

Null 제한조건을 적용한 Worst-case optimization beamformer 의 성능 분석

김지현, 박도현, 김형남
부산대학교 전자공학과

hnkim@pusan.ac.kr

Performance Analysis of Worst-case Optimization Beamformer with Null Constraints

Ji-Hyeon Kim, Do-Hyun Park, Hyoung-Nam Kim
Pusan National University

요 약

적용형 빔 형성 알고리즘인 minimum power distortionless response 는 관심신호의 입사 방향을 정확히 알고 있는 경우 관심신호 추출 및 간섭신호 제거에 우수한 성능을 가진다. 하지만, 조향각 추정 오차가 있을 때 self-nulling 의 문제를 발생시켜 빔형성기의 성능을 크게 저하시킨다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 worst-case optimization beamformer 가 제안되었다. 이는 조향각 추정이 정확하지 않더라도 조향 벡터 오차에 대한 정보를 이용한 제한조건을 통해 성능을 개선한 빔형성 기법이다. 본 논문에서는 간섭신호 제거 성능을 더 향상시키기 위해 기존 worst-case optimization beamformer 에 간섭신호에 대한 정보를 이용한 제한조건을 추가하여 새로운 빔 형성 알고리즘을 제안하고 모의실험을 통해 제안한 알고리즘이 기존의 기법보다 간섭신호 제거에 더 우수한 성능을 가짐을 보인다.

I. 서 론

간섭신호를 제거하기 위한 빔형성 기술은 신호의 개수, 입사각, 반송파 주파수 등의 정보를 이용하여 센서 어레이를 통해 간섭신호를 억제하고 특정 방향의 관심신호를 수신한다^[1]. 그 중 대표적인 minimum power distortionless response (MPDR)는 관심신호 방향으로의 이득을 1 로 제한하면서 어레이 출력 전력을 최소화하여 간섭신호를 제거하고 관심신호를 획득하는 적응 빔형성 기술이다^[2]. MPDR 알고리즘은 관심신호 방향의 조향 벡터를 정확히 알고 있는 경우 간섭신호 제거에 우수한 성능을 가진다. 하지만 조향 벡터 불일치에 매우 민감하기 때문에 조향각의 오차나 불완전하게 교정된 어레이와 같은 결함이 있을 때 성능이 크게 저하되는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위한 접근법으로 diagonal loading (DL)^[3], variable loading (VL)^[4], worst-case optimization beamformer^[5] 등이 제안되었다. Worst-case optimization beamformer 는 볼록 최적화 (convex optimization) 이론을 사용하여 복잡한 설계 문제를, 다루기 쉬운 형태로 변환하고 적절한 수치 기법을 이용해 효율적으로 빔형성 기술의 성능을 개선하였다. 그러나 MPDR 빔형성기와 마찬가지로 worst-case optimization beamformer 는 간섭신호 제거에 대한 제한조건을 가지고 있지 않다. 따라서, 수신되는 간섭신호에 대한 방향 정보를 알 수 있다면 간섭신호 입사각 정보를 활용한 제한조건을 통해 빔형성기의 간섭신호 제거 성능을 더 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 간섭신호의 입사각을 아는 경우에 간섭신호 방향으로 null 을 형성하도록 null 제한조건을 추가한 알고리즘을 제안하고, 모의실험을 통해 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 간섭신호 제거 성능을 비교 및 분석한다.

II. Worst-case optimization beamformer

1. 신호 모델링

M 개의 센서로 구성된 배열 안테나에 수신된 신호 벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{x}(n) = s_{\text{SOI}}(n)\mathbf{a}(\theta_{\text{SOI}}) + s_{\text{int}}(n)\mathbf{a}(\theta_{\text{int}}) + \mathbf{v}(n). \quad (1)$$

여기서 $s_{\text{SOI}}(n)$ 은 입사각 θ_{SOI} 로 입사되는 관심신호, $s_{\text{int}}(n)$ 은 입사각 θ_{int} 로 입사되는 간섭신호이다. $\mathbf{a}(\theta)$ 는 θ 에서의 조향 벡터, $\mathbf{v}(n)$ 은 잡음 신호 벡터를 나타낸다.

빔형성의 목적은 관심신호 $s_{\text{SOI}}(n)$ 을 얻기 위한 빔형성 벡터 \mathbf{w} 를 구하는 것이며, 이를 이용한 빔형성 출력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(n). \quad (2)$$

여기서 H 는 conjugate transpose 이며, 적절한 빔형성 벡터 \mathbf{w} 가 얻어지면 관심신호인 $s_{\text{SOI}}(n)$ 이 추출된다.

