

중첩 비음수 행렬 분해 기법에 기반한 지속파 능동 소나의 잔향 신호 제거 기법

Reverberation suppression algorithm for continuous-wave active sonar system based on overlapping nonnegative matrix factorization

이석진,^{1†} 임준석,² 정명준³

(Seokjin Lee,^{1†} Jun-Seok Lim,² and Myoung Jun Cheong³)

¹경기대학교 전자공학과, ²세종대학교 전자정보통신공학과, ³국방과학연구소
(Received March 10, 2017; revised April 17, 2017; accepted July 31, 2017)

초 록: 본 논문에서는 지속파 능동 소나의 수신된 신호에서 잔향 신호를 제거하는 후처리 알고리즘을 도출하고자 하며, 제안하는 알고리즘은 작은 도플러효과가 존재하여 목표물로부터 반사된 핑 신호가 잔향신호와 잘 구분이 되지 않는 경우를 목표로 하여 고안되었다. 본 알고리즘은 중첩 비음수 행렬 분해 기법에 기반하고 있으며, 방사될 핑 신호의 주파수 특성을 분석한 후, 수신된 신호의 시간-주파수 영역 특성을 이용하여 잔향 신호를 제거하고 핑 신호를 복원한다. 알고리즘의 효과를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 다양한 잔향 신호 에너지 환경에서 6 dB 가량의 신호대잔향비 성능 향상을 보임을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 능동 소나, 지속파, 잔향 제거, 비음수 행렬 분해

ABSTRACT: In this paper, a post-processing algorithm to suppress reverberation for continuous-wave active sonar system is developed. The developed algorithm is designed for a low-doppler environment where the target echo is not distinguishable from the reverberation. The algorithm is developed based on overlapping nonnegative matrix factorization method. The algorithm analyzes the frequency characteristics of transmitting ping signal, then suppresses the reverberation using time-frequency characteristics of the received signal. Simulations performed in order to evaluate the proposed algorithm, and the results show that the proposed algorithm makes 6 dB signal-to-reverberation ratio enhancement in various reverberation energy conditions.

Keywords: Active sonar, Continuous wave, Reverberation suppression, Nonnegative matrix factorization

PACS numbers: 43.60.Hj, 43.30.Vh

1. 서 론

수중에서 대상체를 탐지함에 있어서 음향신호를 이용한 소나 시스템은 필수적인 도구이다. 특히 직접 음파를 방사하여 그 반사음을 측정함으로써 대상체를 탐지하는 능동 소나는 그 쓰임새가 더욱 중요하다.

능동 소나를 이용하여 대상체로부터의 반사음을 정확히 얻기 위해서는 원치 않는 신호, 즉 잡음을 제거하는 것이 중요하다. 특히, 방사한 음향이 주변 환경에 의해 반사되어 발생하는 잔향 신호의 경우 대상 반사음 신호와 그 특성이 유사하기 때문에 제거하기가 어렵다. 또한 실제 환경에서는 도플러에 의한 주파수 변화도 고려하여야 한다.

기존 연구들에서 능동 소나 시스템에서 잔향을 제거하기 위해서는 기하학적 빔살 파형을 이용하거나

†Corresponding author: Seokjin Lee (sjlee6@kgu.ac.kr)
Department of Electronic Engineering, Kyoggi University, 154-42,
Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16227, Republic of Korea
(Tel: 82-31-249-9807, Fax: 82-31-244-6300)

“이 논문은 2016년도 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문임.”

도플러에 민감한 펄스를 설계하는 등 주로 특정 환경에서 잘 동작하도록 새로운 신호를 설계하는 방법으로 수행되어왔다.^[1-3]

이 외에도 잔향에 대한 이상적 수신기에 대한 이론이 제시된 바 있으나 산란 함수 등 신호의 통계적 특성을 필요로 하여 현실적으로 사용되기 어렵고,^[4] 최근에는 이를 바탕으로 하여 주성분 역산(principal component inversion)^[4] 및 이를 개선한 신호 부분공간 추출(signal subspace extraction)^[5] 등의 알고리즘이 고안되었으나, 잔향 신호 에너지 등 사전 지식을 필요로 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 일반적인 지속파(continuous wave) 펄 신호를 이용하는 시스템에서 적용될 수 있는 잔향 제거 알고리즘을 도출한다. 특히 본 연구에서 도출된 잔향 제거 알고리즘은 시간-주파수 영역에서 동작하도록 하여, 빔형성기 등의 공간 정보를 이용하는 시스템과 병행하여 사용이 가능하다.

