

정합장 기반 표적 위치추정 시 모드공간 분석을 통한 간섭 신호 제거 기법

Matched Field Source Localization and Interference Suppression Using Mode Space Estimation

김 경 섭*, 성 우 제*, 표 상 우**
(Kyungseop Kim*, Woojae Seong*, Sangwoo Pyo**)

*서울대학교 조선해양공학과, **리얼웹
(접수일자: 2007년 10월 2일; 채택일자: 2007년 11월 26일)

천해 영역에서 선박과 같은 수상 소음원의 간섭 신호는 정합장처리를 이용한 수중 표적 탐지 및 위치추정 기법 적용에 있어 문제점으로 남아있다. 정지 음원의 경우 수신기공간의 음장에 대한 고유벡터분해를 통해 각 음원 성분을 분리하고 간섭 신호 성분을 제거할 수 있다. 하지만 일반적인 이동 음원 환경에서는 각 신호 성분의 에너지가 수신 음장의 부분공간에 퍼지게 되므로, 고유값 분포 비교만으로 각 신호 성분을 구별하기 어렵게 되거나 하나의 고유벡터에 각 신호 성분이 섞이는 경우도 발생한다. 본 논문에서는 수상 음원과 수중 음원 신호의 물리적 특성 차이를 이용한 모드공간 간섭 신호 제거 기법을 제안하였다. 이 기법은 모드-공분산행렬에 대한 고유벡터분해를 통해 간섭 신호 성분을 판별하며, 이 성분들을 부분공간에서 제거함으로써 차폐되었던 표적 신호를 복원하고 위치추정을 가능하게 한다. 이를 모의실험을 통해 확인하고 결과에 대해 논의하였다.

핵심어: 정합장처리, 모드공간, 소음원 제거, 고유벡터분해

투고분야: 수중음향 분야 (5.5)

Weak target detection and localization in the presence of loud surface ship noise is a critical problem for matched field processing (MFP) in shallow water. For stationary sources, each signal component of received signal can be separated and interference can be suppressed using eigen space analysis schemes. However, source motion, in realistic cases, causes spreading of signal energies in their subspace. In this case, eigenvalues of target and interfere signal components are mixed and hard to be separated with usual phone space eigenvector decomposition (EVD) approaches. Our technique is based on mode space and utilizes the difference in their physical characteristics of surface and submerged sources. Performing EVD for modal cross spectral density matrix, interference components in the mode amplitude subspace can be classified and eliminated. This technique is demonstrated with synthetic data, and results are discussed.

Key words: Matched-field processing, matched mode, interference suppression, eigenvector decomposition

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.5)

I. 서론

수동 소나를 이용한 표적의 탐지 및 위치추정 시 일반적으로 소음원의 간섭 신호가 있을 경우 그 성능이 크게 저하될 수 있다. 특히 해상 교통량이 많은 천해 영역에

서는 수상 선박과 같은 강한 소음원에 의해 수중 표적의 약한 신호가 차폐되는 경우가 많으며, 이 때 표적 신호와 간섭 신호를 분리하지 않는 한 표적의 탐지나 위치추정이 어렵게 된다. 본 논문에서는 천해에서의 음원 탐지 및 인자 추정을 위한 방법으로 널리 연구되어 온 정합장처리 (MFP, matched field processing) 기법의 적용에 있어 수상 소음원의 간섭 신호가 있을 때 이를 제거할 수 있는 방안에 대해 검토하였다.

일반적인 다중 음원 환경에서 표적 신호를 처리하기 위한 주요 방법은 크게 모델기반 방법과 데이터기반 방법으로 나눌 수 있다. 모델기반 방법에는 적응 프로세서에 기반한 영 확장 (null-broadening) 기법 [1-3], 소음원을 억제하며 표적 주위에 대한 공간 필터 (spatial filter)를 구성하는 기법 [4-7], 클린 (CLEAN) 알고리즘을 이용한 기법 [7-9] 등이 대표적인데, 이들 대부분은 소음원 위치에 대한 사전 정보를 바탕으로 하거나 반복적인 탐색 및 추정 과정을 거쳐야 한다. 반면 데이터기반 방법은 수신 음장을 분석하여 표적 및 간섭 음원 신호 성분을 구별해내고 처리하는 기법 [10-12]이다. 통상적인 데이터기반 방법은 주로 수신 신호 벡터의 공분산 행렬 (CSDM, cross spectral density matrix)에 대한 고유벡터분해 (EVD, eigenvector decomposition)를 이용한다. 이 때 간섭 신호의 크기가 표적 신호의 크기에 비해 지배적이라는 가정을 하면, 수신 신호의 부분공간 (subspace)에서 간섭 신호의 계수 (rank)를 추정하고 그에 해당하는 큰 고유벡터를 제거함으로써 간섭 신호의 영향을 억제할 수 있다. 하지만 실제 해양 환경에서는 각 음원이 이동할 뿐만 아니라 신호 레벨 또한 시변동성을 가지는 경우가 많기 때문에 이러한 가정이 항상 성립하지는 않는다. 정지 음원의 경우 간섭 신호와 표적 신호가 비직교성 (nonorthogonal)이라 하더라도 신호 레벨이 차이가 난다면 각 성분을 분리하기가 비교적 용이하나, 음원이 이동할 경우에는 각 신호의 에너지가 부분공간에 퍼지게 되고, 신호 레벨의 변동에 따라 표적 및 간섭 신호에 해당하는 고유벡터가 순서대로 배열되지 않거나 각 성분이 섞이는 경우도 발생한다 [12]. 이럴 경우 통상적인 고유벡터분해 기반 기법으로는 수신 신호에서 간섭 신호 성분을 추출해 내기 어렵게 된다.

