

USRP와 선형 배열 안테나를 이용한 2.4 GHz 대역 S-OMP 기반 도래각 추정 실험

서형욱, 정현진, 박영미*, 김선우

한양대학교, *국방과학연구소

{rlrprl, hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr, *ympark@add.re.kr

A Demonstration of S-OMP based DoA Estimation on 2.4 GHz Band using USRP and Linear Antenna Array

Hyeongwook Seo, Hyeonjin Chung, Youngmi Park*, and Sunwoo Kim

Hanyang Univ., *Agency for Defense Development

요 약

본 논문에서는 압축센싱 기법 중 하나인 S-OMP (simultaneous orthogonal matching pursuit)를 기반으로 2.4 GHz 대역에서 선형 배열 안테나와 USRP (universal software radio peripheral)를 이용하여 실시간 도래각 추정 시스템을 구현하고 실험 결과를 제시한다. 시스템은 4 개의 패치 안테나와 수신용 USRP 2 개, 레퍼런스 신호 송신용 USRP 1 개로 구성된다. 도래각 추정 전 레퍼런스 신호를 이용해 위상 오차를 보정한 후 Linux 환경의 GNU Radio를 이용해 USRP로 들어오는 신호를 수집하고 S-OMP 기반 방향탐지 알고리즘을 통해 신호의 도래각을 추정한다.

I. 서 론

방향탐지는 주로 레이더 군수 통신 등에 주로 사용되며 최근 이동 통신에서의 배열 안테나 사용이 일반화됨에 따라 방향탐지의 민간 분야 적용 또한 확대되고 있다 [1]. 방향탐지 기법 중 대표적으로 압축센싱은 신호의 성긴 (sparse) 성질을 이용하는 기법으로 [2], 현재까지도 압축센싱에 기반한 파생 기법이 연구되고 있다. 본 논문에서는 선형 배열 안테나와 USRP를 이용하여 압축센싱 기법 중 하나인 S-OMP [3] 기반의 방향탐지 알고리즘을 구현하고 실험 결과를 제시한다. 도래각 추정 전 레퍼런스 신호를 이용하여 위상 오차를 보정하고 [4], 이후 S-OMP 기반 도래각 추정 실험을 진행하여 도래각 추정 오차를 확인한다.

II. S-OMP 기반 방향탐지 알고리즘

M 개의 안테나로 구성된 등간격 선형 배열 안테나를 사용할 시 도래각 ϕ 에 대한 조향벡터 $\mathbf{a}(\phi)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\phi) = [1, e^{j(2\pi/\lambda)d\cos\phi}, \dots, e^{j(2\pi/\lambda)d(M-1)\cos\phi}]^T, \quad (1)$$

여기서 λ 는 신호의 파장, d 는 안테나 간의 거리를 의미한다. P 개의 도래각에 대한 조향벡터로 구성된 조향행렬 \mathbf{A} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\phi_1), \mathbf{a}(\phi_2), \dots, \mathbf{a}(\phi_P)] \in C^{M \times P}, \quad (2)$$

여기서 ϕ_p 는 p 번째 신호원의 도래각을 의미한다. 배열로 수신한 신호 \mathbf{Y} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \in C^{M \times K}, \quad (3)$$

여기서 K 는 수신 신호의 스냅샷 개수를 의미한다. $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_P]^T$ 이며 $\mathbf{s}_p \in C^{K \times 1}$ 는 p 번째 신호원의 신호 벡터를 의미한다. \mathbf{N} 은 노이즈이며 \mathbf{N} 의 각 열은 circularly symmetric 복소 정규 분포 $CN(\mathbf{0}_M, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 를 따른다. 여기서 $\mathbf{0}_M$ 은 크기 $M \times 1$ 의 영벡터, \mathbf{I}_M 는 크기 $M \times M$ 의 단위행렬을 의미한다.

