

통합마스트 적용을 위한 컨포멀 어레이 빔 합성 기법에 관한 연구

A Study on the Conformal Array Beam Synthesis Technique for Integrated Mast Application

김영완[★], 라영은*, 이종학*, 박종국*

Kim Youngwan[★], Ra Young-eun*, Lee Jonghak*, Park Jongkuk*

Abstract

In this paper, a study on beam synthesis technique of conformal array was performed. It is applied to various radar systems that can perform beam steering without deterioration of performance due to beam steering in a general linear arrangement. Unlike the beam synthesis technique in the planar linear array, the conformal array has a radiation element located on a curved surface, so it is necessary to compensate for a difference in length from the radiation element to the wave front surface. In addition, by calculating the offset angle for each radiation element and applying it during actual synthesis, it was possible to predict an accurate beam pattern. In this paper, length compensation and offset angle were calculated and applied to beam pattern synthesis to perform beam pattern comparison, and performance was compared through mathematical analysis.

요약

본 논문에서는 컨포멀 어레이(Conformal Array) 빔 합성 기법에 관한 연구를 수행하였다. 일반적인 선형 배열에서의 빔 조향에 따른 성능 열화 없이 빔 조향을 수행할 수 있는 컨포멀 어레이는 다양한 레이더 시스템에 적용되고 있다. 평면형 선형 배열에서의 빔 합성 기법과 달리 컨포멀 배열은 곡면상에 복사소자가 위치하므로 파면(Wave Front)까지의 위상을 보상해 주어야 한다. 또한 복사소자별 오프셋 각도(Offset Angle)를 계산하여 실제 q빔 합성 시 적용함으로써 정확한 빔 패턴을 예측할 수 있었다. 본 논문에서는 위상 보상 및 오프셋 각도를 계산하여 빔 패턴 합성 시 적용한 후 빔 패턴 비교를 수행하였으며, 수학적 분석을 통해 성능을 비교하였다.

Key words : Integrated Mast, Conformal Array, Offset Angle, Phase Compensation, Side-lobe level

1. 서론

위상배열 레이더에는 전기적 빔 조향 기능을 수행하기 위해 다양한 형태의 위상배열 안테나 구조

를 적용한다. 대부분의 위상배열 구조는 평면형 선형 구조를 적용하여 전기적으로 빔을 조향한다. 이를 위해 선형 배열 구조에서 개별복사소자의 위상을 조절하여 빔을 조향시키면 조향 각도에 따라 빔

* Chief Research Engineer, Radar R&D, LIG Nex1
★ Corresponding author
E-mail : kyoungwan@lignex1.com, Tel : +82-31-288-9605
※ Acknowledgment

Manuscript received May. 27, 2020; revised June 10, 2020; accepted June 10, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성능 열화가 발생하며, 특정 조향각 이상에서는 레이다 시스템에 적용할 수 없을 정도의 열화가 발생할 수 있다[1][2][3]. 이러한 빔 성능 열화 없이 전기적인 빔 조향을 수행하기 위해 임의의 곡면에 개별 복사소자를 배열하는 컨포멀 어레이 구조를 적용한다[4][5]. 컨포멀 어레이 구조의 경우 개별 복사소자간 배열상의 선형성이 유지되지 않아 배열 소자에서 파면까지의 소자 위치별 길이 보상이 필요하다. 또한 복사소자가 컨포멀 어레이 곡면상에 위치하기 때문에 빔 합성 시 개별 복사소자의 옹셋 각도를 계산하고, 계산된 각도의 개별 복사소자 패턴을 이용하여 정확한 컨포멀 어레이의 빔 패턴을 예측할 수 있다.

컨포멀 어레이는 항공기 및 탐색기 등 다양한 레이다 센서 시스템에 적용되어 레이다 단면적(RCS : Radar Cross Section)을 감소시키는 효과를 가지는 장점을 가지고 있으며, 최근에는 스마트 스킨의 개념이 큰 관심을 받으며 연구되고 있는 중이다[6].

