

# 부대역을 이용한 MVDR 빔형성기의 주파수 분해능 향상 기법

## MVDR Beamformer for High Frequency Resolution Using Subband Decomposition

이 장 식\*, 박 도 현\*\*, 김 정 수\*\*, 이 균 경\*\*  
(Jang-Sik Lee\*, Do-Hyun Park\*\*, Jeong-Soo Kim\*\*, Kyun-Kyung Lee\*\*)

\*두원공과대학 컴퓨터응용제어과, \*\*경북대학교  
(접수일자: 2001년 10월 29일; 채택일자: 2001년 11월 9일)

MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) 빔형성 기법은 간섭신호의 영향을 최소화하는 기법으로서 방위각 분해능은 우수하나, 높은 주파수 분해능을 얻기 위해서는 오랜 시간 동안 관측한 많은 양의 데이터가 필요하다. 짧은 빔출력 시간에 높은 주파수 분해능을 얻기 위해 기존의 STMV (Steered Minimum Variance) 기법에서는 조향 공분산행렬 (steered covariance matrix)을 이용하여 전체 주파수 대역에 대하여 동일한 적응 가중벡터 (adaptive weighting vector)를 사용한다. 본 논문에서는 각 주파수별로 보다 정확한 적응 가중벡터를 얻기 위해 전체 대역을 여러 개의 부대역 (subband)으로 나누고, 각 부대역에 대한 적응 가중벡터를 얻는 SSMV (Subband Steered Minimum Variance) 기법을 제안한다. 연산량과 부대역의 크기를 줄이기 위해 전체배열을 여러 개의 부배열 (subarray)로 나누고, 각 부대역별로 적응 가중벡터를 구한다. 제안한 SSMV 기법의 성능을 확인하기 위해 실제 해상실험 데이터를 이용하여 신호처리를 하였으며, 그 결과 제안한 기법의 우수한 성능을 확인하였다.

**핵심용어:** 적응 빔형성, MVDR, 부배열, 부대역, 선배열소나, 조향 공분산행렬

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

It is well known that the MVDR beamforming outperforms the conventional delay-sum beamformer in the sense of noise rejection and bearing resolution. However, the MVDR method requires long observation time to achieve high frequency resolution. The STMV method uses the steered covariance matrix of sensor data, so it has an ability to form an adaptive weight vector from a single time-series snapshot. But it uses the same weight vector across all frequencies. In this paper, we propose an SSMV method. The basic idea of the SSMV method is to decompose a full frequency band into several subbands to acquire a weight vector for each subband, individually. Also the array may be divided into several subarrays in order to reduce a computational load and the bandwidth of each subband. Simulations using real sea trial data show that the proposed SSMV method has good performance with short observation time.

**Keywords:** Adaptive beamforming, MVDR, Subarray, Subband, Line array sonar, Steered covariance matrix

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5.6)

## I. 서론

지연합 빔형성기 (DSBF: Delay Sum Beamformer)는 높은 신뢰성과 안정성을 갖고 있지만, 고정된 빔패턴 및 넓은 빔폭으로 인하여, 강한 간섭신호가 존재할 경우 성능이 크게 저하된다. 반면 MVDR 기법은 원하는 방향의 이득은 일정하게 유지하면서 빔출력의 에너지를 최소화 시켜, 원하지 않는 방향의 간섭신호의 영향을 최소화하는 적응 빔형성 기법이다. 따라서 MVDR 기법은 DSBF에 비해 우수한 방위각 분해능을 가진다[1-3]. 그러나 MVDR 기법은 협대역 신호처리 기법으로, 광대역 신호를 처리하는 수동 소나의 경우, 적응 가중벡터를 추정하기 위해 처리 대역내의 모든 주파수에 대한 공분산행렬 추정이 필요하다. 이를 위해 많은 데이터 단편 (snapshot) 중에서 동일한 주파수에 해당하는 공분산행렬의 평균값으로 이를 추정하게 된다. 따라서 높은 주파수 분해능을 갖는 빔출력을 얻기 위해서는 각 데이터 단편을 구성하는 데이터의 수가 많아야 하므로 오랜 관측시간이 필요하다[4].

