

잔향 환경을 위한 기저집단 빔공간 비음수 행렬 분해 기반의 협대역 지속파 능동 소나 표적 탐지 기법

Target detection method of the narrow-band continuous-wave active sonar based on basis-group beamspace-domain nonnegative matrix factorization for a reverberant environment

이석진[†]

(Seokjin Lee^{1†})

¹경북대학교 전자공학부

(Received January 25, 2019; revised February 20, 2019; accepted May 20, 2019)

초 록: 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 수중에서 협대역 지속파 능동 소나를 이용하여 표적 반향음을 탐지하는 문제를 다루고 있다. 능동 소나에서 표적 탐지를 위해 방사한 핑 신호는 주변의 많은 산란체에 의해 반사되는 신호를 만들어내며, 이를 잔향이라 한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 잔향 환경에서 낮은 도플러의 표적 반향음을 탐지하는 것을 목표로 한다. 제안하는 알고리즘은 빔공간 다채널 비음수 행렬 분해 기법을 기반으로 하여 방위, 주파수, 시간 기저를 추정하며, 특히 기저를 두 개의 기저집단-잔향음 기저집단과 반향음 기저집단으로 나누어 독립적으로 추정한다. 제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 합성된 잔향 신호를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 시뮬레이션 결과 제안하는 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 능동 소나, 목표물 탐지, 잔향, 지속파, 다채널 비음수 행렬 분해

ABSTRACT: The proposed algorithm deals with a detection problem of target echo for narrow-band continuous-wave active sonar in the underwater environment in this paper. In the active sonar systems, ping signal emitted for target detection produces a signal that consists of multiple reflections by many scatterers around, which is called reverberation. The proposed algorithm aims to detect the low-Doppler target echo in the reverberant environment. The proposed algorithm estimates the bearing, frequency, and temporal bases based on beamspace-domain multichannel nonnegative matrix factorization. In particular, the bases are divided into two basis groups - the reverberation group and the echo group, then the basis groups are estimated independently. In order to evaluate the proposed algorithm, a simulation with synthesized reverberation was performed. The results show that the proposed algorithm has enhanced performance than the conventional algorithms.

Keywords: Active sonar, Target detection, Reverberation, Continuous-wave, Multichannel nonnegative matrix factorization

PACS numbers: 43.60.Hj, 43.30.Vh

I. 서 론

수중에서 표적을 탐지하는 주요 방법으로 소나 시

스템에서 음파를 방사한 후 표적에 반사된 음파를 수신하는 방법을 사용하며, 이러한 시스템을 능동 소나 시스템이라고 한다. 능동 소나 시스템은 표적 탐지를 위해 음파를 방사하기 때문에 표적의 방위와 거리를 탐지하기에 적합하지만, 방사하는 음파가 주변의 산란체에 반사되어 발생하는 잔향이 표적의 탐지를 방해하는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제를

[†]Corresponding author: Seokjin Lee (sjlee6@knu.ac.kr)
School of Electronics Engineering, Kyungpook National University,
80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea
(Tel: 82-53-950-5523, Fax: 82-53-950-5505)

개선하기 위한 연구들이 진행된 바 있다.

소나에서 탐지를 위해 일반적으로 사용되는 빔형성기를 통해 잔향 성분을 다소 제거할 수 있다.^[1] 그러나 표적 반사음의 도플러 주파수 이동이 작을 경우, 빔형성기의 주엽 혹은 부엽에 해당하는 잔향 성분은 여전히 표적의 탐지를 방해하게 된다.^[2] 특히 지속파(continuous wave) 펄스를 사용하여 표적을 탐지할 때 잔향에 의한 열화가 크게 일어나게 되므로,^[3] 선형 주파수 변조 펄스 및 기하 빗살 펄스^[4] 등 새로운 송신 파형을 설계하여 표적 탐지에 적용하는 방법 등이 연구된 바 있다. 그러나 선형 주파수 펄스의 경우 도플러 분해능이 저하되는 등^[5] 새롭게 설계된 파형들은 다른 문제점을 가지고 있기 때문에 지속파 펄스 및 이를 변형한 펄스를 사용하는 시스템에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다.^[6]

따라서 지속파를 사용하는 능동 소나 시스템에서 신호처리 기술을 이용하여 잔향을 제거하는 연구가 필요하며, 이러한 분야의 기술도 꾸준히 연구되어 왔다. 고전적인 신호처리 기술인 자기회귀(Auto-Regressive, AR) 모델 기반의 백색화 기법이 연구된 바 있으며,^[7] 고유값 분해를 이용한 주성분 역산(Principal Component Inverse, PCI) 기법,^[8] 그리고 이를 발전시킨 신호 부공간 추출 알고리즘이 제안된 바 있다.^[9]

위에서 언급된 잔향 제거 알고리즘들은 신호를 시간 축 혹은 시간-공간 축에서 다루고 있다. 최근의 음향 신호처리 분야에서는 신호의 시간-주파수 축 특성을 이용하는 비음수 행렬 분해(Nonnegative Matrix Factorization, NMF) 알고리즘이 활발히 연구되고 있으며, 능동 소나 시스템에서의 잔향 제거를 위해서도 NMF 알고리즘이 적용된 바 있다.^[10] NMF 기반의 잔향 제거 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보인다. 그러나 기존의 AR모델 기반의 백색화 알고리즘이나 PCI 알고리즘이 공간 축의 데이터를 함께 분석할 수 있도록 발전된 반면, NMF 기반의 알고리즘은 시간-주파수 축의 데이터를 분석할 뿐 공간 축의 정보는 다룰 수 없었다. 이에 따라 시간-주파수-공간 축의 3차원 데이터를 다룰 수 있는 빔공간 다채널 NMF(Beamspace-Domain MultiChannel NMF, BD-MC-NMF) 기반의 탐지 알고리즘이 연구된 바 있으나,^[11] 해당 논문에서 언급하는 바와 같이 알고리

즘의 구조 개선을 통해 성능을 향상시킬 여지가 있는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 잔향 환경에서 능동 소나의 표적 반향음을 탐지하는 알고리즘을 제안하고자 하며, 특히 작은 도플러 주파수를 가져 잔향음에 의해 방해를 받는 반향음을 탐지하는 것을 목적으로 한다. 제안하는 알고리즘은 BD-MC-NMF 알고리즘을 기반으로 하되, NMF의 기저들을 반향음 집단과 잔향 집단으로 분리하여 각 집단에 대해 독립적인 추정 과정을 적용하여 성능을 향상시키고자 한다. 또한 일반적인 능동소나 수신기에서 방위를 분석하고자 빔형성기를 사용하고 있음을 감안하여, 본 알고리즘이 빔형성기의 후처리 단계에서 사용되는 것을 고려하여 알고리즘을 도출하였다.