본 논문에서는 일반적인 선형 배열 구조의 빔 합성과 컨포멀 어레이 구조의 빔 합성에 관해 수학적 관점에서 분석을 수행하고, 특히 컨포멀 어레이 빔 합성 수행 시 분석상의 문제가 될 수 있는 길이 보상 및 옹셋 각도 보상에 관한 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다.

II. 본론

1. 빔 합성 이론 고찰

일반적으로 위상배열 안테나는 복사소자를 배열하고, 각각의 복사소자에 인가되는 전류의 진폭과 위상을 조절하여 원하는 안테나 복사 패턴을 얻는다.

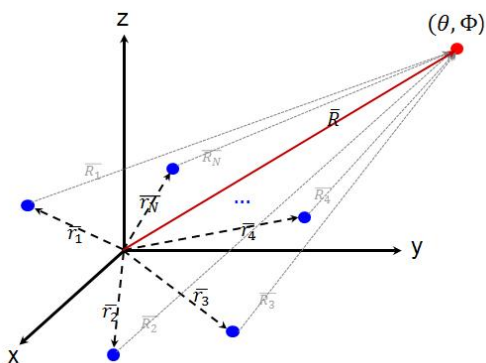


Fig. 1. Planar linear array configuration.
그림 1. 평면 선형 배열 형상

다. 먼저 그림 1과 같이 평면상에 선형으로 배열된 구조를 통해 확인할 수 있다[7][8][9][10].

그림 1에서 원점을 기준으로 xy평면상에 위치한 평면형 선형 배열 구조는 식 (1)처럼 구형좌표계 기준으로 패턴 $f(\theta, \phi)$ 를 구할 수 있다.

$$f(\theta, \phi) = P_e(\theta, \phi) \sum_{n=1}^N W_n \cdot e^{j\bar{k} \cdot \bar{r}_n} \tag{1}$$

W_n : Weight of elements

\bar{k} : vector wave number

$P_e(\theta, \phi)$: element pattern

$$\bar{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z} = k_0 \hat{R} \tag{2}$$

$$\bar{R} = R_x \hat{x} + R_y \hat{y} + R_z \hat{z} = |\bar{R}| \hat{R} \tag{3}$$

여기서 \bar{R} 은 원점에서 원전계상의 관측지점 (θ, ϕ) 까지의 거리 벡터로 식 (3)으로 정의되며, \bar{r}_n 은 원점에서 각각의 개별 소자까지의 거리 벡터이다. 실제 개별 복사소자에서 관측점까지의 거리 벡터 \bar{R}_n 은 \bar{R} 과 \bar{r}_n 의 차를 나타낸다. 식 (1)에서는 관측지점이 원전계의 거리를 가정하여 \bar{R} 항목은 사라지고 \bar{r}_n 에 관한 벡터 형태로 표현된다.

특히 식 (1)은 배열구조에 따라 결정되는 배열 계수(AF : Array Factor)와 개별 복사소자 패턴의 곱으로 전체 패턴이 정의되는 식이 된다. 일반적인 선형 배열 구조에서는 개별 복사소자가 동일하다는 가정으로 그림 2와 같은 동일한 $P_e(\theta, \phi)$ 를 적용한다.

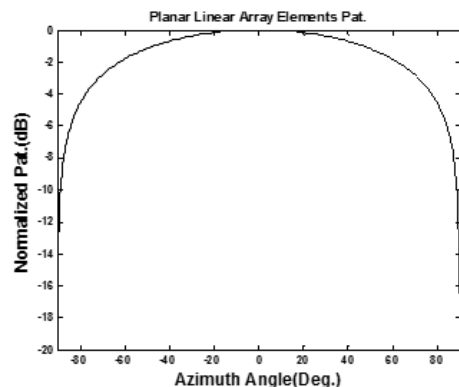


Fig. 2. Each element pattern(linear array).
그림 2. 개별 복사소자 패턴(선형 배열)

이 경우 방사되는 방향의 개별 복사소자와 파면간의 거리가 동일하기 때문에 동일한 개별 복사소자를 가정하여 빔 합성을 수행한다.

