

3차원 콘포멀 어레이에서의 인터플레이션 기술의 적용

강 경 목*, 설 경 은*, 전 정 환*, 고 진 환*

Interpolation Technique for 3-D Conformal Array

Kyung-mook Kang*, Kyung-Eun Seol*,
 Junghwan Jeon*, Jinhwan Koh*

요 약

본 논문에서는 휘어지거나 굴곡진 array인 3차원 conformal array의 beam pattern을 보정하고자 interpolation technique을 3차원으로 확장하여 3-D uniform rectangular array(3-D URA)에 적용하는 방법을 연구하였다. 시뮬레이션 결과는 2차원 interpolation 결과보다 매우 우수한 특성을 보여준다.

Key Words : Conformal array Interpolation,
 Uniform rectangular array, beam
 pattern, 3d array

ABSTRACT

In this correspondence, we studied 3D uniform rectangular array as an extension of interpolation technique to compensate the beam pattern of 3D conformal array. The simulation result shows outstanding performance comparing to 2D interpolations.

I. 서 론

Conformal array antenna는 차량, 비행기, 선박 등 다양한 분야에 이용되는 최신 안테나기술이다.^[1] 기존에 사용되는 interpolation technique은 x,y좌표로 표

현되는 2-D conformal array에 적용되는 기술이다. 또한 실제 전투기의 외벽이나 굴곡진 기체면에 적용하기 위해서는 기체의 곡선 표면을 따라 배열시킨 형상에 따라 배열된 array가 필요하다.^[2] 형상적응배열(또는 conformal array) 레이더는 굴곡진 면에 비선형적으로 TR-module을 배치하는 기술이며 이는 향상된 디지털 빔을 형성할 수 있으며 넓은 가지영역을 확보할 수 있다는 장점이 있다.^[3,4] 또한 평면 배열 안테나에 비해 공기역학적 또는 유체역학적인 특성이 더 우수하고, 레이더 단면적을 감소시킬 수 있게 되며, 외형적 형태의 장점이 있다.^[2]

Conformal array 프로세싱 방법 중 가장 널리 연구되는 방법이 interpolation array를 사용하는 방식이다.^[5,6] 본 논문에서는 x,y,z 성분을 가지고 있는 2-D uniform rectangular array (2-D URA)와 3-D conformal array(3-D CA)간의 처리 과정에 관한 연구를 수행하였다. II에서는 이러한 문제를 공식화 하고 3-D CA에 대한 전 처리방법을 제안하며 III에서는 시뮬레이션의 결과를 통해 제안한 방법의 성능을 도식적으로 나타낸다. 마지막으로 IV에서는 본 논문의 결과를 보여준다.

II. 3차원 interpolation technique

3차원 interpolation technique를 위하여 먼저 $N \times N$ 개의 안테나 어레이에 있는 비 균일하게 배열되어있는 요소들을 고려한다. θ 가 azimuth고 ϕ 가 elevation이며 n 번째 array에 입사되는 신호는 다음과 같다.

$$beam\ pattern = A(\theta, \phi, n) \tag{1}$$

여기서 $A(\theta, \phi, n)$ 는 n 번째 antenna의 azimuth가 θ 이고 elevation이 ϕ 일때의 beam pattern를 나타낸다. $A(\theta, \phi, n)$ 를 수식으로 표현하면

$$A(\theta, \phi, n) = \begin{bmatrix} [a(\theta_1, \phi_1, N^2), a(\theta_2, \phi_1, N^2), \dots, a(\theta_N, \phi_1, N^2)] \\ \uparrow \\ [a(\theta_1, \phi_1, 2), a(\theta_2, \phi_1, 2), \dots, a(\theta_N, \phi_1, 2)] \\ \uparrow \\ \begin{bmatrix} a(\theta_1, \phi_1, 1), a(\theta_2, \phi_1, 1), \dots, a(\theta_N, \phi_1, 1) \\ a(\theta_1, \phi_2, 1), a(\theta_2, \phi_2, 1), \dots, a(\theta_N, \phi_2, 1) \\ \vdots \\ a(\theta_1, \phi_N, 1), \dots, a(\theta_N, \phi_N, 1) \end{bmatrix} \end{bmatrix} a(\theta_N, \phi_N, N^2) \tag{2}$$

* 이 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. NRF-2016025816) 및, 2016년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비에 의하여 지원을 받아 수행하였음

• First Author : GyeongSang National University, Department of Electronics, kkm2501@naver.com, 학생회원
 ◦ Corresponding Author : GyeongSang National University, ERI, Department of Electronics, jikoh@gnu.ac.kr, 정희원
 * GyeongSang National University, ERI, Department of Industrial and Systems Engineering

논문번호: KICS2016-10-295, Received October 17, 2016; Revised November 6, 2016; Accepted November 29, 2016

로서 $N^2 \times N^2 \times N^2$ 의 3차원 행렬로 표현될 수 있다. 여기서 $a(\theta_i, \phi_j, 1), a(\theta_i, \phi_j, 2), \dots, a(\theta_i, \phi_j, n)$ 는 각 어레이의 필드 패턴을 나타내며 식(3)과 같이 주어진다. [4]

$$a(\theta_i, \phi_j, n) = e^{\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{X^2+Y^2+Z^2})} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X &= R\sin(\theta_i)\cos(\phi_j) - x_n \\ Y &= R\sin(\theta_i)\sin(\phi_j) - y_n \\ Z &= R\cos(\theta_i) - z_n \end{aligned}$$

여기서 x_n, y_n, z_n 은 각각 array의 x 좌표 y 좌표 z 좌표이며 R 은 신호원으로부터 array의 중심까지의 거리이다.