Krolik과 Swingler[5]는 위상지연을 통해 배열 센서의 데이터들을 미리 원하는 방향으로 조향시켜 공분산행렬을 추정하는 STMV 기법을 제안하여 관측시간의 문제점을 해결하고자 하였다. STMV 기법은 전체 주파수 대역에서 조향 공분산행렬을 추정하여 한 개의 적응 가중벡터를 얻는다. 주파수가 다른 여러 개의 간섭신호가 존재하는 경우, STMV 기법의 적응 가중벡터는 전체 주파수 대역에 대해 동일한 값을 가지므로 협대역 빔형성 과정에서 최적의 적응 가중벡터를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 전체 주파수 대역을 여러 개의 부대역으로 나누고, 빔출력을 구하는 SSMV (Subband Steered Minimum Variance) 빔형성 기법을 제안한다. 적은 데이터를 이용하는 경우, 각 부대역 별로 서로 다른 적응 가중벡터를 사용함으로써 STMV 기법에 비하여 간섭신호를 효과적으로 제거할 수 있다. 그리고 전체 배열을 여러 개의 배열로 나눈 부배열 기법을 사용함으로써 각 부대역의 대역폭과 계산량을 줄인다.

본 논문은 I장 서론에 이어, II장에서 MVDR 기법을 소개하고, III장에서 조향 공분산행렬과 부배열 기법을 기반으로 부대역을 이용한 SSMV 기법을 제안한다. IV장에서 해상 실험 데이터로 제안한 기법의 성능을 분석하고, 끝으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. MVDR 빔형성 기법

M개의 센서가 등간격으로 배치된 선형 배열에서 빔형성기의 출력은 식 (1)과 같이 각 센서 출력의 가중합으로 구하여진다.

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{s}(t) \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{w} = [w_1(\theta), w_2(\theta), \dots, w_M(\theta)]^T$ 는 가중 벡터이며,  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_M(t)]^T$ 는 센서 출력 벡터를 나타낸다. 그리고 위첨자 T는 전치를, H는 복소 공액 전치를 나타낸다. 빔형성기의 평균 출력 에너지  $P(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$P(\theta) = E[y(t)y^*(t)] = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2)$$

여기에서 위 첨자 \*는 복소 공액을 뜻하고,

$\mathbf{R} = E[\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)]$ 은 센서 출력의 공분산행렬이며 크기는  $M \times M$ 이다. 지연합 빔형성기는 고정된 빔패턴 및 넓은 빔폭으로 인하여, 조향하지 않은 방향에 강한 간섭신호가 존재할 경우 성능이 크게 저하된다. 간섭신호의 영향을 최소화하기 위해 사용하는 적응 신호처리 기법인 MVDR 기법은 원하는 방향의 이득은 일정하게 유지하면서 빔 출력 에너지를 최소화시키는 적응가중벡터를 사용한다. 이는 식 (3)과 같은 최적화 문제의 해를 구함으로써 얻을 수 있다[1-3].

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad \text{subject to } |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)| = 1 \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{a}(\theta)$ 는 조향 (steering) 벡터를 나타낸다. 위 식 (3)을 만족하는 적응 가중벡터  $\mathbf{w}$  및 MVDR 빔출력 에너지  $P(\theta)$ 는 식 (4), (5)와 같다.

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (4)$$

$$P(\theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

적응 가중벡터  $\mathbf{w}$ 는 센서 데이터의 공분산행렬  $\mathbf{R}$ 과 빔 조향 방향  $\theta$ 의 함수이다. 즉, 조향하는 방향과 센서 출력 신호에 따라 가중벡터가 변하여 간섭신호의 영향을 최소화하도록 빔 패턴이 바뀌게 된다. 따라서 MVDR 빔형성기는 지연합 빔형성기에 비해 간섭신호의 영향이 적고 방위각 해상도 또한 매우 우수하다.

