

대형 디지털 배열의 현장 보정을 위한 두 개의 프로브를 활용한 위치 추정기법 분석

Analysis of Two-Probe Position Estimation Technique for On-Site Calibration of Large Digital Arrays

최 원 민¹ · 김 두 수^{2*} · 황 금 철³

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

요 약

우주 감시 레이더에 사용되는 대형 능동 위상 배열을 안정적으로 운용하기 위해서 주기적인 현장 보정이 필수적이다. 그리고 보정에 활용하는 프로브의 위치 정확성은 보정 성능에 직결되므로 해당 위치를 정확하게 추정하는 과정이 필요하다. 이때 2개의 프로브를 활용하면 별도의 외부 정렬 장치 없이 프로브의 위치를 추정할 수 있다. 본 논문은 해당 방식의 유효성을 확인하기 위해 이론 모델을 분석하고 대칭 상황 시뮬레이션에 대한 위치 추정 결과를 정리했다. 수식 모델을 분석한 결과, 프로브가 측정 배열에 가깝게 위치하고 두 프로브 사이각이 클수록 추정 성능이 향상되며 안정적인 추정을 위해서는 상관 잡음 억제가 필요하다는 사실을 확인하였다. 결과적으로 시뮬레이션을 통해 측정 배열 길이와 유사한 프로브 이격 거리를 유지하고 상관 잡음이 적을 경우 0.02λ 오차 수준의 위치 추정 결과를 확인할 수 있었다.

Abstract

To ensure stable operation of the large active phased-array used in space surveillance radars, periodic *in situ* calibration is required. Because the positional accuracy of the probes employed for calibration directly affects calibration performance, an accurate probe localization procedure is necessary. When the two probes are used, their positions can be estimated without auxiliary external alignment equipment. To examine the validity of this approach, we analyze a theoretical model and summarize the localization results obtained from simulations under symmetric configurations. The analytical results indicate that the estimation performance improves as the probes are placed closer to the measurement array, and as the inter-probe angular separation increases, suppression of correlated noise is required for stable estimation. The simulation results further demonstrate that when the probe spacing is maintained at a level comparable to the aperture length of the measurement array and the correlated noise is low, the probe positions can be estimated with an error on the order of 0.02λ .

Key words: Space Surveillance Radars, Ultra-Large Digital Array Antennas, On-Site Calibration, Probe Position Estimation

「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 14, 2026 ; Accepted February 3, 2026. (ID No. 20251231-163)

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

I. 서 론

우주 감시 레이더 시스템은 높은 EIRP와 광각 빔조향 성능을 위해 대형 능동 위상 배열안테나를 사용하며 해당 시스템은 운용 상황에 대한 주기적인 현장 보정이 필요하다^{[1][2]}. 그리고 일반적인 보정 과정에는 보정에 사용할 프로브의 정확한 위치 정보가 필요하다^[3]. 특히 현장에서 프로브 위치를 추정하는 방법 중 보정할 배열 안테나와 외부 프로브 2개의 위상 차이를 형성하면 배열 소자의 채널 내부 회로에서 발생하는 오차를 제외할 수 있으므로 배열과 프로브 사이의 커플링 위상만으로 프로브 위치 추정을 진행할 수 있다^[4]. 해당 방식은 별도의 외부 정렬 장치가 필요하지 않기 때문에 비용과 인프라 측면에서 효율적이다. 다만 기존의 문헌은 적용 조건 및 성능에 대한 설명이 제한적이다. 따라서 본 논문에서는 해당 위치 추정 방식의 유효성을 확인하기 위해 적용 조건 및 성능을 이론적인 수식과 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

II. 위치 추정에 대한 이론적 모델 정리

2개의 프로브를 사용하여 프로브 위치를 추정하는 방식의 과정을 정리한다. n 번째 소자와 첫 번째 프로브 간 변위 벡터를 $r_{n,1}$ 라고 하자. 이때 첫 번째 프로브에 대한 n 번째 소자에서 위상 $\Gamma_{n,1}$ 을 거리 $r_{n,1}$ 에 따른 영향과 n 번째 채널 내부 회로에 의한 영향 $S_{21,n}$ 로 나누어 식 (1) 처럼 정리할 수 있다^[4]. 수식의 f 는 시스템 사용 주파수이며 k 는 사용 파수이다. 이후 채널 내부 회로에 의한 영향을 없애기 위해 두 번째 프로브에 대해 얻은 위상 $\Gamma_{n,2}$ 을 이용하면 n 번째 소자에서 형성되는 프로브 1번과 2번에 대한 위상 차이값 p_n 을 식 (2) 처럼 수식화가 가능하다.

