

제한된 방위각 측정 데이터를 이용한 확장 방위각 어레이 매니폴드 생성

Generation of Extended-Azimuth Array Manifold Using Limited Azimuth Measurements

이창형 · 김태영* · 문효상* · 김항국* · 길기성* · 이준호

Chang-Hyeong Lee · Taeyoung Kim* · Hyosang Moon* · Hangkook Kim* ·
Giseong Gil* · Joon-Ho Lee

요 약

실환경에서 측정하는 array manifold는 실험 조건의 제약에 의해 모든 방위각에 대한 array manifold를 측정할 수 없는 경우가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 배열 매니폴드 보간 및 모델링 기법이 연구되어 왔으나, 대부분의 방법은 배열 매니폴드 전체를 직접 보간하거나 모델링하므로 계산 복잡도가 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 일부 방위각에 대하여 주어진 측정 array manifold를 방위각에 대하여 확장하여 측정되지 않은 방위각에 대한 array manifold를 생성하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 안테나 좌표와 입사신호의 입사방향에 따라 주어지는 이론적인 array manifold의 위상식에 1차 Taylor 근사, 2차 Taylor 근사와 3차 Taylor 근사를 적용하여 얻어진다. 이는 기존 방법과 달리 위상 항에 대해서만 Taylor 전개를 적용함으로써 보다 간단한 형태로 미측정 방위각의 array manifold를 생성할 수 있다. 제안된 방법의 타당성은 실제 측정된 array manifold를 이용하여 검증하였으며, Taylor 차수 및 방위각 증가 간격에 따른 근사 성능을 비교·분석하였다.

Abstract

In practice, it is often infeasible to measure the array manifold for all azimuth angles owing to experimental constraints. To address this problem, various array manifold interpolation and modeling techniques have been studied. However, most existing approaches directly interpolate the entire array manifold, resulting in increased computational complexity. This study proposes a method for extending a given measured array manifold obtained for a limited set of azimuth angles to generate the manifold for unmeasured azimuth angles. The proposed method is derived by applying first-, second-, and third-order Taylor approximations to the phase of the theoretical array manifold, which is determined by the antenna coordinates and direction of arrival of the incident signal. Unlike conventional approaches, the proposed method applies the Taylor expansion only to the phase term, enabling the generation of array manifolds at unmeasured azimuth angles with a simpler formulation. The proposed method was validated using experimentally measured array manifold data. The approximation performance was analyzed for the Taylor expansion order and azimuth increment.

Key words: Array Manifold, Phase Ambiguity, Direction Finding, Manifold Interpolation

세종대학교 정보통신공학과(Department of Infomation & Communication Engineering, Sejong University)

*LIG 디펜스&에어로스페이스 전자기전연구소(Electromagnetic Warfare Technology R&D Group, LIG Defense&Aerospace)

· Manuscript received February 23, 2026 ; Revised March 13, 2026 ; Accepted July 10, 2026. (ID No. 20260223-011)

· Corresponding Author: Joon-Ho Lee (e-mail: joonhlee@sejong.ac.kr)

I. 서 론

배열 매니폴드는 안테나 배열의 기하구조와 입사파의 방향에 의해 이론적으로 유도될 수 있다. 그러나 실제 환경에서는 안테나 소자 간 상호결합(mutual coupling), 케이블 및 커넥터 특성, 지면 및 주변 구조물에 의한 산란 등 다양한 요인에 의해 이론 모델과 실제 응답 간 차이가 발생한다.

실측 배열 매니폴드는 실제 시스템 특성을 반영한다는 장점이 있으나, 모든 방위각 및 양각에 대해 조밀한 간격으로 측정을 수행하는 것은 시간, 장비 제약, 회선 구조의 기계적 한계 등으로 인해 현실적으로 어려운 경우가 많다. 특히 야외 실험 환경에서는 일부 방위각에 대해서만 측정이 가능하며, 이로 인해 미측정 방위각에 대한 배열 매니폴드가 필요한 경우 별도의 보간 또는 모델 기반 확장이 요구된다.