식 (4), (5)는 특정 단일 주파수에 대한 표현식이며, 수동 소나와 같이 표적신호가 여러 주파수를 가지는 경우에

는 표적신호가 존재하는 모든 주파수에 대해 식 (5)의 협대역 빔출력을 구한다. 이를 위해서 일반적으로 센서 출력 벡터를 DFT (Discrete Fourier Transform)하여 주파수영역에서 빔출력을 구한다. 센서 출력 벡터를 DFT하면  $n$ 번째 데이터 단편의  $k$ 번째 Fourier 벡터  $\mathbf{x}_k(n)$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_k(n) = [x_k(1, n), x_k(2, n), \dots, x_k(M, n)]^T \quad (6)$$

여기서 아래첨자  $k$ 는 DFT된 주파수 빈 (bin)의 인덱스이고  $f_k$ 는 다음과 같은 대역내에 존재한다.

$$f_L \leq f_k \leq f_H, \quad k=1, 2, \dots, B \quad (7)$$

여기서  $f_L, f_H$ 는 각각 주파수 대역의 최저 주파수와 최고 주파수이다.  $B$ 는 주파수 대역내의 주파수 빈 수이다. MVDR 기법에서는 주파수  $f_k$ 에 대한 공분산행렬의 추정치를 식 (8)과 같이 구하며, 이를 이용하여 식 (9)와 같이 협대역 빔출력 에너지를 구한다[1,5].

$$\hat{\mathbf{R}}_{MVDR}(f_k) = \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_k(n) \mathbf{x}_k^H(n) \quad (8)$$

$$P_{MVDR}(\theta, f_k) = [\mathbf{a}_k^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{MVDR}^{-1}(f_k) \mathbf{a}_k(\theta)]^{-1} \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{a}_k(\theta)$ 는 주파수  $f_k$ 에서의 조향벡터,  $N$ 은 데이터의 단편수를 나타낸다.

광대역 빔출력 에너지는 대역내의 모든 협대역 빔출력 에너지를 합하여 식 (10)과 같이 구한다.

$$P_{MVDR}(\theta) = \sum_{k=1}^B P_{MVDR}(\theta, f_k) \quad (10)$$

그림 1은 공분산행렬  $\hat{\mathbf{R}}_{MVDR}(f_k)$ 를 추정하는 과정을 나타낸 그림이다. 그림에서  $K$ 는 각 단편 안에 속해 있는 데이터 수를 나타낸다. 식 (9)에서  $\hat{\mathbf{R}}_{MVDR}(f_k)$ 의 역행렬 연산이 필요하므로, 식 (8)의 데이터 단편수  $N$ 은 센서 개수  $M$ 보다 충분히 커야 하며, 많은 단편수를 얻기 위해서는 긴 관측시간이 요구된다. 또한 협대역 주파수 탐지를 위해서는 높은 주파수 분해능이 필요하며, 이를 위해 각 단편에 포함된 데이터 수  $K$ 가 많아야 하므로 긴 관측시간이 필요하다.

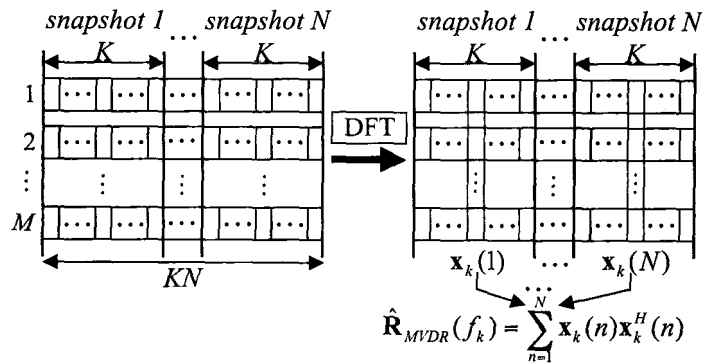


그림 1. MVDR의 공분산행렬  
Fig. 1. Covariance matrix of MVDR.

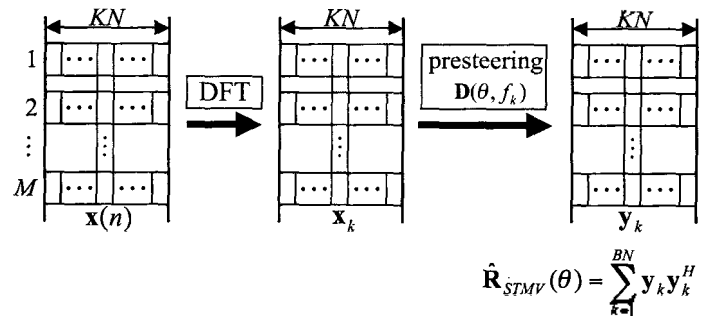


그림 2. STMV의 조향 공분산행렬  
Fig. 2. Steered covariance matrix of STMV.

