

수동 선배열 소나의 저주파 간섭 신호에 대한 독립성분분석 알고리즘 비교

Comparison of independent component analysis algorithms for low-frequency interference of passive line array sonars

김주호,¹ Hina Ashraf,² 이종현,^{2†} 정명준¹

(Juho Kim,¹ Hina Ashraf,² Chong-Hyun Lee,^{2†} and Myoung Jun Cheong¹)

¹국방과학연구소, ²제주대학교

(Received November 6, 2018; accepted March 26, 2019)

초 록: 본 논문에서는 수동 선배열 소나의 저주파 영역에서 수신된 표적 신호로부터 간섭신호를 분리해 내기 위해 독립성분분석 알고리즘을 적용하는 방안을 제안하고 기존 알고리즘들의 성능을 비교해 보았다. 저주파 대역 신호의 경우 비교적 넓은 방위로부터 수신되기 때문에 인접 빔 신호를 관측신호로 활용하여 독립성분분석을 수행할 수 있다. 신호분리에 사용한 독립성분분석 알고리즘은 FastICA(Fast Independent Component Analysis), NNMF (Non-negative Matrix Factorization), JADE (Joint Approximation Diagonalization of Eigen-matrices)이다. 실측 선배열 수동소나신호를 이용하여 독립성분분석을 수행한 결과 제안한 방법으로 간섭신호분리가 가능함을 확인하였으며, JADE 알고리즘의 신호 분리 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

핵심용어: 저주파 수동 소나, 선배열 센서, 암묵신호분리, 독립성분분석

ABSTRACT: In this paper, we proposed an application method of ICA (Independent Component Analysis) to passive line array sonar to separate interferences from target signals in low frequency band and compared performance of three conventional ICA algorithms. Since the low frequency signals are received through larger bearing angles than other frequency bands, neighboring beam signals can be used to perform ICA as measurement signals of the ICA. We use three ICA algorithms such as Fast ICA, NNMF (Non-negative Matrix Factorization) and JADE (Joint Approximation Diagonalization of Eigen-matrices). Through experiments on real data obtained from passive line array sonar, it is verified that the interference can be separable from target signals by the suggested method and the JADE algorithm shows the best separation performance among the three algorithms.

Keywords: Low-frequency passive sonar, Line array, Blind source separation, Independent component analysis

PACS numbers: 43.30.Wi, 43.60.Fg

1. 서 론

수중 신호 중 1 kHz 미만 저주파 대역에는 많은 잡음 및 간섭신호가 존재하기 때문에 이들로부터 표적 신호를 탐지해 내는 일은 어려운 일이다. 표적 신호와 간섭신호가 방위에 대해 구분 가능한 조건에서는 수동소나의 채널의 개수를 증가시켜 지향지수를 향상시

키거나 적응 빔형성을 수행할 수 있다. 그 밖의 방법으로 암묵신호분리기법이 있다. 이는 수신 신호를 서로 다른 경로를 거쳐 혼합된 음원신호로 모델링하여 복수개의 수신 채널 신호로부터 음원신호를 구분해 내는 기법으로 음원간의 방위에 관계없이 구분 가능하다. 대표적인 암묵신호분리기법으로는 독립성분분석(Independent component analysis, ICA)기법이 있다. 독립성분분석 기법은 신호원이 서로 독립이라는 가정을 기반으로 하는 암묵신호분리기법이다.^[1,2]

†Corresponding author: Chong-Hyun Lee (chonglee@jejunu.ac.kr)
Department of Ocean System Engineering, Jeju National University,
102, Jeju Daehakro, Jeju, Jeju 63243, Republic of Korea
(Tel: 82-64-754-3481, Fax: 82-64-754-3480)