$$\Gamma_{n,1}(r_{n,1}, f) \approx \angle S_{21,n}(f) - \angle \exp(jk \| r_{n,1} \|) \quad (1)$$

$$p_n = \Gamma_{n,2} - \Gamma_{n,1} = \angle \exp(jk(\| r_{n,1} \| - \| r_{n,2} \|)) \quad (2)$$

프로브의 위치에 따라 $r_{n,1}, r_{n,2}$ 값이 변하면 p_n 값이 영향을 받는다. 추정 과정은 프로브의 위치를 변화시키며 p_n 값의 변화를 확인하는 과정이므로 $r_{n,1}$ 및 $r_{n,2}$ 에 대한 p_n 의 값의 변화율, 즉 자코비안 값을 분석하여 해당 모델의 추정 성능을 평가할 수 있다. 자코비안을 구성하기 위해서

식 (2)의 지수 함수 내부의 거리에 대해 그라디언트를 각각 취하면 식 (3) 및 식 (4)의 식을 확보할 수 있으며 결과적으로 식 (5) 처럼 자코비안 행렬 식 J 를 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial p_n}{\partial r_{n,1}} = \angle \exp(jk(\frac{r_{n,1}}{\| r_{n,1} \|})) \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial r_{n,2}} = \angle \exp(jk(-\frac{r_{n,2}}{\| r_{n,2} \|})) \quad (4)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial r_{n,1}} & \frac{\partial p_1}{\partial r_{n,2}} \\ \frac{\partial p_2}{\partial r_{n,1}} & \frac{\partial p_2}{\partial r_{n,2}} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial p_n}{\partial r_{n,1}} & \frac{\partial p_n}{\partial r_{n,2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial x_1} & \frac{\partial p_1}{\partial y_1} & \frac{\partial p_1}{\partial z_1} & \frac{\partial p_1}{\partial x_2} & \frac{\partial p_1}{\partial y_2} & \frac{\partial p_1}{\partial z_2} \\ \frac{\partial p_2}{\partial x_1} & \frac{\partial p_2}{\partial y_1} & \frac{\partial p_2}{\partial z_1} & \frac{\partial p_2}{\partial x_2} & \frac{\partial p_2}{\partial y_2} & \frac{\partial p_2}{\partial z_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial p_n}{\partial x_1} & \frac{\partial p_n}{\partial y_1} & \frac{\partial p_n}{\partial z_1} & \frac{\partial p_n}{\partial x_2} & \frac{\partial p_n}{\partial y_2} & \frac{\partial p_n}{\partial z_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

x_1, y_1, z_1 은 첫 번째 프로브의 좌표 성분, x_2, y_2, z_2 는 두 번째 프로브의 좌표 성분으로 J 는 $N \times 6$ 의 크기를 갖는다. 여기서 N 은 배열 안테나의 전체 소자 수를 의미한다.

해당 자코비안 행렬의 특성을 분석하기 위해서 특이값 분해를 진행하였고 그 과정을 식 (6)에 나타내었다.

$$svd(J) = USV^T \quad (6)$$

이때 U 는 $N \times N$ 크기의 위상 차이 값에 대한 벡터 공간을 형성하며 V 는 6×6 크기의 프로브 위치 파라미터에 대한 벡터 공간을 의미한다. S 는 두 벡터 공간의 특이값에 대한 대각 행렬이고 $\text{rank } 6$ 을 가진다. 일반적으로 특이값 행렬의 각 요소에 대한 $1/s_i$ 의 값이 작고 균일할수록 추정 성능이 높다. 따라서 특이값 행렬의 조건수 σ 와 $1/s_i$ 의 합산값 A 를 해당 모델을 평가하기 위한 두 가지 지표로써 활용하였다. 해당 평가지표의 값이 작을수록 위치 추정에 대한 정확도가 높다. 각 지표에 대한 표현은 아래 식 (7) 및 식 (8)을 통해 확인할 수 있다.

$$\sigma = \frac{\max(s_i)}{\min(s_i)} \quad (7)$$

$$A = \sum_1^6 \frac{1}{s_i} \quad (8)$$

이후 해당 지표를 활용하여 추정 성능을 평가하였다. 0.5λ 간격의 패치 안테나를 12×12 직각 격자로 구성하여 축별로 6λ 의 길이를 가지는 시험 대상 안테나(AUT)를 구성하였다. 배열 안테나로 개별 성능평가를 명료하게 진