2-D URA는 기존의 1-D ULA와 다르게 3차원의 $A(\theta, \phi, n)$ 가 만들어진다. 여기서 보정하고자 하는 실제 3-D CA(Real array)를 A_r , 보정을 위해 필요한 가상 2-D URA(Virtual array)를 A_v 라 가정한다. 또한 2-D URA의 3차원 행렬을 $A_{3DURA}(\theta, \phi, n)$ 라 하고 $A_{3DCA}(\theta, \phi, n)$ 를 3-D CA의 3차원 행렬이라 가정한다. interpolation technique의 수행을 위해 $A_{3DURA}(\theta, \phi, n)$ 와 $A_{3DCA}(\theta, \phi, n)$ 의 각 n 번째 어레이의 beam pattern을 고려하자. Broadside 쪽의 빔형성은 각 센서의 값을 모두 더하면 되므로 식 (4)와 (5)와 같이 2차원 행렬인 A_r 와 A_v 을 도출하면

$$A_r(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta, \phi, n) \quad (4)$$

$$A_v(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta, \phi, n) \quad (5)$$

의 $N^2 \times N^2$ 의 $A_r(\theta, \phi)$ 과 $A_v(\theta, \phi)$ 를 도출할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_r(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_1, \phi_1, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_2, \phi_1, n), & \dots, & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_{N^2}, \phi_1, n) \\ \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_1, \phi_2, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_2, \phi_2, n), & \dots, & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_{N^2}, \phi_2, n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_1, \phi_{N^2}, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_{N^2}, \phi_{N^2}, n) & \dots & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DCA}(\theta_{N^2}, \phi_{N^2}, n) \end{bmatrix}_{N^2 \times N^2} \quad (6)$$

$$A_v(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_1, \phi_1, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_2, \phi_1, n), & \dots, & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_{N^2}, \phi_1, n) \\ \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_1, \phi_2, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_2, \phi_2, n), & \dots, & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_{N^2}, \phi_2, n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_1, \phi_{N^2}, n), & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_{N^2}, \phi_{N^2}, n) & \dots & \sum_{n=1}^{N^2} A_{3DURA}(\theta_{N^2}, \phi_{N^2}, n) \end{bmatrix}_{N^2 \times N^2} \quad (7)$$

이때 만들어진 $A_r(\theta, \phi)$ 와 $A_v(\theta, \phi)$ 는 $N^2 \times N^2$ 의 2차원 행렬이며 각각 3-D CA와 2-D URA의 beam pattern 이다. 최종적으로

$$TA_r(\theta, \phi) = A_v(\theta, \phi) \quad (8)$$

로 나타낼 수 있는 matrix T 는 최소 자승법으로 최적화된 변환 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$\min_T \| A_v(\theta, \phi) - TA_r(\theta, \phi) \| \quad (9)$$

Moore-Penrose least square 방법을 통해 matrix T 를 도출하면

$$T = A_v(\theta, \phi)A_r(\theta, \phi)^H(A_r(\theta, \phi)A_r(\theta, \phi)^H)^{-1} \quad (10)$$

로서 transformation matrix T 를 도출할 수 있으며 첨자 H 는 conjugate transpose of a complex matrix이다.

III. Numerical Simulation

그림 1은 2-D URA와 3-D CA의 배열 구조이다. 그림 1의 배열 중 원으로 표시된 2-D URA에서의 beam pattern은 식(5)와같이 표현될 수 있으며 그림 2에 나타내었다. 반면 그림1의 배열 중 별모양으로 표시된 3-D CA에서의 beam pattern은 식(4)와같이 표현될 수 있으며 그림3과 같다. 3-D CA의 beam pattern은 main lobe의 크기도 작을 뿐만 아니라 형태도 불규칙적이어서 실제 radar에 사용하기에는 부적합함을 알 수 있다.

또한, 위의 그림 2, 그림 3와 아래의 그림 4, 그림 5에서의 u_x 와 u_y 는 각각

$$\begin{aligned} u_x &= \sin(\theta)\cos(\phi) \\ u_y &= \sin(\theta)\sin(\phi) \end{aligned} \quad (11)$$

이다.