데이터기반 방법의 이러한 문제점에 대해 일반적인 수신기공간 (phone-space)이 아닌 모드공간 (mode-space)에서의 접근 방법들이 제시되었는데, 이러한 방법들은 해양 음전달 현상의 물리적 특성을 이용할 수 있다는 이점이 있다. Premus [13]는 해수면 운동 등으로 인해 수중 음원 신호가 수중 음원 신호에 비해 모드 진폭의 시변동성이 크다는 점을 이용하여 통계적 지표를 제시하고 이를 수상/수중 음원 식별에 적용하였다. 한편, Zurk 등 [11]은 적응 프로세서를 위한 계수축소 (rank-reduction) 기법 중 하나로서 수신 음장을 모드공간으로 변환한 뒤 모드-공분산행렬에서 고차 모드 (high-order mode) 부분에 해당하는 열과 행들을 제거하는 방식을 사용하였는

데, 일반적인 하향굴절 (downwardrefracting) 수층 음속 구조에서 수상 음원이 상대적으로 고차 모드를 형성한다는 점에서 제안된 기법에 수상 잡음 성분을 억제할 수 있는 부가적 이득이 있다고 언급한 바 있다. 하지만 Zurk 등이 제안한 기법은 모드-공분산행렬의 크기를 줄이는 것을 목적으로 하기 때문에 간섭 신호만을 분리/제거하기 힘들며 잡음이 심해질 경우 간섭 신호 제거 성능이 떨어지는 문제점이 있다. 본 논문에서는 모드-공분산행렬에 대한 고유벡터분해를 통해 수상 음원의 간섭 신호를 제거하는 기법을 제시하고자 한다. 고유벡터분해가 모드공간에서 이루어지기 때문에 수상 및 수중 음원 신호에 해당하는 각 고유벡터가 서로 다른 특성을 보이는데, 이를 이용하여 음원이 이동하거나 신호 레벨이 변하더라도 수상 음원의 간섭 신호를 구별해 내고 제거할 수 있다.

제 2장에서는 수신기공간에서 모드공간 음장으로의 역산과 간섭 신호 제거 기법에 대해 기술하고, 제 3장에서는 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 분석하였다. 마지막으로 제 4장에서 논의 및 결론을 맺는다.

II. 모드공간에서의 간섭 신호 제거

2.1. 모드공간으로의 변환

수신 음장을 모드공간으로 변환하여 처리할 경우 일반 수신기공간에서의 음장 비교 방식에 비해 상대적으로 여러 장점을 가질 수 있으며, 주로 정합모드처리 (MMP, matched mode processing) 기법이나 수신 음장의 차원을 줄이는 데 많이 이용되어왔다. 본 절에서는 논문에서 사용한 모드공간으로의 변환 방법에 대해 간략히 언급하고자 한다.

정상모드 (normal mode) 음전달 이론을 이용할 경우, 깊이 z_s 에 위치한 음원에 대해 거리 r , 깊이 z 에 위치한 수신기에서의 수신 음장은 다음과 같이 모드함수에 대한 전개식으로 표현할 수 있다 (원거리 근사).

$$p(r, z) = \frac{je^{-j\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z)\Psi_m(z_s) \frac{e^{jk_m r}}{\sqrt{k_m r}} \quad (1)$$

여기서, $\rho(z_s)$ 는 음원 깊이에서의 물의 밀도, $\Psi_m(\cdot)$ 는 깊이 방향 모드함수, k_m 은 각 모드 별 수평방향 파수

(horizontal wavenumber), M 은 진행 (propagating) 모드 개수를 나타낸다. 식 (1)을 바탕으로 N 개의 수신기를 가지는 수직선배열 (vertical line array)에 대한 수신 신호 벡터 \mathbf{p} 를 다음과 같이 행렬 형태로 나타낼 수 있다 (수직선배열이 아닌 일반 형태의 배열에 대해서도 변환 가능하나 [14], 본 논문에서는 수직선배열에 대해서만 다루었다.).