독립성분분석 기법을 수행하기 위해서는 이론적으로 신호의 개수와 같거나 보다 많은 센서로부터 수신된 신호가 필요하다. 그러나 수동소나 탐지를 위해 일반적으로 사용되는 선배열 센서 다수 개를 동시에 운용하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 독립성분분석기법을 적용하기는 어려운 실정이다. 그러나 일반적인 지연합 빔형성을 수행하는 선배열 센서에서 신호의 주파수가 배열센서 설계주파수보다 작을 경우, 혹은 표적이 원거리 조건을 만족하지 못하는 거리에 존재하는 경우에는 표적이 두 개 이상의 빔에 걸쳐 탐지될 수 있다. 혹은 그렇지 않은 조건에서도 저주파 신호의 경우에는 두 개 이상의 빔에서 표적이 탐지되는 경우가 많다. 본 논문은 이러한 경우에 대해 선배열 수동소나에서 간섭신호분리기법을 적용해 보고 적용 가능성을 고찰해 본다.

음성신호처리분야 또는 생체신호처리분야에서는 독립성분분석 기법에 대해 많은 연구가 수행되어져 왔으며 알고리즘의 성능 비교도 수행된 바 있다.^[3-5] 반면 수중음향 분야에서는 제한적으로 수행되어져 왔다.^[6-8] Moura *et al.*은 수동소나 신호에 ICA를 적용한 연구를 수행한 바 있다. 시간영역에서 FastICA와 JADE(Joint Approximation Diagonalization of Eigen- matrices)를 비교하여 JADE가 신호 분리 성능이 우수하다는 것을 실험적으로 증명하였다.^[6] Moura *et al.*은 또한 주파수 영역 ICA 알고리즘이 시간영역 알고리즘에 비해 성능이 우수하다는 것을 확인한 바 있으며,^[7] 국내에서도 Lee *et al.*이 시뮬레이션 데이터로 주파수 영역에서 ICA를 수행한 바 있다.^[8] 그러나 두 연구 모두 특정 주파수 영역 ICA 알고리즘을 수동소나 신호에 적용 가능함을 보이는데 그쳤으므로 실제 수동소나 신호에 대한 주파수 영역 ICA 알고리즘들의 성능 비교에 관한 연구는 미진한 실정이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주파수 영역 ICA 알고리즘 중 FastICA, NNMF(Non-Negative Matrix Factorization), 그리고 JADE에 대한 성능을 실제 수동소나신호를 이용하여 성능을 비교해본다.

II. 독립성분분석 알고리즘

독립성분분석은 확률 통계 모델을 기반으로 혼합

된 신호에서 원 신호를 찾는 기법이다. 단순한 순시 혼합 모델에서의 혼합신호는 원 신호와 혼합행렬의 곱으로 나타낸다. 그러나 실제 환경에서의 음향신호는 전달되는 채널에 의해 컨볼루션 형태로 표현된다. 따라서 실제 환경에서 획득한 혼합신호로부터 독립성분분석을 수행하기 위해서는 컨볼루션 혼합 모델을 이용해야 한다. 한편 컨볼루션 혼합모델을 주파수 영역에서 해석할 경우 혼합신호는 혼합행렬 \mathbf{H} 와 원신호 \mathbf{s} 의 곱 형태로, 분리신호는 분리행렬 \mathbf{W} 과 혼합신호 \mathbf{x} 의 곱 형태로 간단히 표현 가능하며 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(\omega, \tau) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{s}(\omega, \tau), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(\omega, \tau) = \mathbf{W}(\omega)\mathbf{x}(\omega, \tau), \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{s}(\omega, \tau) = [s_1(\omega, \tau), \dots, s_N(\omega, \tau)]^T$ 이며, s_n 는 주파수 영역에서의 원신호를 나타낸다($n=1, \dots, N$). ω 와 τ 는 단구간 푸리에 변환된 신호에 대한 주파수빈과 프레임 인덱스를 나타낸다. 마찬가지로 $\mathbf{x}(\omega, \tau) = [x_1(\omega, \tau), \dots, x_M(\omega, \tau)]^T$ 이며, x_m 는 주파수 영역에서의 혼합신호를 나타낸다($m=1, \dots, M$). 본 논문에서는 편의상 변수 ω 와 τ 를 생략 하도록 한다.