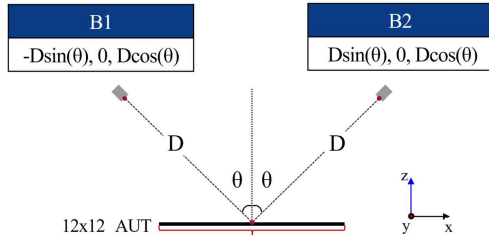
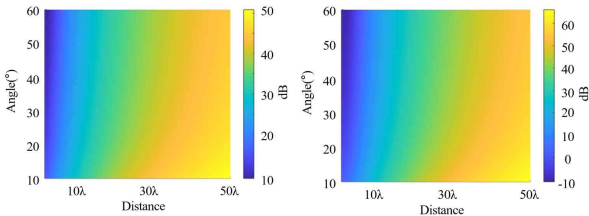


그림 1. 추정 성능 분석을 위한 대칭 상황
Fig. 1. Symmetric setup for probe position estimation.



(a) 조건수(σ) 변화 결과 (b) 지표 A 변화 결과
(a) Results of condition number (b) Results of A

그림 2. D 와 θ 에 따른 지표 변화
Fig. 2. Performance versus probe distance and angle.

행하기 위해 그림 1과 같이 두 개의 프로브가 배열의 중심에 대칭인 경우를 확인했다. 이때 사용한 프로브는 구면파에 가까운 위상 패턴을 형성한다.

배열의 중심부터 프로브까지의 거리 D 를 1λ 부터 50λ 까지 변화시키고 프로브와 z 축 사이 각 θ 를 10° 부터 60° 까지 변화시켰을 때 추정 성능의 평가지표 σ 와 A 의 경향성을 그림 2에 나타내었다. 지표 값에 대한 스케일은 dB 값으로 나타내었다. 해당 결과를 통해 두 프로브가 측정 배열 안테나에 가깝게 위치하고 두 프로브가 이루는 사이 각이 클수록 이론적 모델이 안정적으로 동작한다고 볼 수 있다.

III. 시뮬레이션을 활용한 검증 및 오차 분석

해당 위치 추정 방식을 사용하더라도 일정 수준의 위치 오차가 발생한다^[4]. 실질적인 오차 원인을 분석하기 위해서 앞서 그림 1과 동일한 상황을 설정하고 프로브 거리가 5, 10, 15 λ 일 때 각각 프로브 사이 각도가 10° , 20° , 30° , 40° 인 경우에 대해 결과를 확인하였다. 추정 과정에는 가우스 뉴턴 법을 사용하였다. 그리고 메타휴리스틱 알고리즘 중 성능이 우수한 LSHADE 기반 알고리즘으로

전역 최적 해에 대한 추가 검증을 하였다^[5]. 추정 과정은 실제 위치의 $\pm 5 \lambda$ 범위에서 진행하였다. 가우스 뉴턴 법과 LSHADE 알고리즘을 통해 구한 결과는 동일했으며 추정 오차를 표 1에 정리하였다. 오차 결과는 실제 프로브 위치에 대한 축별 오차를 파장당 길이로 나타내었다.

해당 결과를 확인하면 앞서 그림 2의 경향성과 완전히 일치하지는 않는 것을 확인할 수 있다. 추정 과정에는 소자 간 간섭을 포함한 실제 공간에서 다양한 잡음이 발생하지만^[3] 분석한 수식적 모델에서는 해당 공간 잡음 요소를 포함하지 않기 때문이다. 해당 영향성 파악을 위해 실제 이상적인 위치에 대한 전체 위상 차분 값 벡터 P' 과 시뮬레이션에서 발생한 위상 차분 값 벡터 P 에 대한 차이 r_o 를 공간 잡음에 대한 영향으로 보고 추가적인 분석을 진행하였다. 해당 값은 식 (9)에서 확인할 수 있다.

$$r_o = P' - P \tag{9}$$

표 1. 프로브 배치에 따른 추정 오차 결과
Table 1. Estimation error results regarding probe position.

Distance (λ)	Angle ($^\circ$)	Probe	Estimation error (λ)					
			x	y	z			
5	10	B1	x	0.00	y	0.01	z	0.04
		B2	x	0.02	y	0.01	z	0.06
	20	B1	x	0.02	y	0.01	z	0.04
		B2	x	0.01	y	0.01	z	0.04
	30	B1	x	0.00	y	0.01	z	0.01
		B2	x	0.02	y	0.01	z	0.02
	40	B1	x	0.05	y	0.01	z	0.10
		B2	x	0.07	y	0.01	z	0.11
10	10	B1	x	0.06	y	0.00	z	0.38
		B2	x	0.05	y	0.00	z	0.38
	20	B1	x	0.25	y	0.01	z	0.80
		B2	x	0.26	y	0.01	z	0.81
	30	B1	x	0.16	y	0.00	z	0.31
		B2	x	0.15	y	0.00	z	0.31
	40	B1	x	0.04	y	0.00	z	0.02
		B2	x	0.02	y	0.00	z	0.01
15	10	B1	x	0.92	y	0.00	z	5.00
		B2	x	0.79	y	0.00	z	5.00
	20	B1	x	1.10	y	0.01	z	3.23
		B2	x	1.11	y	0.01	z	3.25
	30	B1	x	0.87	y	0.00	z	1.46
		B2	x	0.77	y	0.00	z	1.43
	40	B1	x	0.41	y	0.01	z	0.47
		B2	x	0.42	y	0.01	z	0.48