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p(r, z_1) \\ \vdots \\ p(r, z_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1(z_1) & \cdots & \Psi_M(z_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_1(z_N) & \cdots & \Psi_M(z_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} = \mathbf{E}\mathbf{a} \quad (2)$$

$$a_m = \frac{je^{-j\pi/4}}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}} \frac{e^{jk_m r}}{\sqrt{k_m r}} \Psi_m(z_s), \quad m=1, \dots, M \quad (3)$$

수신기 공간의 음장으로부터 모드공간으로의 변환은 식 (2)의 음장 \mathbf{p} 에서 모드계수 항 \mathbf{a} 를 역산함으로써 이루어진다. 이 때 해가 유일하기 위해서는 수신기 개수 N 이 진행 모드 개수 M 보다 커야 한다. 역산은 모드함수의 직교성을 이용하는데, 만약 수신기 배열이 수층 전체에 걸쳐있는 수직선배열이고 깊이 방향으로 거의 모든 진행 모드를 추출할 수 있다면, 식 (2)에서 각 모드함수들 (행렬 \mathbf{E} 안의 각 열)이 정규직교기저 (orthonormal basis)를 이루게 되므로 다음과 같이 $\mathbf{H} = \mathbf{E}^H$ 형태의 필터 (sampled mode shape filter)를 이용해 모드계수 항을 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{H}\mathbf{p} = \mathbf{E}^H \mathbf{E}\mathbf{a} \approx \mathbf{a} \quad (4)$$

하지만 현실적으로는 모드 추출에 한계가 있는 부분수직선배열이나 수평선배열 (horizontal line array) 등을 사용하는 경우가 많은데, 이 때에는 역산 문제가 불량조건 (ill-conditioned)이 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 pseudo-inverse, regularized solution (또는 diagonal weighting), maximum a posteriori 기법 등이 알려져 있으며 [15], 본 논문에서는 다음과 같이 정의되는 pseudo-inverse 기법을 이용해 역산을 수행하였다.

$$\mathbf{H} = (\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^H \quad (5)$$

$$(\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} = \sum_{i=1}^K \frac{1}{\kappa_i} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (6)$$

식 (6)에서 κ_i 와 \mathbf{e}_i 는 각각 $\mathbf{E}^H \mathbf{E}$ 의 고유값과 고유벡터를 나타낸다. Pseudo-inverse 기법은 $\mathbf{E}^H \mathbf{E}$ 의 역행렬 계산 시 불량조건으로 인해 발생하는 불안정한 작은 고유값들을 제외하고 나머지 $K(\leq M)$ 개의 고유값만 사용하는데, 본 논문에서는 가장 큰 고유값의 1%에 해당되는 값을 K 설정 기준으로 삼았다. 이러한 특성 때문에 본 pseudo-inverse 기법을 비롯하여 regularized solution 기법 (마찬가지로 불안정한 작은 고유값에 가중치를 더해주는 방식)의 경우 최소값으로 편향된 해 (smallest solution)를 제공한다는 지적이 있으나 [16], 반면 환경 오정합이 있을 때 모드 함수 계산에 포함된 오차의 영향을 줄여준다는 측면도 있다 (모드 역산 기법에 따른 영향과 그에 대한 논의는 참고문헌 [15], [16] 참조).

한편, 실제 수신 음장 모델은 식 (2)에 잡음이 추가된 $\mathbf{p} = \mathbf{E}\mathbf{a} + \mathbf{n}$ 의 형태가 되어야 하므로, 모드 역산 또한 잡음 억제 및 신호의 변동성을 줄이기 위해 다음과 같이 공분산행렬을 기반으로 수행할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{p}} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \mathbf{p}_j \mathbf{p}_j^H \approx \langle \mathbf{p}\mathbf{p}^H \rangle \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{p}}\mathbf{H}^H = (\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^H \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{p}} \mathbf{E} (\mathbf{E}^H \mathbf{E})^{-1} \approx \langle \mathbf{a}\mathbf{a}^H \rangle \quad (8)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle$ 는 신호단편(snapshot)에 대한 평균을 의미하며, $\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{p}}$ 는 수신기공간에서 L 개의 신호단편에 대해 추정된 공분산행렬, $\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{m}}$ 은 모드공간에서의 공분산행렬을 나타낸다. 이들 공분산행렬은 각각 $N \times N$ 과 $M \times M$ 의 행렬 크기를 가진다.

2.2. 모드-부공간에서의 간섭 신호 제거

일반 수신기공간에서 안정된 공분산행렬을 추정하기 위해서는 신호단편을 합하기 위한 일정 시간이 필요한데, 이 시간 동안 음원이 상대적으로 많이 이동할 경우 신호의 에너지는 수신 음장의 부공간에 퍼지게 되며 이는 공분산행렬의 고유값 퍼짐 현상으로 나타난다. 특히 수중 표적에 비해 빠른 속도로 움직이는 수상 간섭 음원이 있을 경우 표적 신호의 고유값들이 간섭 신호의 고유값들 사이에 섞이게 되므로 일반적인 고유벡터분해 기법으로는 간섭 신호 성분을 분리해내기 어렵게 된다. 이런 고유값 퍼짐 현상은 식 (8)의 모드-공분산행렬에서도 마찬가지로 나타나는데, 모드-공분산행렬은 수신기공간 공

분산행렬의 모드공간으로의 사영 (projection)에 해당되므로 두 행렬의 고유값은 같기 때문이다. 하지만 모드공간으로 변환된 고유벡터는 다른 특성을 가진다.

