

UAV 기반 배열 안테나를 이용한 빔형성기의 표적 탐지 성능 분석

김지현, 권순영, 김형남[©]

부산대학교

hnkim@pusan.ac.kr[©]

Analysis on Target-Detection Performance of Beamforming Algorithms using UAV-based Array Antenna

Ji-Hyeon Kim, Soon-Young Kwon, Hyoung-Nam Kim[©]

Pusan National University

요약

UAV 기반 배열 안테나는 특정 운용 목적을 위해 UAV 배치를 자율로 변형할 수 있어 다양한 분야에서 활용이 가능하다. 본 논문에서는 UAV를 이용한 배열 안테나 시스템에서 빔형성을 통한 표적 탐지를 수행할 때, 효과적인 빔형성 알고리즘을 제공하고자 기존의 빔형성 방법을 적용하여 성능 비교를 수행하였다. 관심신호를 추출하고, 간섭 신호 및 잡음을 제거하는 알고리즘으로 널리 사용되는 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response), LCMV(Linearly Constrained Minimum Variance)의 표적 탐지 성능을 비교 및 분석함으로써 두 알고리즘의 성능 차이를 도출한다. 모의실험을 통해 관심신호와 간섭신호 방향에서의 빔형성 이득 차이에서 MVDR 기법이 LCMV보다 관심신호를 얻고 간섭신호를 제거하는 성능이 더 우수함을 확인하였다. 또한 평면 배열보다 원형 배열 안테나 시스템일 때, MVDR과 LCMV의 성능 차이가 더 크게 나타났다.

I. 서론

최근 무인항공기(unmanned aerial vehicles; UAVs)의 활용이 급증함에 따라 다양한 분야에서 무인항공기의 운용 및 적용에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 군사 분야에서는 UAV를 이용한 정찰 및 감시, 전자전, 공격임무 등에 UAV가 주로 사용된다[1-2]. 또한, UAV는 공공 안전 및 IoT(Internet of Things) 시나리오와 같은 다양한 시나리오에서 무선 연결을 가능하게 하는 핵심 역할을 할 수 있다. 이러한 시나리오에서 UAV를 효과적으로 사용하기 위해서는 UAV 배열 신호 처리 기술에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 UAV를 이용한 배열 안테나 시스템에서 빔형성을 통한 표적 탐지 임무를 수행할 때, 더 효과적인 빔형성 알고리즘을 찾고자 한다. 표적 탐지를 위한 빔형성기는 간섭 신호, 잡음 제거 기술로 널리 사용되는 Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)[3], Linearly Constrained Minimum Variance (LCMV) 알고리즘[4]을 사용하며, 모의 실험을 통해 표적 탐지를 위한 두 빔형성 알고리즘의 관심신호 획득 및 간섭신호 제거 성능을 비교 및 분석한다.

II. 본론

1. 신호 모델링

지상의 표적을 탐지하기 위해 M 개의 UAV가 배열 안테나를 형성하고 있는 시스템을 가정하고, 송신기를 사용하여 협대역 신호를 보내고 원거리 표적에 반사되어 각 UAV에 수신된 신호는 다음과 같이 정의할 수 있다[5].

$$\mathbf{x}_m(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}_m, t)\mathbf{s}_m(t) + \bar{\mathbf{n}}_m(t) \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{s}_m(t)$ 는 m 번째 UAV 안테나의 관심신호와 간섭신호가 포함된 수신신호를 말하며, $\bar{\mathbf{n}}_m(t)$ 는 잡음신호를 의미한다. 그리고 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}_m, t)$ 은 θ 에서의 조향 벡터 행렬을 뜻한다.

빔형성의 목적은 관심신호를 얻기 위한 빔형성 벡터 \mathbf{w} 를 구하는 것이며, 이를 이용한 빔형성 출력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y_m(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}_m(t) \quad (2)$$

여기서 H 는 conjugate transpose이며, 적절한 빔형성 벡터 \mathbf{w} 가 얻어지면 관심신호를 추출하고 간섭신호를 제거할 수 있다.