II. 문제 기술

수중에서 능동소나 수신기가 신호를 수신하는 상황을 가정하되, 수신기가 이동하는 상황을 고려해보자. 수신기의 이동 속도가 v 라고 가정하고, 송신기에서 $s(t)$ 의 ping 신호를 방사했다고 가정할 때, 표적 반향음 $s_T(t)$ 는 다음과 같이 나타난다.^[1]

$$s_T(t) = a |G(\psi - \psi_0)| s(t - t_d) \exp(j2\pi f_d t), \quad (1)$$

여기서 a 는 크기 감쇠 계수, t_d 는 시간 지연, f_d 는 도플러 이동 주파수, ψ 는 목표 신호의 입사 방향과 수신기 진행 방향 사이의 각도, $G(\psi)$ 는 센서 혹은 빔형성기의 방향성 함수를 나타낸다. 이를 주파수 축에서 나타내면 다음과 같다.^[1]

$$S_T(f) = a |G(\psi - \psi_0)| S(f - f_d) \cdot \exp[-j2\pi(f - f_d)t_d] \quad (2)$$

하나의 표적에서 반사된 위의 반향음과 달리, 여러 산란체로부터의 반사음이 중첩되면 잔향 신호로 나타나며, 이는 다음과 같다.

$$s_R(t) = \sum_n \left\{ a_n |G(\psi_n - \psi_0)| s(t - t_{d_n}) \cdot \exp(j2\pi f_{d_n} t) \right\}, \quad (3)$$

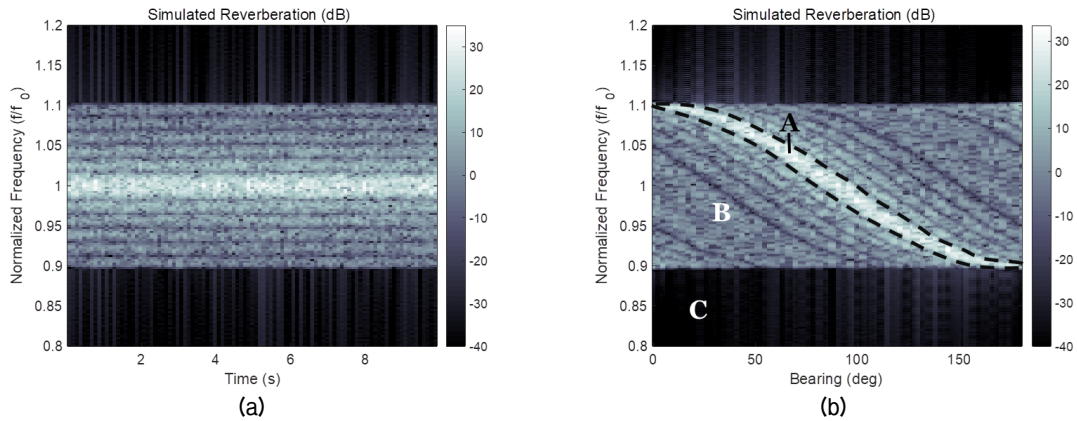


Fig. 1. Graphs of simulated reverberation displayed in (a) a time-frequency domain and (b) a frequency-bearing domain. The regions A, B, and C mean very-low-Doppler, low-Doppler, and high-Doppler zones, respectively.

여기서 ψ_n, t_{d_n}, f_{d_n} 은 각각 n 번째 산란체로부터의 신호 입사각, 시간 지연, 도플러 주파수를 나타낸다. 위와 같은 잔향의 주파수 축 신호는 다음과 같이 얻어질 수 있다.^[1]

$$S_R(f) = \sum_n \left\{ \begin{array}{l} a_n |G(\psi_n - \psi_0)| S(f - f_{d_n}) \\ \cdot \exp[-j2\pi(f - f_{d_n})t_{d_n}] \end{array} \right\}. \quad (4)$$

대부분의 산란체는 선박 혹은 표적에 비해 정지한 상태라고 가정할 수 있으며, 따라서 도플러 주파수는 입사각과 수신기의 이동 속도에 의해 결정된다. 방사되는 신호의 주파수가 f_0 일 때, 각 산란체로부터 입사되는 반사음의 도플러 주파수는 다음과 같이 나타난다.

$$f_{d_n} = \frac{2v \cos \psi_n}{\lambda_0} = \frac{2v \cos \psi_n}{c} f_0. \quad (5)$$

따라서, f_{d_n} 의 도플러 주파수를 가지는 잔향의 입사각은 다음과 같다.

$$\psi_n = \cos^{-1} \left(\frac{c}{2v} \frac{f_{d_n}}{f_0} \right). \quad (6)$$

위의 식에서 $-1 \leq \cos \psi_n \leq 1$ 이므로, 도플러 주파

수 f_{d_n} 의 범위는 $\left(-\frac{2v}{c}f_0 \leq f_{d_n} \leq \frac{2v}{c}f_0\right)$ 이다. 단일 주파수 f_0 를 사용하는 협대역 지속파 펄스의 경우, 잔향 신호의 주파수 폭은 $\frac{4v}{c}f_0$ 로 넓어지게 되며, 이는 수신기의 이동 속도 v 에 비례하여 커진다. 특히 빔형성기 응답 $|G(\psi_n)|$ 가 입사각 ψ_n 에 따라 변화하며, 입사각 ψ_n 과 도플러 주파수 f_{d_n} 은 Eq. (6)과 같은 관계를 가지므로, 빔형성기를 통과한 잔향의 주파수 응답은 빔형성기의 방위 응답과 유사한 형태를 가지게 된다. 이는 Fig. 1(a)의 그래프에서 확인할 수 있다.

Fig. 1은 잔향의 시간-주파수 축 데이터와 주파수-방위 축 데이터를 시뮬레이션을 통해 얻어낸 예시이다. Fig. 1(a)는 특정 방위에 대한 시간-주파수 축 데이터를 도시하고 있으며, 빔형성기 응답과 유사하게 주엽과 부엽으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다. Fig. 1(b)는 특정 시간에 대한 주파수-방위 축 데이터를 도시하고 있으며, 표적의 도플러 주파수에 따라 잔향의 영향을 많이 받는 영역(A, B)과 잔향의 영향을 적게 받는 영역(C)이 있음을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 잔향의 영향을 많이 받는 낮은 도플러 표적을 탐지하는 문제를 다루고자 한다.