2. Worst-case optimization beamformer

MPDR 알고리즘은 관심신호 방향으로의 빔형성 이득에 대한 제한조건이 있기 때문에 조향 벡터를 정확히 알고 있는 경우에는 우수한 성능을 가진다. 하지만, 관심신호 입사각 추정 오차가 존재하는 등의 상황에서 관심신호 방향으로 null 을 형성하는 self-nulling 문제가 그림 1 과 같이 발생한다. 관심신호 입사각이 30°일 때, 빔형성기가 28°를 조향하는 경우 30°에서 null 이 생겨 관심신호를 제거하는 현상을 볼 수 있다.

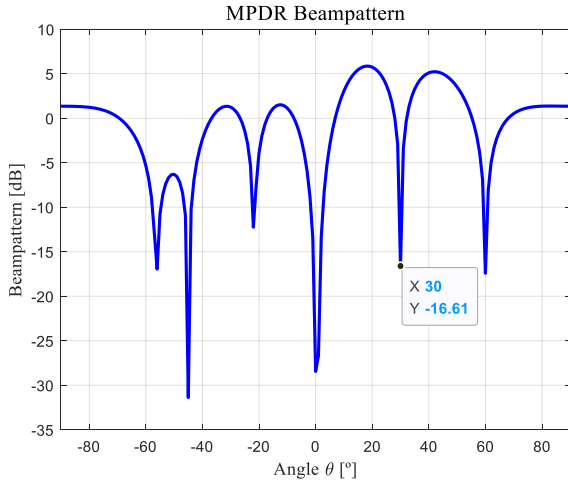


그림 1. MPDR 빔형성기의 self-nulling 현상.

이러한 MPDR 빔형성기가 가지는 문제점을 해결하기 위해 worst-case optimization beamformer 가 제안되었다. 식 (3)과 같이 조향 벡터에 대한 추정 오차가 있을 때, MPDR 알고리즘의 제한조건을 변형하여 성능을 개선한 알고리즘이다. 조향 벡터의 오차 범위 ε 값을 이용해 빔형성 이득 제한조건을 수정하였다. 또한, 상 회전 (phase rotation)을 적용함으로써 어레이 응답 $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)$ 이 실수 성분만 존재한다는 제한조건을 추가하면, 최종적으로 worst-case optimization beam-former 의 최적화 문제는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 볼록 최적화 문제인 second-order cone program (SOCP)으로 쉽게 최적의 가중치 벡터 \mathbf{w} 를 구할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta_{SOI}) = \mathbf{a}(\theta_{SOI}) + \delta, \quad \|\delta\| \leq \varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ & s.t. |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_{SOI})| \geq 1 + \|\mathbf{w}\| \varepsilon \\ & \quad \text{Im}(\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_{SOI})) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

III. 제안 알고리즘

Worst-case optimization beamformer 는 식 (4)와 같이 관심신호 방향의 빔형성 이득에 대한 제한조건을 이용하는 빔형성 기법이다. 수신되는 간섭신호에 대한 방향 정보를 알 수 있다면 간섭신호 방향으로 null 을 가지도록 하여 간섭신호 제거를 더 효과적으로 할 수 있다. 본 장에서는 기존의 알고리즘에 null 제한조건을 추가하여 관심신호 획득 및 간섭신호 제거에 우수한 성능을 가지도록 하는 알고리즘을 제안한다. 간섭신호 방향으로 null 을 가지도록 하는 제한조건은 식 (5)와 같다. 관심신호 방향으로 높은 이득을 가지며, 간섭신호 방향으로 null 을 형성한다면 출력 신호 대 간섭 및 잡음비 (signal to interference and noise ratio; SINR) 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

$$\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i) = 0, \quad i = 1, \dots, M_0 \quad (5)$$

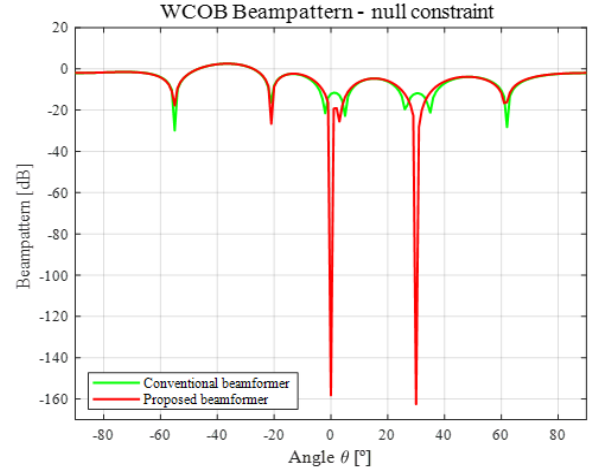


그림 2. 기존 알고리즘과 제안 알고리즘의 빔패턴.