식 (9)의 r_o 를 행렬 U^T 와 곱연산하면 프로브 위치에 영향을 줄 수 있는 성분 α 를 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha = U^T r_o \quad (10)$$

앞서 A 와 동일한 수준에서 비교하기 위해 α 를 앞서 구한 특이값에 대한 비율로 나타낸 뒤 합산하여 오차 비율 지표 E 를 식 (11)과 같이 확보하였다. 이때 시스템의 rank가 6이므로 α 는 상위 6개의 성분만 활용한다.

$$E = \sum_{i=1}^6 \frac{\alpha_i}{s_i} \quad (11)$$

표 2에서 해당 지표를 포함한 전체 결과를 확인할 수 있다. A 만 보면 추정 오차 최댓값과 A 의 경향성이 동일하지 않다. A 는 수식적 모델에 대한 성능만 나타내며 상관잡음을 고려하지 못하기 때문이다. 대신 앞서 분석한 상관 잡음에 대한 지표 E 를 추가로 고려하면 동일한 경향성을 확인할 수 있다. 이때 E 는 A 를 구할 때 활용한 특이값의 비율로 형성하였기 때문에 $A + E$ 를 전체 평가 지표로 활용하였다. $A + E$ 를 확인할 경우 추정 오차 최댓값과 경향성이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 프로브가 배열에 근접하고 두 프로브의 사이각이 클수록 추정 성능이 좋다는 사실은 유효하지만 상관 잡음이 발생하여 위치 추정 오차가 발생한다고 볼 수 있다.

표 2. 지표 A, E 에 대한 추정 오차 성능 비교
Table 2. Comparison of estimation error with indicator A, E .

Distance (λ)	Angle ($^\circ$)	Maximum estimation error (λ)	[A]	[E]	[A+E]	Accuracy rank
5	10	0.06	19	204	223	4
	20	0.04	5	29	34	2
	30	0.02	2	17	19	1
	40	0.11	1	349	350	5
10	10	0.38	405	2.36e4	2.77e4	7
	20	0.81	108	1.18e4	1.19e4	9
	30	0.31	53	2098	2151	6
	40	0.04	34	10	44	3
15	10	5.00	3.59e4	7.55e5	7.59e5	12
	20	3.25	980	1.32e5	1.33e5	11
	30	1.46	497	3.79e4	3.84e4	10
	40	0.48	329	7.37e4	7.70e4	8

IV. 결 론

본 논문은 2개의 프로브를 사용하는 위치 추정 기법에 서 프로브의 배치에 따른 위치 추정 성능 변화를 분석하 고 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 수식적 모델을 통해 프로브가 배열에 가깝고 두 프로브 간의 사이각이 클수 록 추정 모델의 성능이 좋다는 사실을 조건수와 지표 A 의 변화 결과를 통해 확인하였고 시뮬레이션 결과에서도 전반적으로 유효함을 확인했다. 다만 상관잡음의 영향으 로 일부 조건에서 큰 오차가 발생하였다. 특히 시뮬레이 션 결과에서 측정 배열 길이와 유사한 프로브 이격 거리를 유지하고 상관 잡음이 적을 경우 0.02 λ 오차 수준의 위치 추정 결과를 확인할 수 있었다. 결과적으로 해당 방 식을 실제 환경에 적용하기 위해서는 정밀한 위치 추정을 위해서 프로브를 측정 배열에 근접시키며 시스템의 안정성을 위한 상관 잡음 억제가 수반되어야 할 것이다.

References

- [1] J. A. Haimlerl, 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] 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," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 9, pp. 5919-5933, Sep. 2019.
- [3] 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.
- [4] M. Ciattaglia, "On site calibration of AESA using two probes," in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Florence, Mar. 2023.
- [5] N. H. Awad, M. Z. Ali, and P. N. Suganthan, "Ensemble sinusoidal differential covariance matrix adaptation with Euclidean neighborhood for solving CEC2017 benchmark problems," in *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC)*, Donostia, Jun. 2017, pp. 372-379.