2.1 FastICA

FastICA는 분리신호 \mathbf{y} 의 비가우스성이 최대로 만드는 행렬 \mathbf{w} 를 추정함으로써 분리신호를 구한다. 중심극한정리에 의해 혼합 신호는 원신호에 비해 가우시안 분포 특성을 따르게 되기 때문이다. 비가우스성을 측정하는 수단으로 FastICA는 음의 엔트로피(negentropy)를 사용한다. A. Hyvarinen은 최대 엔트로피 이론을 기반으로 음의 엔트로피를 추정하는 방법을 제시하였고, 고정점 알고리즘을 이용해 빠르게 계산할 수 있는 방법을 제시하였는데 이를 FastICA라 한다. \mathbf{w} 를 \mathbf{W} 의 열벡터라 할 때 \mathbf{w} 의 갱신 과정은 다음과 같다.^[9,10]

$$\mathbf{w}^*(k) = \mathbf{C}^{-1} \frac{E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}(k-1))^T \mathbf{x}\}}{E\{g'(\mathbf{w}(k-1))^T \mathbf{x}\}} \mathbf{w}(k-1), \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}^*(k) / \sqrt{\mathbf{w}^*(k)^T \mathbf{C} \mathbf{w}^*(k)}, \quad (4)$$

여기서 \mathbf{C} 는 \mathbf{x} 의 공분산 행렬을 나타낸다. g 는 비이차 함수를 의미하며 침도, 쌍곡선 탄젠트, 지수함수 등이 사용된다. g' 는 g 의 미분을 의미한다.

2.2 NNMF (Non-Negative Matrix Factorization)

신호의 독립성을 측정하는 수단으로 NNMF가 사용될 수 있다. NNMF는 임의의 행렬 \mathbf{V} 를 음수를 포함하지 않은 행렬 \mathbf{G} 와 \mathbf{Q} 의 곱으로 분해하는 알고리즘이다. 행렬 \mathbf{V} 는 다음과 같이 비음수 행렬 \mathbf{G} 와 \mathbf{Q} 의 곱으로 근사화 할 수 있다.^[11]

$$\mathbf{V} \approx \mathbf{G}\mathbf{Q}, \quad (5)$$

NNMF 알고리즘은 \mathbf{V} 와 $\mathbf{G}\mathbf{Q}$ 간의 오차를 최소화하기 위해 다음과 같은 비용함수를 사용한다.

$$\mathbf{C}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|^2 = \sum_{ij} (A_{ij} - B_{ij})^2, \quad (6)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{A}|\mathbf{B}) = \sum_{ij} (A_{ij} \log \frac{A_{ij}}{B_{ij}} - A_{ij} + B_{ij}), \quad (7)$$

여기서 행렬 $\mathbf{A} = \mathbf{V}$, $\mathbf{B} = \mathbf{G}\mathbf{Q}$, \mathbf{C} 는 \mathbf{A} 와 \mathbf{B} 의 최소제곱 오차, \mathbf{D} 는 \mathbf{B} 로부터 \mathbf{A} 의 발산 값이다. $\mathbf{A} = \mathbf{B}$ 일 때 두 비용함수의 하한 값은 모두 0이다. 순차적으로 계산되는 비용함수의 하한 값은 아래와 같은 증배 갱신 규칙에 의해 갱신된다.

$$\mathbf{Q}_{a\mu} \leftarrow \mathbf{Q}_{a\mu} \frac{(\mathbf{G}^T \mathbf{V})_{a\mu}}{(\mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{Q})_{a\mu}}, \quad (8)$$

$$\mathbf{G}_{ia} \leftarrow \mathbf{G}_{ia} \frac{(\mathbf{V} \mathbf{Q}^T)_{ia}}{(\mathbf{G} \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T)_{ia}}, \quad (9)$$

Eq. (6)에서 최소 제곱 오차 $\|\mathbf{V} - \mathbf{G}\mathbf{Q}\|^2$ 는 비증가 함수이며, 갱신 규칙에서 최소 제곱 오차가 거의 변하지 않을 때, 행렬 \mathbf{G} 와 \mathbf{Q} 는 임계값에 도달한다. 또

한 \mathbf{V} 의 발산 값 \mathbf{D} 는 비증가 함수이며, 갱신 규칙에서 발산 값이 거의 변화되지 않을 때, 행렬 \mathbf{G} 와 \mathbf{Q} 의 임계값에 도달한다.