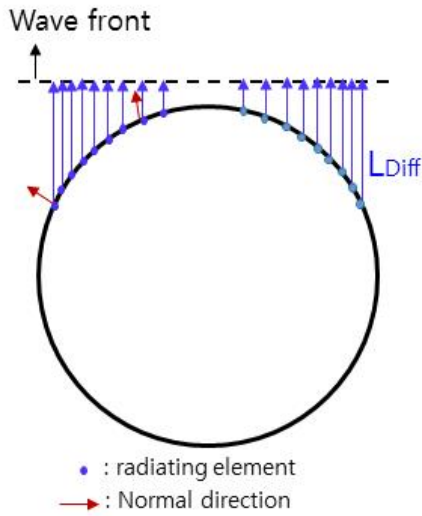


Fig. 3. Conformal array configuration.
그림 3. 컨포멀 어레이 구조 형상

하지만, 컨포멀 어레이 구조에서는 동일한 복사소자를 적용할 수 없다. 우선 그림 3에서 본 것처럼 컨포멀 어레이 곡면상에 위치한 각각의 복사소자는 방사파면을 기준으로 복사소자까지의 길이 차이가 발생하므로 위상 보상을 통해 길이 차이(L_{Diff})를 보상해 주어야 한다.

$$W_{com} = e^{-jkL_{Diff}} \quad (4)$$

식 (4)의 w_{com} 은 식 (1)의 w_n 에 중첩되어 식 (5)과 같이 최종 길이차이를 보상하는 빔 패턴 식이 된다.

$$f(\theta, \Phi) = P_e(\theta, \Phi) \sum_{n=1}^N W_t \cdot e^{jk \cdot \vec{r}_n} \quad (5)$$

$$w_t = w_n \times w_{com}$$

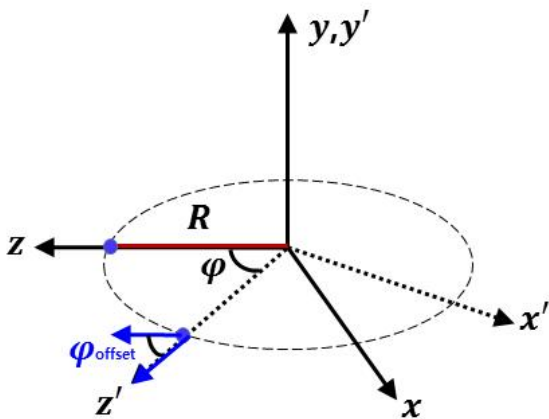


Fig. 4. Coordinate system for calculation offset angle.
그림 4. 옵셋 각도 계산 좌표계

다음으로 곡면상에 있는 각각의 개별복사소자별 옵셋 각도를 계산한다. 옵셋 각도는 실제 곡면 표면상의 수직 방향(Normal direction)과 파면이 이루는 각을 말한다. 그림 4에서 보는 것처럼 각각의 위치에서의 옵셋각도(φ_{offset_n})를 구하기 위해 y 축을 기준으로 xz 평면상에서 회전 변환을 이용한다.

방사되는 파면에 수직인 x 축과 개별복사소자 표면의 수직 방향인 z' 축이 이루는 각으로 실제 빔 합성 시 옵셋 각도 지점에서의 개별 복사소자 크기가 중첩되어야 실제 합성빔을 정확히 분석할 수 있다. 식 (6)은 그림 4의 좌표계의 회전 변환 관계를 나타낸 식이다.

$$\begin{aligned} \hat{z} &= \hat{z} \cos \varphi + \hat{x} \sin \varphi \\ \hat{x} &= -\hat{z} \sin \varphi + \hat{x} \cos \varphi \\ \hat{y} &= \hat{y} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 좌표계간의 회전 관계식인 식 (7)에 대입하면 최종 식 (8)과 같은 식을 얻을 수 있으며 옵셋 각도를 계산하고 빔 패턴 합성에 적용할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)을 통해 유도된 개별복사소자별 옵셋 각도를 적용하여 파면 기준 각각의 개별소자 복사패턴은 그림 5와 같다.

