

간섭신호 제거를 위한 빔형성 알고리즘의 성능 분석

(Performance Analysis of Beamforming Algorithms for Interference Cancellation)

이 정 훈, 박 근 호, 김 형 남

(Jung-Hoon Lee, Geun-Ho Park, Hyoung-Nam Kim)

부산대학교 전자공학과

Abstract : A beamformer is a signal processing method for receiving a signal-of-interest based on the antenna array. This paper describes the characteristics of delay-and-sum (DAS), minimum variance distortionless response (MVDR), and minimum power distortionless response (MPDR) beamformers. Through the computer simulations, we derive the beampatterns of these algorithms and compare the performances of their interference cancellation.

Keywords : beamforming, interference cancellation, uniform linear array, delay-and-sum, MVDR, MPDR

I. 서 론

무선 통신 및 안테나에 대한 연구가 지속적으로 진행되면서 배열 안테나를 이용한 빔형성 기술 또한 다방면으로 연구가 진행되고 있다. 빔형성이란 원하는 방향으로 신호를 송·수신하는 데 사용되는 기술로써, 수중 및 전파 환경에서 물체를 탐지하는 소나와 레이더 시스템, 천체물리학 분야와 이동통신 등에서 활용되고 있다. 특히 통신 분야에서는 5G 시대가 도래함에 따라 신호의 에너지 낭비를 줄이고자 원하는 방향으로만 신호를 송·수신하는 빔형성 기술이 더욱 각광받고 있다.

이러한 빔형성은 크게 고정형과 적응형으로 분류된다. 가장 기본적인 빔 형성 방법인 DAS (delay-and-sum)은 고정된 빔 가중치로부터 빔형성을 수행하는 고정형으로 분류되며, MVDR (minimum variance distortionless response)과 MPDR (minimum power distortionless response) 빔형성 알고리즘은 적응적으로 간섭신호를 제거하는 적응형으로 분류된다. 본 논문에서는 균일선형 배열 (uniform linear array, ULA) 구조의 안테나를 이용하여 배열 안테나의 수신 신호를 수학적으로 모델링 및 분석하고 DAS, MVDR,

MPDR의 빔 패턴을 통해 간섭신호 제거 성능을 확인한다.

II. 균일 선형 배열의 수신 신호 모델

ULA는 배열 안테나 구조의 가장 간단한 형태로써, 그림 1과 같이 L 개의 안테나를 동일한 d 의 간격으로 배치한 형태를 말한다. 이때 신호는 원거리장 (far-field) 및 협대역 (narrow band) 신호라고 가정하며 이를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다[1].

$$X(k) = A(\theta)s(k) + N(k), \tag{1}$$
$$k = 0, 1, \dots, K-1.$$

여기서 $X(k)$ 는 수신신호로 $L \times 1$ 벡터이며 L 은 안테나의 개수, K 는 수집 샘플 수이다. $A(\theta)$ 는 조향 벡터 (steering vector)로 $L \times M$ 행렬이고 M 은 신호원의 개수를 의미한다. 조향 벡터를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A(\theta) = [1 e^{-jks\sin\theta} \dots e^{-jk(L-1)ds\sin\theta}]^T. \quad (2)$$

식 (1)에서 $N(k)$ 는 $L \times 1$ 벡터이며, 독립동일분포를 가지고 평균이 0, 공분산 행렬이 $\sigma^2 \mathbf{I}_L$ 인 가우시안 분포를 가지는 잡음을 나타낸다. 빔형성은 수신신호 $X(t)$ 로부터 원하는 신호를 획득하는 것이 그 목적이며, 빔형성 방법은 다음 장에서 구체적으로 설명한다.

III. 빔형성 알고리즘

빔형성 알고리즘은 빔가중치 벡터 \mathbf{w} 가 정해지면 다음 식으로부터 빔출력을 얻을 수 있다.

$$y(k) = \mathbf{w}^H X(k). \quad (3)$$

빔형성 알고리즘은 \mathbf{w} 의 결정방법에 따라 DAS, MVDR, MPDR 등이 존재한다.

1. DAS 빔형성기

DAS 빔형성기 수신된 신호를 일정 시간 지연 시킨 후 합한 것을 빔출력으로 취한다. 이때 신호원이 협대역이라고 가정할 때, 시간 지연은 위상지연으로 표현할 수 있으므로 특정 각도로 들어오는 신호를 수신하기 위한 위상 지연 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{w} = [1 e^{jks\sin\theta_w} \dots e^{jk(L-1)ds\sin\theta_w}]^T. \quad (4)$$

2. MVDR 빔형성기

MVDR 빔형성기는 M 개의 신호원이 존재할 때, 원하는 신호의 방향으로 입사하는 신호는 1의 이득을 유지하면서 이외의 간섭신호 및 잡음의 전력을 최소화하는 방법으로서, 원하는 신호의 전력과 간섭신호 및 잡음의 비, 즉, SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)이 최대가 되도록 한다. W 가 MVDR 빔형성 알고리즘의 빔가중치라고 하면, 다음과 같다.

$$W = \frac{S_I^{-1} A(\theta)}{A^H(\theta) S_I^{-1} A(\theta)} \quad (5)$$

여기서 S_I 는 간섭신호와 잡음의 공분산 행렬을 의미한다.

3. MPDR 빔형성기

실제 신호 수신 환경에서는 간섭신호의 공분산 행렬을 유도하기 매우 어렵기 때문에, MVDR을 구현하는 데에는 큰 문제가 존재한다.