2.3 JADE (Joint Approximation Diagonalization of Eigen-matrices)

JADE 알고리즘은 4차 누적 행렬을 기반으로 상호 대각화하여 혼합 행렬을 추정하는 방법이다. JADE 알고리즘은 백색화, 적률 계산 및 텐서분해 그리고 고유행렬의 공유대각화의 세 단계로 구성되어 있다.^[12] $\mathbf{X} = [\mathbf{x}(\omega_1) \ \mathbf{x}(\omega_2) \ \dots \ \mathbf{x}(\omega_L)]$, L 은 고속 푸리에 변환의 주파수 빈 개수와 할 때 백색화 과정은 PCA (Principal Component Analysis)를 통해 데이터 행렬 \mathbf{X} 의 열이 서로 수직이 되도록 하고 차원을 줄이는 과정으로, \mathbf{X} 에 행렬 \mathbf{D} 를 곱하여 얻어진다.

$$\mathbf{D}\mathbf{X} = \mathbf{P}^T, \quad (10)$$

여기서 \mathbf{P} 는 \mathbf{X} 의 SVD(Singular Value Decomposition), $\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{P}^T$ 을 통해 얻은 우측특이행렬이다. 따라서 $\mathbf{D} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^T$ 와 같다. 그 결과 행렬 \mathbf{P} 를 회전해도 열 벡터들은 상관관계가 없게 된다. JADE 알고리즘은 \mathbf{P} 의 회전을 찾아서 각 열 벡터가 독립이 되도록 하는 과정 중에 행렬 \mathbf{P} 의 4차 적률 즉, 신호의 자기 적률와 신호와 상호간의 상관 적률을 계산한다. 만약 신호 벡터가 독립이면 4차 상관 적률은 0이 되고, 자기적률은 최대가 된다. 이 과정에서는 적률 텐서의 벡터들이 통계적으로 독립이 되게 하는 회전 행렬을 계산한다. Jacobi 알고리즘을 이용한 공유대각화 과정은 서로 다른 신호들 간의 4차 적률에 해당되는 비대각인자의 값을 최소로 한다. 이 과정 중에 얻어진 투영 행렬은 결과적으로 분리 행렬 \mathbf{W} 를 추정한 값과 같다.

III. 실험

3.1 신호 획득 환경

알고리즘의 신호 분리 성능을 분석하기 위해 선배열 소나를 이용한 해상실험을 수행하였다. 실험 환경은 Fig. 1과 같다. 실험 해역의 수심은 약 1,000 m 이

었으며, 선배열 센서는 심도 약 200 m이었고 예인선을 이용하여 4kts로 예인하였다. 음원을 운용하는 선박은 선배열 센서 예인선으로부터 약 35 km 떨어진 위치에 정지해 있었다. 음원을 이용해 150 Hz, 330 Hz, 405 Hz의 세 주파수를 갖는 톤(tone) 신호를 송신하였다. 신호를 수신하는 과정에 음원의 방위와 같은 방위에서 다른 선박 등으로부터 간섭신호가 발생된 약 20 s 동안의 신호를 추출하여 신호 분리성능 실험에 사용하였다. 신호의 샘플링 주파수는 7812 Hz이다.

Fig. 2는 간섭신호가 발생한 신호 구간 중에서 약 10 s 경의 신호를 주파수-방위(빔 번호) 평면에서 나타낸 것이다. 이를 위해 약 0.5 s 신호에 대해 주파수 영역의 전력을 구해 빔 번호 별로 나타내었다. 원거리 신호를 송신하였음에도 불구하고 수신된 세 주파수의 톤 신호는 약 5개의 빔에 걸쳐 나타나고 있는 것을 볼 수 있다(화살표). 같은 방위의 약 490 Hz 부근에는 음원에서 송신하지 않은 간섭신호가 존재하는 것을 볼 수 있으며, 송신 신호의 정보가 주어지지 않은 상황에서는 신호인지 간섭신호인지 분간하기 어렵다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 3은 지연 합 빔 신호처리된 수신 신호의 단구간 푸리에 변환 분석 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 Fig. 2의 5번 빔 신호를 나타낸다. Fig. 3(e)로 갈수록 빔 번호가 증가하며 9번 빔까지 총 5개의 빔 신호를