### III. 주파수 분해능 향상을 위한 SSMV 기법

#### 3.1. 조향 공분산행렬을 이용한 STMV 기법

센서 데이터에 위상지연을 주어 미리 원하는 방향으로 조향시킨 후 조향 공분산행렬을 추정함으로써, 공분산행렬 계산시 긴 관측시간의 문제점을 해결할 수 있다[4]. MVDR 기법에서는 N개의 K-DFT 데이터를 사용하여 공분산행렬을 추정한다. STMV 기법에서는 1개의 KN-DFT 데이터를 이용한다. 푸리에 벡터  $\mathbf{x}_k$ 에 위상 지연 행렬  $\mathbf{D}(\theta, f_k)$ 를 곱하여 식 (11)과 같이 조향된 벡터  $\mathbf{y}_k$ 를 얻을 수 있다[4,5].

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}(\theta, f_k) \mathbf{x}_k \quad (11)$$

여기서,  $\mathbf{D}(\theta, f_k) = \text{diag}(D_1, D_2, \dots, D_M)$ 로 정의되며  $\text{diag}(\cdot)$ 는 대각행렬을 나타내고,  $D_m = \exp(-j2\pi f_k d(m-1)\sin\theta)$ 는 각 센서별 위상 지연을 나타낸다. 그리고  $d$ 는 센서간격,  $c$ 는 음속,  $m = 1, 2, \dots, M$ 이다. 식 (11)의 조향된 벡터  $\mathbf{y}_k$ 를 이용하여 조향 공분산행렬 추정치를 구하면 식 (12)와 같다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{STMV}(\theta) = \sum_{k=1}^{BN} \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^H \quad (12)$$

이를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 1과 비교하면 STMV 기법은 동일한 시간동안의 데이터를 이용하는 경우 MVDR 기법에 비해 주파수 분해능이 M배 향상된다. 조향 공분산행렬을 이용한 STMV 기법의 적응 가중벡터는 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{w}}_{STMV}(\theta) = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{STMV}^{-1}(\theta) \mathbf{1}_M}{\mathbf{1}_M^H \hat{\mathbf{R}}_{STMV}^{-1}(\theta) \mathbf{1}_M} \quad (13)$$

여기서,  $\mathbf{1}_M = [1, 1, \dots, 1, 1]^T_{1 \times M}$ 로 정의된다. 방위각  $\theta$ 에 대해 얻어진 식 (13)의 적응 가중벡터  $\hat{\mathbf{w}}_{STMV}(\theta)$ 를 전체 주파수 대역에 동일하게 적용하면,  $\theta$  방향으로 조향한 협대역 에너지는 식 (14)와 같다[4].

$$P_{STMV}(\theta, f_k) = z(\theta, f_k) z^*(\theta, f_k) \quad (14)$$

여기서  $z(\theta, f_k) = \hat{\mathbf{w}}_{STMV}^H(\theta) \mathbf{y}_k$ 이다. 식 (14)로부터 구한  $\theta$ 방향의 협대역 에너지를 이용하면 STMV 기법의 광대역 에너지는 다음과 같다.

$$P_{STMV}(\theta) = \sum_{k=1}^{BN} P_{STMV}(\theta, f_k) \quad (15)$$

#### 3.2. 부배열

M개의 선배열 센서를 이용하여 적응빔을 형성하는 경우, 부배열을 이용하면 공분산행렬의 역행렬을 구하는 과정에서 요구되는 최적화 차원이 M에서 부배열의 개수로 감소하므로 연산량을 줄일 수 있다. 전체 M개 센서로 구성된 선배열을  $N_s$ 개의 부배열로 나눌 수 있으며, 각 부배열은  $M_s$ 개의 센서로 구성된다. 각각의 부배열은 지연 빔형성기의 역할을 하게 되며  $N_s$ 개의 부배열 출력은  $N_s$ 개의 센서 출력으로 생각할 수 있다. 부배열을 구성하는 방법은 SA1, SA2, SA2M으로 크게 3가지 형태로 구분할 수 있다. 표 1은 각 부배열의 구조를 나타낸 것이다. SA2M 구조는 부배열간 센서 중첩이 없고, 구성하는 센서의 수가 달라서 부배열의 빔패턴이 서로 다르므로 가장 좋은 성능을 갖는 것으로 알려져 있다[4]. 부배열을 이용한 경우 각 부배열의 빔 출력은 식 (16)과 같다.