II. 문제 정의

소나 시스템에서 수신된 신호 $x(t)$ 는 다음과 같다.

$$x(t) = s(t) + r(t) + n(t), \quad (1)$$

여기서 $s(t)$ 는 목표물로부터 반사된 반향 신호, $r(t)$ 는 주변 환경으로부터의 잔향 신호, $n(t)$ 는 배경 잡음 신호를 나타내며, $s(t)$ 는 다음과 같이 모델링된다.

$$s(t) = c(t) \cos(2\pi f_d t), \quad (2)$$

$$c(t) = \cos(2\pi f_0 t), \quad (3)$$

여기서 f_0 는 방사된 펄 신호의 중심주파수, f_d 는 도플러 주파수를 나타내며, $c(t)$ 는 방사된 펄 신호를 가리킨다.

능동 소나에서 잔향 신호 $r(t)$ 는 산란체 점을 이용하여 모델링하는 방법^[6] 및 레일리(Rayleigh) 포락선 모델을 이용하는 방법 등이 있으며,^[7] 본 논문에서는 능동 소나에 있어 위 모델들의 단점을 보완하여 고안된 기법^[8]을 이용하여 능동 소나의 잔향을 묘사하였다.

Eq. (1)의 신호를 시간-주파수 영역에서 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{S} + \mathbf{R} + \mathbf{N}, \quad (4)$$

여기서 행렬 $\mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{N}$ 은 각각 $x(t), s(t), r(t), n(t)$ 의 시간-주파수 표현이며, 주파수 bin의 개수를 K , 시간 프레임의 개수를 N 이라 할 때 각 행렬은 $K \times N$ 의 크기를 가진다. 또한 $c(t)$ 의 시간-주파수 표현을 행렬 \mathbf{C} 라 할 때, 행렬 \mathbf{S} 는 행렬 \mathbf{C} 가 도플러 효과에 의해 주파수 축으로 평행이동된 형태로 나타난다.

본 연구에서는 위와 같이 행렬 \mathbf{S} 가 행렬 \mathbf{C} 의 주파수 축 평행이동된 형태를 가진다는 성질을 이용하여, 방사된 펄 신호 데이터로부터 행렬 \mathbf{S} 를 추정하고 잔향을 제거하는 알고리즘을 도출하고자 한다.

III. 잔향 제거 알고리즘

3.1 중첩 비음수 행렬 분해 기법

중첩 비음수 행렬 분해 모델은 다음과 같이 정의된다.^[9]

$$\mathbf{V} = \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{W}_{\uparrow p} \mathbf{H}_p + \mathbf{E}, \quad (5)$$

여기서 행렬 $\mathbf{V}, \mathbf{W}, \mathbf{H}_p$ 는 각각 $K \times N, K \times R, R \times N$ 크기의 행렬이며, R 은 비음수 행렬 분해 모델의 차수(order)를 의미한다. 또한, $\mathbf{W}_{\uparrow p}$ 는 \mathbf{W} 행렬의 각 행이 p 만큼 위쪽으로 이동한 것을 의미한다.

본 논문에서 도출하는 알고리즘에서는 행렬 \mathbf{V} 를 수신된 신호로 삼아서 이를 $\mathbf{W}_{\uparrow p}$ 와 \mathbf{H}_p 의 곱들의 합으로 모델링하며, 비음수 행렬 분해 알고리즘을 이용하여 \mathbf{W} 와 \mathbf{H}_p 행렬들을 추정한다.