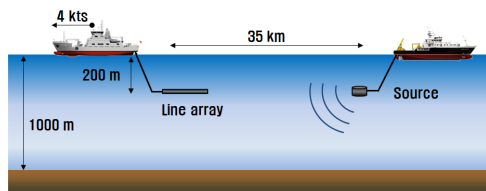


Fig. 1. Experiment environment.

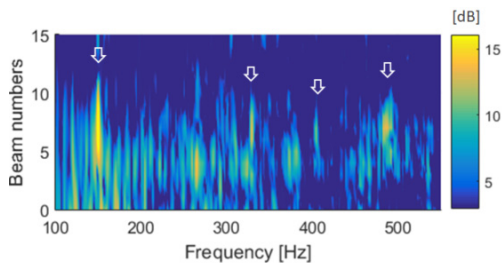


Fig. 2. Received signals in frequency-azimuth domain.

나타내었다. 단구간 푸리에 변환 분석을 위한 윈도우 길이(샘플 수)는 4096, 중첩 길이는 2048, FFT 길이는 4096이며 전력스펙트럼을 구해 그림으로 나타내었다. 총 20 s에 해당하는 분석 구간 동안 세 주파수의 톤 신호와 간섭신호가 5개의 빔에 걸쳐 나타나는 것을 확인할 수 있다.

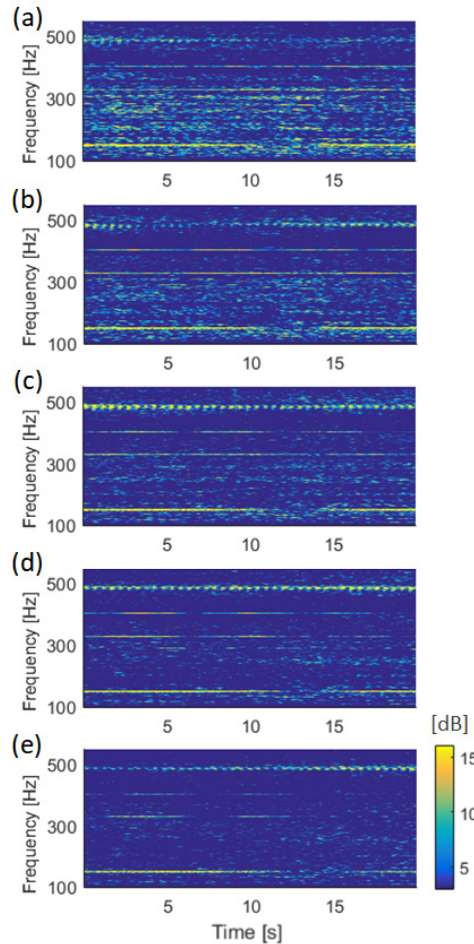


Fig. 3. Short-Time Fourier Transform (STFT) of five beamformed signals corresponding to the Fig. 2. (a) 5th beam, (b) 6th beam, (c) 7th beam, (d) 8th beam, (e) 9th beam.

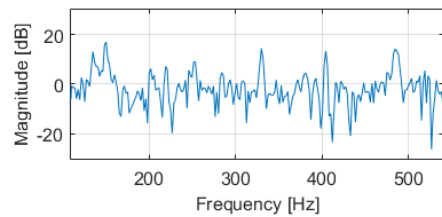


Fig. 4. Power spectrum of middle beam (7th beam) signal at 10 s.

Fig. 4는 Fig. 3에서 중간 빔(7번 빔)에서 10s 시점의 전력스펙트럼을 나타낸다. 송신 신호의 주파수인 150 Hz, 330 Hz, 405 Hz에서의 전력은 각각 17.1 dB, 14.4 dB, 13.3 dB이며 간섭신호는 484.5 Hz에서 14.1 dB로 송신 신호의 수신레벨과 거의 유사한 전력 크기를 나타내었다.

