

빔 조향을 통한 대형 디지털 배열 패턴 검증

Ultra-Large Digital Array Pattern Verification Using Beam Steering

최 원 민¹ · 김 두 수^{2*} · 황 금 철³

Won Min Choi¹ · Doo Soo Kim^{2*} · Keum Chol Hwang³

요 약

우주 감시 레이더는 고이득 특성과 효율적인 운용을 위해 초대형 디지털 배열 안테나를 사용한다. 해당 시스템은 주기적인 보정이 필수적이며 보정의 정확성은 방사 패턴을 측정하여 검증할 수 있다. 하지만 현장에서 기존 측정 방식을 적용해 초대형 레이더의 패턴을 검증하기에는 현실적인 제약이 발생한다. 따라서 본 논문은 보정에 사용한 프로브 및 빔 조향을 통해 방사 패턴을 검증하는 새로운 방법을 제안한다. 제안 방식을 검증하기 위해 타일로 구성된 배열 축소 모델 구성하고 시뮬레이션을 통해 방사 패턴을 확인하였다. 이후 동일한 환경에서 근접 전계를 활용해 형성한 방사 패턴을 확보한 뒤 제안 방식에 대한 방사 패턴과 비교 분석하였다. 두 방사 패턴은 유사한 결과를 확인할 수 있으며 제안 방식을 초대형 디지털 배열 안테나의 현장 패턴 검증에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

Space surveillance radars use ultra-large digital array antennas for high gain and efficient operation. These systems require periodic calibration, and the accuracy of the calibration can be verified by measuring radiation patterns. However, there are practical limitations to verifying patterns in the field using existing measurement methods. Therefore, this study proposes a novel method for verifying radiation patterns using a calibration probe and beam steering. A tiled-array model was constructed to verify the proposed method, and the radiation patterns were verified through simulations. Subsequently, radiation patterns formed using near-field electric fields in the same environment were obtained and compared with those generated using the proposed method. The two radiation patterns yielded similar results, suggesting that the proposed method can be useful for field pattern verification of ultra-large digital array antennas.

Key words: Space Surveillance Radars, Ultra-Large Digital Array Antennas, On-Site Pattern Verification

I. 서 론

위성 및 미확인 잔해를 특정하기 위한 우주 감시 시스템에 대한 필요성이 높아지고 있다^{[1],[2]}. 특히 해당 시스템

은 주기적인 보정이 이루어지지만 그 이후 현장에서 바로 성능을 검증하기 위한 방사 패턴을 확보하는 방법은 제한적이다. 패턴 측정을 위한 인프라를 현장에 적용하기에는 현실적인 제약이 발생하기 때문이다^[3]. 본 논문에서

「이 연구는 2024년 정부(방위산업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UI247004TD).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*국방과학연구소(Agency of Defense Department)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0009-0005-8316-5189>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-1570-1291>), 3: 정교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received December 31, 2025 ; Revised January 13, 2026 ; Accepted February 5, 2026. (ID No. 20251231-162)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: khwang@skku.edu)

는 관련한 추가적인 측정 인프라를 구성하는 대신 안테나 인근에 설치한 고정된 보정 타워에서 타일의 빔 조향 데이터를 확보하여 안테나 방사특성을 검증하는 방법을 제안한다. 제안 방식은 우주 감시 레이더와 유사한 축소 환경을 재구성하여 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 해당 방식으로 확보한 방사 패턴은 근접 전계 확보를 통해 확보한 방사 패턴과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

II. 빔 조향을 활용한 패턴 확보

배열 안테나에 대한 far-field 영역에서의 방사 패턴 구성 식을 식 (1)에 나타내었다. u, v 는 관측점의 방향 코사인이며 x_n, y_n 은 각 소자의 위치이고 u_b, v_b 는 조향 가중치에 대응되는 방향 코사인이다. $g_i(u, v)$ 는 개별 소자의 능동소자패턴이며 β 는 시스템에서 사용하는 파수다.

$$P = \sum_i g_i(u, v) \times e^{-j\beta(x_i u_p + y_i v_p)} \times e^{j\beta(u_b + v_b)} \quad (1)$$

구성 식을 개별 소자 i 에 대해 합산하면 전체 배열 패턴 P 를 도출할 수 있다. 식과 같이 far-field 영역에서 조향하기 때문에 조향 가중치 u_b, v_b 와 관측 위치에 대한 u, v 를 선형적으로 다룰 수 있다. 따라서 관측점 u, v 가 프로브의 위치에 고정되어 있지만 u_b, v_b 에 적절한 변화를 주면 수식적으로 관측점을 이동시킨 결과와 동일한 방사 패턴을 확보할 수 있다. 해당 방식을 우선 단일 타일 상황에 대해 확인하고 검증하였다.

