸면 이 식은 개구면의 장 분포와 2차 위상요소와 convolution 형태인데 이를 공간 주파수 영역(spatial frequency domain or K-space)에서 달리 표현하면 개구면 함수와 2차 위상요소의 푸리에 변환의 곱에 대한 역 변환으로 표현된다.

$$U(x) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi) e^{j\frac{k}{2z}(x-\xi)^2} d\xi \quad (7)$$

$$= \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}\{u(x)\} \times \mathfrak{F}\{e^{j\frac{k}{2z}x^2}\}\} \quad (8)$$

따라서 2차 위상요소의 푸리에 변환은 전파(propagation)에 대한 시스템 함수로 간주할 수 있다. 그림 4에서 보듯이 안테나 배열로부터 전파되어 목표물에 집중되는 빔에 대해서 식 (8)로부터 BPM을 통해 해석할 수 있다.

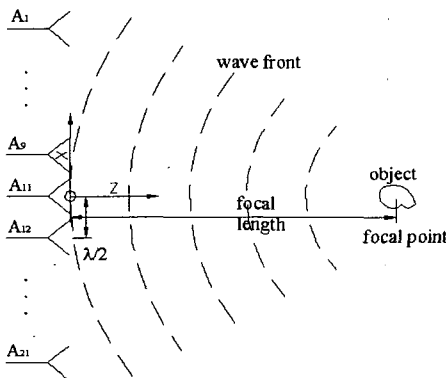


그림 4. 안테나 배열로부터 집속 전파되는 빔의 모형
Fig. 4. The focused beam propagated from the antenna array to an object.

그림 4와 같은 상황은 그림 5와 같이 BPM 모델을 설정할 수 있다. 즉, 안테나 바로 전면에서 장 분포의 푸리에 변환과 전파 시스템 함수를 곱하여 역 변환을 취한 결과이다. 구체적으로 그림 5에서 매 전파 단계마다 전파분포(U_n)는 바로 전 단계의 sampling된 전파 분포 열 벡터(U_{n-1})의 푸리에 변환과 시스템함수 열 벡터(H)의 곱의 역 변환에 비례상수($e^{jkz}/j\lambda z$)를 곱한 것이다. 이를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$U_n = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}\{U_{n-1}\} \times H\} \quad (9)$$

여기서, $H = \mathfrak{F}\{e^{j\frac{k(m\Delta x)^2}{2\Delta z}}\}$

그림 4와 같은 상황에 대한 실제 계산을 위해 안테나의 배열크기는 10λ , 전파의 간격(propagation step)을 한 파장($z = 1\lambda$), 안테나 간격은 $1/2\lambda$ 으로 가정하여 BPM 모델을 설정하여 프로그램을 작성하였다. 안테나 간격을 $1/2\lambda$ 보다 작게 할 경우는 각 안테나에서 수신되는 신호를 공간적으로 구분하기에는 지나치게 상관도(correlation in space)가 높아질 수 있다. 전파 창(propagation window)은 128λ 으로 설정하였는데 이는 배열을 포함하기에 충분하며 $1/2\lambda$ 간격으로 sampling할 경우 256개의 원소를 갖는 열 벡터로 표현 가능하며 FFT 알고리즘에 따르면 2ⁿ개의 원소를 가질 경우 계산 속도가 그렇지 않은 경우보다 매우 빠르기 때문이다. 그림 5에서 첫 번째 열 벡터는 안테나 전면부를 포함한 전파 창(propagation window)의 장 분포를 $1/2\lambda$ 간격을 sampling한 값의 FFT 결과이다. 즉, 256 원소를 갖는 열 벡터이며 중심은 배열의 장 분포 값으로 그 위는 0으로 하여 FFT 실행한 열 벡터이다. 이를 전파 시스템 함수(H)와 곱하여 IFFT 시킨 것은 전파거리만큼 진행된 지점에서 장 분포에 해당된다. 따라서 같은 방식으로 매 단계마다 적용하면 해당 지점에서 전파 분포를 파악할 수 있다. 또한 흡수 층은 계산상 반사 면으로 작용하는 외곽 면을 충분한 깊이의 감쇠 면을 설정함으로써 반사를 제거하였다. 일반적으로 충분히 깊게 하면 좋으나 계산량을 고려하여 10λ 정도로 설정할 수 있다. 개구면이 작으면 회절에 의해 전파 분포가 넓게 전파 축의 외곽으로 크게 분포하