IV. 모의실험

모의실험에서는 기존 worst-case optimization beamformer 와 제안하는 알고리즘의 간섭신호 제거 성능 비교 및 분석을 진행하였다. 모의실험의 환경은 표 1 과 같다.

그림 2 는 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 빔패턴을 나타낸다. 초록색 실선은 기존 worst-case optimization beamformer, 빨간색 실선은 null 제한조건을 추가한 알고리즘의 빔형성 벡터 이득을 의미한다. 간섭신호 방향인 0° , 30° 에서 제안한 알고리즘이 깊은 null 을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3 은 조향각 오차가 $0 \sim 3^\circ$ 로 발생할 때, 식 (6)으로부터 구한 출력 신호 대 간섭 및 잡음비를 비교하였다. 빔형성 벡터의 관심신호 조향각 오차가 커질수록 출력 신호 대 간섭 및 잡음비가 감소하지만, 제안한 알고리즘의 성능이 향상된 것을 알 수 있다. 3° 의 조향각 오차가 발생할 때 두 알고리즘의 성능 차이는 약 7dB 로, 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘보다 관심신호 추출 및 간섭신호 제거에 더 우수한 성능을 가진다.

표 2. 모의실험 환경.

파라미터	값
센서수	8
신호수	3
신호대 잡음비(SNR)	30 dB
관심신호 입사각	-45°
간섭신호 입사각	$0^\circ, 30^\circ$
관심신호 조향각 오차	$0 \sim 3^\circ$

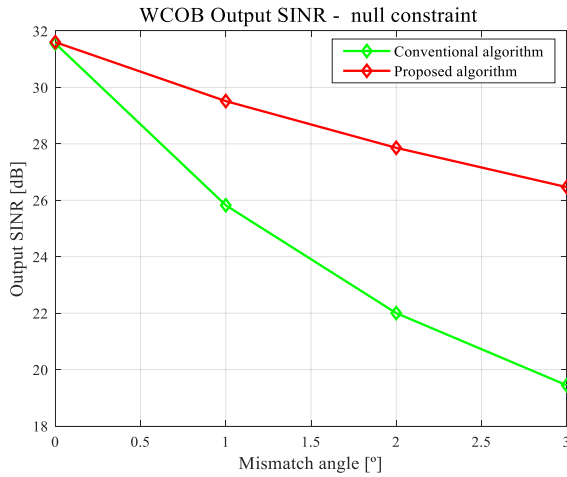


그림 3. 기존 알고리즘과 제안 알고리즘의 출력 SINR.

V. 결론

MPDR 빔형성 알고리즘의 단점을 개선한 worst-case optimization beamformer 는 조향 벡터의 오차 범위를 정하는 ε 값을 사용하여 효과적으로 빔형성 벡터를 얻는다. 이 때, 간섭신호의 입사각을 아는 경우에 적용할 수 있는 null 제한조건을 추가한 알고리즘을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 null 제한조건을 적용한 알고리즘이 기존 알고리즘보다 간섭신호를 제거하는 성능이 우수함을 확인하였다. 향후에는 최적의 ε 값을 구하는 방법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 최양호, “신호 부공간에 기초한 간단한 적응 어레이 및 성능분석,” *전자공학회 논문지-SP*, 47(6), pp.162-170, Nov, 2010.
- [2] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*. NewYork, USA: Wiley, 2002.
- [3] B. D. Carlson, “Covariance matrix estimation errors and diagonalloading in adaptive arrays,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol.24, pp. 397-401, Jul. 1988.
- [4] Gu, J., and Wolfe, P.J, “On robust Capon beamforming and diagonal loading”, *IEEE Trans. Signal Process*, Vol. 51, No. 2, pp. 1702-1715, 2003.
- [5] E. N Ibrahim, “Robust Adaptive Beamforming Based on Convex Optimization with Variable Diagonal Loading,” *2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, Nov. 2018.