제한된 측정 데이터로부터 미측정 방위각의 배열 매니폴드를 추정하기 위하여 다양한 보간 및 모델링 기법이 연구되어 왔다. 참고문헌 [1]은 multilinear interpolation을 이용하여 제한된 측정 데이터를 기반으로 배열 매니폴드를 확장하는 방법을 제안하였으며, 참고문헌 [2]는 manifold separation 기법을 통해 다양한 배열 구조에 대한 효율적인 매니폴드 표현 방법을 제시하였다. 또한 참고문헌 [3]은 상호결합(mutual coupling)이 존재하는 환경에서 polynomial 기반 array manifold 보간 기법을 적용하여 방향탐지 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 그러나 기존 방법들은 대부분 array manifold 자체를 직접 보간하거나 모델링하는 방식에 기반하며, 본 논문에서는 배열 매니폴드를 구성하는 상대 위상차(relative phase difference)에 대한 Taylor 근사를 이용하여 array manifold를 생성한다. 따라서 기존 방법과 제안 방법은 보간 대상과 생성 과정이 서로 다르며, 동일한 조건에서의 직접적인 성능 비교에는 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 안테나 좌표와 입사 방향에 의해 주어지는 이론적 위상식에 대하여 1차, 2차 및 3차 Taylor 근사를 적용함으로써, 일부 방위각에서 측정된 배열 매니폴드를 방위각 방향으로 확장하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 배열 매니폴드를 구성하는 상대 위상차에 대해서

만 Taylor 전개를 수행한 후 이를 이용하여 array manifold를 생성한다. 실제 측정된 배열 매니폴드를 이용하여 방위각 증가 간격에 따른 근사 오차 특성을 분석하고, 1차, 2차 및 3차 Taylor 근사의 적용 범위를 비교·검증한다.

II. 배열 매니폴드의 위상 표현 및 방위각 Taylor 근사

2-1 배열 매니폴드의 위상 표현

신호가 방위각 θ , 양각 0 방향에서 입사할 때 N 개의 안테나로 구성된 배열에서 n 번째 안테나의 좌표는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r_n = [x_n, y_n] \quad (1)$$

이때 원점에서의 위상에 대한 n 번째 안테나에서의 상대 위상은 식 (2)와 같다.

$$\psi_n(\theta) = \frac{2\pi f}{c}(x_n \cos\theta + y_n \sin\theta) \quad (2)$$

1번 안테나를 기준으로 n 번째 안테나와의 위상 차이는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \psi_{n1}(\theta) &= \psi_n(\theta) - \psi_1(\theta) \\ &= \frac{2\pi f}{c}[(x_n - x_1)\cos\theta + (y_n - y_1)\sin\theta] \end{aligned} \quad (3)$$

배열 매니폴드는 위상 항에 의해 결정되므로, 본 논문에서는 배열 매니폴드 자체가 아닌 위상 항 $\psi_{n1}(\theta)$ 에 대한 Taylor 전개를 이용한다.

2-2 방위각에 대한 1차 Taylor 근사

특정 방위각 θ_0 에서 측정된 위상차가 존재하면 인접한 방위각 $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ 에서의 위상은 1차 Taylor 근사를 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다^[4].

$$\psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0} \Delta\theta \quad (4)$$

식 (3)에서 $\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta}$, $\left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0}$ 는 각각 식 (5) 및

식 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \\ &= \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta + (y_n - y_1)\cos\theta] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \\ &= \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta_0 + (y_n - y_1)\cos\theta_0] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (4)에 대입하여 식 (7)을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \\ & \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta_0 + (y_n - y_1)\cos\theta_0] \Delta\theta \end{aligned} \quad (7)$$

2-3 방위각에 대한 2차 Taylor 근사

1차 근사는 방위각 변화가 충분히 작은 경우에 유효하나, 방위각 증가치가 커질 경우 근사 오차가 증가할 수 있다. 이러한 오차를 감소시키기 위하여 2차 항을 포함한 Taylor 근사를 고려한다. 2차 Taylor 근사식은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \\ & \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0} \Delta\theta \\ & \quad + \frac{1}{2!} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \Big|_{\theta=\theta_0} (\Delta\theta)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right)$, $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0}$ 는 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \\ &= \frac{d}{d\theta} \left(\frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta + (y_n - y_1)\cos\theta] \right) \\ &= \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\cos\theta - (y_n - y_1)\sin\theta] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0} \\ &= \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\cos\theta_0 - (y_n - y_1)\sin\theta_0] \end{aligned} \quad (10)$$