III. 제안하는 알고리즘

제안하는 알고리즘은 Fig. 2와 같이 빔형성기와 단 시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 거친

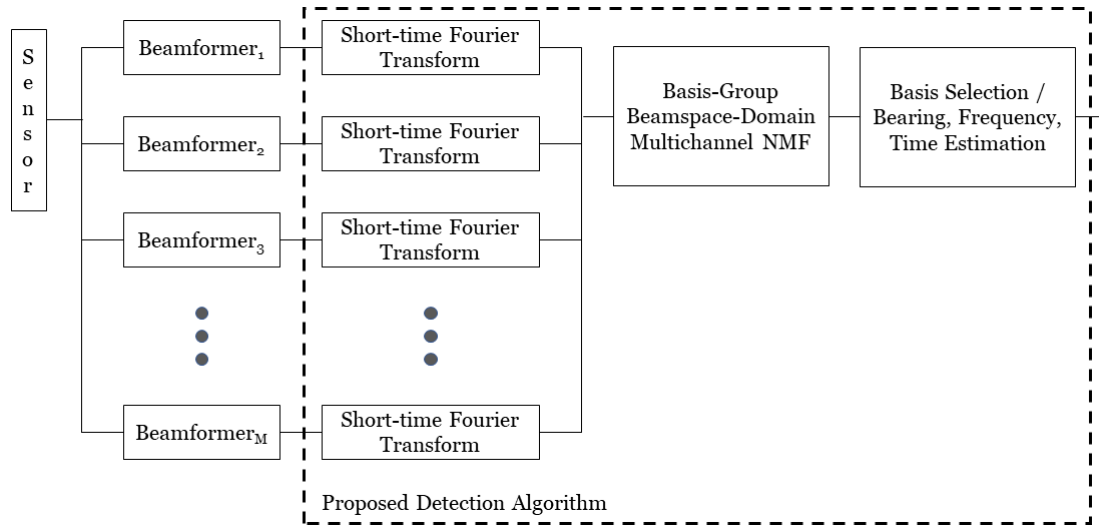


Fig. 2. A block diagram of proposed target detection algorithm.

신호에 대해 BD-MC-NMF 알고리즘을 적용하여 방위 기저, 주파수 기저, 그리고 시간 기저로 분석하는 알고리즘이다. 스펙트로그램을 얻어내는 단시간 푸리에 변환은 여러 신호처리 시스템에서 일반적으로 사용하는 기법이며 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 핵심 부분이 아니므로 여기서는 따로 언급하지 않겠다.

3.1 기저그룹 빙공간 다채널 비음수 행렬 분해

M 개의 빙형성기에 대한 스펙트로그램은 빙공간-주파수-시간 영역의 $M \times K \times N$ 크기 3차원 텐서가 되며, 여기서 M, K, N 은 각각 빙형성기, 주파수 빈, 시간 프레임의 개수를 나타낸다. 빙공간 다채널 비음수 행렬 분해 모델을 이용하면, 3차원 스펙트로그램의 원소 $v_{m,kn}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[11,13]

$$v_{m,kn} = \sum_j u_{mj} p_{j,kn} + e_{m,kn}, \quad (7)$$

여기서 $u_{m,j}$ 는 j 번째 성분의 m 번째 빙형성기에 대한 이득, $e_{m,kn}$ 은 m 번째 빙형성기의 (k,n) 번째 스펙트로그램의 잡음을 나타내며, $p_{j,kn}$ 은 j 번째 성분의 크기스펙트로그램 \mathbf{P}_j 의 (k,n) 번째 원소로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{j,kn} = \sum_{r \in C_j} w_{kr} h_{rn}, \quad (8)$$

여기서 w_{kr} 은 주파수 기저 행렬 \mathbf{W} 의 (k,r) 번째 원소, h_{rn} 은 시간 기저 행렬 \mathbf{H} 의 (r,n) 번째 원소를, 그리고 C_j 는 j 번째 음원에 해당하는 기저들의 집합을 의미한다.

본 논문에서는 위의 빙공간 다채널 비음수 행렬 분해 모델을 기반으로 하되, Fig. 3과 같이 반향음 기저 집단과 잔향음 기저 집단으로 나누어 각 집단을 독립적으로 추정하고자 한다. 이를 위하여, Eq. (7)의 모델을 다음과 같이 변형한다.

$$v_{m,kn} = \sum_{j=1}^{J_R} u_{mj} p_{j,kn} + \sum_{j=J_R+1}^{J_R+J_E} u_{mj} p_{j,kn} + e_{m,kn}, \quad (9)$$

여기서 J_R 과 J_E 은 각각 잔향음 성분과 반향음 성분의 개수를 의미한다.

3.2 잔향음 기저집단의 기저 추정

잔향음 기저 집단에 대한 추정 알고리즘을 도출하기 위하여 먼저 최적화할 비용 함수를 정의한다. 비용 함수는 다음과 같이 추정 스펙트로그램 $\hat{v}_{m,kn}$ 과 수신된 신호의 스펙트로그램 $v_{m,kn}$ 의 거리 함수로 정의된다.

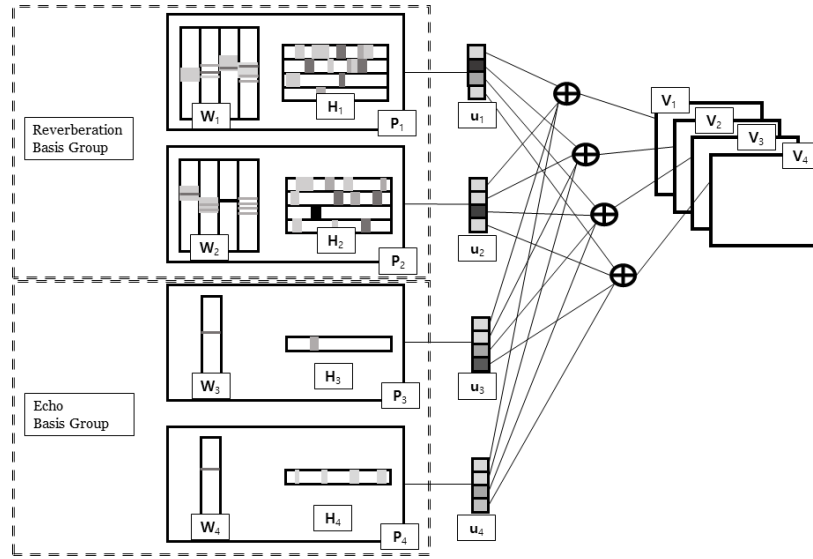


Fig. 3. Basis-group multichannel nonnegative matrix factorization model for the proposed algorithm.

$$C(\theta) = d_{IS}(v_{m,kn} | \hat{v}_{m,kn}), r \in C_j, 1 \leq j \leq J_R, \quad (10)$$

여기서 θ 는 추정할 기저들 ($u_{m,j}, w_{kr}, h_{rn}$)을 의미하고, $\hat{v}_{m,kn}$ 은 다음과 같은 값을 나타낸다.

$$\hat{v}_{m,kn} = \sum_{j=1}^{J_R} u_{m,j} p_{j,kn} + \sum_{j=J_R+1}^{J_R+J_E} u_{m,j} p_{j,kn}. \quad (11)$$