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{S}_N \mathbf{S}^T \mathbf{y}_k \quad (16)$$

여기서  $\mathbf{S}_N = \text{diag}(1/N_1, 1/N_2, \dots, 1/N_{N_s})$ 은 서로 다른 센서수를 가지는 부배열의 빔 출력을 정규화하는 정규화 행렬이고,  $N_i$ 는  $i$ 번째 부배열의 센서수이며,  $i = 1, 2, \dots, N_s$ 이다. 행렬  $\mathbf{S}$ 는  $M \times N_s$ 의 크기이고 "0"과 "1"로 구성되는 부배열 선택행렬이다. 행렬  $\mathbf{S}$ 의 각 열은 한 개

표 1. 각 부배열의 구조 (M=12)  
Table 1. Geometry of each subarray (M=12).

	부배열의 구조	$M_s$
No Subarray ( $N_s=12$ )	●○○○○○○○○○○○○○○○○○○	1
	○●○○○○○○○○○○○○○○○○	1
	○○●○○○○○○○○○○○○○○	⋮
	○○○○○○○○○○○○○○●○	1
SA1 ( $N_s=3$ )	●●●●●●●●○○○○○○○○	10
	○●●●●●●●●●●○○○○	10
	○○●●●●●●●●●●●●	10
SA2 ( $N_s=3$ )	●●●○○○○○○○○○○○○	4
	○○○○○○●●●●●●○○○○	4
	○○○○○○○○○○●●●●●●	4
SA2M ( $N_s=3$ )	●●●○○○○○○○○○○○○	3
	○○○○○○●●●●●●○○○○	5
	○○○○○○○○○○●●●●●●	4

의 부배열을 의미하며 “1”은 한 개의 부배열을 구성할 때 선택된 센서를 나타낸다.

식 (12)의 벡터  $\mathbf{y}_k$  대신에 부배열 빔출력 벡터  $\mathbf{u}_k$ 를 대입하면 부배열을 이용한 조향 공분산행렬을 추정할 수 있다. 이와 같이 부배열을 이용하여 구한 조향 공분산행렬은  $N_a \times N_a$ 로 크기가 감소되어 공분산 행렬의 역행렬 연산시 연산량이 크게 줄어든다.

### 3.3. 부대역을 이용한 SSMV 기법

제안한 기법에서는 전체 주파수 대역을 여러 개의 부대역으로 나누어 각 부대역별 적응 가중벡터를 구함으로써, STMV 기법에서 전 주파수 대역에 대해 동일한 적응 가중벡터를 이용함으로써 인해 간섭신호를 효과적으로 제거하지 못하는 문제점을 개선한다.

전체 주파수 대역을  $N_B$ 개의 부대역으로 나누면  $i$  번째 부대역  $B_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_i : f_L + f_{B,i-1} \leq f_k \leq f_L + f_{B,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (17)$$

여기서  $B_i$ 는 부대역 내에 포함된 주파수 bin수를 나타낸다.

조향 공분산행렬을 추정하기 위해서는 필요한 주파수의 bin수가 적응 자유도보다 충분히 커야 한다. 부배열을 사용하지 않을 경우 적응 자유도는 센서의 수  $M$ 과 같다. 그러나 부배열을 사용함으로써 적응 자유도는 부배열의 수  $N_a$ 와 같아지며, 이는  $M$ 보다 훨씬 적으므로 필요한 주파수의 bin수가 매우 작아진다. 따라서 부배열을 사용함으로써 부대역의 대역폭을 줄일 수 있다.

부배열을 사용한  $i$ 번째 부대역  $B_i$ 에서의 조향 공분산행렬과 적응 가중벡터는 식 (18), (19)와 같이 정의된다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{SSMV}(\theta, i) = \sum_{k \in B_i} \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{w}}_{SSMV}(\theta, i) = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{SSMV}^{-1}(\theta, i) \mathbf{1}_{N_a}}{\mathbf{1}_{N_a}^H \hat{\mathbf{R}}_{SSMV}^{-1}(\theta, i) \mathbf{1}_{N_a}} \quad (19)$$

단,  $\mathbf{1}_{N_a} = [1, 1, \dots, 1]^T_{1 \times N_a}$ 로 정의된다.