S-OMP 기반 방향탐지는 \mathbf{Y} 와 신호원이 존재할 수 있는 모든 방향의 조향벡터로 구성된 디크셔너리 \mathbf{D} 를 필요로 하며 \mathbf{D} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D} = [\mathbf{a}(\tilde{\phi}_1), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_2), \dots, \mathbf{a}(\tilde{\phi}_L)] \in C^{M \times L}, \quad (4)$$

여기서 $l=1,2,\dots,L$ 일 때 $\tilde{\phi}_l = 180l/L^\circ$ 이다. S-OMP 기반 방향탐지 알고리즘은 여러 번의 반복을 거쳐 도래각을 추정한다. 첫 번째 반복에서 \mathbf{D} 를 구성하는 조향벡터 중 \mathbf{Y} 와의 상관도 (correlation)가 가장 높은 조향벡터의 순번을 탐색하며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$c(1) = \underset{l=1,2,\dots,L}{\operatorname{argmax}} \|\mathbf{a}(\tilde{\phi}_l)^H \mathbf{Y}\|_2, \quad (5)$$

여기서 $c(1)$ 는 첫 번째로 탐색한 조향벡터의 순번이며 첫 번째 추정 도래각은 $\tilde{\phi}_{c(1)}$ 이다. $\|(\cdot)\|_2$ 는 열벡터의 l_2 노름을 의미한다. 첫 번째 반복을 마치며 도출되는 잔여행렬 \mathbf{R}_1 는 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{Y} - \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)})\mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)})^\dagger \mathbf{Y}, \quad (6)$$

여기서 \mathbf{X}^\dagger 는 \mathbf{X} 의 의사역행렬을 의미하며 $\mathbf{X}^\dagger = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T$ 이다.

두 번째 반복에서 \mathbf{D} 를 구성하는 조향벡터 중 \mathbf{R}_1 과의 상관도가 가장 높은 조향벡터의 순번 $c(2)$ 를 탐색하여 두 번째 추정 도래각 $\tilde{\phi}_{c(2)}$ 을 찾는다. 이후 행렬 $[\mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)}), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(2)})]$, \mathbf{Y} 를 사용하여 \mathbf{R}_2 를 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{Y} - [\mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)}), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(2)})][\mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)}), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(2)})]^\dagger \mathbf{Y}. \quad (7)$$

세 번째 반복에서는 두 번째 반복과 유사하게 \mathbf{R}_2 을 이용하여 세 번째 추정 도래각 $\tilde{\phi}_{c(3)}$ 을 탐색하고 $[\mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(1)}), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(2)}), \mathbf{a}(\tilde{\phi}_{c(3)})]$ 과 \mathbf{Y} 를 이용하여 \mathbf{R}_3 을 생성한다.

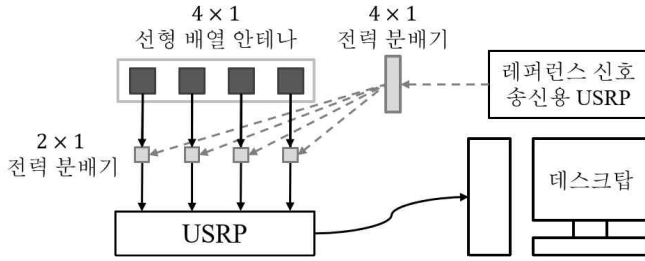


그림 1. 수신단 시스템 구성도



그림 2. 실제 수신단 시스템

만약 p 번째 반복에서의 \mathbf{R}_p 가 $\|\mathbf{R}_p\|_F \ll \epsilon$ 를 만족한다면 반복을 중지한다. 여기서 $\|(\cdot)\|_F$ 은 행렬의 프로베니우스 노름을 의미하며 ϵ 는 사용자가 설정한 역치값이다. 일반적으로 ϵ 는 노이즈의 세기에 비례하도록 설정한다. $\|\mathbf{R}_p\|_F \ll \epsilon$ 를 만족하여 총 p 번의 반복이 수행되고 반복이 중지되었을 때, 총 p 개의 추정 도래각 $\tilde{\phi}_{c(1)}, \tilde{\phi}_{c(2)}, \dots, \tilde{\phi}_{c(p)}$ 이 도출된다.