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{M}} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (9)$$

식 (9)와 같이 모드-공분산행렬의 고유벡터분해를 통해 얻어진 고유벡터 \mathbf{v}_i 는 수신 신호에 포함된 모드계수 공

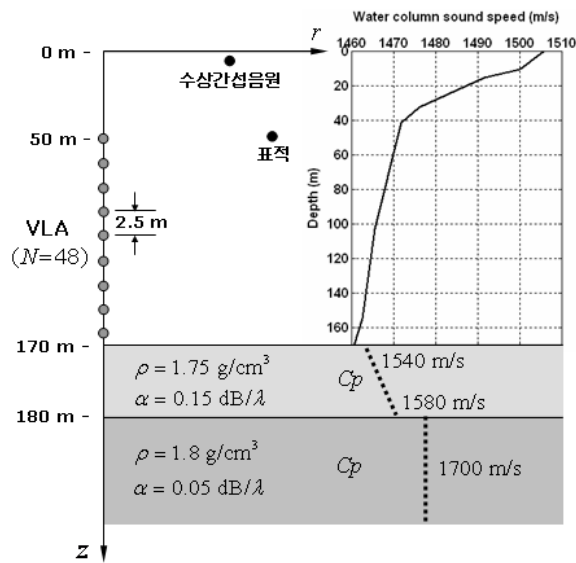


그림 1. 하향굴절 수층 음속 구조를 가지는 천해 환경 모델
Fig. 1. Shallow water environment with downward refracting sound speed profile.

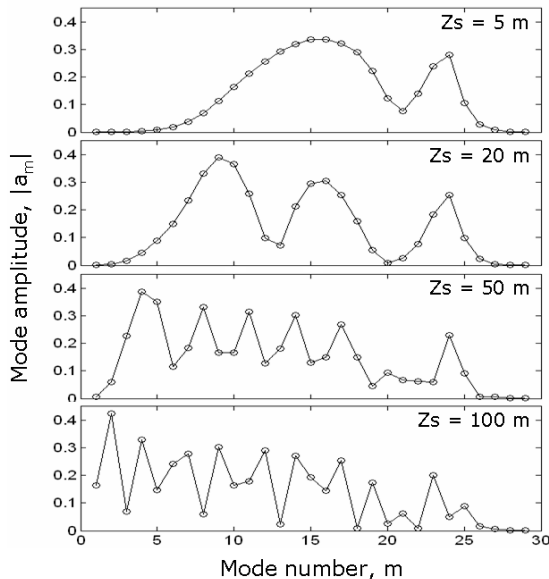


그림 2. 음원 수심에 따른 모드 별 모드계수 크기 분포 (CW, 200 Hz)
Fig. 2. The mode amplitude distribution for varying source depth (CW, 200 Hz).

간의 기저가 된다. 따라서 수층 표적 신호와 수상 간섭 신호의 모드 특성이 다른 점을 이용하면 간섭 신호 성분에 해당하는 고유벡터를 분류하고 제거할 수 있다.

수층 표적 신호와 수상 간섭 신호의 모드 특성은 일반적인 하향굴절의 수층 음속 구조에서 많이 달라진다. 음원이 해수면 근처에 있을 경우 수신 신호는 고차 모드가 중심이 되는데, 이를 확인하기 위해 그림 1과 같이 동해에서 수행된 MAPLE IV 실험 [17] 환경과 유사한 환경 모델을 고려해 보자. 수신기로부터 거리 3 km, 수심 5, 20, 50, 100 m에 각각 음원이 위치할 경우 모드계수 벡터 \mathbf{a} 의 절대값을 그림 2에 비교하였다. 그림 2에서 각 모드 별 모드계수의 크기를 비교해보면 음원이 수중에 위치할 경우 저차 및 고차의 모드들이 다양하게 생성되는 반면, 음원이 수상에 위치할 경우 ($Z_s = 5$ m) 저차 모드에 비해 고차 모드가 지배적인 것을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 다음 식 (10)과 같이 각 고유벡터에 포함된 ‘저차 모드계수와 고차 모드계수의 평균 에너지비’를 나타내는 지표를 정의하고 이를 간섭 신호 성분 추출에 사용하였다.

$$CI_i = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |v_{ij}|^2} / \sqrt{\frac{1}{J'-J} \sum_{j=J+1}^{J'} |v_{ij}|^2} \quad (10)$$

여기서 v_{ij} 는 모드-공분산행렬의 i 번째 고유벡터 \mathbf{v}_i 의 j 번째 원소 (j 번 모드계수)를 나타내며, J 와 J' 는 M 개의 모드 중 저차 모드와 고차 모드의 경계를 나타내는 값이다. 즉, 모드-공분산행렬의 각 고유벡터 마다 지표 CI_i 값을 계산하고, 이 값이 일정 기준치 ($\equiv \gamma$) 이하이면 고차 모드가 지배적인 고유벡터 (즉, 간섭 음원 성분)로 판단하고 이를 제거한다. 모드-공분산행렬에서 간섭 음원 성분을 제거하기 위한 방법은 다음과 같은 사영 방식을 사용하였다.