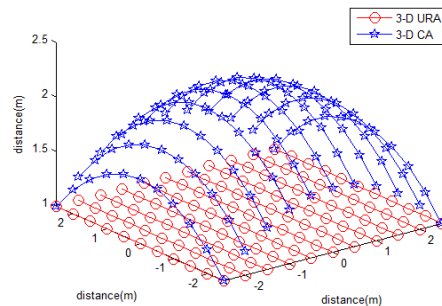


그림 1. 2-D URA와 3-D CA의 기하학적 구조
Fig. 1. Geometry of 2-D URA and 3-D CA

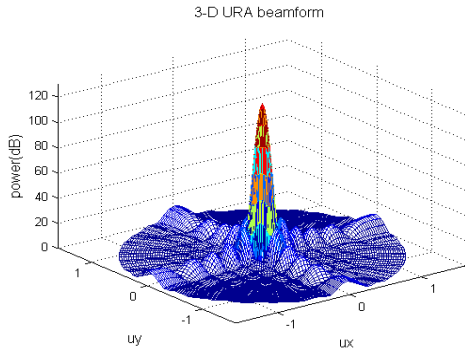


그림 2. 2-D URA의 beamform
Fig. 2. Beamform of 2-D URA

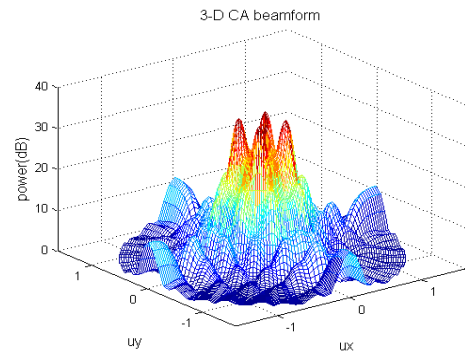


그림 3. 3-D CA의 beamform
Fig. 3. Beamform of 3-D CA

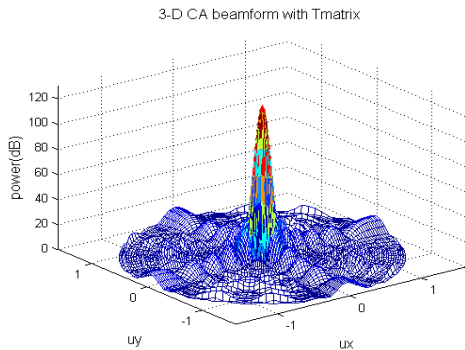


그림 4. T를 적용한 3-D CA의 beamform
Fig. 4. Beamform of 3-D CA with T matrix

최종적으로 도출한 T를 그림 3의 3-D CA의 beam pattern 에 적용시키면 그림 4와 같은 beam pattern을 도출할 수 있다. Main lobe의 크기뿐만 아니라 side lobe 또한 그림 2의 2-D URA의 beam pattern과 흡사하게 출력된다. 그림4의 결과를 error를 통해 도식적으로 나타내기 위하여 등고선으로 표현하면 그림 5와

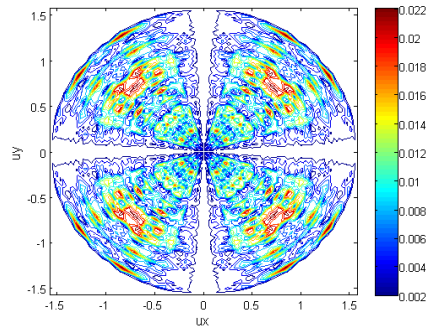


그림 5. 등고선으로 표현한 Error
Fig. 5. Contour of error

같이 main lobe와 side lobe에서의 오차가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그림 5에서의 error는 다음과 같이 정의된다.

$$Error = \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |[A_v(\theta, \phi)]_{i,j} - [T][A_r(\theta, \phi)]_{i,j}|} \quad (12)$$

IV. 결 론

본 논문에서는 3차원 conformal 안테나 어레이로부터 데이터의 보정을 위해 interpolation technique을 사용하였다. 기존의 2차원 array에 적용 되는 interpolation technique을 확장하여 3차원 array에 적용하였으며, 수치해석적 시뮬레이션 결과는 2차원 결과보다 이상적인 경우에 매우 근사해 지는 것을 알 수 있다.

References

- [1] J. Choi, J. Choi, and S. Kim, "The study of DoA estimation in frequency domain in automotive radar system," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 12-22, Jan. 2016.
- [2] J. Lars and P. Persson, *Conformal array antenna theory and design*, vol. 29, Wiley-IEEE Press, Jan. 2006.
- [3] M. Jeong, RADAR's A to Z - LIGNex1 (2013), Retrieved April.25.2015, <http://blog.naver.com/lignex1/120194353480>
- [4] H. L. Van Trees, *Optimum array processing: part IV of detection, estimation, and modulation theory*, New York: John Wiley & Sons, May 2002.

- [5] Y. Wang, W. Zhou, L. Wang, and J. Koh, "DOA estimation and interpolation beamforming with semicircular array," in *Proc. IEIE Summer Conf. 2006*, pp. 121-122, Jeju Island, Korea, Jun. 2006.
- [6] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, P. M. Salazar, and R. J. Bonneau, *Smart antennas*, vol. 170, John Wiley & Sons, 2005.