또한 $d_{IS}(x|y)$ 는 다음과 같은 Itakura-Saito 거리 함수를 의미한다.^[11]

$$d_{IS}(x|y) = \frac{x}{y} - \log\left(\frac{x}{y}\right) - 1. \quad (12)$$

Eq. (10)의 목적함수를 최적화하는 방위 기저 $u_{m,j}$ 를 찾기 위해 이를 $u_{m,j}$ 로 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial u_{m,j}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left(\frac{p_{j,kn}}{\hat{v}_{m,kn}} - \frac{v_{j,kn} p_{j,kn}}{\hat{v}_{m,kn}^2} \right), \quad (13)$$

여기서 j 의 범위는 $1 \leq j \leq J_R$ 이다. $p_{j,kn}, \hat{v}_{m,kn}, v_{m,kn}$ 이 모두 비음수이므로, Eq. (13) 우변의 괄호 안의 첫 번째 항은 0 이상의 값, 두 번째 항은 0 이하의 값이 된다. Lee와 Seung의 연구에 의한 곱셈 기반의 갱신법

에 의하여, 방위 기저 $u_{m,j}$ 는 다음과 같은 반복적인 갱신식에 의해 추정될 수 있다.^[12,13]

$$u_{m,j} \leftarrow u_{m,j} \frac{\left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (v_{j,kn} p_{j,kn} / \hat{v}_{m,kn}^2) \right\}}{\left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (p_{j,kn} / \hat{v}_{m,kn}) \right\}}. \quad (14)$$

이를 행렬 표기법을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$u_{m,j} \leftarrow u_{m,j} \frac{\mathbf{1}_{1 \times K} [\hat{\mathbf{V}}_m^{-2} \otimes \mathbf{V}_m \otimes (\mathbf{W}_j \mathbf{H}_j)] \mathbf{1}_{N \times 1}}{\mathbf{1}_{1 \times K} [\hat{\mathbf{V}}_m^{-1} \otimes (\mathbf{W}_j \mathbf{H}_j)] \mathbf{1}_{N \times 1}}, \quad (15)$$

여기서 \mathbf{V}^a 는 행렬 \mathbf{V} 의 원소 단위의 a 제곱을 의미하며, $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$, $\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}}$ 는 각각 두 행렬 \mathbf{A}, \mathbf{B} 의 원소 단위의 곱셈과 나눗셈을 의미하고, $\mathbf{1}_{a \times b}$ 는 모든 원소가 1인 $a \times b$ 크기의 행렬을 의미한다.

주파수 기저 w_{kr} 과 시간 기저 h_{rn} 의 갱신식 또한 Eqs. (13)~(15)와 동일한 과정을 거쳐 얻어낼 수 있다. 얻어진 갱신 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{W}_j \leftarrow \mathbf{W}_j \frac{\sum_{m=1}^M u_{m,j} (\hat{\mathbf{V}}_m^{-2} \otimes \mathbf{V}_m) \mathbf{H}_j^T}{\sum_{m=1}^M u_{m,j} \hat{\mathbf{V}}_m^{-1} \mathbf{H}_j^T}, \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_j \leftarrow \mathbf{H}_j \frac{\sum_{m=1}^M (u_{m,j} \mathbf{W}_j)^T (\hat{\mathbf{V}}_m^{-2} \otimes \mathbf{V}_m)}{\sum_{m=1}^M (u_{m,j} \mathbf{W}_j)^T \hat{\mathbf{V}}_m^{-1}}. \quad (17)$$

Eqs. (16)~(17) 모두 j 의 범위는 $1 \leq j \leq J_R$ 이다.

3.3 반향음 기저집단의 기저 추정

반향음 기저집단의 방위, 주파수, 시간 기저를 추정하는 과정은 기본적으로 잔향음 기저집단과 크게 다르지 않다. 다만 주파수 기저의 경우 차이가 좀 있는데, 주파수 구조를 미리 알 수 없는 잔향음과 달리 반향음의 주파수 구조는 어느 정도 예측이 가능하다. 특히 협대역 지속파 신호를 사용하는 능동소나의 경우, 방사된 핑 신호가 도플러 이동된 것과 동일하게 반향음을 모델링할 수 있으며^[1], 따라서 반향음의 주파수 구조 또한 방사 핑 신호의 주파수 구조를 이용하여 어느 정도 예측이 가능하다. 따라서, 제안하는 알고리즘에서는 다음과 같이 예상 가능한 반향음 후보군을 이용하여 반향음 기저집단의 주파수 기저 행렬을 사전에 구성한다. 방사되는 핑 신호의 크기 스펙트럼을 \mathbf{w}_p 라 하자. 이는 $K \times 1$ 크기의 비음수 벡터가 된다. 이를 이용하여 주파수 기저 행렬을 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{W}_j = \mathbf{w}_{p, \uparrow(j-J_R-1-(J_E-1)/2)}, J_R+1 \leq j \leq J_E, \quad (18)$$

여기서 $\mathbf{w}_{p, \uparrow(d)}$ 는 \mathbf{w}_p 를 위쪽으로 d 만큼 이동시킨 벡터를 의미하며, 반향음 기저집단의 기저 개수 J_E 는 홀수라고 가정한다. Eq. (18)에 의해 반향음 기저집단의 주파수 기저 \mathbf{W}_j 는 $-(J_E-1)/2$ 의 주파수 빈부터 $(J_E-1)/2$ 의 주파수 빈까지의 도플러 이동을 가지는 J_E 개의 기저로 구성된다.

위와 같이 사전에 구성되는 주파수 기저를 제외한 반향음 기저집단의 방위 기저와 시간 기저는 잔향음 기저집단의 경우와 동일하게 Eqs. (15), (17)을 이용하여 추정된다.

3.4 자기 도플러를 고려한 반향음 방위 기저 추정

앞서 언급한 Eqs. (15)~(18)을 수립할 때까지 반복

하면 잔향음 및 반향음 기저 집단의 방위, 주파수, 시간 기저를 추정할 수 있다. Fig. 4(a)~(c)는 시뮬레이션을 통해 잔향 환경에서의 협대역 지속파 능동 소나 수신 신호를 합성한 후, 이를 이용하여 방위, 주파수, 시간 기저를 추정한 결과의 예시를 보여주고 있다. 각 그래프의 백색 파선은 정답의 범위를, 회색 점선은 알고리즘에 의해 선택된 표적 기저를 의미한다.

