

전자기 스펙트럼 분석을 위한 광대역 미상신호 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정

김한빛¹, 박현우¹, 이정란², 지영근², 주형준², 최재각², 박지연², 김기훈², 김선우¹

¹ 한양대학교 융합전자공학과, ² 한화시스템

¹ {dante0813, stark95, remero}@hanyang.ac.kr

² {jrlee, younggun.ji, junie.ju, jaekark.choi, bji0914, kihun19.kim}@hanwha.com

Spectrum Sensing and DoA Estimation of Unknown Wideband Signal for Electromagnetic Spectrum Analysis

Hanvit Kim¹, Hyunwoo Park¹, Jungran Lee², Younggun Ji², Hyungjun Ju², Jaekark Choi², Jiyeon Park², Kihun Kim², and Sunwoo Kim¹

¹ Department of Electronic Engineering, Hanyang University

² Tactical Communication System Team, Hanwha Systems

요약

본 논문은 전장환경의 전자기 스펙트럼 분석을 위하여 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정 기법을 소개하고, 이후 후속 연구 방향을 제시한다. 먼저 multiband joint detection 기법을 통하여 광대역 미상 수신신호의 스펙트럼을 센싱한다. 그리고 MUSIC (multiple signal classification) 기법을 이용하여 탐지한 주파수 대역 별 도래각을 추정한다. 시뮬레이션 결과 적절한 decision threshold값 설정 및 MUSIC을 통하여 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정이 가능함을 확인하였다.

I. 서론

전자기 스펙트럼 분석은 전장환경에서 적군 신호원의 위치 추적, 무인기 탐지, Radar 등의 기술에 적용 가능하다 [1]. 전자기 스펙트럼 분석을 위하여 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정이 필요하나, 협대역 수신신호를 주로 이용한 기존 도래각 추정 연구는 주파수에 따라 달라지는 배열 안테나 원소 간 위상 차이로 인하여 광대역 신호에 적용하기 어렵다 [2]. 따라서 본 연구는 전자기 스펙트럼 분석을 위한 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정 기법을 소개한다.

II. 광대역 미상 수신신호 모델

광대역 미상 수신신호는 ULA (uniform linear array) 배열 안테나를 통하여 수신된다. n 개의 신호원이 존재하는 환경에서 도래각 θ_n , 주파수 f_n 에 대한 ULA 배열 안테나 기반 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta_n, f_n)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{a}(\theta_n, f_n) = \left[1, e^{\frac{j2\pi d \sin(\theta_n)}{\lambda_n}}, \dots, e^{\frac{j(M-1)2\pi d \sin(\theta_n)}{\lambda_n}} \right]^T, \quad (1)$$

여기서 d, M, λ_n 는 각각 안테나 원소 간 간격, 배열 안테나 원소 수, n 번째 신호의 파장을 의미한다. 광대역 미상신호의 조향행렬 \mathbf{A} 는 n 개의 조향벡터를 통하여 정의되며, 이는 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, f_1), \mathbf{a}(\theta_2, f_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_n, f_n)], \quad (2)$$

최종적으로 배열 안테나로 수신된 광대역 미상신호의 신호 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{N}, \quad (3)$$

여기서 \mathbf{x}, \mathbf{N} 은 각각 송신신호, 잡음을 의미한다.

III. 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정

본 연구의 목표는 전장 환경의 전자기 스펙트럼 분석을 위한 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱 및 도래각 추정에 있다. 배열 안테나 원소 간 위상 차이가 균일한 협대역 신호에 비하여, 광대역 신호는 배열 안테나 원소 간 위상 차이가 주파수에 따라 다르다. 따라서 정확한 도래각 추정을 위하여 광대역 미상신호의 주파수 대역을 스펙트럼 센싱을

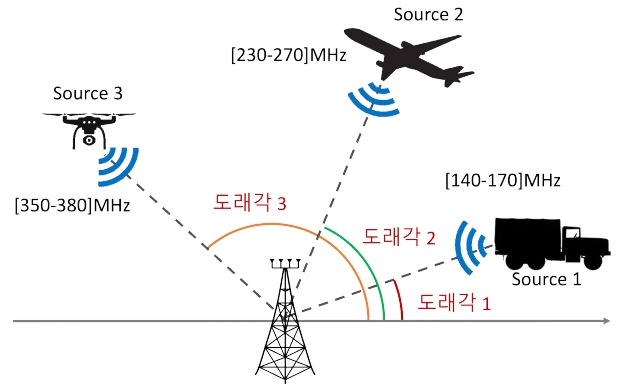


그림 1 배열 안테나 기반 광대역 미상신호 수신 시나리오 모식도 통하여 탐지하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 기존 스펙트럼 센싱 기법 중 대표적인 multiband joint detection 기반 스펙트럼 센싱을 통하여 주파수 대역을 탐지하고, MUSIC 알고리즘을 통하여 도래각을 추정한다.