2. 빔형성 알고리즘

1) Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)[4]

MVDR 기법은 관심신호 방향으로 입사하는 신호는 1의 이득을 유지하면서 이외의 간섭신호 및 잡음의 전력을 최소화하는 방법으로서, 원하는 신호의 방향으로 빔을 형성하고, 원하지 않는 신호의 방향으로 널(null)을 형성한다. 식 (3)은 MVDR 빔형성 알고리즘의 빔형성 벡터를 나타낸다.

$$\mathbf{w}_{mvd} = [\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}_I^{-1}\mathbf{a}(\theta)]^{-1}\mathbf{R}_I^{-1}\mathbf{a}(\theta) \quad (3)$$

여기서 \mathbf{R}_I 는 간섭신호와 잡음의 공분산 행렬을 의미한다.

2) Linearly Constrained Minimum Variance (LCMV)[5]

LCMV는 적응 빔형성 알고리즘의 하나로 식 (4)와 같이 선형의 제한조건을 만족하면서 출력의 분산을 최소화하는 방법이다.

$$\min_{\mathbf{w}} \{\mathbf{w}^H \mathbf{S}_I \mathbf{w}\} \text{ s.t } \mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (4)$$
$$\mathbf{w}_{LCMV} = \mathbf{S}_I^{-1} \mathbf{C} [\mathbf{C}^H \mathbf{S}_I^{-1} \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{f}$$

이 때, $\mathbf{S}_I = E[\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H]$ 은 간섭신호 \mathbf{x}_i 의 공분산 행렬, \mathbf{C} 는 특정 방향의 응답을 원하는 값으로 주는 선형 제약 조건 행렬, \mathbf{f} 는 응답벡터이다.

MVDR과 LCMV 알고리즘은 관심신호 방향에서의 빔형성 이득을 높이고, 간섭신호 방향으로의 이득을 최소화하는 공통점을 가지고 있다. 하지만 MVDR은 관심신호의 방향을 알고 이외의 모든 신호의 공분산 행렬을

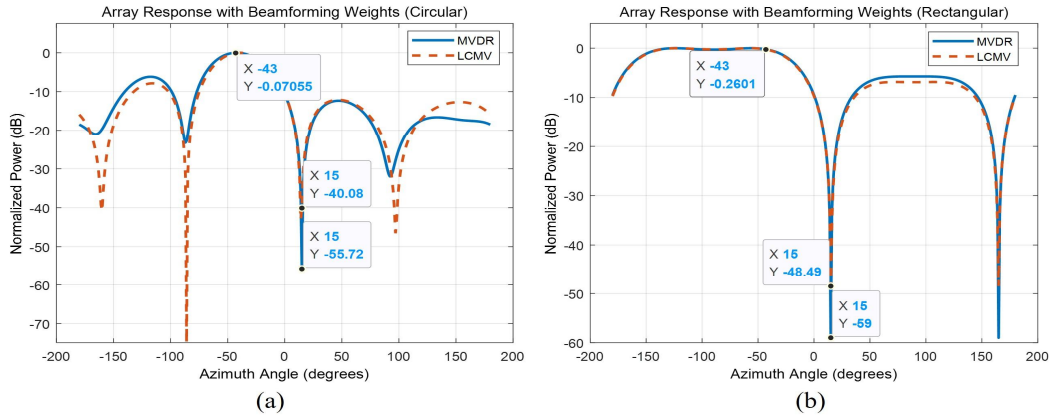


그림 1. MVDR, LCMV 알고리즘의 빔형성 벡터 이득 - (a) 원형 배열 안테나, (b) 평면 배열 안테나.

표 1. 모의실험 환경

| 파라미터 | 값 |
|---------------|----------------|
| 센서 수 | 16 |
| 관심신호 입사각 | (-43°, 10°) |
| 간섭신호 입사각 | (15°, 10°) |
| 신호 대 잡음비(SNR) | -20 dB ~ 20 dB |

이용하여 빔형성 벡터를 구하는 데 비해 LCMV는 관심신호뿐만 아니라 간섭신호에 대한 공분산 행렬이 추가로 필요하다는 차이점이 있다.

III. 모의실험

모의실험에서는 UAV를 이용한 원형, 평면 배열 안테나 시스템에서 MVDR과 LCMV 빔형성 알고리즘의 표적 탐지 성능을 비교 및 분석한다. 모의실험의 환경은 표 1과 같다.