시간 기저 행렬을 살펴보면 반향음 기저집단 중 특정 시간 영역에서 두드러지게 큰 값을 보이는 부분이 있으며, 해당 부분이 실제 반향음이 존재하는 시간과 일치함을 볼 수 있다. 그리고 해당 시간 기저에 해당하는 주파수 기저가 수신된 반향음의 주파수 성분을 잘 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 여기서 살펴본 예시의 경우 제안하는 알고리즘이 반향음의 시간과 주파수를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 그러나 방위 기저 행렬은 반향음의 방위가 아닌 자기 도플러의 방위를 강하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Eq. (18)에서 보는 바와 같이 반향음 기저집단의 j 번째 주파수 기저는 $f_d = d_j \Delta f$ 의 도플러 이동을 가지는 지속파 신호로 이루어져 있으며, 여기서 Δf 는 주파수 빈 사이의 간격을 의미하고, d_j 는 j 번째 기저의 이동된 주파수 빈 개수를 의미하며, 이는 다음 식과 같이 결정된다.

$$d_j = j - J_R - 1 - (J_E - 1) / 2. \quad (19)$$

따라서, 방위 기저의 원소 $u_{m,j}$ 는 d_j 개의 주파수 빈만큼 도플러 이동된 지속파 주파수 성분이 m 번째 빔형성기를 통해 입사되는 크기라고 볼 수 있다. Eqs. (4)와 (6)을 이용하면 $u_{m,j}$ 중 자기 도플러 잔향 성분에 대한 이득은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$G_{OD}(m,j) = G_m \left(\cos^{-1} \left(\frac{c}{2v} \frac{d_j \Delta f}{f_0} \right) \right). \quad (20)$$

제안하는 알고리즘에서는 반향음 기저집단이 잔향음 성분을 배제하고 반향음 성분을 추정하는 목적을 가지고 있으므로, Eq. (20)은 원하지 않는 자기 도플러 잔향 성분의 이득이 된다. 이를 억제하기 위하

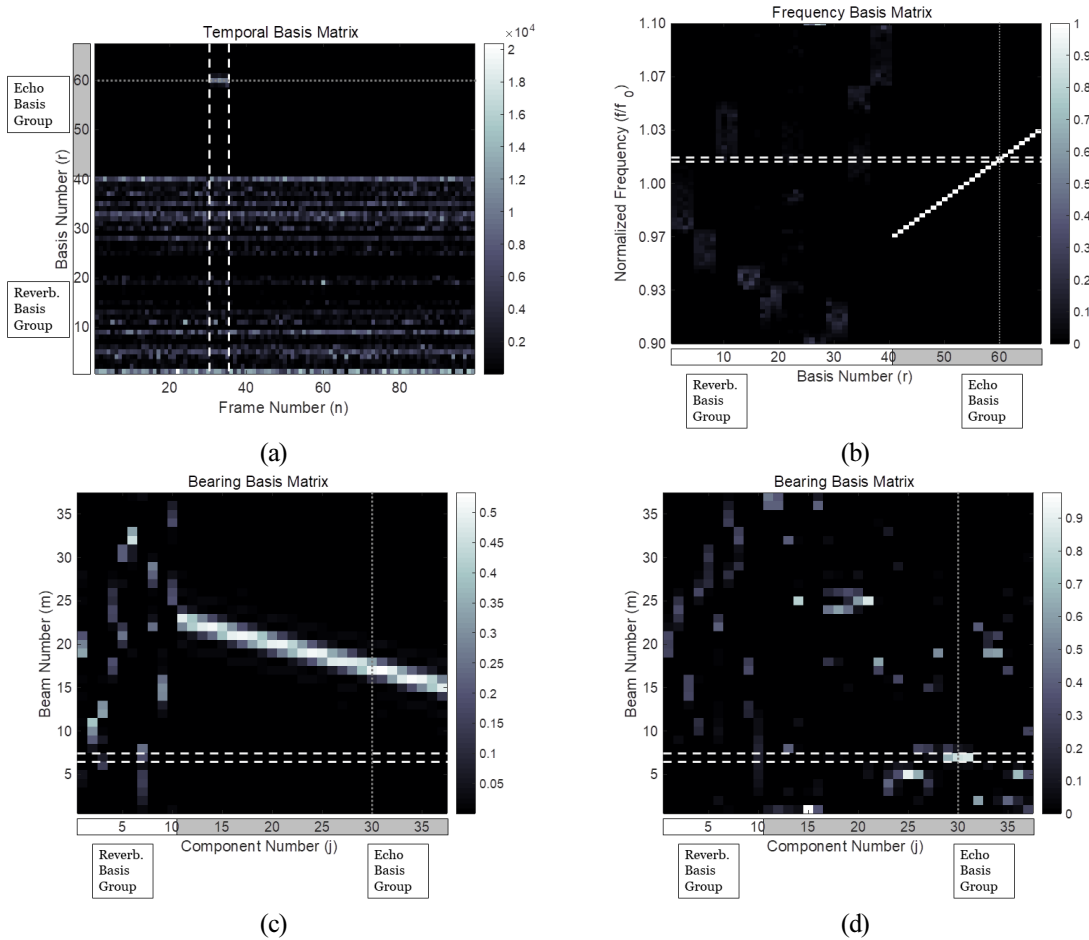


Fig. 4. Examples of estimated (a) temporal, (b) frequency, (c) bearing basis matrices without own Doppler suppression, and (d) bearing basis matrix with own Doppler suppression. The white dashed lines and the gray dotted line indicate the range of ground truth and selected target basis, respectively.

여, 방위 기저 $u_{m,j}$ 를 추정하는 과정에서 다음과 같이 Eq. (20)의 이득에 비례하는 잔향 억제 과정을 추가로 수행한다.

$$u_{m,j} \leftarrow \alpha u_{m,j} + (1-\alpha) \left\{ 1 - \frac{G_{OD}(m,j)}{\max_{m,j} G_{OD}(m,j)} \right\} u_{m,j}, \quad (21)$$

여기서 α 는 억제 정도를 조절하는 상수로서, 0과 1 사이의 값을 가진다.

Fig. 4(d)는 Eq. (21)의 잔향 억제 과정을 추가한 알고리즘의 방위 기저 추정 결과를 나타낸다. Fig. 4와 비교해 보면, 잔향 억제 과정을 추가함으로써 방위 기저에서 자기 도플러 성분이 제거되어 표적의 방위를 잘 예측하게 되었음을 알 수 있다.

3.5 표적 기저 선택 및 방위, 주파수, 시간 추정

수신되는 표적 반향음 신호의 길이는 방사 지속파 신호 길이와 표적 길이로 인한 연장(elongation)이 더해진 정도의 길이로, 전체 해석 신호 길이에 비하면 짧다. 따라서, 표적 반향음 신호를 포함한 기저는 짧은 시간 구간에 집중된 에너지를 가질 가능성이 높다.