식 (6)과 식 (10)을 식 (8)에 대입하여 식 (11)을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \\ & \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta_0 + (y_n - y_1)\cos\theta_0] \Delta\theta \\ & \quad + \frac{\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\cos\theta_0 - (y_n - y_1)\sin\theta_0] (\Delta\theta)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

2-4 방위각에 대한 3차 Taylor 근사

2차 근사 또한 방위각 변화가 더욱 증가하는 경우에는 오차가 누적될 수 있다. 따라서 고차 비선형 성분을 반영하기 위하여 3차 Taylor 항을 포함할 수 있다. 3차 Taylor 근사식은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \\ & \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \Big|_{\theta=\theta_0} \Delta\theta \\ & \quad + \frac{1}{2!} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \Big|_{\theta=\theta_0} (\Delta\theta)^2 \\ & \quad + \frac{1}{3!} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \right) \Big|_{\theta=\theta_0} (\Delta\theta)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right)$, $\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \Big|_{\theta=\theta_0}$ 는 각각 식 (13) 및 식 (14)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\theta} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \\ &= \frac{2\pi f}{c} [(x_n - x_1)\sin\theta - (y_n - y_1)\cos\theta] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\theta} \left(\frac{d}{d\theta} \left(\frac{d\psi_{n1}(\theta)}{d\theta} \right) \right) \Big|_{\theta=\theta_0} \\ &= \frac{2\pi f}{c} [(x_n - x_1)\sin\theta_0 - (y_n - y_1)\cos\theta_0] \end{aligned} \quad (14)$$

식 (6), 식 (10), 식 (14)를 식 (12)에 대입하여 식 (15)를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 & \psi_{n1}(\theta_0 + \Delta\theta) \\
 & \approx \psi_{n1}(\theta_0) + \frac{2\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\sin\theta_0 + (y_n - y_1)\cos\theta_0] \Delta\theta \\
 & + \frac{\pi f}{c} [-(x_n - x_1)\cos\theta_0 - (y_n - y_1)\sin\theta_0] (\Delta\theta)^2 \\
 & + \frac{\pi f}{3c} [(x_n - x_1)\sin\theta_0 - (y_n - y_1)\cos\theta_0] (\Delta\theta)^3
 \end{aligned} \quad (15)$$

III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안한 Taylor 기반 array manifold 확장 방법의 타당성을 검증하기 위하여 측정된 array manifold와 근사 결과를 비교하였다. 사용한 array manifold는 실제 방향탐지 안테나 배열로부터 측정된 데이터를 이용하였다. 안테나 배열은 총 9개의 안테나 소자로 구성되며, 배열 매니폴드는 1번 안테나를 기준으로 각 안테나 소자와의 상대 위상차 형태로 저장하였다. 방위각은 0°부터 359°까지 1° 간격으로 측정되었으며, 측정 주파수 범위는 20 MHz부터 530 MHz이다.

제안된 방법의 검증을 위해 일정 방위각 간격(step size)마다 측정 데이터가 존재한다고 가정하고, Taylor 근사를 이용하여 그 사이의 미측정 방위각에 대한 array manifold를 생성한 후 실제 측정 결과와 비교하였다. 또한 성능 비교에 사용한 40, 81, 120, 200, 300, 400 및 500 MHz는 전체 측정 주파수 대역을 대표할 수 있도록 저주파, 중주파 및 고주파 영역에 걸쳐 선정하였다. 이를 통해 주파수 증가에 따른 위상 변화율 변화가 Taylor 근사 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션은 대표 예시로 안테나 9번 소자에 대한 위상 비교 결과를 제시하였으며, 정량적 평가는 전체 안테나 소자(2~9번)에 대한 평균 RMSE를 이용하여 수행하였다.

