

USRP 기반 배열 안테나 테스트베드를 이용한 5.8 GHz 대역 MUSIC 실험

김한빛, 서형욱, 정현진, 방지훈, 최재훈, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

{dante0813, rlrprl, hyeonjingoo, bangjih, choijh, remero}@hanyang.ac.kr

A Demonstration of 5.8 GHz MUSIC using Linear Antenna Array Testbed based on USRP

Hanvit Kim, Hyeongwook Seo, Hyeonjin Chung, Jihoon Bang, Jaehoon Choi, and
Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문은 배열 안테나 신호처리 기법인 MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘을 기반으로한 방향 탐지 실험 결과를 제시한다. 실험을 위해 4개의 안테나로 이루어진 선형 배열 안테나와 송수신용 USRP 2대로 5.8 GHz 방향탐지 테스트베드를 구성하였다. 본 논문에서는 테스트베드를 통해 MUSIC 알고리즘을 직접 구현하고 실제 환경에서의 성능을 분석한다. 거리를 일정하게 유지한 상태로 송신단과 수신단의 위치를 미리 고정시킨 후 GNU Radio를 통해 들어오는 실시간 데이터를 수집한다. 이와 같은 설정을 유지한 채 좌우 폭이 넓은 실내공간, 좌우 폭이 좁은 실내 복도 환경, 실외 공간에서의 실험을 진행한다. 본 논문은 3개의 다른 실험 환경에 따른 MUSIC 알고리즘의 방향 탐지 성능을 분석한다.

I. 서론

방향 탐지는 주로 레이더 군수 통신 등에 주로 사용되며 최근 이동통신에서의 배열 안테나 신호 처리기술이 일반화됨에 따라 방향탐지의 민간 분야 적용 또한 확대되고 있다 [1]. MUSIC (Multiple Signal Classification)은 방향 탐지를 위한 배열 신호 처리 알고리즘으로서 우수한 도래각 추정 성능을 지닌다. MUSIC 알고리즘은 선형 배열 안테나로 입사한 신호의 공분산 행렬을 고유값 분해하여 얻은 수신 신호의 잡음 부분공간을 이용해 도래각을 추정한다 [2, 3]. 본 논문에서는 USRP 기반의 배열 안테나 테스트베드를 이용해 신호의 송신 및 수신 환경을 구현하고 외부 실험 환경의 변화에 따른 MUSIC 알고리즘의 성능을 제시한다.

II. 신호 모델 및 MUSIC 알고리즘

M 개의 안테나로 구성된 선형 배열 안테나로 수신하는 신호 \mathbf{X} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \in \mathbb{C}^{M \times K}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{A} , \mathbf{N} , K 는 각각 조향행렬, 노이즈, 스냅샷 개수를 의미한다. $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{P \times K}$ 는 P 개의 신호원에 대한 신호행렬을 의미한다. 공분산 행렬 \mathbf{R}_X 는 수신 신호를 이용하여 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I}_M \approx \frac{\mathbf{X}\mathbf{X}^H}{K} \in \mathbb{C}^{M \times M}, \quad (2)$$

여기서 \mathbf{R}_s , σ_n^2 는 각각 원신호의 공분산 행렬, 잡음의 분산을 의미한다. $(\cdot)^H$ 는 에르미트 전치, \mathbf{I}_M 는 크기 $M \times M$ 의 단위행렬을 의미한다. MUSIC 알고리즘은 수신 신호의 공분산 행렬을 고유값 분해하여 얻은 잡음의 부분공간을 이용하여 다음과 같이 수신 신호의 공간 스펙트럼 $P_{MU}(\theta)$ 를 산출한다 [2].

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{a}(\theta)$, \mathbf{E}_N 은 도래각 θ 의 조향 벡터와 잡음의 부분 공간을 의미한다. 잡음의 부분공간은 배열로 수신한 신호의 도래각에 해당하는 조향 벡