식 (18)과 (19)를 이용하는 제안한 SSMV 기법에서 부대역  $B_i$ 에 포함된 주파수  $f_k$ 의 협대역 빔출력 에너지는 식 (20)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{SSMV}(\theta, f_k) = z_u(\theta, f_k) z_u^*(\theta, f_k) \quad (20)$$

여기서  $z_u(\theta, f_k) = \hat{\mathbf{w}}_{SSMV}^H(\theta, i) \mathbf{u}_k$ 이다.

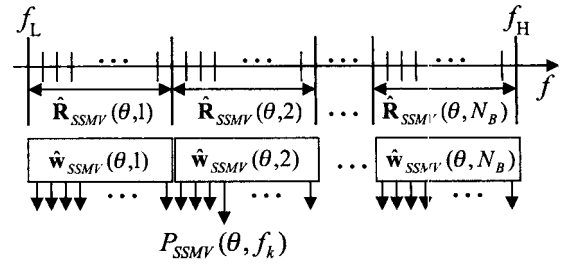


그림 3. 부대역 분할과 가중 벡터  
Fig. 3. Subband decomposition and weighting vector.

식 (20)의 협대역 에너지를 이용하여 광대역 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$P_{SSMV}(\theta) = \sum_{k=1}^{BN} P_{SSMV}(\theta, f_k) \quad (21)$$

제안한 SSMV 기법을 그림 3에 나타내었다.

### 3.4. 제안한 SSMV 기법의 신호처리 과정

광대역의 방위 분해능과 협대역의 주파수 분해능을 높이기 위해, 본 논문에서 제안한 SSMV 기법의 신호처리 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 1단계 배열 센서 신호를 주파수 변환하여 Fourier 벡터  $\mathbf{x}_k$ 를 얻는다 (식 (6)).
- 2단계  $\mathbf{x}_k$ 에 위상지연 행렬  $D(\theta, f_k)$ 를 곱하여 조향된 벡터  $\mathbf{y}_k$ 를 얻는다 (식 (11)).
- 3단계 부배열 구조를 선택하여 벡터  $\mathbf{u}_k$ 를 얻는다 (식 (16)).
- 4단계 주파수 대역을 여러 개의 부대역  $B_i$ 로 나눈다 (식 (17)).
- 5단계 부대역  $B_i$ 별로 조향 공분산행렬  $\hat{\mathbf{R}}_{SSMV}(\theta, i)$ 를 추정한다 (식 (18)).
- 6단계 특정 방향  $\theta$ 에 대한 각 부대역  $B_i$ 의 적응 가중벡터  $\hat{\mathbf{w}}_{SSMV}(\theta, i)$ 를 구한다 (식 (19)).
- 7단계 적응 가중벡터를 이용해서 부대역  $B_i$ 에 속해 있는 주파수  $f_k$ 에 대한 협대역 빔출력 에너지를 구하고 (식 (20)), 방위각  $\theta$ 에 대한 광대역 에너지는 협대역 에너지의 합으로 구한다 (식 (21)).

## IV. 해상 실험 데이터를 이용한 성능 분석

제안된 SSMV 기법의 타당성을 검증하기 위해 선배열

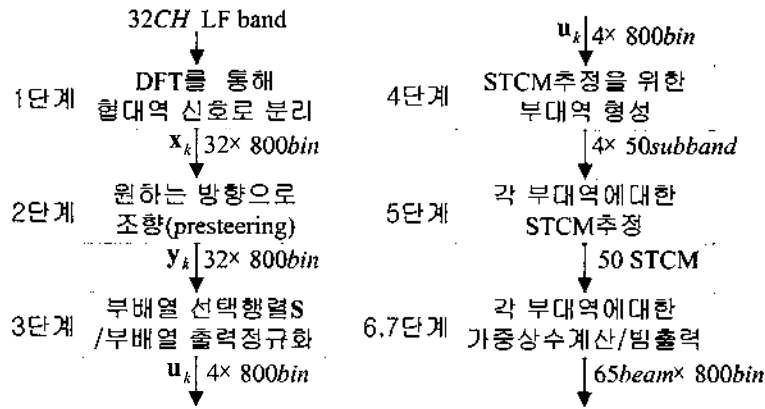


그림 4. SSMV 빔형성기의 신호처리 흐름도  
 Fig. 4. Signal processing flow chart of SSMV beamformer.

