

다중 신호원의 방향 탐지 성능 향상을 위한 계층적 MUSIC 기법

오민규, 이영석, 임정봉†, 강창옥†, 정방철
 충남대학교, 덕산 넵코어스†

minkyuoh@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, jblim@oneduksan.com, cokang@oneduksan.com, bcjung@cnu.ac.kr

Hierarchical MUSIC Technique for Improving Direction Finding Performance of Multiple Signal Sources

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Jeong-Bong Lim†, Chang-Ok Kang†, and Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, South Korea

†Duksan Navcours, Co., Daejeon, South Korea

요약

본 논문에서는 인접한 도래각 (direction-of-arrival : DOA)을 통하여 도착하는 다중 신호원의 방향 탐지 성능 향을 위한 계층적 다중 신호 분류 (hierarchical multiple signal classification : H-MUSIC) 기법을 제안한다. 인접한 도래각을 갖는 다중 신호원이 존재하는 환경에서 기존 MUSIC 기법의 경우 신호원 간 간섭으로 인해 안테나 Array를 탑재한 수신기에서 도래각 추정 성능이 열화된다. 그러나 제안하는 H-MUSIC 기법은 기존의 MUSIC 기법과 빔공간 MUSIC (Beam-space MUSIC) 기법을 계층적 DOA 추정 과정에서 결합하여 이용하는 것으로, 1) 대략적 추정 단계에서 기존의 MUSIC 기법으로 전방향을 대상으로 다중 신호원의 DOA를 추정하고, 2) 정밀 추정 단계에서 빔공간 MUSIC 기법 활용하여 1단계에서 신호원이 존재할 것으로 추정되는 도래각 영역을 높은 정밀도로 DOA 추정을 수행한다. 제안하는 H-MUSIC 기법은 DOA 추정면에서 기존 MUSIC보다 월등히 향상된 결과를 나타낸다는 것을 모의실험을 통해 확인하였다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서 무선 방향 탐지 및 측위는 주요 응용 중 하나로 기대되고 있으며, 다수의 지상 단말뿐만 아니라, 상용 위성이나 무인 항공기가 다수 있는 비 지상 네트워크에서도 정밀한 방향 탐지 (direction-of-arrival : DOA) 기술의 중요성이 크게 증가하고 있다 [1]. 더불어, 배열안테나를 이용한 방향 탐지 기술은 높은 탐지 성능을 얻을 수 있어 다양한 응용에서 개발 및 분석되고 있다 [2]. 그러나, 일반적으로 배열안테나 기반 방향 탐지 기술은 신호 성분 간의 상관관계가 작은 환경에서 강력한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다 [3]. 특히, 대표적인 배열안테나 기반 DOA 추정 알고리즘 중 하나인 다중 신호 분류 (multiple signal classification : MUSIC) 기법은 수신 신호의 공분산을 이용하기 때문에 입사 신호 간의 상관관계에 많은 영향을 받는다 [4]. 따라서 본 논문에서는 다수의 인접 신호를 분류하기 위해 계층적으로 DOA 추정 기법을 이용하는 단계별 MUSIC 알고리즘을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 알고리즘은 크게 두 가지 부분으로 분류할 수 있다. 먼저, 넓은 탐지 영역에서 기존 MUSIC 알고리즘을 사용한 대략적인 DOA를 추정하는 단계와 이전 단계에서 신호원의 존재할 것으로 추정된 영역에 대해 빔 형성을 적용한 MUSIC (beam-space-MUSIC [4]) 기법으로 정밀하게 DOA 추정하는 단계로 구성되어 있다.

마지막으로, 본 논문에서는 모의실험을 통해 제안하는 계층적 DOA 추정 알고리즘이 낮은 신호 대 잡음 비 (signal-to-noise ratio : SNR) 영역과 적은 수의 신호 샘플 환경에서도 기존 MUSIC 기법만 사용한 경우 대비 우수한 성능을 보이는 것을 확인했다.