비음수 행렬 분해 기법은 사용하는 비용 함수의 종류에 따라 다양하게 나타나며, 본 논문에서는 Kullback-Leibler 거리 함수에 의한 추정 함수를 사용하였다. 먼저 각 이동 위치 p ($0 \leq p \leq P-1$)에 대한 시간 기저 행렬 \mathbf{H}_p 를 다음과 같이 추정한다.^[7]

$$\hat{\mathbf{V}} \leftarrow \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{W}_{\uparrow p} \mathbf{H}_p, \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_p \leftarrow \mathbf{H}_p \cdot \times \frac{\left[(\mathbf{W}_{\uparrow p})^T \left(\frac{\mathbf{V}}{\hat{\mathbf{V}}} \right) \right]}{(\mathbf{W}_{\uparrow p})^T \mathbf{1}_{K \times N}}, \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{A} \cdot \times \mathbf{B}$ 는 원소단위의 곱셈을, $\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}}$ 는 원소단위의 나눗셈을 의미한다. 위와 같이 \mathbf{H}_p 를 추정한 이후에는 이를 이용하여 다음과 같이 \mathbf{W} 를 추정한다.

$$\hat{\mathbf{V}} \leftarrow \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{W}_{\uparrow p} \mathbf{H}_p, \quad (8)$$

$$\mathbf{W} \leftarrow \sum_{p=0}^{P-1} \left[\mathbf{W} \cdot \times \frac{\left\{ \left(\frac{\mathbf{V}}{\hat{\mathbf{V}}} \right)_{\uparrow (-p)} \mathbf{H}_p^T \right\}}{\mathbf{1}_{K \times N} \mathbf{H}_p^T} \right], \quad (9)$$

비용함수가 충분히 수렴할 때까지 Eqs. (6)~(9)까지의 과정을 반복 수행함으로써 \mathbf{W} 와 \mathbf{H}_p 행렬들을 추정한다.

3.2 잔향 제거 알고리즘

본 논문에서 제안하는 잔향 제거 알고리즘은 다음과 같은 과정을 통하여 수행된다.

- 1) 시간-주파수 표현: 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 이용하여 방사 펄 신호 $c(t)$ 및 수신된 신호 $x(t)$ 의 시간-주파수 표현 행렬 \mathbf{C} 와 행렬 \mathbf{X} 를 각각 구한다.
- 2) 펄 신호 \mathbf{C} 의 주파수 기저 학습: 펄 신호는 수신된 신호가 아니므로 도플러의 영향을 받지 않는다. 따라서 중첩 비음수 행렬 분해 기법이 아닌 일반 비음수 행렬 분해 기법을 수행하면 된다. Eq. (5)의 중첩 비음수 행렬 모델에서 중첩 차수 P 를 1로 설정하면 일반 비음수 행렬 분해 모델과 동일하게 되므로, 이를 통하여 일반적인 비음수 행렬 분해 기법을 수행할 수 있다.

따라서 P 를 1로 설정하여 Eqs. (6)~(9)까지의 작업을 수행하여 펄 신호의 주파수 기저 \mathbf{W}_c 를 추정하며,

이때 펄 신호의 주파수 특성이 시간에 따라 변하지 않는 지속파 신호라고 가정하여, 기저의 개수 R 은 1로 설정한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\theta}_c = \text{ONMF}(|\mathbf{C}|)_{R=1, P=1}, \quad (10)$$

여기서 $\boldsymbol{\theta}_c = (\mathbf{W}_c, \mathbf{H}_c)$ 이며, $\text{ONMF}(\cdot)$ 는 Eqs. (6)~(9)까지의 중첩 비음수 행렬 분해 과정을 반복수행하는 것을 의미한다.

- 3) 수신된 신호 \mathbf{X} 의 시간 기저 추정: 2)의 과정에서 학습된 펄 신호의 주파수 기저 \mathbf{W}_c 를 이용하여 다음과 같이 수신된 신호의 시간 기저 $\mathbf{H}_{\mathbf{x}, p}$ 를 추정한다.

$$\mathbf{H}_{\mathbf{x}, p} = \text{ONMF}(|\mathbf{X}|)_{\mathbf{w}_x = \mathbf{w}_c, R=1}, \quad (11)$$

- 4) 신호 기저 선택: 다음과 같이 $\mathbf{H}_{\mathbf{x}, p}$ 의 에너지를 분석하여, 가장 큰 에너지를 가지는 중첩 기저 하나를 선택한다.

$$p_s = \arg \max_p \|\mathbf{H}_{\mathbf{x}, p}\|_2^2, \quad (12)$$

- 5) 신호 복원: 학습된 주파수 기저 \mathbf{W}_c 의 p_s 만큼 주파수 이동된 형태인 $\mathbf{W}_{c, \uparrow p_s}$ 와, p_s 에 해당하는 시간 기저 $\mathbf{H}_{\mathbf{x}, p_s}$ 를 이용하여 다음과 같이 반향 신호를 복원한다.^[10]