MPDR은 MVDR 알고리즘을 실제 신호 수신 환경에서 활용할 수 있도록 보완한 것으로서, 수신된 신호의 공분산 행렬을 빔가중치 벡터 계산에 사용한다. 수신 신호의 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$R_{XX} = E[X(k)X(k)^H] \quad (6)$$

이때 식 (6)은 시간에 따라 통계적 특성이 변하지 않는다고 가정하면 다음 식으로도 구할 수 있다.

$$R_{XX} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} X(k)X(k)^H \quad (7)$$

따라서 MPDR의 빔가중치는 다음과 같다.

$$W = \frac{R_{XX}^{-1} A(\theta)}{A^H(\theta) R_{XX}^{-1} A(\theta)} \quad (8)$$

IV. 모의실험

그림 1은 식 (4)의 θ_w 를 30도로 설정한 상태에서의 DAS 빔형성기의 빔패턴 결과를 나타낸 것으로서, 지정된 θ_w 방향에 대해서만 1의 이득을 얻고 나머지 방향에 대해서는 신호의 감쇄가 있는 모습을 확인할 수 있다. 만약 표 1의 신호가 각각 -60도, -30도, 30도로 입사한다고 설정하면 DAS 빔형성기에 -60도로 입사하는 신호는 약 -30 dB, -30도로 입사하는 신호는 null에 위치하므로, 입사각 30도로 설정한 음원을 얻을 수 있다.

그림 2는 원하는 방향의 신호가 30도로 입사하고 이외의 간섭신호는 -60도와 -30도로 입사할 때 MVDR 빔형성기의 빔패턴을 나타낸 것으로서, 원하는 신호의 방향 θ (30도) 방향의 이득은 1로 유지하고 간섭신호의 입사각에서 큰 null을 만들어낸다.

그림 3에는 원하는 방향의 신호가 30도로 입사하고 이외의 간섭신호는 -60도와 -30로 입사할 때 MPDR 빔형성기의 빔패턴을 나타내었다. 원하는 신호의 방향 $\theta(30\text{도})$ 의 이득은 1로 유지한 것을 확인할 수 있으며, 간섭신호의 입사각 방향에는 null이 형성된 것을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 ULA 구조의 배열 안테나에서 DAS, MVDR, MPDR 빔형성 알고리즘의 빔패턴으로부터 간섭 신호 제거 성능을 분석하였다. DAS 알고리즘은 협대역 신호에 대해서 단순히 위상 지연만을 통해 구현할 수 있으므로 간단하지만 적응적으로 간섭신호를 제거하는 것은 아니기 때문에 다른 빔형성 알고리즘에 비해 간섭신호 제거 성능의 측면에서는 우수한 성능을 나타내지는 않는 것을 확인하였다. 또한, MVDR은 간섭 신호 및 잡음의 공분산 행렬을 이용하여 원치 않는 방향에 대한 null을 만든다. 하지만, 현실적으로 실현하기 어려운 문제가 존재한다. MPDR은 간섭신호의 공분산 행렬이 아닌 수신 신호의 공분산 행렬을 활용하기 때문에 MVDR에 비해 구현이 쉬운 특징이 있다. 하지만 모의실험을 통해 MPDR은 MVDR에 비해 간섭신호 제거 성능이 상대적으로 떨어지는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] HAMID KRIM, MARS VIBERG, "Two Decades of Array Signal Processing Research", IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, pp.67-71, 1996.
- [2] Livnar Ehrenberg, Sharon Gannot, Amir Leshem, Ephraim Zehavi, "Sensitivity Analysis of MVDR and MPDR Beamformers", IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Isrel, pp.418-419, 2010

표1 모의실험에 활용된 음원 정보

No.	Artist	Title
1	키썸	No Jam
2	버스커버스커	벚꽃엔딩
3	김연자	아모르파티

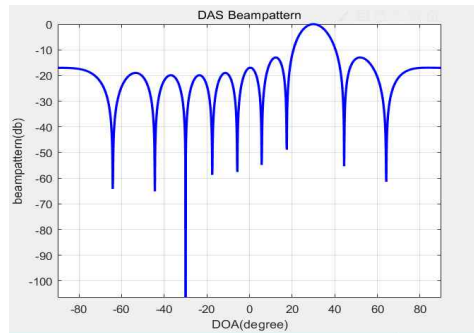


그림 1. DAS 빔패턴
Fig. 1. DAS BeamPattern

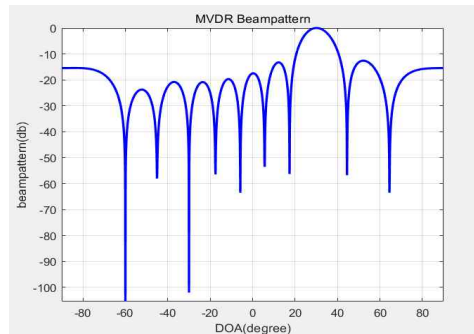


그림 2. MVDR 빔패턴
Fig. 2. MVDR BeamPattern

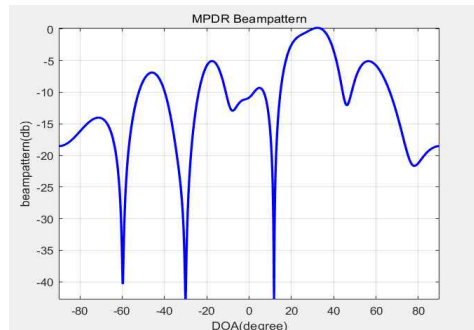


그림 3. MPDR 빔패턴
Fig. 3. MPDR BeamPattern