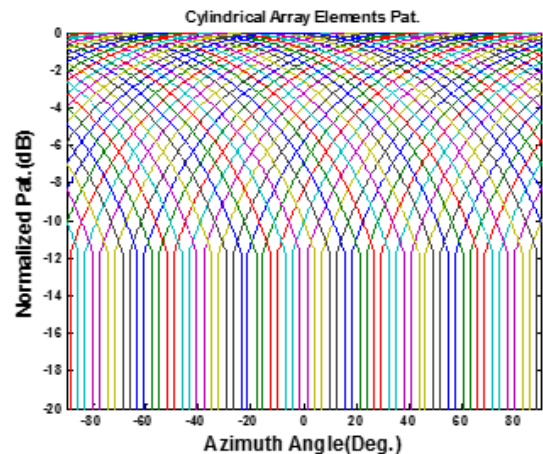


Fig. 5. Each element pattern based on wavefront.
그림 5. 파면 기준 개별 복사 패턴

각각의 개별소자는 옵셋 각도만큼 기울어진 상태에서 빔이 합성되게 된다. 이 기법에 따라 외곽 부분의 패턴 정확도가 향상될 것으로 예측된다.

2. 빔 합성 이론 고찰

본 절에서는 컨포멀 어레이 구조의 빔 합성 시뮬레이션을 수행하였다. 컨포멀 어레이 구조의 반경 및 그레이팅 로브(GL : Grating Lobe)를 고려한 복사소자 개수 및 주파수 정보는 표 1과 같다. 급전 계수는 전체 복사소자에 동일한 분포를 가정하였다.

Table 1. Beam synthesis parameter of conformal array.
표 1. 컨포멀 어레이 빔 합성 파라미터

| Parameters | Value | Unit |
|--------------------|---------|------|
| Radius | 1500 | mm |
| Number of elements | 65 | |
| Frequency [GHz] | 1.03 | GHz |
| Feeding weight | uniform | |

2절에서 계산된 길이 보상값은 그림 6과 같았으며, 배열 중심을 기준으로 대칭인 보상값을 추출하였다. 길이 보상이 없는 상태에서의 빔 패턴은 그림 7을 통해 확인할 수 있다.

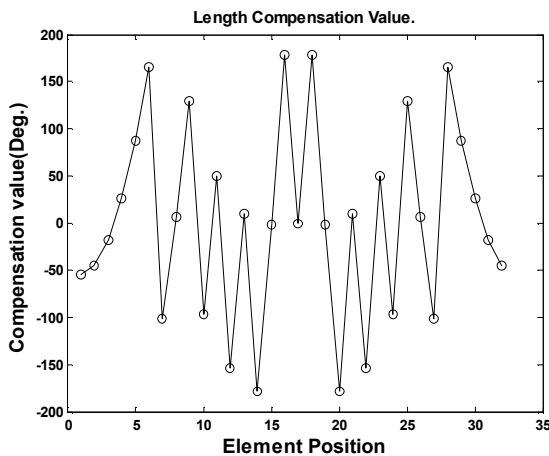


Fig. 6. Phase compensation value.
그림 6. 개별 소자별 위상 보상값

그림 7을 통해 파면과 복사소자간의 각기 다른 위상 상태, 즉 길이 보상이 수행되지 않으면 원하는 빔이 합성되지 않음을 확인할 수 있다.