그림 1은 원형, 평면 배열 안테나 시스템에서 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio; SNR) 20dB에서의 MVDR과 LCMV의 빔패턴을 나타낸다. 두 배열 안테나 시스템에서 MVDR, LCMV 알고리즘 모두 관심신호 입사각인 -43°에서 이득이 최대인 것을 확인할 수 있고, 간섭신호 방향인 15°에서 깊은 널(null)을 형성하는 것을 볼 수 있다. 여기서 관심신호와 간섭신호 방향에서의 빔형성 이득 차이는 MVDR은 평균 57 dB, LCMV는 44 dB로 MVDR 알고리즘이 LCMV 알고리즘보다 간섭신호 제거 성능이 더 좋은 것을 알 수 있다. 그림 2는 SNR을 -20 dB부터 20 dB까지 변화시키면서 두 빔형성기의 관심신호와 간섭신호 방향에서의 빔형성 이득 차이를 구해 그래프로 나타내었다. LCMV에 비해 MVDR이 빔형성 이득 차이값이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, 평면 배열보다 원형 배열 안테나 시스템일 때, MVDR과 LCMV의 성능 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

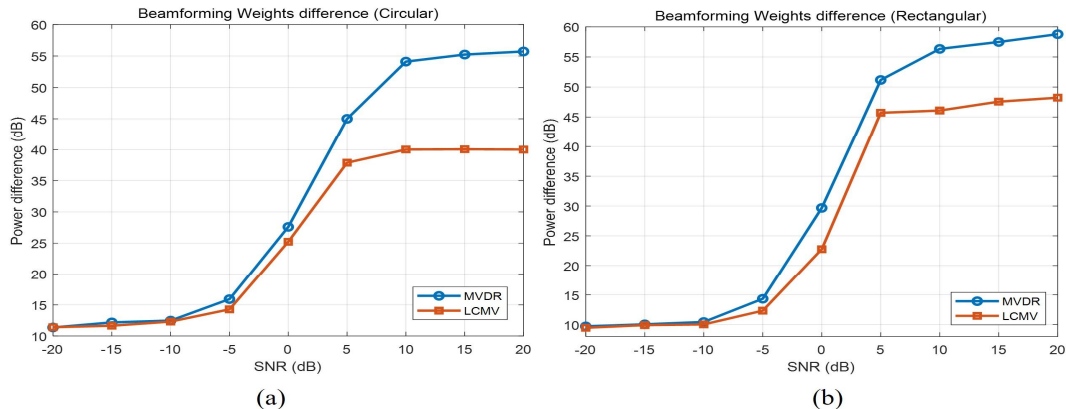


그림 2. MVDR과 LCMV의 빔형성 이득 차이 비교 - (a) 원형 배열 안테나, (b) 평면 배열 안테나.

IV. 결론

본 논문에서는 UAV 배열 안테나 시스템에서 표적 탐지를 위해 MVDR과 LCMV 빔형성 알고리즘의 성능을 비교 및 분석하였다. SNR 환경에 따라서 성능 비교를 했을 때, MVDR 알고리즘이 LCMV보다 더 큰 이득 차이를 보이며, 빔형성 성능이 더 우수함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1F1A1060025).

참고 문헌

- [1] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, June 2016.
- [2] M. Alzenad, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, "3D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements," *IEEE Wireless Communications Letters*, Early access, 2017.
- [3] Y. Wang, L. Huang, and Y. Shi, "Robust widely linear adaptive MVDR beamformer based on interference-plus-noise covariance matrix and steering vector estimation," *Conf. IEEE Signal and Information Processing*, Chengdu, China, July 2015, pp. 726–730.
- [4] 김성민, 황석승, "간섭제거를 위한 TPMS 빔형성기들의 복잡도 비교," *한국전자통신학회논문지*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1327–1335.
- [5] P. S. Bithas, V. Nikolaidis, A. G. Kanatas, G. K. Karagiannidis, "UAVto-Ground Communications: Channel Modeling and UAV Selection," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 68, Issue. 8, Aug. 2020.