그림 1은 방위각 증가치를 1°로 설정하고 1차 Taylor 근사를 적용한 결과를 나타낸다. Step이 1°로 충분히 작은 경우, 제안한 1차 근사에 의해 생성된 array manifold는 모든 주파수 대역에서 실제 측정 array manifold와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 특히, 40 MHz에서 500 MHz에 이르는 전 주파수 구간에서 위상 곡선이 거의 중첩되며, 근사 오차는 시각적으로 구분하기 어려운 수준임을 알 수 있다.

이는 방위각 증가치가 충분히 작은 경우, array manifold 위상은 국소적으로 선형 거동을 보이며 1차 미분 항만으로도 충분한 정확도를 확보할 수 있음을 의미한다.

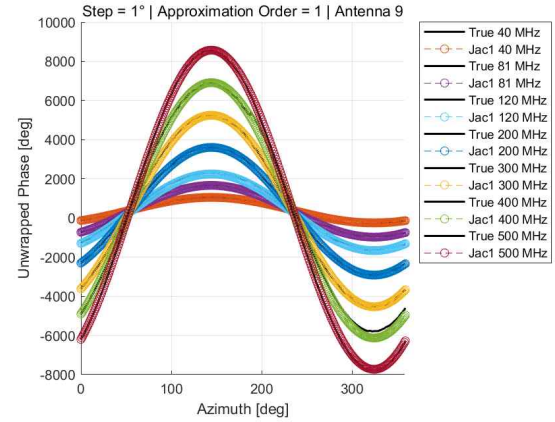


그림 1. Step=1°에서 1차 Taylor 근사 결과

Fig. 1. First-order Taylor approximation results for an azimuth step size of 1°.

반면에 방위각 증가치를 16°로 설정한 경우에는 1차 Taylor 근사만으로는 실제 array manifold를 충분히 정확하게 재현하지 못함을 확인할 수 있다(그림 2). 방위각 간격이 증가함에 따라 위상 변화의 비선형성이 두드러지게 나타나며, 특히 위상 최대 및 최소 부근과 같이 곡률이 큰 영역에서 실제 위상 곡선과 1차 근사 결과 사이의 차이가 뚜렷하게 발생한다. 이러한 경향은 고주파 대역으로 갈수록 더욱 두드러지며, 이는 주파수가 증가할수록 위상 변화율이 커지기 때문이다.

이에 따라 2차 Taylor 항을 포함한 결과를 그림 3에 나

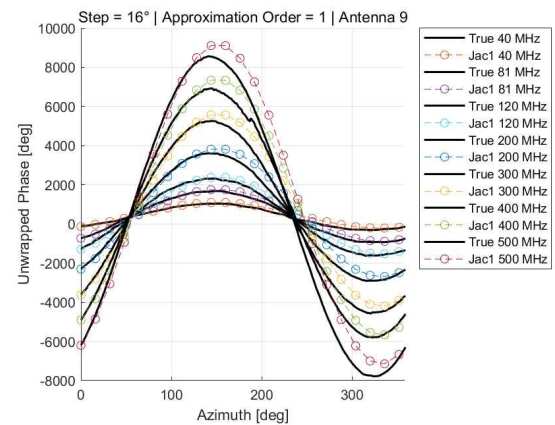


그림 2. Step=16°에서 1차 Taylor 근사 결과

Fig. 2. First-order Taylor approximation results for an azimuth step size of 16°.

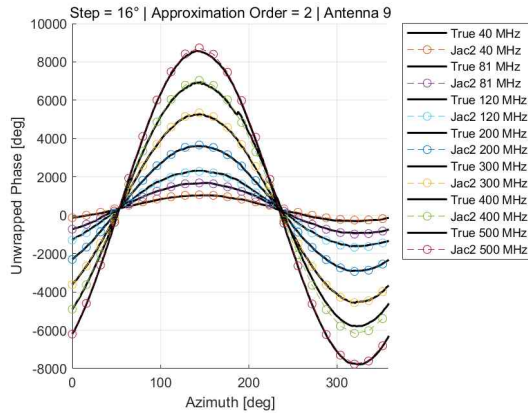


그림 3. Step=16°에서 2차 Taylor 근사 결과
Fig. 3. Second-order Taylor approximation results for an azimuth step size of 16°.