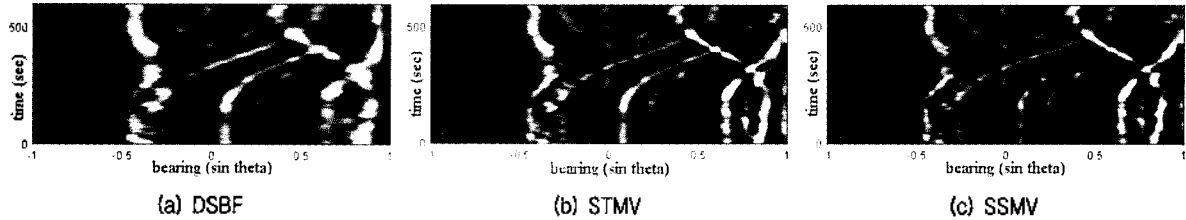


그림 5. 광대역 에너지  
 Fig. 5. Wideband energy.

소나의 해상 실험 데이터를 적용하여 DSBF, STMV 기법과 비교하여 성능을 분석하였다. 선배열소나는 LF 대역의 최고주파수의 반파장 간격으로 32개의 센서를 등간격으로 배치하였고 샘플링 주파수  $f_s$ 는 LF대역 최고주파수의 2.56배로 설정하였다. 협대역 빔출력을 얻기위해 2048 데이터를 DFT하여 얻은 Fourier 벡터를 이용하였다. 그리고 STMV 기법과 SSMV 기법 사용시 부배열수  $N_a$ 는 4개, 각 부배열내의 센서수  $M_a$ 는 각각 19, 5, 11, 7인

SA2M 구조를 사용하였다. SSMV 기법에서 부대역의 수  $N_B$ 는 50개, 각 부대역  $B_i$ 에 속한 주파수 빈수  $B_s$ 는 16개이다. 이는 부배열의 수  $N_a$ 보다 4배 많은 수이다. SSMV 기법의 신호처리 과정을 도표로 요약하면 그림 4와 같다. 그리고 모든 기법에서  $-1 \leq \sin \theta \leq 1$  사이에 65개의 빔을 형성하였다.

그림 5는 DSBF, STMV, 제안한 SSMV 기법의 광대역 에너지를 시간에 따라 나타낸 것이다. 제안한 기법은

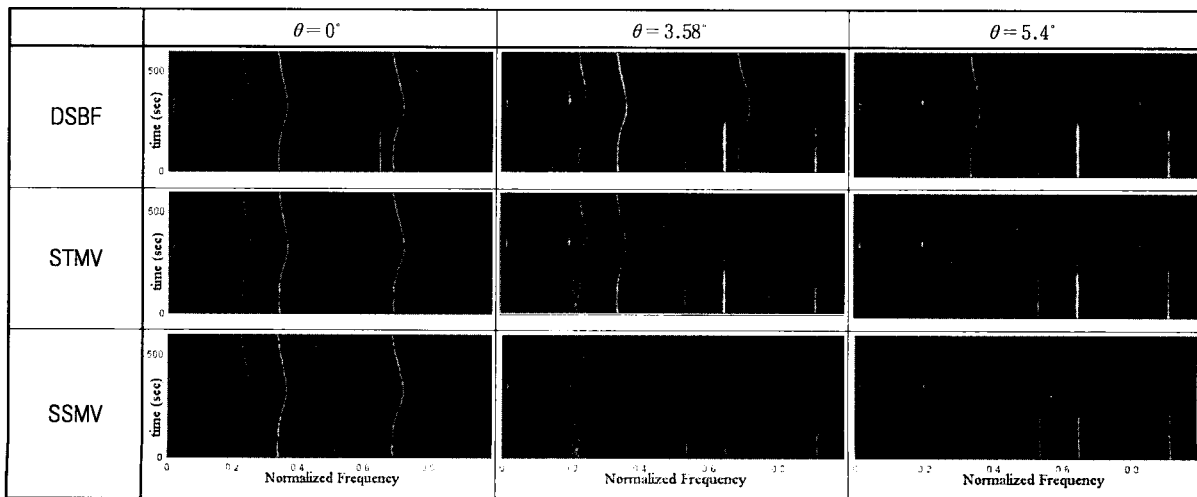


그림 6. 협대역 주파수 스펙트럼  
 Fig. 6. Narrowband frequency spectrum.