III. 시스템 구성 및 실험 결과

실험은 그림 1과 같이 4 개의 안테나 요소로 구성된 선형 배열안테나, 수신용 USRP, 위상 오차를 보정하기 위한 레퍼런스 신호 송신용 USRP와 신호 분배기로 구성된다. 레퍼런스 신호 송신용 USRP에서 수신용 USRP에 각 포트에 동일한 레퍼런스 신호를 송신하기 위해 레퍼런스 신호 송신용 USRP와 수신용 USRP를 동일한 길이의 케이블로 유선 연결한다. 수신용 USRP에서 수신한 레퍼런스 신호는 90° 의 도래각으로 들어온 것과 같다고 생각한다. 방향탐지 알고리즘 실행 전 레퍼런스 신호를 수신용 USRP로 전송하여 [4]과 같이 위상오차를 보정한다. 이후 신호원 개수를 아는 상황을 가정하고, S-OMP에서의 반복을 1 회만 실행하여 1 개의 추정 도래각을 도출한다. 이외 주파수 대역, 신호원 개수 등의 실험 환경은 표 1에 정리하였다. 실제 시스템은 그림 2와 같으며 8 개의 패치안테나 중 4 개만 사용하여 실험을 진행한다. Linux 환경의 플랫폼 GNU Radio를 통해 S-OMP 기반 도래각 추정 알고리즘을 구현한다. 알고리즘의 GNU Radio 블록도는 그림 3과 같다.

송신 신호원을 90° 에서부터 60° 까지 10° 단위로 이동시켜가며 방향탐지를 진행하며 수신단과의 거리는 6.8 m 를 유지한다. 표 2는 실제 도래각 변화에 따른 도래각 추정 결과와 추정 오차를 나타낸다. 실험 결과 90° 부근에서 도래각을 정확히 추정하고, 90° 에서 멀어질수록 추정 오차가 커지는 경향을 보인다. 또한 시간이 지남에 따라 위상 오차가 변하면서 도래각 추정 오차가 발생하는 것을 관찰하였다. 이는 주기적으로 레퍼런스 신호를 이용해 위상 오차를 보정해줌으로써 해결 가능할 것으로 예상된다.

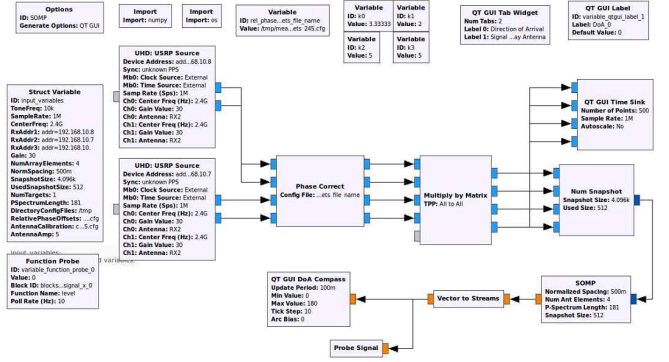


그림 3. S-OMP 기반 도래각 추정의 GNU Radio 블록도

표 2. 실험 환경

파라미터	값
중심 주파수	2.4 GHz
신호원 개수 (P)	1
안테나 개수 (M)	4
안테나 간 간격 (d)	62 mm (2.4 GHz의 반파장)
딕셔너리 크기 (L)	181
스냅샷 개수 (K)	512

표 3. 실험 결과

실제 도래각	추정 도래각	추정 오차
90°	90°	0°
80°	80°	0°
70°	69°	1°
60°	64°	4°

IV. 결론

본 논문에서는 USRP와 선형 배열 안테나를 이용하여 S-OMP 기반 도래각 추정 실험을 진행하고 결과를 제시한다. 도래각 추정 정확도를 높이기 위해 위상 오차를 보상하기 위한 수신단 시스템을 구성하였다. S-OMP 기반 도래각 추정 알고리즘은 Linux 환경의 플랫폼 GNU Radio 상에서 구현하였으며, 레퍼런스 신호를 이용하여 위상 오차를 보상한 이후 도래각 추정 실험을 진행하였다. 실험을 통해 서로 다른 도래각에 따른 S-OMP 기반 도래각 추정 알고리즘의 오차를 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 장병준, "방향탐지기술: 튜토리얼, 최신동향 및 연구전망," *한국전자과학회논문지*, 30(8), pp. 607-618, 2019년 8월.
- [2] D. L. Donoho, "Compress sensing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006.
- [3] J. A. Tropp, "Algorithms for simultaneous sparse approximation. part I: greedy pursuit," *Signal Process.*, vol. 86, no. 3, pp. 572-588, Mar. 2006.
- [4] EttusResearch (2019) gr-doa [Source code]. <https://github.com/EttusResearch/gr-doa>