A. Multiband joint detection 기반 스펙트럼 센싱

Multiband joint detection은 DFT(discrete Fourier transform)를 통하여 광대역 신호를 다수의 협대역으로 분리 후 energy detection 기법을 적용하여 각 주파수 대역 별 신호의 유무를 판단한다 [3]. 각 대역 별 신호 유무 판단을 위한 binary hypotheses는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} H_{0,k} &: \mathbf{Y}_k = \mathbf{N}_k \\ H_{1,k} &: \mathbf{Y}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{N}_k, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{Y}_k, \mathbf{x}_k, \mathbf{A}_k, \mathbf{N}_k$ 는 각각 k 번째 협대역에 해당하는 수신신호, 송신신호, 조향행렬, 잡음을 의미하며, 광대역 수신신호 \mathbf{Y} 는 K 개 협대역 수신신호의 합으로 정의된다. $H_{0,k}, H_{1,k}$ 는 각각 k 번째 대역에 신호가 존재하지 않는 경우, 존재하는 경우를 의미하며, 이는 각 대역 별 에너지와 임의로 설정한 threshold를 비교하여 결정된다. k 번째 대역 수신신호의 에너지 E_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_k = \sum_{n=1}^L |\mathbf{Y}_k(n)|^2, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (5)$$

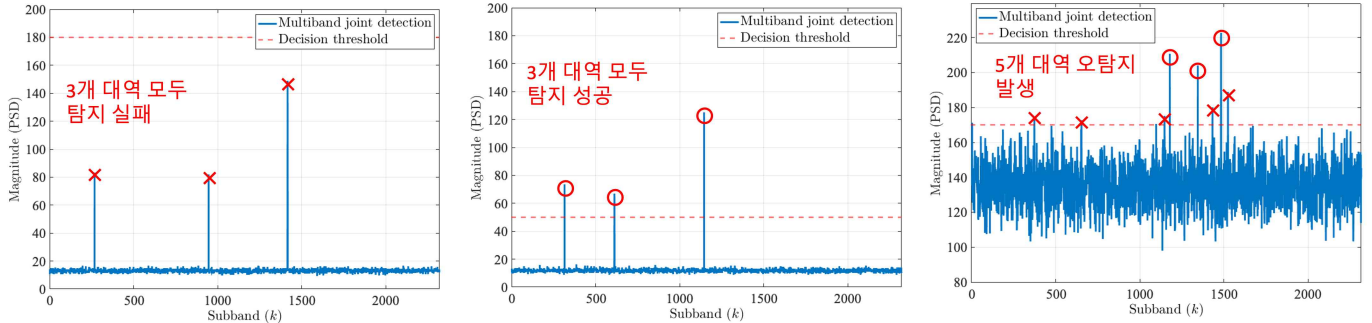


그림 2 Multiband joint detection 기반 스펙트럼 센싱 결과: 미탐지 (좌), 탐지 성공 (중), 오탐지 (우)

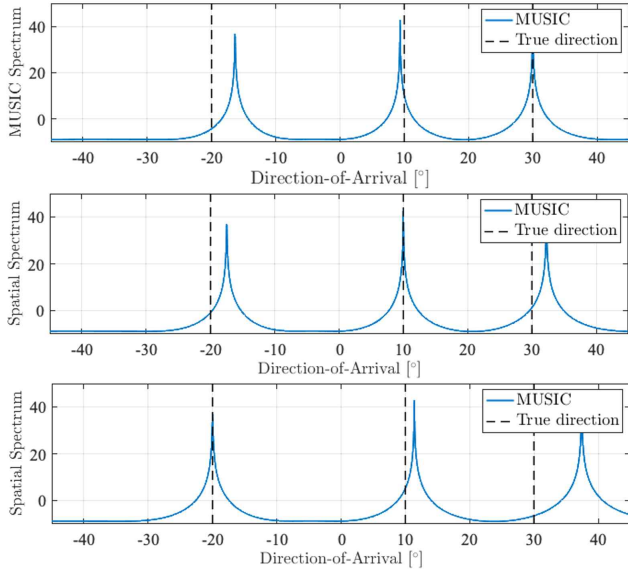


그림 3 3개의 신호원에 대한 MUSIC 기반 광대역 미상신호의 도래각 추정 결과

여기서 L 은 신호 샘플 수를 의미한다. Binary hypotheses에 의하여 k 번째 대역의 신호의 에너지 E_k 와 threshold γ_k 를 비교 후 에너지가 threshold보다 큰 경우 신호가 존재하며, 작은 경우 신호가 존재하지 않는다고 판단한다.