II. 계층적 MUSIC 기법의 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 배열안테나를 갖는 수신기가 K 개의 인접한 도래각을 갖는 신호원의 방향을 탐지하는 환경을 고려한다. 이때, 수신기는 각 신호원과 가지선 (line-of-sight : LOS) 경로를 확보하는 위치에 존재하며, 안테나 소자간 간격이 d 로 고정된 M 개의 소자를 갖는 균일 선형 배열 (uniform linear array : ULA) 안테나이며, 인접 신호원의 수는 안테나 소자의 수 대비 적다고 가정하였다. 이때 T 개의 신호 샘플에 대해 K 개의 신호원으로부터 입사되는 수신 신호 행렬 $\mathbf{Y} (\in \mathbb{C}^{M \times T})$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{W},$$

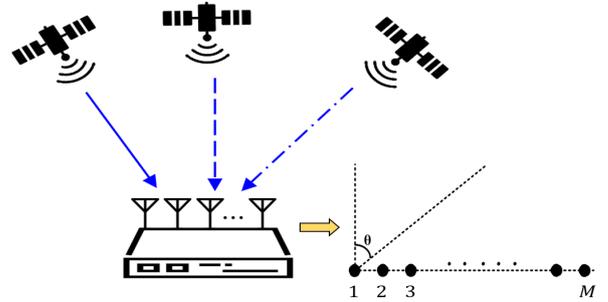


그림 1. 제안하는 기법의 배열안테나 시스템 모델

여기서 \mathbf{Y} 는 T 개의 열로 구성되어 있으며, 각 $t (\in \{1, \dots, T\})$ 번째 열은 t 번째 시간 샘플에서 수신된 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}_t (\in \mathbb{C}^M)$ 이다. 또한 $\mathbf{A} (\in \mathbb{C}^{M \times K}) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$ 는 인접 신호원들의 조향 벡터들이 결합된 조향 행렬이며, 신호원의 도래 각은 T 시간 샘플 동안 변하지 않는다고 가정하였다. 따라서, $k \in \{1, \dots, K\}$ 번째 신호원의 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta_k) (\in \mathbb{C}^M)$ 는 고도 각 $\theta_k (\in [0, \pi])$ 에 의해 결정된다. 그리고 $m \in \{1, \dots, M\}$ 번째 안테나 소자에서의 k 번째 신호원의 조향 벡터 $a_m(\theta_k)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_m(\theta_k) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d(m-1) \cos \theta_k},$$

여기서 λ 는 파장을 의미하고, d 는 안테나 소자 간 거리이고, $\mathbf{X} (\in \mathbb{R}^{K \times T})$ 는 T 시간 샘플 동안 수신된 신호로 구성된 행렬을 의미한다. 또한, 본 논문에서는 도플러 주파수 및 캐리어 주파수가 보상되었다고 가정하였다. 따라서 각 t 번째 시간 샘플에서 수신된 k 번째 신호원의 수신 신호 전력은 $x_{t,k} = \sqrt{P_{t,k}}$ 이다. 마지막으로 $\mathbf{W} (\in \mathbb{C}^{M \times T})$ 는 T 시간 샘플 동안 수신된 열잡음 행렬이며, 각 열은 시간 샘플에서 부가된 가우시안 백색 잡음이며, $CN(0, \sigma^2)$ 의 분포를 따른다.

III. 인접 신호원의 방향 탐지를 위한 계층적 MUSIC 추정 기법

본 논문에서는 인접한 다중 신호원의 DOA를 정확하게 추정하기 위한 계층적 DOA 추정 기법을 제안한다. 첫 번째 단계에서, 수신기는 T 시간 샘플 동안 수집한 수신 신호로 기존 MUSIC 기법을 이용하여 대략적인

DOA 추정을 수행한다. 이때, 기존 MUSIC 기법은 수신 신호의 공분산을 고윳값 분해(eigen-value decomposition : EVD)를 이용하여 잡음 부공간을 수신 신호의 공분산에서 분리하여 다음과 같이 임의의 고도 각 집합 $\theta \in \Psi$ 에서 다음과 같이 공간 스펙트럼 함수 $P_{MU}(\theta)$ 를 생성한다.