STMV 기법과 성능이 유사하며 DSBF 기법보다는 방위 분해능이 우수함을 알 수 있다.

그림 6은 DSBF, STMV 그리고 제안한 SSMV 기법을 사용한 경우  $\theta = 0^\circ, 3.58^\circ, 5.4^\circ$  방위의 정규화된 주파수와 시간에 대한 협대역 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 해상 데이터에는  $\theta = 0^\circ$  방향에 0.35, 0.7의 주파수를 가지는 신호가 존재하며  $\theta = 5.4^\circ$  방향에는 0.65, 0.92의 주파수를 가지는 신호가 250초 동안 존재한다.

$\theta = 0^\circ$  인 빔스펙트럼 중 주파수 0.35, 0.7 부근에서 공통적으로 휘어진 선 모양이 뚜렷하게 보인다. 따라서 이 방향에 주파수가 0.35와 0.7인 강한 신호가 존재함을 알 수 있다. 특히 DSBF 기법은  $\theta = 5.4^\circ$  방향에 존재하는 주파수가 0.65인 간섭신호의 영향을 받는 것을 볼 수 있다.

$\theta = 3.58^\circ$  인 빔스펙트럼에서는, DSBF 기법의 경우  $\theta = 0^\circ$  에 존재하는 주파수가 0.35와 0.7인 신호와  $\theta = 5.4^\circ$  에 존재하는 주파수가 0.65와 0.92인 신호에 의한 영향을 받는다. STMV 기법에서는  $\theta = 0^\circ$  에 존재하는 주파수 0.35와  $\theta = 5.4^\circ$  에 존재하는 주파수가 0.65인 신호에 의해 영향을 받는다. 그러나 제안한 SSMV 기법의 경우 인접 방향에 존재하는 간섭신호의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

$\theta = 5.4^\circ$  인 빔스펙트럼에서는 3가지 기법 모두 주파수가 0.65와 0.92인 신호를 갖는다. 그리고 DSBF 기법의 경우  $\theta = 0^\circ$  에 존재하는 간섭신호의 영향을 받음을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 전체 주파수 대역을 여러 개의 부대역으로 나누고 각 부대역으로부터 구한 적응 가중 벡터를 이용하여 빔 출력에너지를 얻는 SSMV 기법을 제안하였다. 실제 해상 실험 데이터를 이용하여 신호처리를 한 결과, SSMV 기법은 협대역 빔출력에서 기존의 DSBF, STMV 기법에 비해 간섭신호의 영향이 현저하게 줄어드는 것을 확인하였으며, 광대역 빔출력의 경우에도 방위각 분해능이 우수한 STMV 기법과 유사한 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서 제안한 SSMV 기법은 표적의 추적을 위해 짧은 관측시간 동안의 적은 양의 데이터를 이용하여 높은

주파수 분해능과 높은 방위각 분해능을 얻어야 하는 실제 수동 소나 신호처리에 효과적으로 사용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 수중음향 특화센터와 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었습니다.

### 참고 문헌

1. B. C. Kim and I. T. Lu, "High resolution broadband beamforming based on the MVDR method," *Oceans 2000 MTS/IEEE*, vol. 3, pp. 1673-1676, Sep. 2000.
2. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, third-edition, Prentice Hall, 1996.
3. S. U. Pillai, *Array Signal Processing*, Springer-Verlag, New York Inc., 1989.
4. D. N. Swingler, "A low-complexity MVDR beamformer for use with short observation times," *IEEE Trans., Signal Processing*, vol. 47, No. 4, pp. 1154-1160, Apr. 1999.
5. J. Krolik and D. Swingler, "Multiple broadband source location using steered covariance matrices," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 37, pp. 1481-1494, Oct. 1989.

### 저자 약력

● 이 장 식 (Jang-Sik Lee)

현재: 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 교수  
한국음향학회지 제20권 제5호 참조

● 박 도 현 (Do-Hyun Park)

현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료  
한국음향학회지 제20권 제6호 참조

● 김 정 수 (Jeong-Soo Kim)



2000년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)  
2000년 2월~ 현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위추정, 표적탐지 및 추적

● 이 균 경 (Kyun-Kyung Lee)

현재: 경북대학교 전자전기공학부 교수  
한국음향학회지 제17권 제4호 참조