3.2 실험 결과

Fig 3의 빔 별 신호를 이용하여 FastICA, JADE, NNMF 세 가지 알고리즘의 신호 분리 성능을 비교해 본다. Figs. 5~10은 다섯 빔 신호를 전부 이용하여 신호 분리를 수행한 결과를 나타낸다. 먼저 Fig. 5는 FastICA 기법을 이용해 신호 분리를 수행한 결과이다. Fig. 6는 Fig. 5에서 10s 시점의 전력 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

Fig. 6(a)에는 간섭신호 성분이 주로 나타나며 Fig. 6(b)에는 신호성분이 나타난다. 그러나 Fig. 6(b)에 간섭신호 성분이 여전히 남아 있어 신호 구분이 뚜렷하게 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 7은 NNMF 기법을 이용해 신호 분리를 수행한 결과이다. Fig. 8은 Fig. 7에서 10s 시점의 전력 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

Fig. 7의 결과로 미루어 보아 Fig 8(a)에는 간섭신호 성분이 Fig. 6(b)에는 신호성분이 나타난 것으로 보인다. 그러나 간섭신호 성분과 신호 성분이 잘 구분되지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 JADE 기법을 이용해 신호 분리를 수행한 결과이다. Fig. 10은 Fig. 9에서 10s 시점의 전력 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

Fig. 10(a)와 (b)를 비교해 볼 때 이전 두 알고리즘의

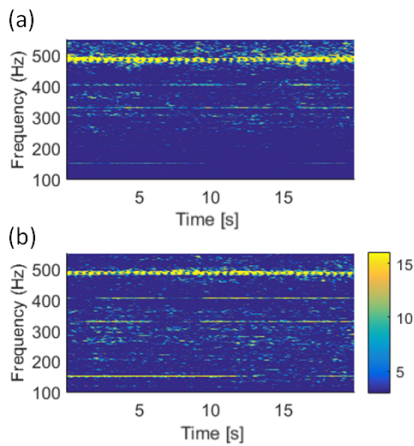


Fig. 5. STFT of separated signals by FastICA algorithm (a) interference (b) signal.

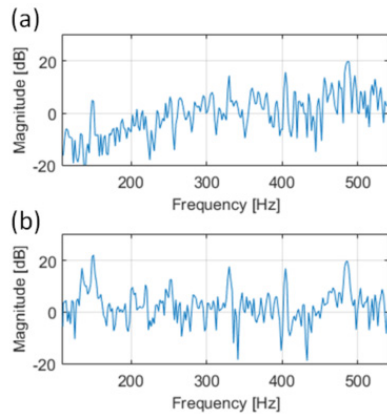


Fig. 6. Power spectrums of separated signals by FastICA algorithm (a) interference (b) signal.

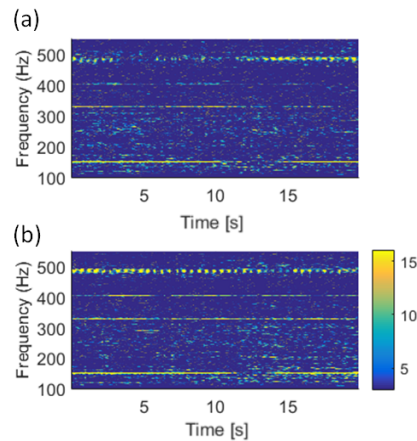


Fig. 7. STFT of separated signals by NNMF algorithm (a) interference (b) signal.

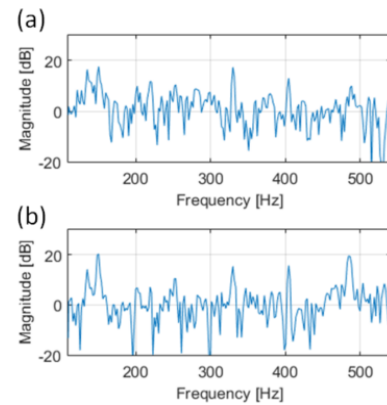


Fig. 8. Power spectrums of separated signals by NNMF algorithm (a) interference (b) signal.