Reference [11]에서 사용한 기저 선택 방법과 같이, 표적 기저 인덱스 r_{target} 은 반향음 기저집단 중 n_p 개의 연속적인 프레임의 크기가 가장 큰 시간 기저의 인덱스로 정의한다.

$$r_{target} = \operatorname{argmax}_r \bar{h}(r), r \in \{C_{J_R+1}, \dots, C_{J_R+J_E}\}, \quad (22)$$

여기서

$$\bar{h}(r) = \max_i \sum_{n = \lfloor i - n_p + 1 \rfloor}^i h_{rn}, \quad (23)$$

이고, $\lfloor \cdot \rfloor$ 기호는 괄호 안의 값의 하한이 1임을 의미한다.

표적 기저 r_{target} 을 이용하여 다음과 같이 표적을 포함하는 빔형성기의 번호 m_{target} , 표적 주파수 빈 번호 k_{target} , 그리고 표적 반향음이 존재하는 시간 프레임 번호의 집합 n_{target} 을 추정한다.

$$m_{target} = \operatorname{argmax}_m u_{m,j} |_{C_j \ni r_{target}}, \quad (24)$$

$$k_{target} = \operatorname{argmax}_k w_{kr_{target}}, \quad (25)$$

$$n_{target} = \{n \mid h_{r_{target}n} > \eta\}, \quad (26)$$

여기서 η 는 미리 설정된 문턱값을 의미한다.

IV. 실험 결과 및 토의

본 논문에서 고안한 알고리즘의 성능을 살펴보기 위하여 수중 잔향 환경에서 목표물이 존재하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 목표 반향음과 잔향음은 Eq. (1) 및 Eq. (3)과 같이 합성되었으며, 이때 잔향음은 Abraham과 Lyons^[14]의 잔향 모델을 이용하여 합성되었다.

본 실험에서는 0.5 s 길이의 협대역 지속파 신호를 방사하는 능동 소나 시스템을 가정하였으며, 표적의 정규화 도플러 주파수 (f/f_0) 는 1.015로 가정하였다. 빔형성기 시스템은 소나의 진행 방향을 기준으로 하여 0°부터 180°까지 5°간격으로 37개의 빔형성기를 가지고 있다고 가정하였으며, 각 빔형성기의 null-to-null 각도는 10°로 설정하였다.

빔형성기를 통과한 신호는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 단시간 푸리에 변환 시스템을 통과하게 되는데, 이때 사용되는 윈도우는 133 ms 길이의 Hamming 윈도우로 설정하였으며, 각 시간 프레임 사이는 25%의 중첩이 있도록 설정하였다.

본 실험에서는 제안하는 알고리즘의 성능을 PCI

알고리즘^[8] 및 BD-MC-NMF 기반의 기존 알고리즘^[11] 과 비교하였다. PCI 알고리즘의 문턱값은 여러 번의 시도를 통해 가장 높은 성능을 내는 값으로 설정되었으며, Reference [8]에서와 마찬가지로 PCI 알고리즘 출력에 정합 필터를 적용하여 표적을 탐지하였다. 기존의 BD-MC-NMF 기반의 알고리즘의 파라미터인 성분 개수는 30개, 성분 당 기저의 개수는 4개로, 총 120개의 기저를 가지도록 설정되었다. 제안하는 알고리즘에서 잔향음 기저집단의 성분 개수는 10개, 성분 당 기저의 개수는 4개로 설정되었으며, 반향음 기저집단의 성분 개수는 27개로 설정되었다. Eq. (18)에서 보는 바와 같이 반향음 기저집단의 경우 하나의 성분이 하나의 기저로 이루어져 있기 때문에, 제안하는 알고리즘의 총 기저 개수는 67개이다. 제안하는 알고리즘의 자기 도플러 억제 상수 α 는 0.5를 사용하였다. 기존의 BD-MC-NMF 기법과 제안하는 알고리즘 모두 기저 추정 알고리즘의 반복 횟수는 50번으로 설정하였으며, 시간 기저에서 반향음을 탐지하기 위한 문턱값은 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\eta = 0.2 \max_n h_{r_{target}n}. \quad (27)$$

다양한 신호대잔향비 환경에서 본 알고리즘을 검증하기 위하여, 표적 반향음의 강도는 표적의 방위 기준 신호대잔향비가 -25 dB에서 0 dB까지 5 dB 간격으로 변화하도록 설정되었다. 각 신호대잔향비 환경에 대해 50번의 반복실험 후 다음과 같은 F-measure를 이용하여 탐지 정확도를 측정하였다.

$$F\text{-measure} = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}, \quad (28)$$

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (29)$$

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (30)$$

여기서 TP 는 목표 반향음의 시간, 주파수, 방위 등을 맞게 추정한 개수를 나타내고, FP 는 목표 반향음의 시간, 주파수, 방위 등을 추정했으나 틀린 개수, 그

리고 FN 은 실제 목표 반향음의 시간, 주파수, 방위 중 추정하지 못한 개수를 나타낸다.

Fig. 5는 각 신호대잔향비 환경 별 추정 정확도를 나타낸다. PCI 알고리즘의 경우 주파수 추정 결과가 잘 나오지 않아 시간 및 방위 추정 결과만을 도시하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 제안하는 알고리즘이 대부분의 신호대잔향비 환경에서 비교 알고리즘 대비 우수한 추정 성능을 보인다. 기존의 BD-MC-NMF 알고리즘이 -10 dB 환경에서 성능이 저하되기 시작되는 것과 달리 제안하는 알고리즘은 -20 dB 이상의 환경에서 꾸준한 성능을 보이며, -25 dB 환경에서 성능이 다소 저하되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 -10 dB 환경에서 기존의 BD-MC-NMF 알고리즘^[11]과 제안하는 알고리즘의 주파수 및 시간 기저 추정 결과를 비교한 예시이다. Fig. 6에서 살펴볼 수 있듯이 기존의 BD-MC-NMF 기반 알고리즘은 모든 기저를 탐색하여 표적 기저를 선정해야 하지만 제안

하는 알고리즘은 반향음 기저집단만을 대상으로 탐색하므로 표적 기저 선정에서 다소 유리하다. 또한 기존의 BD-MC-NMF 기반 알고리즘은 주파수 기저 추정에 있어 아무런 제약조건을 가지고 있지 않지만 제안하는 알고리즘은 반향음 기저집단의 주파수 기저를 지속과 신호에 적합하도록 사전에 설정해 놓기 때문에 표적 반향음 탐색에 보다 유리하다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 위와 동일한 조건에서 빔형성기의 null-to-null 각도를 1°로 변경했을 때의 실험 결과를 도시하고 있다. Fig. 5와 마찬가지로 PCI 알고리즘은 주파수 성분을 제대로 검출하지 못하였기 때문에, 주파수 검출 결과는 PCI를 제외한 BD-MC-NMF 및 제안하는 알고리즘의 결과만 도시되어 있다. Fig. 5와 비교하였을 때 PCI의 성능이 다소 향상되었으나, 제안하는 알고리즘 및 BD-MC-NMF 알고리즘의 성능은 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한 해당 경우에서도 제안하는 알고리즘이 PCI 및 BD-MC-NMF 알고리즘 대비 좋은