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{X} \cdot \times \frac{\mathbf{W}_{c, \uparrow p_s} \mathbf{H}_{\mathbf{x}, p_s}}{|\mathbf{X}|}, \quad (13)$$

위의 과정 중 2)의 펄 주파수 추정 과정은 시스템 초기화 시 한번만 수행하면 되며, 매 신호 수신 때마다 수행할 필요는 없다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 도출된 알고리즘의 동작을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 사용된 펄 신호는

0.05 s 길이의 지속파 신호를 사용하였으며, 대상체로부터의 정규화 도플러 비(f/f_0)는 1.036으로 가정하였다. 시뮬레이션의 잔향 환경은 -10 dB의 신호대잔향비를 설정하였다. 데이터의 시간-주파수 표현은 16 ms 길이의 Hamming 윈도우를 75 % 중첩하여 단시간 푸리에 변환을 수행하여 얻어내었으며, 위의 중첩 정도는 시간 축 신호로 합성할 때의 오차를 최소화하기 위하여 선택되었다. 잔향 신호는 2장에서 언급한 능동 소나 잔향 모델⁸⁾을 이용하여 생성되었다.

제안하는 알고리즘의 파라미터인 주파수 이동 기저 개수 P 는 10으로, 비음수 행렬 분해 기법의 반복 수행 횟수는 200으로 설정하였다. 위의 설정값들은 알고리즘 결과에 크게 영향을 미치지 않으나, P 의 경우는 잔향 신호 영역을 모두 포함하기에 충분한 크기 이상의 값을 설정하는 편이 바람직하다.

Fig. 1의 (a)는 이상적인 수신 핑 신호, (b)는 수신된

잔향 신호, (c)는 핑 신호와 잔향 신호가 섞여있는 신호, (d)는 본 논문에서 제안하는 알고리즘에 의해 처리된 결과 신호의 시간-주파수 표현을 도시하고 있다. Fig. 1(d)의 처리 결과를 살펴보면 Fig. 1(b)와 같은 잔향 성분을 제거하고, Fig. 1(a)와 유사한 출력을 얻어내는 것을 알 수 있다.

알고리즘의 동작 과정을 살펴보기 위해서 학습된 주파수 기저 \mathbf{W}_c 와 수신된 신호의 시간 기저 $\mathbf{H}_{x,p}$ 를 도시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 학습된 주파수 기저의 모양을 도시하고 있으며, Fig. 2(b)는 이를 이용하여 분석된 시간 기저 중 5개($p=0, \dots, 4$)의 그래프를 도시하고 있다. 그래프를 통해 살펴보면, 학습된 주파수 기저에 해당하는 성분이 $p=2$ (목표물 반향 신호가 존재하는 성분)에서 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