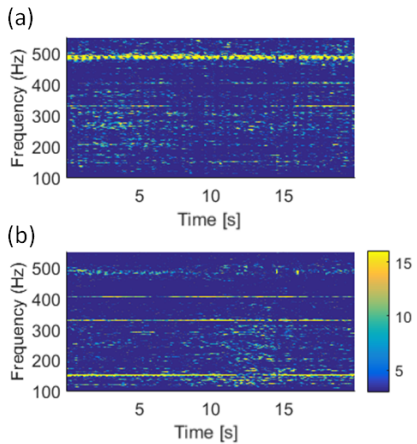


Fig. 9. STFT of separated signals by JADE algorithm (a) interference (b) signal.

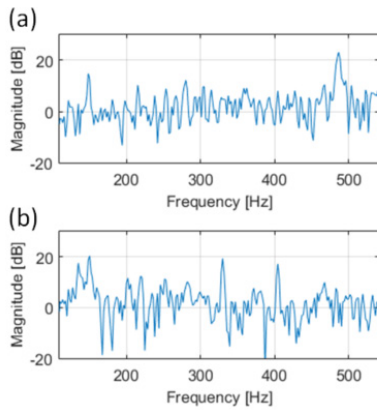


Fig. 10. Power spectrums of separated signals by JADE algorithm (a) interference (b) signal.

결과 달리 간섭신호 성분과 신호 성분이 잘 구분되는 것을 볼 수 있다.

Table 1은 각 알고리즘의 성능을 비교한 결과이다. 성능은 SIR(Signal to Interference Ratio)를 계산하여 평가하였다. 이때 신호레벨은 세 가지 톤 신호의 평균 레벨을 구하여 사용하였으며, 간섭신호레벨은 490 Hz의±10Hz 구간에서 최대 피크 레벨을 구해 사용하였다. 신호 분리성능은 입력 신호의 빔 개수를 2개부터 5개까지 변화시켜가며 비교하였다. SIR은 전체 신호 구간 중 5 s, 10 s, 15 s의 전력스펙트럼으로부터 각각 구해 평균한 값을 대푯값으로 사용하였다.

비교 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 빔 개수에 따른 분리성능의 평균치는 FastICA, NNMF, JADE가 각각 3.73, 8.34, 3.97로 JADE의 분리성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 빔 개수별 분리성능의 경

Table 1. Comparison of SIRs (signal to interference ratio) computed by three algorithms according to number of signals [dB].

No. of beams	FastICA	NNMF	JADE	
Mixed	1	2.08		
Separated	2	2.13	3.08	6.58
	3	6.29	2.58	9.55
	4	4.64	5.48	8.49
Averaged	5	1.87	4.73	8.72
		3.73	3.97	8.34

Table 2. Comparison of computation times of three algorithms [s].

No. of beams	FastICA	NNMF	JADE
5	0.8~2.7	4.0	0.7
7	1.3~3.5	4.9	0.9

우 FastICA는 빔 개수가 3개일 때, NNMF는 4개일 때, JADE는 3개일 때 가장 높아 빔 개수가 너무 적거나 너무 많아도 분리 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 독립성분분석을 수행하기 전 7번빔의 SIR이 2.08 dB인 것을 고려해 볼 때 FastICA의 경우 빔 개수에 따라 알고리즘 수행 전과 큰 차이가 없거나 더 악화되는 경우도 있음을 알 수 있다.

Table 2는 약 20 s간의 수동소나 신호분리를 수행함에 있어 소요된 각 알고리즘의 연산시간을 비교한 결과이다. 연산시간은 Matlab 시간 측정 함수를 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 JADE 알고리즘이 가장 빠름을 알 수 있고 NNMF의 계산시간이 가장 큰 것을 알 수 있다. 단, FastICA 알고리즘의 경우 수렴 조건 설정에 따라 연산 시간이 달라질 수 있다.