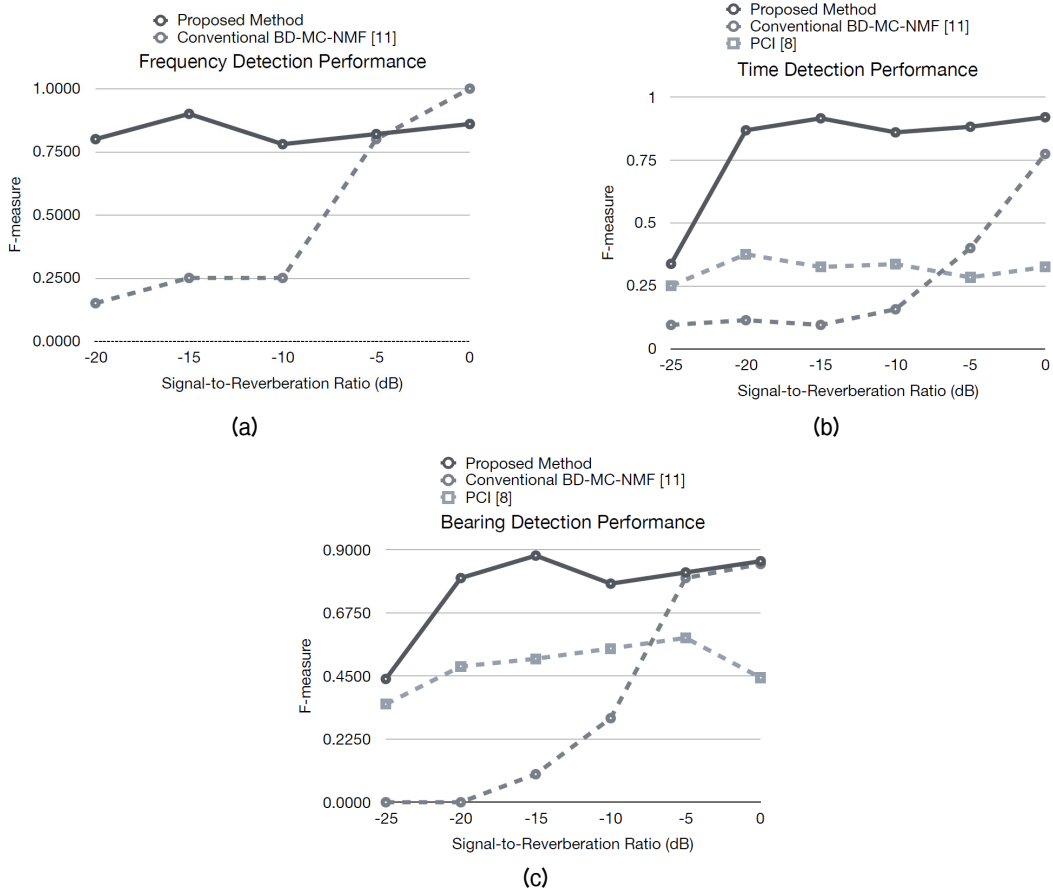


Fig. 5. Detection performances of (a) frequency, (b) time, and (c) bearing of the target echo based on F-measure.

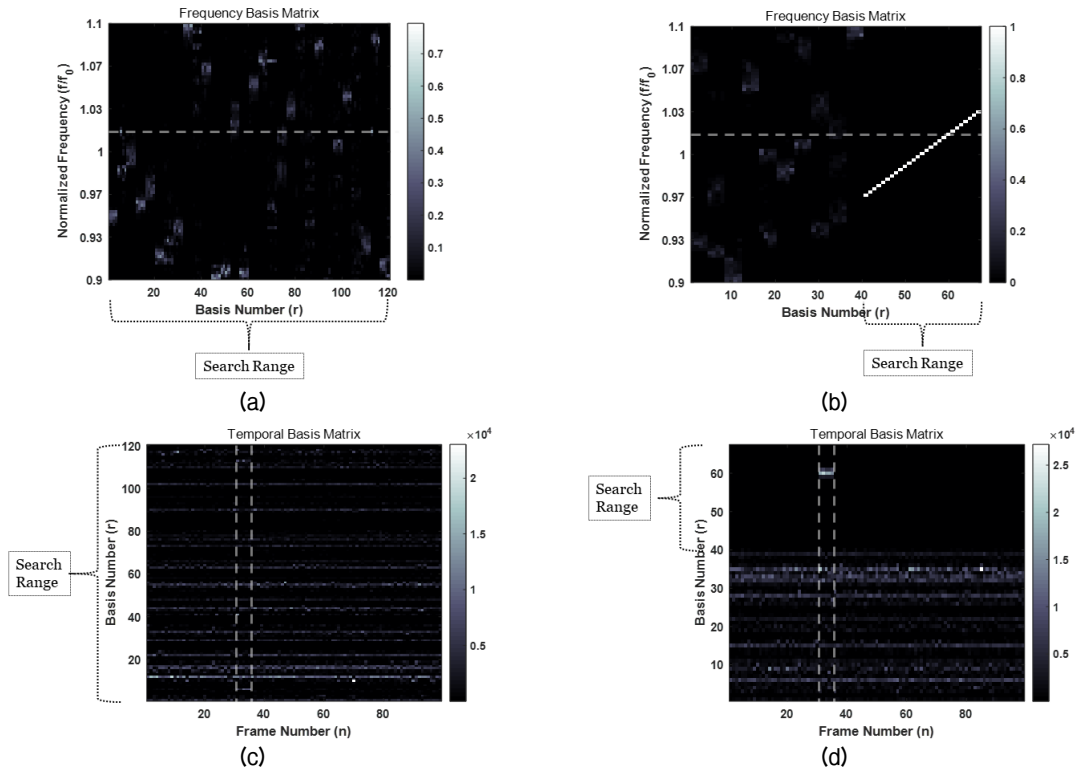


Fig. 6. Estimated results of the frequency basis matrices of (a) the conventional BD-MC-NMF-based method and (b) the proposed method, respectively, and the temporal basis matrices of the (c) the conventional BD-MC-NMF-based method and (d) the proposed method, respectively.