$$\mathbf{P}_{\perp} = \mathbf{I} - \mathbf{V}\mathbf{V}^H \quad (11)$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_{\mathbf{M}} = \mathbf{P}_{\perp} \hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{M}} \mathbf{P}_{\perp} \quad (12)$$

식 (11)에서 행렬 \mathbf{V} 의 각 열은 CI_i 의 값이 기준치 이하인 고유벡터들로 이루어지며, \mathbf{I} 는 단위행렬을, $\mathbf{v}\mathbf{v}^H$ 는 간섭 신호 공간으로의 사영 행렬을 나타낸다. 따라서 식 (12)의 $\tilde{\mathbf{C}}_{\mathbf{M}}$ 은 간섭 신호 성분이 제거된 모드-공분산행렬

이 되며, 이를 \hat{C}_M 대신 모드정합처리 등에 사용하여 표적에 대한 탐지 및 위치추정을 할 수 있다.

본 논문에서 제시한 이러한 방식은 데이터 기반 적응 기법이지만, 이동 음원 환경에서 간섭 신호의 부분공간을 특정 차원으로 가정하거나 간섭 신호의 에너지가 연속적인 고유벡터 형태로 나타난다는 가정을 하지 않고도 자동화된 형태로 간섭 음원 성분을 분류하고 제거할 수 있다.

III. 모의실험 및 결과 분석

제안한 간섭 신호 제거 기법의 성능 검증을 위해 모의 수치실험을 수행하였다. 실험 환경은 그림 1과 같으며 이동중인 두 개의 수상 간섭 음원과 하나의 수중 표적을 가정하였다. 간섭 음원의 좌표 (거리 km, 수심 m)는 (1.6, 5) 및 (5.0, 7)이고 표적 좌표는 (3.0, 50)으로 설정하였다. 표적의 경우 수심이 깊을수록 간섭 음원과 분리될 수 있으나 (그림 2) 여기서는 비교적 얕은 수심을 설정하였다. 간섭 음원의 이동 속도는 각각 10 m/s와 -6 m/s이며 표적의 경우 상대적으로 느린 -3 m/s의 속도를 가진다. 이동에 의한 도플러 효과는 무시하여 표적 및 간섭 음원 모두 200 Hz의 협대역 연속신호를 가정하였다. 잡음이 심한 환경에서 테스트하기 위해 표적의 입력 신호대잡음비 (SNR, signal-to-noise ratio)는 -6 dB로 하였으며 이 때 간섭 음원은 표적에 비해 각각 20 dB와 10 dB 더 큰 수신 신호 레벨을 가진다. 이와 같은 설정으로 다음과 같이 j 번째 수신 신호단편을 모델링하였다.

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{s}_j^{\text{target}} + \mathbf{s}_j^{\text{interp1}} + \mathbf{s}_j^{\text{interp2}} + \mathbf{n}_j \quad (13)$$

이 때 \mathbf{n}_j 는 공간적 백색 잡음이며, 신호단편 하나 당 1 초를 가정하고 $L = 15$ 개의 신호단편을 이용하여 식 (7)과 같이 공분산행렬을 생성하였다. 이렇게 할 경우 각 신호 성분간의 cross-term이 고려되므로 상관성 (coherence)을 가지도록 모델링할 수 있다. 이 시간 동안 간섭 음원은 150, 90 m를 이동하고 표적은 45 m를 이동하게 된다. 음장 생성을 위한 음전달 모델은 정상모드법 프로그램 중 하나인 ORCA [18]를 사용하였다.

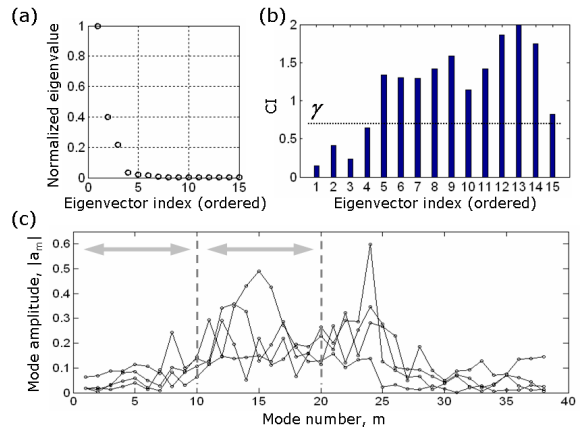


그림 3. 첫번째 모의실험에서 (a) 모드 공분산행렬의 고유값 분포, (b) 각 고유벡터 별 CI_i 값, (c) 제거된 고유벡터들의 절대값(1, 2, 3, 4 번째 고유벡터)

Fig. 3. In the first simulation, (a) the eigenvalue distribution for modal CSDM, (b) the value of CI_i for each eigenvector, (c) the mode amplitude distribution for eliminated eigenvectors (1st, 2nd, 3rd, and 4th eigenvector).