다양한 신호대잔향비(Signal to Reverberation Ratio,

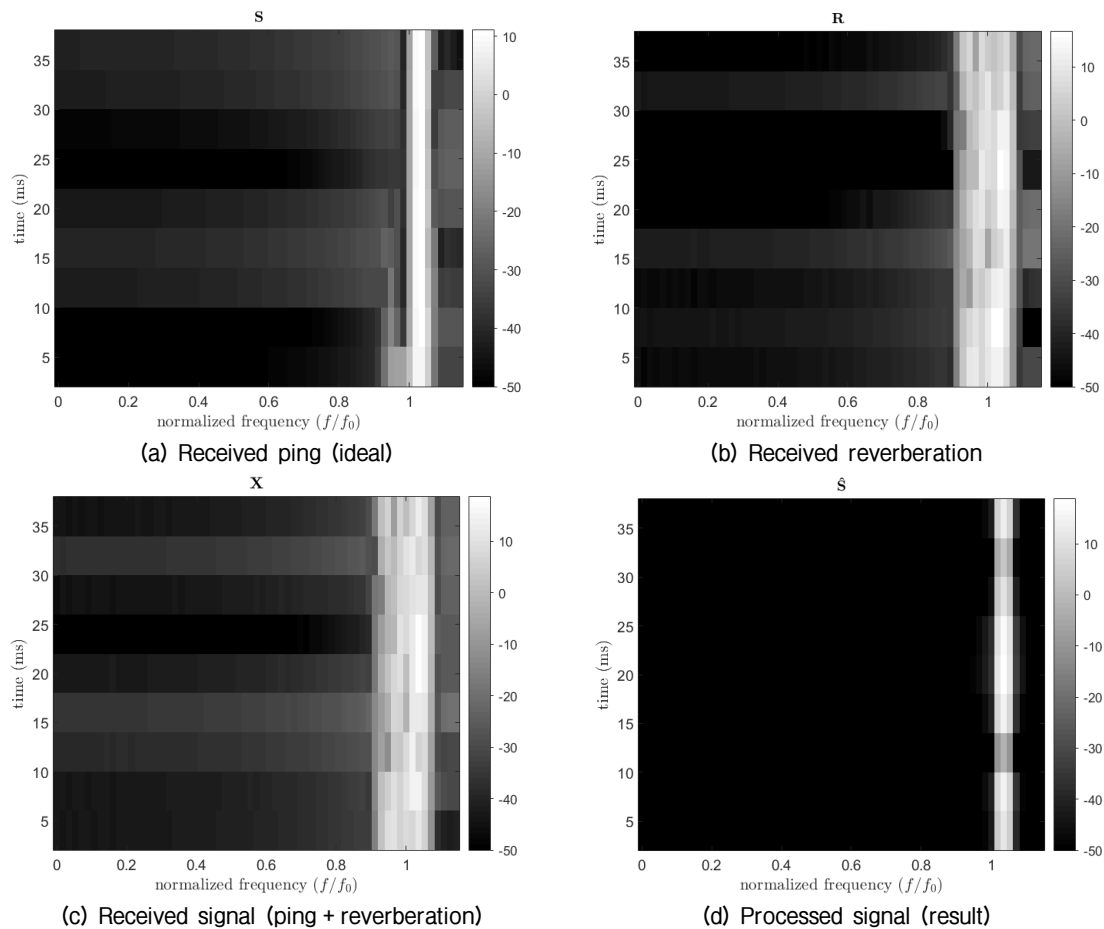


Fig. 1. Time-frequency presentation for received ping (ideal), reverberation, received signal, and processing result.

SRR) 환경에 대한 알고리즘 성능을 분석하기 위하여, -20 dB ~ 5 dB의 신호대잔향비 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 알고리즘의 성능을 신호 부분공간 추출^[5] 알고리즘의 성능과 비교하였으

며, 이 때 잔향 신호의 에너지는 사전지식으로 주어 진다고 가정하였다.

Fig. 3은 다양한 신호대잔향비 환경에 대하여 제안 하는 알고리즘을 수행한 결과를 그래프로 도시한 것이다. -20 dB ~ 5 dB의 신호대잔향비 환경의 시뮬레 이션을 5 dB 간격으로 수행한 결과를 살펴볼 수 있으며, 분석결과 6 dB 가량의 신호대잔향비 이득을 얻어 내었음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 중첩 비음수 행렬 분해 기법에 기 반하여 지속파 능동 소나의 잔향 성분을 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 빔형 성기와 같이 공간정보를 이용하여 신호를 처리하는 모듈의 후처리 알고리즘으로 사용되는 것을 목표로 하였으며, 해당 신호의 시간-주파수 영역 특성을 이 용하여 잔향 신호를 제거하고자 하였다.

본 논문에서 도출된 알고리즘은 중첩 비음수 행렬 분해 알고리즘을 기반으로 하여, 방사될 핑 신호의 특성을 학습한 후 수신된 신호에서 해당 주파수 특성 신호를 복원하는 방법으로 잔향 신호를 제거한다.

핑 신호 및 잔향 신호에 대한 시뮬레이션을 통하 여 본 논문에서 제안하는 알고리즘에 대한 동작을 분석하였으며, 분석 결과 제안하는 알고리즘이 다양 한 신호대잔향비 환경에서 6 dB 가량의 신호대잔향 비 이득을 만들어 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되 었음(UD160015DD).

