

Received: 2026/08/12
Revised: 2026/08/24
Accepted: 2026/09/10
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Sera Kim

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5234
E-mail: srkim85@gmail.com

광대역 도플러 스케일 보상과 희소 다중경로 등화를 이용한 천해 능동소나 탐지 성능 향상

Abstract

천해 능동소나는 해수면·해저면에 의한 다중경로와 표적 및 플랫폼의 상대운동에 따른 광대역 도플러 효과로 인해 탐지 성능이 저하된다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위해 광대역 도플러 스케일 보상과 희소 다중경로 등화를 결합한 능동소나 신호처리 기법을 제안한다. FFT 기반 단계적 정밀 탐색으로 도플러 스케일을 추정·보상하고, OMP 기반 희소 채널 추정과 iterative sparse-MMSE 등화를 수행한 후 펄스압축과 CA-CFAR를 적용하여 표적을 검출한다. MATLAB Monte Carlo 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 $-30 \sim 0$ dB SNR 범위에서 안정적인 탐지 성능을 보였으며, 평균 gate false alarm probability는 0.0118로 목표값 0.01에 근접하였다. 또한 SNR 증가에 따라 도플러 추정 오차가 감소하였으며, ROC 분석에서도 낮은 오경보율 영역에서 높은 탐지확률을 유지하여 제안 기법의 유효성을 확인하였다.

Shallow-water active sonar is degraded by multipath propagation and wideband Doppler effects. This paper proposes a signal-processing method that combines wideband Doppler-scale compensation and sparse multipath equalization. Doppler compensation, OMP-based channel estimation, Sparse-MMSE equalization, pulse compression, and CA-CFAR detection were sequentially applied. Monte Carlo simulations demonstrated stable detection over -30 to 0 dB SNR, with a gate false-alarm probability of 0.0118. ROC results also confirmed improved detection performance at low false-alarm rates.

Keywords

능동소나(Active Sonar),
광대역 도플러(Wideband Doppler),
희소 다중경로(Sparse Multipath),
적교 정합 추구(OMP)

Acknowledgement

이 논문은 2026년 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

Improving Active Sonar Detection in Shallow Water Using Wideband Doppler-Scale Compensation and Sparse Multipath Equalization

최영두¹, 김세라^{2*}

¹해군 소령/해군사관학교 전자제어공학과 조교수

²해군사관학교 기초과학과 부교수

Youngdoo Choi¹, Sera Kim^{2*}

¹LCDR, ROK Navy/Assistant professor, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

²Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

능동소나는 송신 음향신호의 반사파를 이용하여 수중 표적을 탐지하는 핵심 수중감시 센서이다. 그러나 천해 환경에서는 해수면과 해저면 반사에 의한 다중경로가 펄스압축 출력의 부엽과 허위 표적을 증가시켜 탐지 성능을 저하시킨다[1,2]. 최근에는 선형 주파수 변조(linear frequency modulation, LFM) 계열 파형의 거리-도플러 특성과 반향음 억제 성능을 개선하여 저 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 환경에서 능동소나 탐지 성능을 향상시키려는 연구도 수행되고 있다[3].

또한 표적과 플랫폼의 상대운동은 광대역 LFM 신호에 시간축 압축·팽창 형태의 도플러 스케일 왜곡을 발생시킨다[4]. 이러한 왜곡은 LFM 신호의 매치드필터 사이의 정합성을 저하시켜 펄스압축 이득과 거리 추정 정확도를 감소시킬 수 있으므로, 광대역 신호에서는 도플러 스케일을 고려한 보상이 요구된다.

한편 천해 수중음향 채널은 제한된 수의 지배적인 전파경로가 존재하는 희소 다중경로 구조로 모델링할 수 있으며, 이러한 특성을 이용한 희소 복원 기반 채널추정 기법이 활발히 연구되고 있다[5-9].

특히 직교정합추구(orthogonal matching pursuit, OMP)는 관측신호와 사전 원자의 상관도를 이용하여 주요 경로를 반복적으로 선택함으로써 비교적 낮은 계산복잡도로 희소 채널을 추정할 수 있다[5,6]. 최근에는 OMP의 개선뿐만 아니라 사전 학습(dictionary learning), 희소도 적응 정합 추구(sparsity adaptive matching pursuit, SAMP) 및 희소 베이저안 학습(sparse Bayesian learning, SBL) 등을 결합하여 저 SNR 수중 음향 환경에서 채널 추정 정확도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다[7-9].