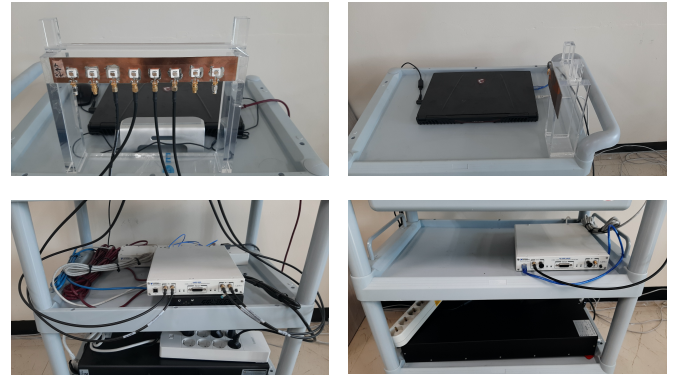


그림 1. 5.8 GHz대역 수신 시스템(좌) 및 송신 시스템(우)

터와 서로 직교하는 특성을 지닌다. 따라서 θ 가 신호의 입사각과 일치할 경우 분모의 값이 0에 수렴하여 공간 스펙트럼의 값이 최대가 된다. MUSIC 알고리즘은 이를 이용해 공간 스펙트럼의 피크값을 계산하여 실제 신호의 도래각을 추정한다.

III. 테스트베드를 이용한 MUSIC 실험 및 결과

실험 시스템은 그림 1과 같이 송수신용 USRP, 수신용 USRP, 4개의 안테나로 이루어진 선형 배열 안테나로 구성된다. 실험 이전에 레퍼런스 신호를 이용하여 각 안테나로 들어오는 신호의 위상 오차를 보정한다. 이후 Linux 기반 플랫폼 GNU Radio를 이용해 그림 2와 같이 MUSIC 알고리즘을