References

1. H. Cox and L. Hung, "Geometric comb waveforms for reverberation suppression," 1994 Conference Record of the Twenty-Eighty Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2, 1185-1189 (1994).
2. T. Collins and P. Atkins, "Doppler-sensitive active sonar pulse designs for reverberation processing," IEE

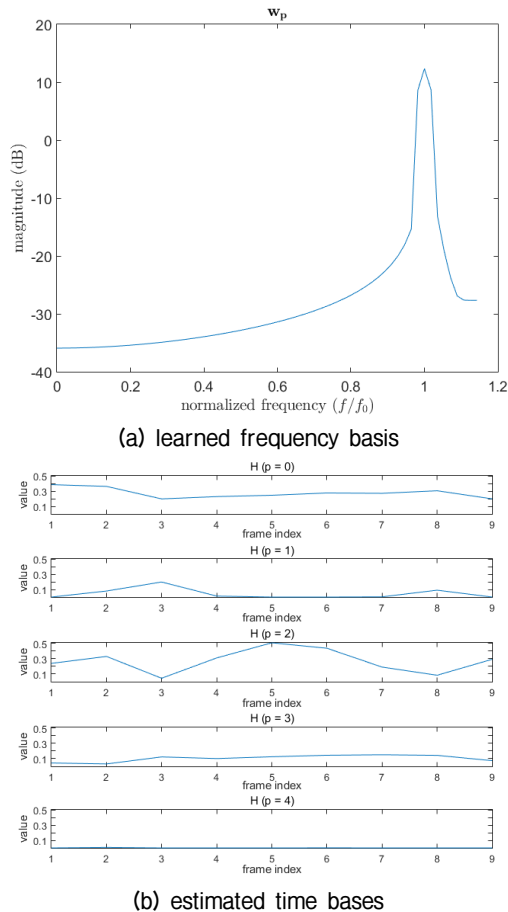


Fig. 2. Estimated frequency and time bases of proposed algorithm.

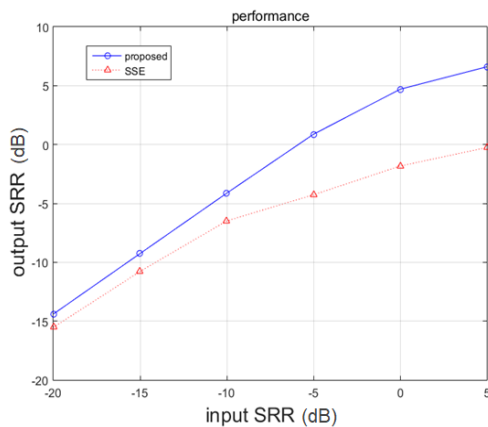


Fig. 3. Simulation results for various signal environment.

- Proceedings of Radar, Sonar, and Navigation **145**, 347-353 (1998).
3. 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).
 4. G. Ginolhac and G. Jourdain, "Principal component inverse algorithm for detection in the presence of reverberation," IEEE J. Ocean. Eng. **27**, 310-321 (2002).
 5. W. Lei, 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).
 6. P. Faure, "Theoretical model of reverberation noise," J. Acoust. Soc. Am. **36**, 259-266 (1964).
 7. F. C. Marchall, "A conceptual model of reverberation in the ocean," Proc. IEEE ICSSP **2**, 836-839 (1977).
 8. D. A. Abraham and A. P. Lyons, "Simulation of Non-Rayleigh reverberation and clutter," IEEE J. Ocean. Eng. **29**, 347-362 (2004).
 9. A. Cichocki, R. Zdunek, A. H. Phan, and S. Amari, *Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations* (Wiley, Chichester, 2009), pp. 160-166.
 10. T. Virtanen, "Monaural sound source separation by nonnegative matrix factorization with temporal continuity and sparseness criteria," IEEE Trans. Audio, Speech, and Lang. Process. **15**, 1066-1074 (2007).

▶ 임 준 석 (Jun-Seok Lim)



1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
 1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
 1996년 8월: 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
 1996년 7월 ~ 1997년 10월: LG종합기술원
 현재: 세종대학교 전자정보통신공학과 교수

▶ 정 명 준 (Myoung Jun Cheong)



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

저자 약력

▶ 이 석 진 (Seokjin Lee)



2006년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사
 2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
 2012년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2012년 3월: (주)LG전자 CTO연구소 선임 연구원
 2014년 3월 ~ 현재: 경기대학교 전자공학과 조교수