IV. 결 론

수동 선배열 소나의 저주파 신호대역은 많은 잡음과 간섭신호들이 존재한다. 본 논문에서는 간섭신호를 제거하기 위한 방법으로 독립성분분석을 이용하였으며, 이를 수동 선배열 센서 신호에 적용하는 방안을 제안하였다. 또한 기존의 독립성분분석 알고리즘을 실제 해상데이터에 적용하여 그 성능을 비교해 보았다. 인접한 빔 신호들을 이용하여 독립성분분석을 수행한 결과 JADE 알고리즘이 수동 선배열 소나

신호의 간섭신호 제거에 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD170011DD).

References

1. A. Hyvärinen and E. Oja., "Independent component analysis: algorithms and applications," *Neural networks*, **13**, 411-430 (2000).
2. A. Hyvärinen, "Independent component analysis: recent advances," *Phil. Trans. R. Soc. A* 371.1984, 20110534 (2013).
3. G. R. Naik, D. K. Kumar, and H. Weghorn, "Performance comparison of ICA algorithms for isometric hand gesture identification using surface EMG," *ISSNIP, Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information, 3rd International Conference on. IEEE*, 613-618 (2007).
4. N. Falco, L. Bruzzone, and J. A. Benediktsson. "A comparative study of different ICA algorithms for hyperspectral image analysis," *Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 5th Workshop on. IEEE*, 1-4 (2013).
5. Z. Koldovsky, P. Tichavsky, and E. Oja, "Efficient variant of algorithm FastICA for independent component analysis attaining the Cramér-Rao lower bound," *IEEE Transactions on Neural Networks*, **17**, 1265-1277 (2006).
6. N. N. de Moura, J. M. Seixas, W. S. Filho, and A. V. Greco, "Independent component analysis for optimal passive sonar signal detection. In *Intelligent Systems Design and Applications*," ISDA, Seventh International Conference IEEE, 671-678, (2007).
7. N. N. de Moura, E. S. Filho, and J. M. de Seixas, "Independent component analysis for passive sonar signal processing," *Advances in Sonar Technology. InTech*, 91-110 (2009).
8. H. Lee, I. Seo, and K. Bae, "Separation of passive sonar target signals using frequency domain independent component analysis" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **35**, 110-117 (2016).
9. A. Hyvärinen and E. Oja, "A fixed-point algorithm for independent component analysis," *Neural Computation*, **9**, 1482-1492 (1997).
10. A. Hyvärinen, P. Ramkumar, L. Parkkonen, and R. Hari, "Independent component analysis of short-time Fourier transforms for spontaneous EEG/MEG analysis," *NeuroImage*, **49**, 257-271 (2009).
11. H. -L, Hsieh and J. -T. Chien. "A new nonnegative matrix factorization for independent component analysis," *ICASSP IEEE, 2026-2029* (2010).
12. D. N. Rutledge and D. J-R Bouveresse, "Independent Components Analysis with the JADE algorithm," *Trends in Analytical Chemistry*, **50**, 22-32 (2013).

저자 약력

▶ 김 주 호 (Juho Kim)



2010년 2월: 제주대학교 해양시스템공학과 학사
2012년 2월: 제주대학교 해양시스템공학과 석사
2016년 2월: 제주대학교 해양시스템공학과 박사
2016년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

▶ Hina Ashraf



2010년: NUCES-FAST Telecommunication Engineering 학사
2014년: NUCES-FAST Electrical Engineering 석사
2018년 ~ 현재: 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정

▶ 이 종 현 (Chong-Hyun Lee)



1985년: 한양대학교 전자공학과 학사 졸업
1987년: Michigan Technological University 석사 졸업
2002년: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 박사 졸업
1990년 ~ 1995년: 한국전자통신연구원 선임연구원
2000년 ~ 2002년: (주)KM Telecom 연구소장
2003년 ~ 2006년: 서경대학교 전자공학과 전임강사
2017년 ~ 2018년: Georgia Institute of Technology 방문교수
2006년 ~ 현재: 제주대학교 해양시스템공학과 교수

▶ 정 명 준 (Myoung Jun Cheong)



2004년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 학사
2006년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 석사
2006년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원