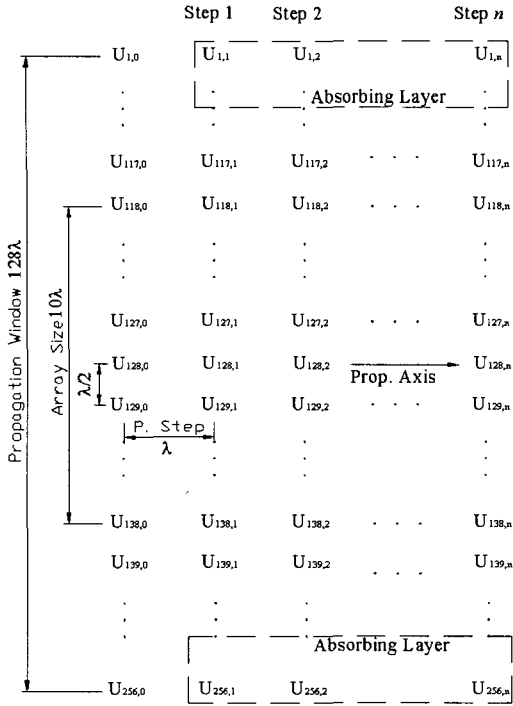
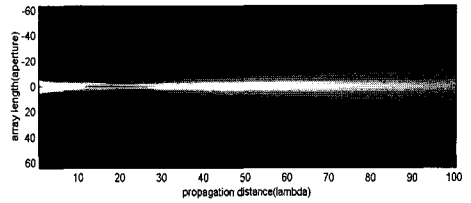


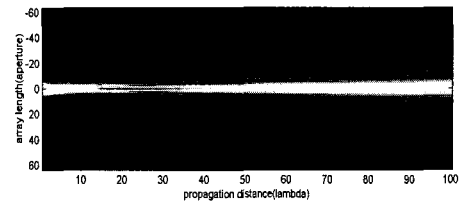
그림 5. 그림 4의 안테나 배열의 집속 빔에 대한 BPM 행렬 모델
 Fig. 5. BPM matrix model for the focused beam from the antenna array shown in Fig. 4.

므로 상대적으로 깊게 하는 것이 바람직하다. 이를 또한 이와 같이 얻은 전파 분포를 간 전파 단계마다 생성된 장 분포 열 벡터의 크기를 도식화시키면 그림 6과 같이 빔의 전파를 가시적으로 나타낼 수 있다. 그림 6에서 기하 초점거리가 20λ , 30λ , 50λ 인 경우에 대해 빔의 전파 현상과 전파 축에서 거리에 따른 세기의 변화를 계산하였다.

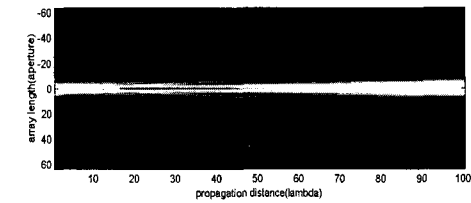
각각 기하 초점거리 20λ , 30λ , 50λ 를 갖는 빔에 대해 BPM을 실행한 결과 최고 세기는 차례로 16λ , 20λ , 24λ 에서 나타났으며 이 거리에서 세기는 배열 표면의 세기보다 5.11, 3.99, 3.06배 증가되었음을 볼 수 있었다. 빔 폭(half-power beam width) 또는 스팟 크기(spot size)는 1.10λ , 1.30λ , 1.90λ 를 차례로 얻었다. 기하 초점거리와 실제 최고 세기를 얻는 지점 즉 실제 초점거리와 차이가 발생함을 볼 수 있으며 이는 회절이론에 의해 예견된 상황^[6]이며 또한 초점깊이(depth of focus)는 개구면 안테나로 접근함에 따라 감소함을 볼 수 있었다.