그림 1은 단일 타일에 대한 전체 조감도 및 타일 구성이다. 해당 시스템은 S 대역을 활용하며 프로브는 방위각 기준 -20° 및 4 m에 위치한다. $\frac{2D^2}{\lambda}$ 을 기반으로 했을 때

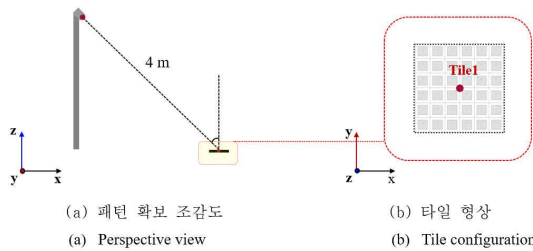


그림 1. 타일 하나에 대한 패턴 확보 상황
Fig. 1. Setup for pattern acquisition of an unit tile.

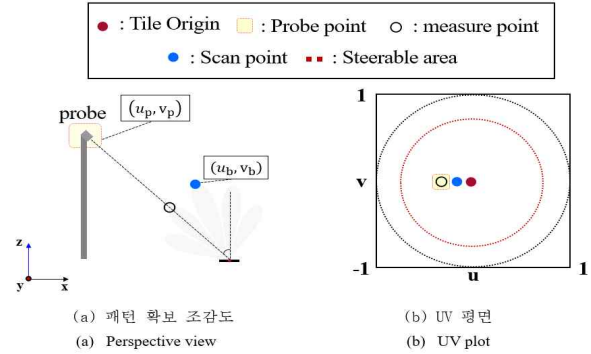


그림 2. 빔 조향을 활용한 방사특성 응답 확보 기본
Fig. 2. Basics of obtaining radiation characteristic response using beam steering.

프로브는 타일에 대해 far-field 영역에 위치한다. 타일 하나는 0.5λ 간격의 직각 격자인 6×6 의 패치 안테나로 구성하였다.

그림 2는 빔 조향으로 타일의 방사 패턴을 확보하는 기본적인 방법을 도시한 그림으로 임의의 조향 지점 (u_b, v_b) 에 대해 프로브 위치인 (u_p, v_p) 에서 응답 특성을 확보하는 모습이다. 이때 타일은 $\pm 60^\circ$ 영역에 대해 광각 빔 조향이 가능하다.

고정된 프로브에서 확보한 조향 시 응답 특성은 식 (2)와 같다. 방사 패턴 응답 특성 S_{21} 은 개별 소자에 대한 응답 특성 s_{21}^i 의 합을 통해 형성한다. 이때 s_{21}^i 은 전체 소자 개수 I 로 정규화한다. s_{21}^i 는 식 (3)처럼 구분하여 볼 수 있다. $g_i(u_{p_i}, v_{p_i})$ 는 개별 소자에 대한 방사 패턴 영향이고 $g_p(u_{p_i}, v_{p_i})$ 는 프로브의 방사 패턴 영향이다. 그리고 $\frac{\lambda \exp(-jkr_{p_i})}{4\pi r_{p_i}}$ 는 거리에 따른 영향성이다. 여기에 조향 가중치 $e^{j\beta(u_b + v_b)}$ 가 곱해진다. 이때 아래 첨자 p_i 는 프로브부터 i 번 개별 소자에 대한 방향이다. λ 및 r_{p_i} 는 각각 시스템에서 사용하는 파장 및 소자 중심으로부터 프로브까지의 거리 벡터를 의미한다.

$$S_{21}(u_b, v_b) = \frac{1}{\sqrt{I}} \sum_i s_{21}^i(u_{p_i}, v_{p_i}; u_b, v_b) \quad (2)$$

$$s_{21}^i = g_i(u_{p_i}, v_{p_i}) g_p(u_{p_i}, v_{p_i}) \frac{\lambda \exp(-j\beta r_{p_i})}{4\pi r_{p_i}} \times e^{j\beta(u_b + v_b)} \quad (3)$$

결과적으로 빔 조향 시 거리에 대한 영향 및 프로브의

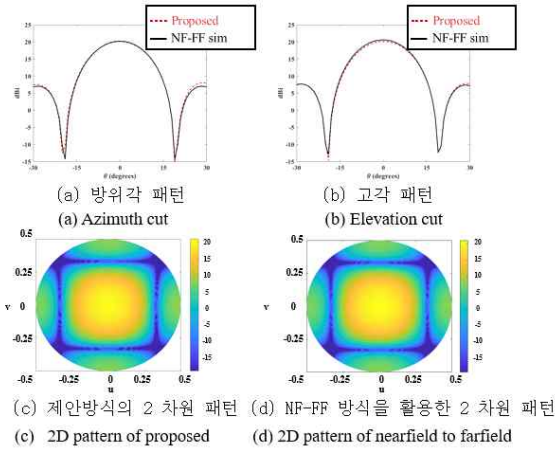


그림 3. 빔 조향 및 근접 전계 방식을 통해 확보한 방사 패턴 결과 비교

Fig. 3. Comparison of radiation pattern results obtained using beam steering and a near-field method.