다음으로 옵셋 각도 적용 유무에 따른 패턴 영향성을 분석하였다. 마찬가지로 2절에서 유도한 옵셋 각도 식 (8)에 따라 $P_e(\theta, \phi)$ 의 옵셋 각도에서의 크

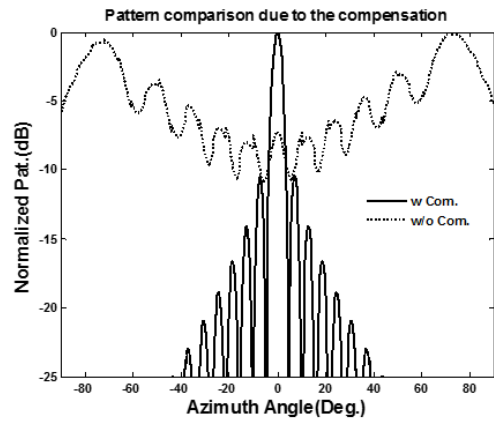


Fig. 7. Pattern comparison due to length compensation.
그림 7. 길이 보상에 따른 패턴 비교

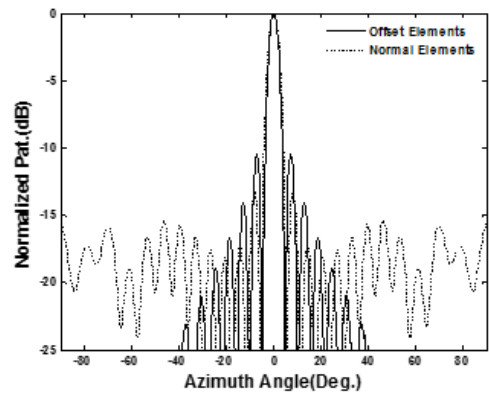


Fig. 8. Pattern comparison due to offset angle.
그림 8. 옵셋 각도 보상에 따른 패턴 비교

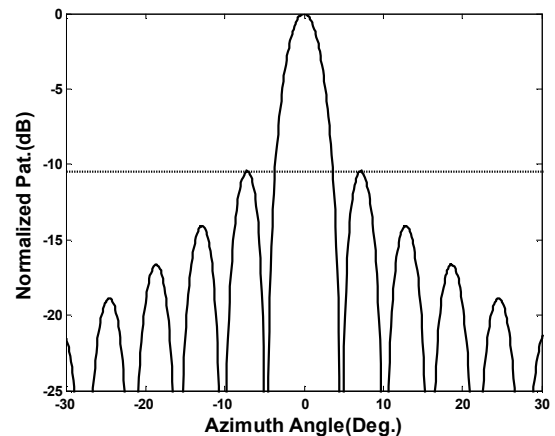


Fig. 9. Result of final beam pattern.
그림 9. 최종 빔 패턴 결과

기 데이터를 개별 복사소자 입력 데이터로 빔 합성을 수행하였다.

그림 8의 시뮬레이션 결과를 통해 곡면부의 복사소자에 의해 20° 이상의 각도에서 패턴의 부엽 레벨이 상승함을 볼 수 있었다. 이는 외곽으로 갈수

록 큰 옵셋 각도에 의한 영향으로 판단된다.

그림 9는 최종적으로 합성된 패턴에서 -11dB의 부엽 수준을 확인한 그래프이다. 컨포멀 어레이의 경우 파면 기준으로 외곽쪽으로 소자간의 간격이 좁아지는 비선형 배열 구조이기 때문에 급전 계수의 최적화를 통해 부엽레벨 조정이 필요할 것으로 판단된다.

III. 결론

본 논문에서는 빔 성능 열화 없이 전기적으로 빔을 조향할 수 있으며, 레이더 시스템에서 레이더 단면적을 감소시켜 줄 수 있는 컨포멀 어레이 빔 합성에 대하여 고찰하였다.