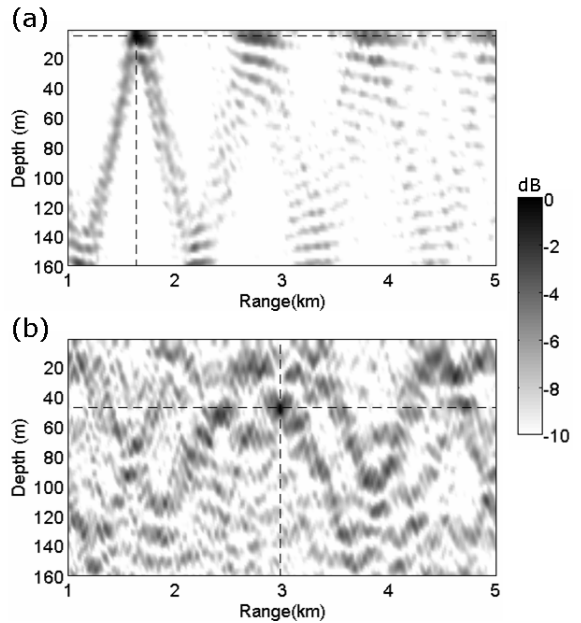


그림 4. 첫번째 모의실험에 대한 음원 위치추정 결과: (a) 간섭 신호 필터링 전, (b) 간섭 신호 필터링 후

Fig. 4. The source localization result in the first simulation: (a) before the filtering, (b) after the filtering.

이와 같은 조건에서 생성된 공분산행렬에 대하여 (a) 필터링 전 모드-공분산행렬의 고유값 분포, (b) 각 고유벡터에 대한 CI_i 값 및 (c) 필터링 된 고유벡터를 그림 3에 같이 나타내었다. 그림 (a)에서 각 음원의 이동으로 인한 고유값 퍼짐 현상을 볼 수 있다. 그림 (b)의 각 고유벡터에 대한 지표 CI_i 의 산출은 20번 모드까지만 고려하여 저차 (1~10번)/고차 (11~20번) 모드계수 값을 비교하였으며, 기준치는 $\gamma = 0.7$ 로 설정하였다 (가로 점선). 즉, 기준치

보다 작은 CI_i 값을 갖는 1~4 번째 고유벡터들은 간섭 신호 성분으로 판단되어 제거되게 된다. 그림 (c)에는 제거된 1~4 번째 고유벡터의 절대값을 나타내었다. 그림 4는 Bartlett 정합모드 프로세서를 사용하여 ‘거라깊이’에 대한 음원 위치추정을 수행한 결과 (AMS, ambiguity surface)이며, (a)는 간섭 신호의 필터링 전, (b)는 필터링 후의 결과를 나타낸다. 각 AMS에서 탐색 격자 간격은 거리 20 m, 깊이 2 m 이고, 첨단 (peak) 값은 0 dB가 되도록 정규화 하였다. 간섭 신호 성분을 제거하지 않은 경우

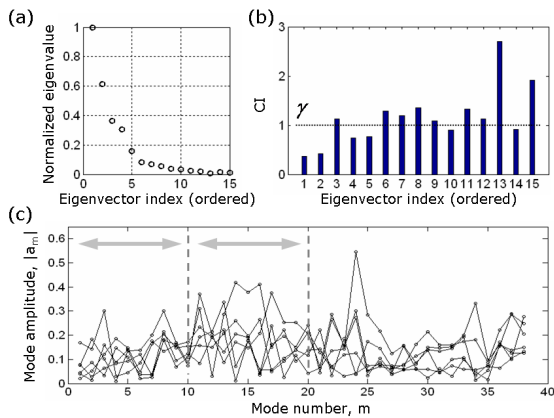


그림 5. 두번째 모의실험에서 (a) 모드 공분산행렬의 고유값 분포, (b) 각 고유벡터 별 CI_i 값, (c) 제거된 고유벡터들의 절대값(1, 2, 4, 5, 10, 14 번째 고유벡터)

Fig. 5. In the second simulation, (a) the eigenvalue distribution for modal CSDM, (b) the value of CI_i for each eigenvector, (c) the mode amplitude distribution for eliminated eigenvectors(1st, 2nd, 4th, 5th, 10th, and 14th eigenvector).