타내었다. 2차 항을 추가함으로써 위상 곡률 성분이 보정되어 1차 근사 대비 실제 array manifold와의 일치도가 현저히 향상됨을 확인할 수 있다. 특히 방위각 전 영역에 걸쳐 오차가 감소하며, 위상 극값 부근에서의 차이가 크게 줄어드는 경향을 보인다. 이는 방위각 증가치가 비교적 큰 경우, 2차 미분 항이 비선형 위상 변화를 효과적으로 보상함을 의미한다.

또한 3차 Taylor 항까지 포함한 결과를 그림 4에 나타내었다. 3차 항을 고려할 경우, 고차 비선형 성분까지 반영되어 전체 방위각 구간에서 실제 array manifold와 거의

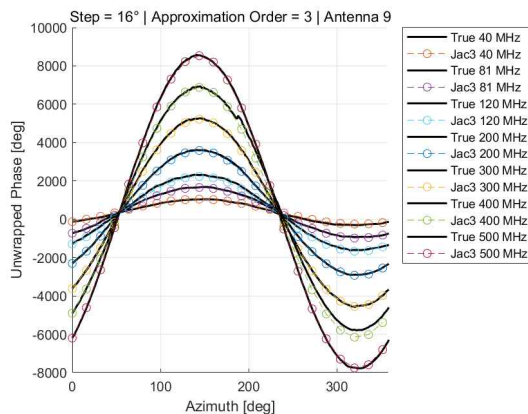


그림 4. Step=16°에서 3차 Taylor 근사 결과
Fig. 4. Third-order Taylor approximation results for an azimuth step size of 16°.

일치하는 결과를 얻을 수 있다. 특히 500 MHz와 같이 위상 변화가 급격한 경우에도 실제 곡선의 전반적인 경향을 잘 추종함을 확인할 수 있다. 이는 방위각 증가치가 크더라도 고차 Taylor 항이 비선형 위상 변화를 효과적으로 보상할 수 있음을 보여준다.

제한된 방법의 근사 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 실제 측정 위상과 Taylor 근사 위상 간의 RMSE(root mean square error)를 계산하였다. RMSE는 Taylor 근사에 의해 생성된 방위각 지점에서 계산하였으며, 특정 안테나 소자에 대한 결과에 의존하지 않도록 전체 안테나 소자(2~9번)에 대한 평균값을 사용하였다.

표 1 및 그림 5는 Step=16° 조건에서 주파수별 전체 안

표 1. Step=16°에서 주파수별 전체 안테나 평균 RMSE
Table 1. Average RMSE over all antennas at each frequency for an azimuth step size of 16°.

Frequency (MHz)	First-order RMSE	Second-order RMSE	Third-order RMSE
40	53.07	30.74	28.75
81	89.30	23.92	22.40
120	105.13	50.26	66.58
200	104.13	31.00	28.66
300	105.06	41.49	42.35
400	100.20	64.75	40.94
500	103.76	86.19	39.31

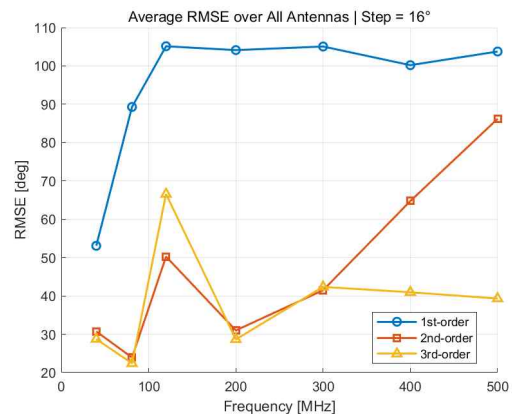


그림 5. Step=16°에서 주파수별 전체 안테나 평균 RMSE
Fig. 5. Average RMSE over all antennas at each frequency for an azimuth step size of 16°.