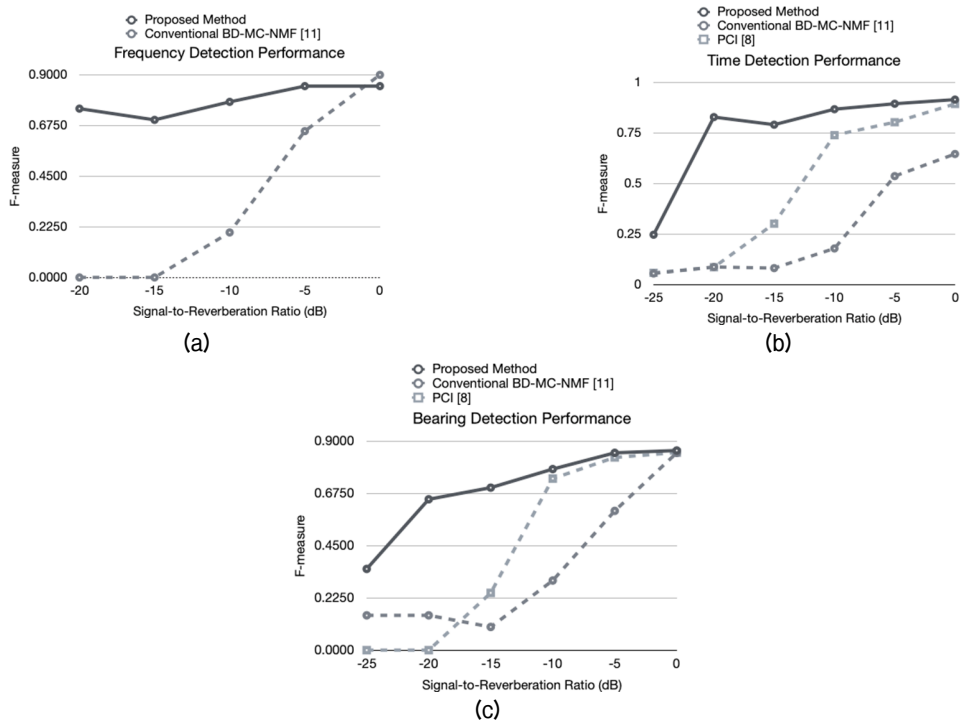


Fig. 7. Detection performances of (a) frequency, (b) time, and (c) bearing of the target echo based on F-measure, when the beamwidth is 1° .

성능을 보이는 것 또한 확인할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 7의 성능 양상이 차이를 보이는 것은 빔형성기의 빔폭이 감소하면서 잔향의 매우 낮은 도플러 영역 [Fig. 1(b)의 A영역]이 감소하여 성능에 영향을 준 것으로 판단된다. PCI 알고리즘의 경우 푸리에 변환을 사용하지 않고 시간-공간 영역에서 데이터를 처리하기 때문에 해당 영향을 상대적으로 크게 받았으나, NMF 기반의 알고리즘들은 푸리에 변환을 사용하여 이산 주파수 영역에서 데이터를 처리하기 때문에 주파수 분해능 대비 해당 변화가 작은 경우 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. Fig. 5와 Fig. 7을 비교하여 보면, PCI 알고리즘이 빔형성기의 빔폭에 영향을 크게 받는 반면 제한하는 알고리즘은 빔형성기의 빔폭 파라미터에 강인한 성능을 가진다고 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기저집단 기반의 BD-MC-NMF 알고리즘을 이용하여 잔향 환경에서 표적 반향음을 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 고안한 알고리즘은 여러 방위의 빔형성기를 통과한 수신 신호를 이용하여, 이를 다채널 NMF 모델을 이용하여 나타내었다. 이때, 각 기저들을 잔향음 기저집단과 반향음 기저집단으로 나누어 추정하였으며, 추정된 반향음 기저집단을 대상으로 표적 반향음을 판별하는 알고리즘을 고안하였다.

제안하는 알고리즘의 동작을 분석하기 위하여 합성된 잔향음을 이용한 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 성능을 분석하였다. -25 dB ~ 0 dB의 신호대잔향비 환경에서 표적반향음의 탐지 정확도를 분석한 결과, 기존의 BD-MC-NMF 기반 알고리즘 및 PCI 알고리즘에 비해 향상된 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016RIC1B1008951).

References

1. W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis* (Prentice-Hall, NJ, 1991), Chap. 12.
2. K. Mio, Y. Chocheyras, and Y. Doisy, "Space-time adaptive processing for low frequency sonar," Proc. Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, **2**, 1315-1319 (2000).
3. T. Collins and P. Atkins, "Doppler-sensitive active sonar pulse designs for reverberation processing," IEE Proc. Radar, Sonar, and Navigation, **145**, 347-353 (1998).
4. H. Cox and H. Lai, "Geometric comb waveforms for reverberation suppression," 28th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, **2**, 1185-1189 (1994).
5. J. M. Alsop, "Comb waveforms for sonar," 33rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, **2**, 864-869 (1999).
6. Y. Doisy, L. Deuraz, S. P. van Ijsselmuide, S. P. Beerens, and R. Been, "Reverberation suppression using wideband doppler-sensitive pulses," IEEE J. Ocean. Eng. **33**, 419-433 (2008).
7. S. Kay and J. Salisbury, "Improved Active Sonar Detection using Autoregressive Prewhitened," J. Acoust. Soc. Am. **87**, 1603-1611 (1990).
8. G. Ginolhac and G. Jourdain, "Principal component inverse algorithm for detection in the presence of reverberation," IEEE J. Ocean. Eng. **27**, 310-321 (2002).
9. W. Li, Q. Zhang, X. Ma, and C. Hou, "Active sonar detection in reverberation via signal subspace extraction algorithm," EURASIP J. Wireless Communications and Networking, **2010**, 1-10 (2010).
10. S. Lee, J. S. Lim, and M. Cheong, "Reverberation suppression algorithm for continuous-wave active sonar system based on overlapping nonnegative matrix factorization" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 273-278 (2017).
11. S. Lee, "A study on the target detection method of the continuous-wave active sonar in reverberation based on beamspace-domain multichannel nonnegative matrix factorization" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **37**, 489-498 (2018).
12. D. D. Lee and H. S. Seung, "Algorithms for non-negative matrix factorization," Proc. Advances in Neural Information Processing Systems, 556-562 (2001).
13. S. Lee, S. H. Park, and K.-M. Sung, "Beamspace-domain Multichannel Nonnegative Matrix Factorization for Audio Source Separation," IEEE Signal Process. Lett. **19**, 43-46 (2012).
14. D. A. Abraham and A. P. Lyons, "Simulation of non-rayleigh reverberation and clutter," IEEE J. Ocean. Eng. **29**, 347-362 (2004).

저자 약력

▶ 이 석 진 (Seokjin Lee)



2006년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 학사
2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 석사
2012년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 박사
2012년 3월: (주)LG전자 CTO연구소 선임
연구원
2014년 3월: 경기대학교 전자공학과 조교
수
2018년 3월 ~ 현재: 경북대학교 전자공학
부 조교수