(a) 20λ



(b) 30λ



(c) 50λ

그림 6. 기하초점거리에 따른 파의 집속 현상과 전파 축에서 세기의 변화
 Fig. 6. Beam focusing and their intensities of beams along the propagation axis with different geometrical focal lengths.

표 1. 기하 초점거리에 따른 빔의 전파
 Table 1. Beam propagation of focused beams with geometrical focal lengths of 20λ , 30λ , and 50λ .

G. Focal Length	20λ	30λ	50λ
Peak Distance	16λ	20λ	24λ
Focusing Int.	5.11 times	3.99 times	3.06 times
Beamwidth	1.10λ	1.30λ	1.90λ

IV. 결 론

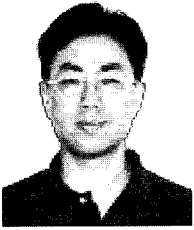
본 논문에서 안테나 배열로부터 집속 빔을 해석하기 위해 BPM을 적용하는 방법에 대해 기술하였다. 또한 로트맨 렌즈와 안테나 사이에 가변 위상 변환기를 삽입한 경우를 가정하여 빔의 초점거리를 적응적으로 조절할 수 있는 경우에 대해서 BPM을 통해 집속 현상을 살펴보았다. 이는 마치 줌 렌즈와 같이 대물 쪽(object side)의 초점거리 또한 조절할 수 있는 능력을 추가함으로써 앞서 언급한 탐지나 RF 전력전송에 저렴한 해결책을 제공할 수 있을 것이다. 이와 같이 집속 빔의 전파를 해석하기 위해 EM full-wave simulation을 실행할 경우 구조의 복잡도와 난이도에 따른 어려움이 있다. 또한 안테나를 통한 빔의 집속은 근거리 장(near-field) 현상으로서 변화가 심하여 정확한 해석에 어려움이 따른다. 이러한 난점을 극복하기 위한 차선책으로서 정확도가 약간 떨어지는(full-wave simulation의 난점에 대한 trade-off

로서 주로 전파 과정에서 편파의 변화를 고려하지 않아서 발생) BPM을 통해 간단히 파악할 수 있는 수단을 제공하였다. 전파이론의 예측대로 계산 결과 실제의 경우에 집속 빔을 적용할 경우 기하 초점거리와 실제 초점 거리 간에 차이가 발생하는데 이에 대한 연구 및 분석이 위상 변환기가 결합된 로트맨 렌즈와 더불어 추가적으로 수행 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, Chap. 2 and 7, Wiley, 2002.
- [2] C. Liberti, Jr., T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications*, Chap. 5, Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] W. Rotman, R. F. Turner, "Wide-angle microwave lens for line source applications", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-11, pp. 623-632, Nov. 1963.
- [4] D. H. Arther, "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave Journal*, pp. 37-42, Oct. 1975.
- [5] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd Ed., Chap. 3-7, McGraw-Hill, 1996.
- [6] R. C. Hansen, "Focal region characteristics of focused array antennas", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-33, pp. 586-593, Dec. 1985.

김 재 흥



1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 12월: University of Colorado at Boulder Electrical Eng. (공학석사)
2002년 5월: University of Colorado at Boulder Electrical Eng. (공학박사)

2002년 8월~현재: 강원대학교 전기전자정보공학부 BK21 사업단 교수
[주 관심분야] Lens Antennas, Power Amplifiers, Scattering Problem 등

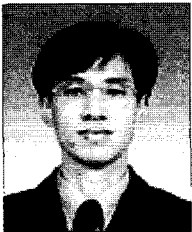
이 재 욱



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월~2004년 2월: 한국전자

통신연구단 전파기반연구그룹
2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자전자 및 항공 전자 전공, 조교수
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능, 수동 및 설계, EMI/EMC 대책기술, 고증폭기 및 고출력 안테나 설계

조 춘 식



1987년 2월: 서울대학교 제어계측 공학과 (공학사)
1995년 12월: University of South Carolina, Electrical Eng. (공학석사)
1998년 12월: University of Colorado at Boulder, Electrical Eng. (공학박사)

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부 전임강사
[주 관심분야] MMIC, PA, Oscillator, Mixer, Antenna, Computational Electromagnetics 등