

동시 상관형 위상비교 기법을 통한 신호원 방향 탐지

오민규, 이영석, 정방철
충남대학교

minkyuoh@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Direction Finding of Signal Sources through Simultaneous Correlative Interferometer Techniques

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 배열안테나를 갖는 수신기가 인접 신호원의 방향을 탐지할 때 다수의 수신 샘플을 효율적으로 이용할 수 있는 동시 상관형 위상비교 기법(simultaneous correlative interferometer: SCI)을 제안한다. SCI 기법은 사전에 정의된 기준 함수를 통해 각 샘플에서의 신호 성분을 결합하여 인접 신호원의 방향을 탐지하는 기술로, 모의실험을 통해 제안하는 기법의 방향 탐지 성능을 검증하였다.

I. 서론

실내의 정밀한 측위 서비스는 6G 이동통신의 주요 응용 중 하나로 기대되고 있으며, 이로 인해 효율적인 방향 탐지 기술 개발의 중요성이 크게 증가하고 있다 [1]. 특히, 배열안테나를 이용한 방향 탐지 기술은 높은 탐지 성능을 얻을 수 있어 다양한 응용에서 개발 및 분석되고 있다 [2]. 그 중, 상관형 위상비교(correlative interferometer: CI) 기법은 낮은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)에서 우수한 방향 탐지 성능을 얻을 수 있어 더욱 각광받고 있다 [3]. 그러나, 기존 CI 기법에서는 다중 샘플을 수신하는 환경을 고려할 때 각 샘플에서 수신된 신호를 완전히 이용하여 방향 탐지 성능을 개선한 연구는 아직 수행되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 각 샘플에서의 신호 성분을 결합하여 인접 신호원의 방향을 탐지할 수 있는 동시 상관형 위상비교(simultaneous CI: SCI) 기법을 제안하고, 모의실험을 통해 제안하는 기법의 방향 탐지 성능을 비교 및 검증한다.

II. 다중 샘플을 이용한 배열안테나 기반 SCI 기법

본 논문에서는 배열안테나를 갖는 수신기가 K 개의 인접 신호원의 방향을 탐지하는 환경을 고려한다. 이때 수신기는 각 인접 신호원과 가시선(line-of-sight: LoS) 경로를 확보하는 위치에 존재한다고 가정하였다. 본 논문에서는 반지름이 r 로 고정된 M 소자 균일 원형 배열안테나(uniform circular array antenna: UCA)를 가정하였다. T 개의 샘플에 대해 K 개의 신호원으로부터 입사되는 수신 신호는 $\mathbf{Y}(\in \mathbb{C}^{M \times T}) = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{N}$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 $\mathbf{N}(\in \mathbb{C}^{M \times T})$ 은 T 개의 샘플 동안 수신기에서 발생하는 열잡음 행렬을 나타내며, $\mathbf{A}(\in \mathbb{C}^{M \times K}) = [\mathbf{a}(\phi_1) \cdots \mathbf{a}(\phi_K)]$ 는 행렬 내 각 열이 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 제 신호원에 대한 조향 벡터를 의미하는 조향 행렬을 나타낸다. 이때, k 제 조향 벡터 $\mathbf{a}(\phi_k) \in \mathbb{C}^M$ 의 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 제 원소 $a_m(\phi_k)$ 는 다음과 같다:

$$a_m(\phi_k) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{M}(m-1) - \phi_k\right)},$$

이때 λ 는 파장을 의미하고 ϕ_k 는 k 제 신호원의 도래각을 나타내며, 본 논문에서는 T 샘플 동안 인접 신호원의 방향은 변하지 않는다고 가정하였다. 또한, $\mathbf{X}(\in \mathbb{R}^{K \times T})$ 는 T 샘플 동안 K 개의 인접 신호원으로부터 수신되는 신호의 전력 행렬을 나타낸다 [2].

제안하는 SCI 기법은 각 샘플 동안 수신되는 신호 성분을 완전히 활용하기 위해 다음과 같은 기준 함수 $J(\phi)$ 를 정의한다.

$$J(\phi) = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \cos(\psi_m(\phi) - \hat{\psi}_{m,t}(\phi)),$$

여기서 ψ_m 는 m 제 안테나에서 잡음이 없는 이상적인 위상을 의미하고 $\hat{\psi}_{m,t}$ 는 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 제 샘플의 m 제 안테나에서 잡음을 포함한 실제 수신 신호의 위상을 나타낸다:

$$\psi_m(\phi) = \frac{2\pi r}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{M}(m-1) - \phi\right), \hat{\psi}_{m,t}(\phi) = \psi_m(\phi) + \Delta \hat{\psi}_{m,t}(\phi),$$

여기서, $\Delta \hat{\psi}_{m,t}$ 는 잡음으로 인한 위상 차이를 나타낸다. SCI 기

법은 앞서 정의한 기준 함수의 K 개의 국부적 최댓값에 해당하는 도래각을 찾음으로써 K 개 인접 신호원의 방향 탐지를 수행할 수 있으며 다음과 같이 추정 도래각 집합 Φ 를 정의할 수 있다.

$$\Phi = \left\{ \phi \mid \frac{\partial J(\phi)}{\partial \phi} = 0, \mid \Phi \mid = K \right\}.$$

III. 모의실험 결과 및 결론

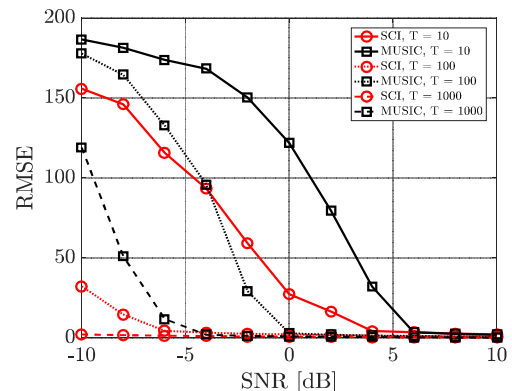


그림 1. 제안하는 SCI 기법의 SNR 대비 RMSE 성능

그림 1은 제안하는 SCI 기법의 SNR 대비 평균 제곱근 오차(root mean squared error: RMSE) 성능을 도시하였다. 본 모의실험은 20° 도래각에 대한 단일 신호원을 가정하였고, 반지름 $r = 0.0972$ 인 7소자 UCA를 고려하였다. 본 논문에서는 제안하는 SCI 기법과 다중 신호 분류(multiple signal classification: MUSIC)알고리즘의 방향 탐지 성능을 비교하였다. SCI 기법은 각각의 샘플에서 기준 CI의 기준 함수를 결합하여 신호 도래각을 추정함으로써 샘플 다이버시티 효과로 인해 모든 SNR에서 MUSIC 기법보다 매우 우수한 성능을 갖는다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2022R111A3073740).

참고 문헌

- [1] A. Behravan *et al.*, "Positioning and sensing in 6G: Gaps, challenges, and opportunities," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 40-48, Mar. 2023.
- [2] 이영석, 이인기, 정방철, "PS-LTE 네트워크에서 신호원 방향탐지 알고리즘의 성능 분석," *한국통신학회 논문지*, vol. 48, no. 5, pp. 539-542, May 2023.
- [3] Z. Memarian and M. Majidi, "Multiple signals direction finding of IoT devices through improved correlative interferometer using directional elements," in *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Cities, Internet Things. Appl.*, Mashhad, Iran, Sept. 2022, pp. 1-6.