일반적인 평면형 선형 배열과 달리 곡면 구조에 복사소자가 위치하여 파면에서의 길이차 및 개별 복사소자에서의 옵셋 각도별 보상값을 적용하여 정확한 빔 패턴을 예측할 수 있었다.

각각의 영향성 분석을 위해 수학적 분석을 수행하고 매트랩 시뮬레이션을 통해 분석된 결과의 유효성을 확인할 수 있었다.

특히 스킨 안테나 형태의 곡면 배열 안테나 시스템에 적용할 수 있는 컨포멀 어레이에 대한 빔 성능 분석을 수행하여 정확한 빔 패턴 성능을 예측할 수 있었으며, 다양한 시스템에서의 정확한 성능 분석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Skolnik, M. I., *Introduction to Radar System*, McGraw-Hill, NY, USA, 2001.
- [2] Balanis, C. A., *Antenna Theory : Analysis and Design, 3rd Edition*, Wiley, 2005.
- [3] Hyung-Gi Lee, Yong-Uk Park, Hak-Keun Choi, "Design of X-Band Phased Array Antenna Systems for Satellite Communication," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol.5, no.1, pp.53-61, 2005.
- [4] Leopoldo Infante, Stefano Mosca, Giulio Pellegrini, "A Beam Synthesis Procedure for Matrix-Fed Cylindrical Antenna Arrays," *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and*

Technology, pp.1-8, 2016.

DOI: 10.1109/ARRAY.2016.7832543

[5] Massimo Angelilli, Leopoldo Infante, Paolo Pacifici, "A Family of Secondary Surveillance Radars based on Conformal Antenna Array Geometries," *IEEE Radar Conference*, pp.1681-1684, 2017.

[6] Vijay K. Varadan, Vasundara V. Varadan, "Smart-skin antenna technology," *Smart Structures and Materials 1993: Smart Materials*, Vol.1916, 1993. DOI: 10.1117/12.148473

[7] Young-wan Kim, Jun-Beom Kwon, Yeonduk Kang, Jong-Kuk Park, "Array Configuration Analysis of Ka-Band Phase Array Antenna," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol.19, no.3, pp.141-147, 2019.

[8] Doo-Yeong Yang, Minsoo Lee, "Analysis of DOA Estimation and Adaptive Beam-forming of MIMO between Linear-circular Array Antennas," *The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.12, no.6, pp.2777-2784, 2011. DOI: 10.5762/KAIS.2011.12.6.2777

[9] W. Y. Song, M. H. Lee, J. H. Joo, "Multi-beam Pattern using Beam Steering Algorithms to Adaptive Array Antenna," *The Journal of KIIT*, vol.6, no.4, pp.60-65, 2008. DOI: 10.1186/s13638-019-1622-y

[10] Kwan-hyeong Lee, "A Study on the Performance CDMA System Using Adaptive Array Antenna Beamforming Technique," *The Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology*, vol.5, no.2, pp.68-73, 2012. DOI: 10.17661/jkiiect.2012.5.2.068

BIOGRAPHY

Youngwan Kim (Member)



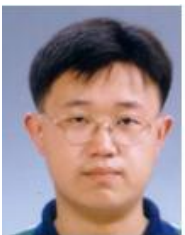
2005 : BS degree in Electrical Engineering, Kwangwoon University.
2007 : MS degree in Electrical Engineering, Kwangwoon University.
2007~ : Chief Research Engineer, LIG Nex1

Youngeun Ra (Member)

2007 : BS degree in Mechanical Engineering, Hanyang University.
2019 : MS degree in Mechanical Engineering, Yonsei University.
2007~ : Research Engineer, LIG Nex1

Jonghak Lee (Member)

2000 : BS degree in Electrical Engineering, Ajou University.
2009 : MS degree in Mechanical Engineering, Yonsei University.
2000~ : Research Engineer, LIG Nex1

Jongkuk Park (Member)

1995 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1997 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2001 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2001~ : Chief Research Engineer, LIG Nex1