테나 평균 RMSE를 나타낸다. 1차 Taylor 근사의 경우 주파수가 증가함에 따라 RMSE가 증가하는 경향을 보이며, 특히 고주파 영역에서 오차가 크게 증가함을 확인할 수 있다. 반면 2차 및 3차 Taylor 근사는 대부분의 주파수에서 1차 Taylor 근사보다 낮은 RMSE를 나타내어 고차 Taylor 항이 위상 비선형성을 효과적으로 보상함을 확인할 수 있다. 다만 일부 주파수에서는 3차 Taylor 근사가 2차 Taylor 근사보다 큰 RMSE를 보였으며, 이는 실제 측정 데이터에 포함된 상호결합(mutual coupling), 케이블 특성 및 주변 환경에 의한 비이상성의 영향으로 판단된다.

그림 6은 방위각 증가치에 따른 전체 주파수 및 전체 안테나 평균 RMSE를 나타낸다. 1차 Taylor 근사는 방위각 증가치가 커질수록 오차가 증가하는 경향을 보이며, 특히 방위각 증가치가 큰 경우 RMSE가 크게 증가함을 확인할 수 있다. 반면 2차 및 3차 Taylor 근사는 전반적으로 1차 Taylor 근사보다 낮은 RMSE를 유지하며, 방위각 증가치 변화에 대해서도 비교적 안정적인 성능을 보인다. 다만 실제 측정 데이터에는 상호결합, 케이블 특성 및 주변 환경에 의한 비이상성이 포함되어 있으므로 모든 주파수 및 방위각 조건에서 Taylor 차수 증가에 따라 RMSE가 단조 감소하지는 않았다. 그럼에도 불구하고 전체적으로는 2차 및 3차 Taylor 근사가 1차 Taylor 근사 대비 낮은

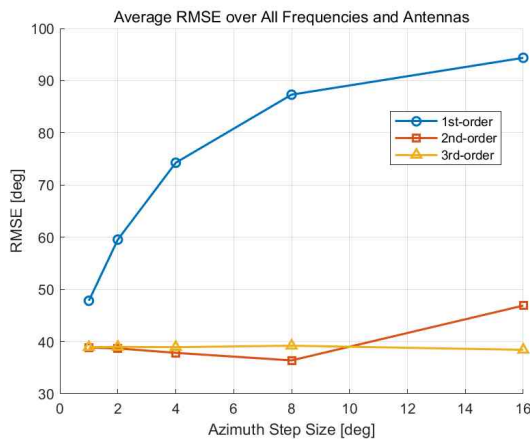


그림 6. 방위각 간격 증가치에 따른 전체 주파수 및 안테나 평균 RMSE

Fig. 6. Average RMSE over all frequencies and antennas according to the azimuth step size.

RMSE를 나타내어 제안된 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

종합하면, 방위각 증가치가 작은 경우에는 1차 근사만으로도 충분한 정확도를 확보할 수 있으나, 증가치가 커질수록 고차 Taylor 항의 포함이 필수적임을 확인하였다. 따라서 제안된 방법은 방위각 증가 간격과 요구 정확도에 따라 적절한 Taylor 차수를 선택적으로 적용할 수 있으며, 제한된 측정 데이터로부터 미측정 방위각의 array manifold를 효과적으로 생성할 수 있음을 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 일부 방위각에서 측정된 array manifold로부터 미측정 방위각의 array manifold를 생성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 이론적 array manifold의 위상식에 기반하여 위상값에 대해 Taylor 전개를 적용하는 방식으로 구성된다.

시뮬레이션 결과, 방위각 증가치가 작은 경우에는 1차 Taylor 근사만으로도 실제 array manifold와 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 반면, 방위각 증가치가 증가할 경우 1차 근사 오차가 증가하여 실제 array manifold와의 일치도가 저하됨을 확인하였다. 이 경우 2차 이상의 Taylor 항을 포함함으로써 근사 오차를 효과적으로 감소시킬 수 있으며, Taylor 차수가 증가함에 따라 전반적으로 근사 오차가 감소하는 경향을 확인하였으며, 특히 2차 및 3차 Taylor 근사는 1차 근사 대비 낮은 RMSE를 나타내었다.