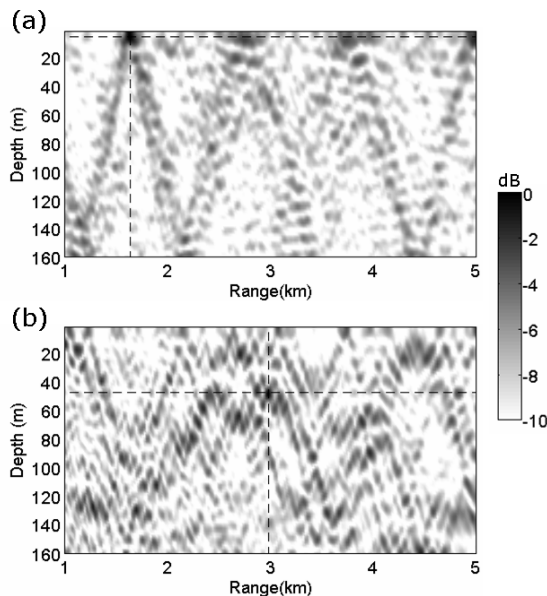


그림 6. 두번째 모의실험에 대한 음원 위치추정 결과: (a) 간섭 신호 필터링 전, (b) 간섭 신호 필터링 후

Fig. 6. The source localization result in the second simulation: (a) before the filtering, (b) after the filtering.

첫번째 간섭 음원 (1.6 km)에 대한 주엽 및 부엽들만 나타나는데, 이는 각 신호 성분 간 상관성이 있는 상태에서 표적 및 두번째 간섭 음원 (5 km)이 가장 강한 신호 레벨을 갖는 첫번째 간섭 음원의 부엽 위치에 있기 때문이다. 하지만 간섭 신호 성분을 제거한 모드-공분산행렬을 사용할 경우 그림 (b)와 같이 표적 위치 탐지가 가능함을 알 수 있다. 기준치 값의 설정 문제와 관련하여, 앞에서와 같이 산출한 CI_i 값에 대해 경험적으로 0.6~1.0 사이의 값을 사용하면 간섭신호 성분이 제거되는 정도의 차이는 있지만 기준치 값에 크게 민감하지 않게 표적의 위치를 성공적으로 추정할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 간섭 신호 제거 방식은 고유벡터분해 기법을 이용하기 때문에 신호들의 레벨 차이가 클수록, 음원 이동 속도 차이가 클수록 각 신호 성분에 해당하는 고유벡터로의 분리가 잘 이루어질 것으로 예상할 수 있다. 그림 5는 첫번째 모의실험과 같은 환경 및 처리 조건에서 각 음원의 신호 레벨 및 이동 속도만 변화시켰을 때의 모드-공분산행렬 특성들을 나타낸다. 표적의 입력 SNR은 -6 dB로 유지한 채 간섭 음원의 신호 레벨을 표적에 비해 각각 5 dB, 3dB 이상이 되도록 낮추었으며, 표적 및 두 간섭 음원의 이동 속도도 각각 -2 m/s와 5 m/s, -1 m/s가 되도록 차이를 줄여 테스트하였다. 그림 (a)를 보면 신호 성분 간 상관성이 높아졌기 때문에 첫번째 모의실험에 비해 고유값 퍼짐 현상이 훨씬 심해진 것을 알 수 있다. 그림 (b)에서는 신호 성분 간 상관성이 높아지면서 간섭 신호 성분과 표적 신호 성분이 순차적으로 나타나지 않음을 확인할 수 있다(표적이 두번째 간섭 음원의 이동 속도보다 빠름). 또한 이런 경우 하나의 고유벡터에 각 성분이 섞여서 나타나는 경우도 늘어나는데 간섭 신호 성분을 되도록 많이 제거하기 위하여 이 모의실험에서는 CI_i 값 기준치를 앞서 보다 높게 $\gamma = 1.0$ 으로 설정하였다. 그림 (c)의 필터링된 고유벡터들 값을 보면 첫번째 모의실험의 경우에 비해 저차 모드의 에너지 분포가 높아진 것을 알 수 있으며 이는 표적 신호 성분이 그만큼 많이 포함되었음을 뜻한다. 그림 6에는 두번째 모의실험에 대한 음원 위치추정 결과를 나타내었다. 그림 (a)의 필터링 전 결과에서는 줄어든 두 간섭 음원의 신호 레벨 차이로 인해 두번째 간섭 음원 위치(5 km)에서도 강한 부엽이 나타남을 볼 수 있다. 그림 (b)의 필터링 후 결과에서는 첫번째 모의실험 결과에 비해 출력신호대배경잡음비 (SBNR, signal-to-background-and-noise ratio)가 낮아졌음을 확인할 수 있는데, 이는 표적 신호 성분의

일부가 간섭 음원 성분과 섞여서 같이 제거되었기 때문이다. 이와 같이 표적과 간섭 음원 신호간 상관성이 높은 경우에는 공분산행렬의 신호대편 수를 늘이거나 여러 주파수 성분을 이용한 광대역처리 등을 통해 신호 성분 간 섞임 현상을 줄일 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 정합장 기반의 음원 탐지 및 위치추정 시 모드공간에서 수상 간섭 신호를 제거하는 방법을 제안하였다. 일반적인 데이터기반 방법과는 달리 모드-공분산행렬에 대한 고유벡터분해를 바탕으로 수상 음원과 수중 음원 신호의 모드 특성 차를 이용함으로써 표적 및 간섭 음원의 이동에 의한 고유값 퍼짐 현상에 상관없이 간섭 신호 성분을 필터링할 수 있었다. 간단한 모의실험을 통해 제시한 기법의 타당성을 확인하였으나, 몇 가지 고려해야 할 부분도 있다. 먼저 고유벡터 판별을 위한 지표 계산 시 사용하는 모드계수 개수 및 기준치의 경우, 본 논문에서는 경험적으로 설정하였으나 추가적인 연구를 통해 주파수나 환경 조건 등의 변화에도 광범위하게 적용 가능한 정식화된 기준 마련이 필요할 것으로 생각된다. 또한 수층 음속 구조와 같은 해양 환경 조건이나 표적 및 간섭 음원의 상태 조건 (신호의 상관도)에 따라 프로세서의 성능이 조금씩 달라질 것이므로, 다양한 모의실험이나 실 해상 자료에 대한 적용 등을 통해 추가적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