$$P_{MU}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta)}$$

여기서 Ψ 는 전체 고도 각 θ 의 모든 값을 포함하는 집합을 의미하며, $\mathbf{E}_N (\in \mathbb{C}^{M \times M-K})$ 는 EVD를 수행하여 생성한 잡음 부공간 행렬이다. 그 후, 분해능에 따라 설정된 각도를 변경하며 공간 스펙트럼에서 첨두 값(peak-value)이 발생하는 영역을 신호가 존재하는 영역으로 추정한다. 이어서, 신호원이 존재하는 대략적인 영역에 대해 제안하는 계층적 MUSIC 기법은 두 번째 단계로 진행된다. 신호원이 대략적으로 존재하는 영역을 $\Theta (\subset \Psi)$, 해당 영역 Θ 에 설정된 각도를 $\hat{\theta}$ 라고 각각 정의한다. 또한, 수신기는 DOA를 추정하고자 하는 영역 Θ 에 $B (\leq M)$ 개의 빔을 이용하여 빔 형성 행렬 $\mathbf{F} (\in \mathbb{C}^{M \times B})$ 을 다음과 같이 생성한다.

$$\mathbf{F} = [\mathbf{a}(\hat{\theta}_1), \mathbf{a}(\hat{\theta}_2), \dots, \mathbf{a}(\hat{\theta}_B)].$$

여기서 각 열은 수신 신호를 해당 빔 공간으로 투영하는 빔 형성 벡터이다. 빔 수의 제한으로 인해 전체 영역 Ψ 에 대해 B 개의 빔으로 세밀하게 구성하기는 어렵지만, 제한된 대략적인 영역에서는 빔 형성 행렬 \mathbf{F} 로 구성된 빔 공간에 신호 성분을 투영하여 정밀한 DOA 추정이 가능하다. 따라서, 정밀한 DOA 추정 단계에서는, 대략적인 영역 이내에서 다시 DOA를 추정하며 빔 공간 기반 공간 스펙트럼 함수는 다음과 같다.

$$P_{BSMU}(\hat{\theta}) = \frac{\mathbf{a}^H(\hat{\theta})\mathbf{F}\mathbf{F}^H\mathbf{a}(\hat{\theta})}{\mathbf{a}^H(\hat{\theta})\mathbf{F}\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{F}^H\mathbf{a}(\hat{\theta})}$$

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 모의실험은 수신기의 안테나 소자 간 거리 $d = \lambda/2$ 이며, 7개의 안테나 소자로 구성된 ULA를 고려하였으며, 각 실험환경은 신호원의 도래 각이 충분히 멀리 이격된 경우($\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 120^\circ$)와 도래 각이 인접한 경우($\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 65^\circ$)이고, 중심 주파수는 12.7 [GHz]를 가정하였다. 또한, 제안하는 기법은 두 단계로 구성된 계층적 MUSIC 기법이며, 각 단계에서의 각도 분해능은 1° 이다. 더불어, 제안하는 기법의 방향 탐지 성능을 평가하기 위해 I 번의 몬테-카를로 실험에서 제공된 평균 제곱 오차 (root mean squared error : RMSE)를 평가 지표로 고려하였으며, 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{IK} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (\bar{\theta}_{k,i}^* - \theta_{k,i})^2},$$

여기서 $\bar{\theta}_{k,i}^*$ 는 $i \in \{1, \dots, I\}$ 번째 실험에서 k 번째 신호원을 제안된 기법을 사용하여 추정된 고도 각이며, $\theta_{k,i}$ 는 실제 신호원의 고도 각이다. 그림 2는 제안하는 계층적 MUSIC 기법의 SNR 대비 RMSE 성능을 다양한 신호원 간 거리 환경에서 도시하였다. 그림 2-1과 같이 신호원의 도래각이 충분히 멀리 이격된 신호원 환경 ($\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 120^\circ$)에서는 제안 기법이 기존 MUSIC 기법과 다양한 샘플 환경에서도 각각 거의 비슷한 추정 성능을 달성한다. 다른 한편으로, 그림 2-2와 같이 인접한 도래 각을 갖는 신호원 환경($\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 65^\circ$)에서는 기존 MUSIC 기법만 사용하여 신호의 DOA를 추정한 경우 배열안테나로 인한 분해능 제한,