기존의 배열 매니폴드 보간 및 모델링 기법들은 일반적으로 다수의 측정된 array manifold를 이용하여 미측정 구간을 보간하거나 모델링하는 방식에 기반한다. 반면, 본 논문에서 제안한 방법은 배열 매니폴드를 구성하는 상대 위상차에 대하여 Taylor 전개를 반복 적용하여 방위각 방향으로 순차적으로 array manifold를 생성한다. 따라서 두 방법은 입력 데이터와 생성 과정이 서로 다르므로 동일한 조건에서 직접적인 성능 비교에는 한계가 있다. 위상값을 이용할 경우 미분식이 비교적 간단하게 표현되는 장점이 있으며, array manifold는 위상의 복소 지수함수 형태로 주어지므로 합성함수의 미분 공식을 이용하여

array manifold 자체에 대한 1차, 2차 및 3차 Taylor 전개식을 쉽게 유도할 수 있다. 또한 배열 매니폴드는 위상값의 복소 지수함수 형태로 표현되므로, 위상 근사 오차는 복소 매니폴드 오차에 직접 영향을 미친다. 따라서 위상 근사 정확도가 향상될수록 실제 복소 매니폴드와의 차이 또한 감소하게 된다. 실제 측정 데이터를 이용한 검증을 통해 제안된 방법의 유효성을 확인하였으며, 제한된 측정 데이터 환경에서 배열 매니폴드를 확장하기 위한 대안으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 사용한 Taylor 전개는 안테나 좌표와 입사 방향에 의해 결정되는 이론적 위상식에 기반하므로, 실제 환경에서 존재하는 상호결합(mutual coupling) 및 주변 환경에 의한 비선형 효과를 직접 모델링하지는 않는다. 그럼에도 불구하고 실제 측정된 array manifold를 이용한 검증 결과를 통해 제안된 방법이 제한된 방위각 범위 내에서는 이러한 영향을 포함한 실제 응답을 효과적으로 근사할 수 있음을 확인하였다.

제안된 방법은 방위각과 양각이 동시에 변화하는 경우로 확장 가능하며, 이 경우 2변수 Taylor 근사 또는

Jacobian 형태의 표현으로 일반화될 수 있다. 이를 통해 제한된 방향 정보만이 주어진 경우에도 보다 넓은 각도 영역에 대한 array manifold 확장이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] R. O. Schmidt, "Multilinear array manifold interpolation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, no. 4, pp. 857-866, Apr. 1992.
- [2] F. Belloni, A. Richter, and V. Koivunen, "DoA estimation via manifold separation for arbitrary array structures," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 10, pp. 4800-4810, Oct. 2007.
- [3] H. Duan, Y. Liu, S. Li, L. You, and W. Wang, "Polynomial manifold interpolation for direction finding in the presence of mutual coupling," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 173811-173816, Nov. 2019.
- [4] S. C. Chapra, R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, New York, NY, McGraw-Hill, 2011.

이 창 형 [세종대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-6861-6374>



2024년 8월: 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)

2024년 9월~현재: 세종대학교 정보통신공학과 (석사과정)

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 방향탐지

김 태 영 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-9755-5495>



2015년 2월: 건국대학교 물리학과 (이학사)

2017년 8월: 한국공학대대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)

2018년 2월~2021년 2월: 광주과학기술원 전자전특화연구센터

2022년 4월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 전자기전연구소 선임연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 방향탐지

문 호 상 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1128-7249>



2006년 8월: 경희대학교 전자통신공학과 (공학사)

2008년 8월: 경희대학교 전자공학과 (공학석사)

2008년 7월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 전자기전연구소 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나, EM

시뮬레이션

길 기 성 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-0771-8792>



2022년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 4월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 전자기전연구소 선임연구원

[주 관심분야] COMINT, ELINT, 방향탐지, 신호처리

김 향 국 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0002-2783-2854>



2003년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 9월~2004년 4월: 팬택앤큐리텔

2004년 5월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 전자기전연구소 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 방향탐지

이 준 호 [세종대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3715-3943>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2004년 3월~현재: 세종대학교 정보통신

공학과 교수

[주 관심분야] Signal Processing (Radar Signal Processing, Array Signal Processing), Smart Antenna