1. J. S. Kim, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, and H. C. Song, "Null broadening in a waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.* **112** (1), 189-197, 2002.
2. H. C. Song, W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, P. Gerstoft, and J. S. Kim, "Null broadening with snapshot deficient covariance matrices in passive sonar," *IEEE J. Oceanic Eng.* **28** (2), 250-261, 2003.
3. 박정수, 김재수, 김성일, 신기철, 김영규, "적응 정합장처리에서 도파관 공간간섭 필터링," *한국음향학회지* **23** (4), 288-295, 2004.
4. C. S. MacInnes, "Source localization using subspace estimation and spatial filtering," *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** (2), 488-497, 2004.
5. R. J. Vaccaro, A. Chhetri, and B. F. Harrison, "Matrix filter design for passive sonar interference suppression," *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (6), 3010-3020, 2004.
6. S. A. Stotts, "A robust spatial filtering technique for multisource localization and geoacoustic inversion," *J.*

7. T. B. Neilsen, "Localization of multiple acoustic sources in the shallow ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **118** (5), 2944-2953, 2005.
8. H. C. Song, J. de Rosny, and W. A. Kuperman, "Improvement in matched field processing using the CLEAN algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* **113** (3), 1379-1386, 2003.
9. Z. H. Michalopoulou, "Multiple source localization using a maximum a posteriori Gibbs sampling approach," *J. Acoust. Soc. Am.* **120** (5), 2627-2634, 2006.
10. M. D. Collins, L. T. Fialkowski, W. A. Kuperman, and J. S. Perkins, "The multivalued Bartlett processor and source tracking," *J. Acoust. Soc. Am.* **97** (1), 235-241, 1995.
11. L. M. Zurk, N. Lee, and J. Ward, "Source motion mitigation for adaptive matched field processing," *J. Acoust. Soc. Am.* **113** (5), 2719-2731, 2003.
12. B. F. Harrison, "The eigencomponent association method for adaptive interference suppression," *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (5), Pt. 1, 2122-2128, 2004.
13. V. Premus, "Modal scintillation index: A physics based statistic for acoustic source depth discrimination," *J. Acoust. Soc. Am.* **105** (4), 2170-2180, 1999.
14. T. C. Yang and C. W. Bogart, "Matched mode processing for sparse three dimensional arrays," *J. Acoust. Soc. Am.* **95** (6), 3149-3166, 1994.
15. J. R. Buck, J. C. Preisig, and K. E. Wage, "A unified framework for mode filtering and the maximum a posteriori mode filter," *J. Acoust. Soc. Am.* **103** (4), 1813-1824, 1998.
16. N. E. Collison and S. E. Dosso, "Regularized matched mode processing for source localization," *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (6), 3089-3100, 2000.
17. 김경섭, 이근화, 성우제, 김성일, 김영규, "L 자형 선배열을 이용한 지음향학적 인자 역산 및 음원 위치 추정," *한국음향학회지* **25** (7), 346-355, 2006.
18. E. K. Westwood, *ORCA version 1.0 user's guide*, Applied Research Laboratory (Univ. of Texas, 1998).

저자 약력

• 김 경 섭 (Kyungseop Kim)

2002년: 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
2002년~현재: 서울대학교 대학원 조선해양공학과 석·박사 통합과정
※ 주관심 분야: 배열 신호처리, 정합장처리, 지음향역산

• 성 우 제 (Woojae Seong)

1982년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
1990년: M.I.T. 해양공학과 (박사)
1991년: M.I.T. Post-doctoral Associate
1992년~1996년: 인하대학교 선박해양공학과 조교수
1996년~현재: 서울대학교 조선해양공학과 부교수
※ 주관심 분야: 음전달 모델링, 지음향역산, 정합장처리, AUV

• 표 상 우 (Sangwoo Pyo)

1986년: 서울대학교 조선공학과 (학사)
1988년: 서울대학교 조선공학과 (석사)
1995년: M.I.T. 해양공학과 (박사)
1997년: 텍사스대학 연구원
1997년~2003년: 서울대학교 공과대학 연구원 및 연구교수
2001년~현재: (주)리얼웹 상무이사
※ 주관심 분야: 프로펠러 설계, 캐비테이션 소음