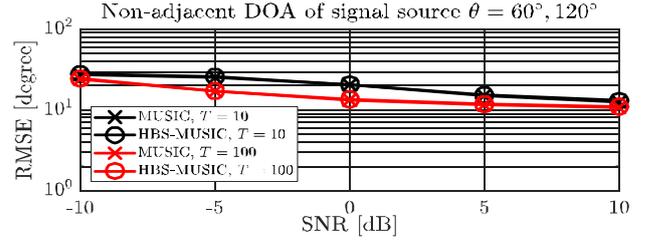


그림 2-1. 이격된 도래 각 환경에서 제안 기법의 SNR 대비 RMSE 성능

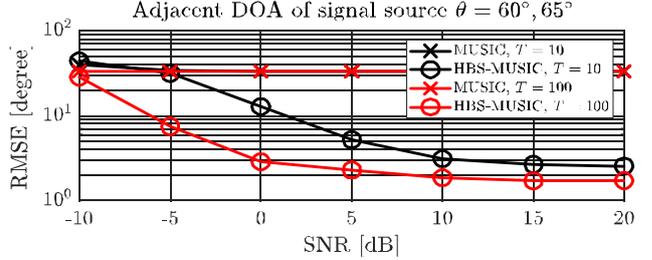


그림 2-2. 인접한 도래 각 환경에서 제안 기법의 SNR 대비 RMSE 성능

신호원 간 간섭 및 불완전한 공분산 연산으로 인하여 인접한 도래 각을 갖는 신호원의 방향을 정확하게 식별하지 못한다. 반면에, 본 논문에서 제안하는 계층적 MUSIC 기법의 경우에는 동일한 환경에서 인접한 도래각을 갖는 신호원을 식별할 수 있으며, 전체 SNR 영역에서 기존 기법 대비 우수한 RMSE 성능을 보여준다. 특히, 적은 수의 샘플 환경에서도 SNR이 충분한 경우에는 인접한 도래 각을 갖는 신호원의 방향을 탐지할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 배열안테나 기반 수신기를 이용하여 다수의 인접한 신호원이 방향 탐지를 위한 계층적 MUSIC 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 다음과 같이 분류할 수 있다: 1) 낮은 해상도를 가진 대략적인 DOA 추정 부분 2) 빔 형성을 이용하여 높은 해상도를 갖는 상세 DOA 추정 부분. 제안 기법은 다양한 단계와 해상도를 적용하여 유연하게 개량될 수 있으며, 모의실험을 통해 제안하는 계층적 MUSIC 기법의 다중 신호원 환경에서 도래각 추정 성능이 기존 MUSIC 기법에 비해 월등히 좋아짐을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구 논문은 방위사업청 무기체계 부품 국산화 개발 지원사업 "소형 장형기(LAH)용 통합 위성/관성항법장치(EGI) 장치" (개발관리번호 : C220020)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M. Vaezi et al., "Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: A survey on 5G advances and the road toward 6G," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 2, pp. 1117-1174, 2nd Quart. 2022.
- [2] Y. -S. Lee, J. S. Yeom, and B. C. Jung, "A novel antenna-based GNSS spoofing detection and mitigation technique," *Proc. 2023 IEEE 20th Consum. Commun. Netw. Conf.*, pp. 489-492, Jan. 2023.
- [3] H. Xu, W. Liu, M. Jin, and Y. Tian, "Positioning and contour extraction of autonomous vehicles based on enhanced DOA estimation by large-scale arrays," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11792-11803, Jul. 2023.
- [4] A. Liu, S. Shi, X. Wang "Robust DOA estimation method for underwater acoustic vector sensor array in presence of ambient noise," *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1-14, Jul. 2023.
- [5] P. -C. Chen and P. P. Vaidyanathan, "Distributed algorithms for array signal processing," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 4607-4622, Aug. 2021.