방사 패턴 특성을 보상하면 조향 상황에 따른 실제 소자의 방사 패턴 특성만으로 S_{21} 을 구성할 수 있다. 즉 해당 응답 특성으로 식 (1)을 재구성할 수 있다. 이때 $g_i(u_{pi}, v_{pi})$ 의 경우 식 (1)의 $g_i(u, v)$ 에 대응되는 값이지만 프로브가 고정되어 있으므로 u, v 변화에 따른 정확한 값을 가져올 수는 없다. 하지만 광각 빔 조향이 가능한 해당 시스템은 u, v 에 따른 $g_i(u, v)$ 값이 유사하므로 $g_i(u_{pi}, v_{pi})$ 만 사용하더라도 충분히 좋은 근사치로 활용할 수 있다⁴⁾.

그림 3은 시뮬레이션에서의 빔 조향 및 근접 전계를 확보하여 형성한 방사 패턴을 비교한 그림이다. 제안 방식은 $\pm 30^\circ$ 영역으로 빔 조향하여 패턴을 확보하였으며 근접 전계를 통해 확보한 패턴도 이에 대응되는 $\pm 30^\circ$ 영역에 대한 방사 패턴을 나타내었다. 비교 결과 boresight 기준 최대 0.45 dB 오차 및 sidelobe 기준 최대 0.76 dB 오차가 발생한다. RMS 오차는 0.92이며 0.9975의 상관관계수 값으로 높은 유사도를 확인할 수 있다.

III. 전체 패턴 확보

보정 타워는 검정할 전체 안테나를 기준으로 near-field 영역에 위치해야 한다⁵⁾. 해당 설정에 맞게 타일 7개로 확장한 배열 안테나에 대한 패턴 확보 및 검정을 진행하였다. 그림 4에서 패턴 검정을 진행하는 배열 안테나 및 보

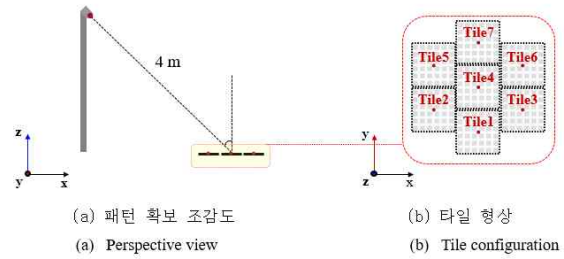


그림 4. 확장 배열에 대한 패턴 확보 상황

Fig. 4. Setup for pattern acquisition of the expanded array.

정 타워를 확인할 수 있다. 단일 타일 상황과 동일하게 프로브는 안테나 중심을 기준으로 4 m 떨어져 있으며 방위각 -20° 방향에 위치한다.

이때 식 (1)을 활용하기 위해서 far-field 영역을 만족하는 개별 타일 단위로 패턴 데이터를 확보하였다. 앞선 단일 타일 상황과 동일하게 제안 방식은 측정 프로브가 위치한 방위각 -20° 를 기준으로 $\pm 30^\circ$ 영역에서 빔 조향하여 패턴을 확보하였으며 근접 전계를 통해 확보한 패턴을 대응되는 영역에 대해 비교하였다. 표 1을 통해 각 타일의 패턴 특성 및 비교 결과를 확인할 수 있다. Boresight 기준 최대 0.6 dB 이하의 오차 및 sidelobe 기준 최대 1 dB 내외의 오차를 가진다. 그리고 2 내외의 RMS 오차와 0.98 이상의 상관관계수 값을 확인할 수 있다.

확보한 개별 타일 패턴을 합성하면 전체 배열 패턴을 확보할 수 있다. 식 (4)는 관련 수식을 나타낸다.

$$FP = \sum_{m=1}^{N_t} w_m \times TP_m(u, v) \tag{4}$$

표 1. 타일별 패턴에서의 주요 지표
Table 1. Major index in patterns by tile.