B. MUSIC 기반 도래각 추정

MUSIC은 수신신호의 공분산 행렬을 EVD(eigenvalue decomposition)하여 얻은 잡음의 부공간을 이용하여 도래각을 추정한다 [4]. 광대역 수신신호의 공분산 행렬 \mathbf{R} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{R} \approx \frac{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H}{L}, \quad (6)$$

공분산 행렬 \mathbf{R} 을 EVD하여 얻은 잡음의 부공간을 이용하여 정의된 MUSIC 스펙트럼 $\mathbf{P}(\theta, f)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{P}(\theta, f) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, f)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, f)}, \quad (7)$$

여기서 \mathbf{E}_N 은 잡음의 부공간을 의미한다. 잡음의 부공간은 수신신호의 도래각에 해당하는 조향벡터와 서로 직교하는 특성을 지니며, MUSIC은 이를 이용하여 MUSIC 스펙트럼의 피크값을 계산하여 수신신호의 도래각을 추정한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서 사용된 광대역 수신신호는 FM 변조 기법 기반이며 주파수 범위는 30~76.225 MHz이고 채널 간 간격이 25 kHz이며, 총

2,250개의 채널이 존재한다. 배열 안테나 원소 수 M 은 8이며, 안테나 간 간격은 주파수 범위 최대값인 76.225 MHz의 반파장으로 설정하였다.

그림 2는 multiband joint detection 기반 스펙트럼 센싱 시뮬레이션 결과를 제시한다. 좌측, 중앙 그림은 총 2,250개의 채널 중 3개 대역을 무작위로 할당하였으며 SNR(signal-to-noise ratio)은 10 dB로 설정하였다. 우측 그림은 8개의 대역을 무작위로 할당하였으며 SNR은 0 dB로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 DFT를 통하여 검출된 에너지의 피크값을 threshold 값과 비교함으로써 신호 대역을 탐지 가능함을 확인하였다. 하지만 그림 2의 좌측 그림과 같이 threshold가 높거나, 우측 그림과 같이 SNR 저하로 인하여 신호의 세기가 약한 경우 미탐지 혹은 오탐지가 발생한다. 따라서 DFT로 산출한 스펙트럼의 최대 피크값에 따른 adaptive한 threshold 설정이 필요하다.

그림 3은 MUSIC 기반 도래각 추정 결과를 나타낸다. 3개의 주파수 대역 별 도래각을 $-20^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ 로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 무작위로 설정된 도래각에 해당하는 피크값이 탐지됨을 확인하였다. 또한, 스펙트럼 센싱을 통하여 탐지한 주파수 대역에 해당하는 도래각을 추정하기 위해서는 주파수 filtering 등의 기법을 통하여 추정하고자 하는 대역 이외의 신호 주파수를 억제하는 작업이 선행되어야 함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 전자기 스펙트럼 분석을 위한 광대역 미상신호의 주파수 탐지 및 도래각 추정 기법에 대하여 소개하고, 시뮬레이션을 통하여 결과를 확인하였다. 시뮬레이션 결과 multiband joint detection 기법을 통하여 광대역 미상신호의 스펙트럼 센싱이 가능하고, 이후 MUSIC 알고리즘을 이용하여 주파수 대역 별 도래각 추정이 가능함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Jung Yongseok, Yoon Dongweon, "Electromagnetic Spectrum Operations and Signal Intelligence Strategy," *J.Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, pp. 658-694, Sep. 2022.
- [2] L. Wang, *et al.*, "Novel Wideband DoA Estimation Based on Sparse Bayesian Learning with Dirichlet Process Priors," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.64, no.2, pp. 275-289, Jan. 2016.
- [3] Z. Quan, S. Cui, A. H. Sayed and H. V. Poor "Optimal Multiband Joint Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 3, pp. 1128-1140, Mar. 2009.
- [4] Ralph. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.