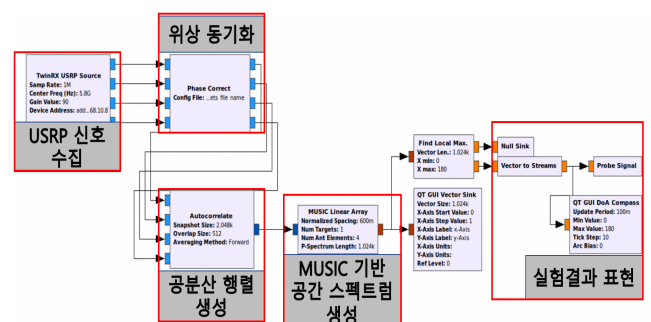


그림 2. MUSIC 알고리즘 GNU Radio 블록도

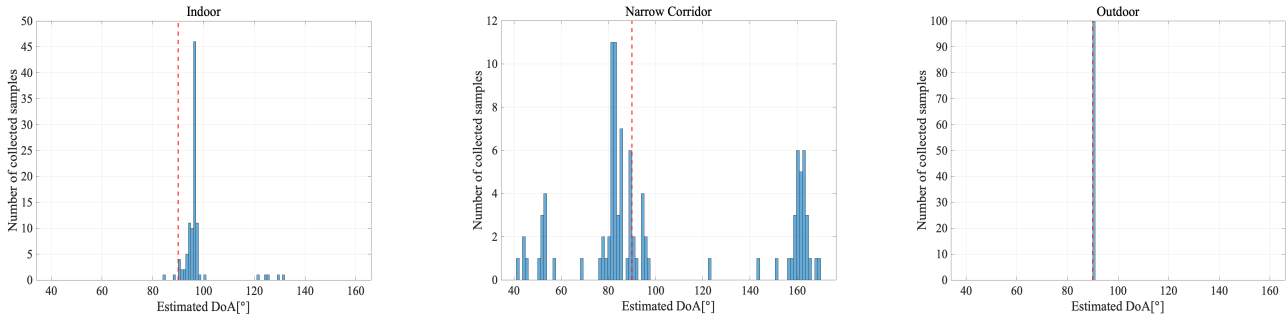


그림 3. MUSIC 기반 도래각 추정 실험 결과 히스토그램

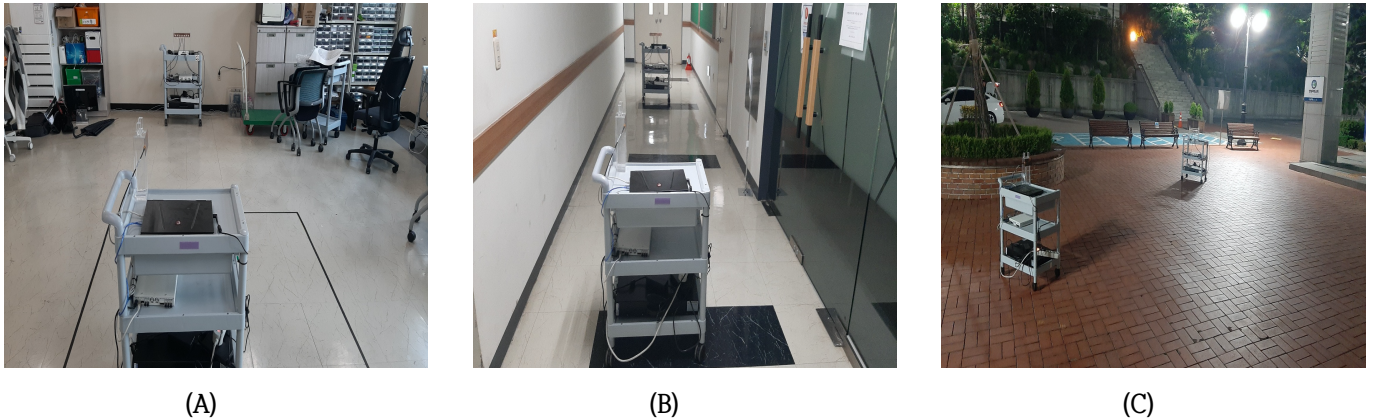


그림 4. (A) 좌우 폭이 넓은 실내 공간, (B) 좌우 폭이 좁은 실내 복도 환경, (C) 실외 공간

표 1. 실험 환경

파라미터	값
중심 주파수	5.8 GHz
P	1
M	4
안테나 간 간격	3 cm
θ	90°

구현한다. 신호원 개수, 주파수 대역 등의 실험 환경은 표 1에 정리하였다. 실험은 장애물이 없는 LOS (Line of sight) 환경의 좌우 폭이 넓은 실내 공간(Indoor), 실외 공간(Outdoor), 좌우 폭이 좁은 실내 복도 환경(Narrow corridor)에서 진행되었다. 수신 신호의 도래각을 90° 로 설정하고 이격거리를 6 m로 유지한 상태에서 도래각을 추정한다.

그림 3은 실제 실험 외부 환경을 나타낸다. 좌우 폭이 넓은 실내 공간과 폭이 좁은 실내 복도 환경의 벽과 벽 사이의 이격거리는 각각 7.8 m, 2.3 m이다. 그림 4는 방향 탐지 실험을 통해 얻은 100개의 실시간 데이터를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 산출한 외부 환경에 따른 각도 추정 RMSE (root mean square error) 값을 표 2에 제시하였다. 실험 결과 실내 환경에서의 도래각은 96° 부근 위주로 추정되었으며, 10° 내외의 추정오차를 갖는 것을 확인하였다. 좌우 폭이 좁은 실내 복도 환경의 경우 90° 와 160° 의 근처 위주로 도래각이 추정되었으며, 42° 내외의 추정 오차를 갖는 부정확한 도래각 추정이 이루어졌다. 실외 환경의 경우 90° 부근 위주로 도래각이 추정되었으며, 추정 오차 또한 1° 이내로 매우 정확한 도래각 추정이 이루어졌다.

IV. 결론

본 논문에서는 MUSIC 알고리즘을 이용한 실내외 공간에서의 방향 탐지

표 2. 실험 환경에 따른 RMSE

실험 환경	RMSE [°]
실내 공간 (Indoor space)	9.7077
비좁은 통로 (Narrow corridor)	42.0115
실외 공간 (Open space)	0.5742

실험 결과를 제시한다. USRP와 선형 배열 안테나를 통해 실험 시스템을 구성하고, 실험 외부 환경에 따른 MUSIC 알고리즘의 성능을 관찰한다. 실험 결과를 통해 실외 환경에서 제일 좋은 도래각 추정 성능을 보이며, 좌우 폭이 넓은 실내 환경에서는 약간의 오차가 존재하였고, 좌우 폭이 좁은 실내 복도 환경의 경우에는 부정확한 도래각 추정이 이루어지는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2021-2017-0-01637)

참고 문헌

- [1] 장병준, "방향탐지기술: 튜토리얼, 최신동향 및 연구전망," *한국전자파학회논문지*, 30(8), pp. 607-618, 2019년 8월.
- [2] Ralph. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [3] Q. Yuan, Q. Chen, and K. Sawaya, "Accurate DoA estimation using array antenna with arbitrary geometry," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 4, pp. 1352-1357, Apr. 2005.