	Boresight error (dB)	Sidelobe error (dB)	RMS error	Correlation coefficient
Tile 1	0.10	1.02	1.94	0.9879
Tile 2	0.43	0.22	2.17	0.9853
Tile 3	0.59	0.88	2.09	0.9870
Tile 4	0.44	0.05	2.39	0.9828
Tile 5	0.43	0.23	2.27	0.9840
Tile 6	0.59	0.89	2.10	0.9868
Tile 7	0.46	0.68	1.90	0.9881

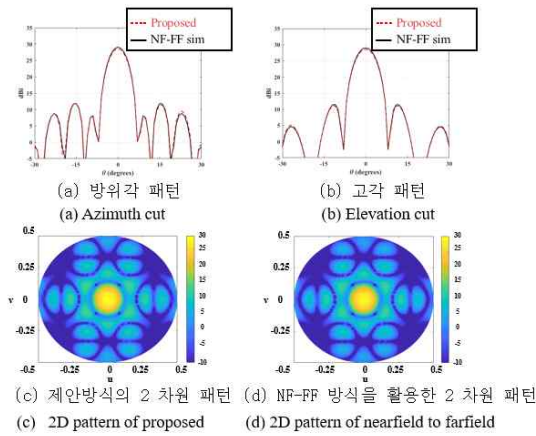


그림 5. 빔 조향 및 근접 전개 방식을 통해 확보한 전체 방사 패턴 결과 비교

Fig. 5. Comparison of the overall radiation-pattern results obtained using beam steering and a near-field method.

$TP_m(u, v)$ 는 빔 조향을 활용하여 확보한 각 타일의 방사 패턴으로 앞서 빔 조향에서 확보한 $\pm 30^\circ$ 영역에 대한 패턴이다. 전체 안테나 패턴 FP 는 TP_m 를 타일별 가중치 w_m 를 고려하여 타일 전체 개수인 N_t 에 대해 합성하면 재구성할 수 있다. 그림 5에서 w_m 가 1일 때 전체 타일에 대한 제안 방식 및 근접 전개 방식 대한 방사 패턴을 비교하였다. 결과적으로 제안 방식은 근접 전개 방식과 비교했을 때 Boresight에서 최대 0.4 dB 오차 및 Sidelobe에서 최대 0.8 dB 이내의 오차로 패턴을 구성할 수 있었다. RMS 오차는 0.92이며 0.9853의 상관계수로 패턴 경향성 또한 일치하는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구는 빔조향을 활용하여 초대형 디지털 배열을 검증할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 측정 안테나에 대해 관측 프로브가 far-field 영역에 위치할 경우 적절한 빔 조향을 데이터를 확보할 경우 실제 프로브가 측정한 데이터와 대응되는 패턴 데이터를 확보할 수 있다. 단일 타일에 대해서 해당 결과를 확인하였으며 결과적으로 제안 방식으로 확보한 방사 패턴은 근접 전개 확보를 통해 확보한 방사 패턴과 비교했을 때 0.9975의 상관계수로 매우 유사한 경향성을 확인하였다. 다만 실질적인 초대형

배열 안테나의 경우 보정 타위는 배열 안테나 기준 near-field 영역에 위치하기 때문에 직접적인 조향 데이터를 사용할 수 없다. 대신 배열 안테나를 구성하는 타일을 기준으로 보면 보정 타위는 far-field에 위치한다. 따라서 본 논문에서는 개별 타일에 대해 빔 조향 및 방사 패턴 데이터를 확보한 뒤 각 타일에 대한 패턴을 합성하는 방법을 제안한다. 해당 상황을 타일 7개로 구성된 환경에서 시뮬레이션하였고 제안 방식과 근접 전계를 통해 확보한 배열 패턴을 비교했을 때 0.9853의 상관계수로 높은 유사도를 확인하였다. 제안 방법을 활용한다면 초대형 배열 운용 현장에서 추가적인 인프라 없이 효율적으로 타일 및 안테나 전체 패턴을 검증할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] J. A. Haimeri, B. Hudson, G. P. Fonder, and D. K. Lee, "Overview of the large digital arrays of the space fence radar," in *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology(PAST)*, Waltham, MA, Oct. 2016.
- [2] R. C. Gómez, J. M. V. Salmerón, P. Besso, M. Alessandrini, G. M. Pinna, and M. A. R. Prada, "Initial operations of the breakthrough Spanish Space Surveillance and Tracking Radar(S3TSR) in the European context," in *Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference*, Darmstadt, Jan. 2019.
- [3] J. J. Schuss, T. V. Sikina, J. E. Hilliard, P. J. Makridakis, J. Upton, and J. C. Yeh et al., "Large-scale phased array calibration," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 9, pp. 5919-5933, Sep. 2019.
- [4] B. K. Ahn, I. J. Hwang, K. S. Kim, S. C. Chae, J. W. Yu, and H. L. Lee, "Wide-angle scanning phased array antenna using high gain pattern reconfigurable antenna elements," *Scientific Reports*, vol. 9, p. 18391, Dec. 2019.
- [5] G. He, X. Gao, and R. Zhang, "Impact analysis and calibration methods of excitation errors for phased array antennas," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59010-59026, Apr. 2021.