기존 협대역 도플러 보상은 이러한 시간축 왜곡을 충분히 보상하기 어렵고, 일반적인 MMSE 등화 역시 천해 다중경로 채널의 희소성을 효과적으로 활용하지 못하는 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT) 기반 광대역 도플러 스케일 추정과 OMP 기반 희소 채널 추정 및 반복 희소 최소평균제곱 오차 등화(iterative sparse-minimum mean square error equalization, iterative sparse-MMSE)를 결합한 능동소나 신호처리 기법을 제안한다. 단계적 정밀 탐색(coarse-to-fine search) 및 도플러 스케일을 추정하고 시간축 왜곡을 보정한 후, OMP로 지배적인 다중경로를 추정하여 반복 MMSE 등화를 수행한다. 이후 펄스 압축과 셀 평균 일정 오경보율(cell averaging constant false alarm, CA-CFAR)을 적용하여 표적을 검출한다[10]. 매트랩(MATLAB) 몬테 카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 통해 탐지확률, ROC, 도플러 추정 RMSE를 평가하여 제안 기법의 성능을 검증한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 능동소나 신호 및 채널 모델을 제시하고, 제3장에서는 제안 알고리즘을 설명한다. 제4장에서는 시뮬레이션 결과를 분석하고 제5장에서 결론을 제시한다.

2. 광대역 능동소나 신호 및 채널 모델

능동소나에서 수신되는 신호는 송신 신호가 표적에서 반사된 후 수중음향 채널을 거쳐 수신기에 도달하는 과정에서 광대역 도플러 왜곡과 다중경로 영향을 동시에 받는다[1,4]. 특히 천해 환경에서는 해수면과 해저면에서 반복적으로 발생하는 반사로 인해 여

러 개의 전파경로가 형성되며, 이로 인해 수신 신호는 서로 다른 시간 지연과 감쇠를 갖는 다중경로 성분의 합으로 구성된다[7,8]. 이러한 특성을 고려하여 광대역 LFM 신호와 희소 다중경로 채널을 기반으로 신호 모델을 구성하였다.

송신 신호는 능동소나에서 가장 널리 사용되는 LFM 신호로 가정하며, 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$s(t) = \exp \left[j2\pi \left(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2 \right) \right], \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

여기서 f_0 는 시작 주파수, T 는 펄스폭(pulse width), $\mu = B/T$ 는 chirp rate, B 는 신호 대역폭을 의미한다. LFM 신호는 긴 송신 펄스를 이용하여 높은 송신 에너지를 확보하면서도 매치드필터를 통해 높은 거리 분해능을 제공하므로 능동소나에 널리 적용된다.

표적과 플랫폼 사이의 상대운동은 광대역 도플러 스케일을 발생시키며, 시간축은 수식 (2)와 같이 변형된다[4].

$$t' = (1 + \epsilon)t \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 광대역 도플러 스케일 인자이다. 이를 고려한 수신 신호는 수식 (3)과 같이 모델링된다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K a_k s((1 + \epsilon)(t - \tau_k)) + n(t) \quad (3)$$

여기서 a_k 와 τ_k 는 각각 k 번째 전파경로의 감쇠계수와 시간지연이며, $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)을 나타낸다.

천해 수중음향 채널은 전체 가능한 전파경로 중 일부 경로만이 큰 에너지를 갖는 희소(sparse) 특성을 가지므로 채널은 다음과 수식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$h(\tau) = \sum_{k=1}^K a_k \delta(\tau - \tau_k) \quad (4)$$

여기서 $\delta(\cdot)$ 는 디랙 델타(Dirac delta) 함수이다. 이러한 희소 채널 모델은 실제 천해 환경을 효과적으로 반영하며, OMP 기반 희소 채널 추정에 적합하다[5,6].

3. 광대역 도플러 보상 및 희소 다중경로 등화 알고리즘

본 연구에서는 천해 환경에서 발생하는 광대역 도플러 왜곡과 희소 다중경로 간섭을 동시에 보상하기 위한 통합 신호처리 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 FFT 기반 광대역 도플러 스케일 추정, OMP 기반 희소 채널 추정, iterative sparse-MMSE 등화, 펄스압축 및 CA-CFAR 탐지를 순차적으로 수행하여 기존 능동소나 신호처리 기법의 탐지 성능을 향상시키도록 설계하였다. 전체 처리 과정은 수신 신호 탐지, 도플러 스케일 추정, 시간축 보상, 희소 채널 추정, sparse-MMSE 등화, 펄스압축, CA-CFAR 탐지의 순서로 수행된다.

먼저 광대역 도플러 스케일은 FFT 기반 coarse-to-fine search를 이용하여 추정한다. 다양한 도플러 후보에 대해 시간축을 보정한 수신 신호와 송신 신호의 매치드필터 출력을 계산하고, 가장 큰 상관값을 갖는 도플러 스케일을 최적값으로 선택한다. 추정된 도플러 스케일을 이용하여 수신 신호를 재표본화함으로써 상대운동에 의한 시간축 압축 및 팽창을 보상한다.

도플러가 보상된 신호는 OMP를 이용하여 희소 다중경로 채널을 추정한다. OMP는 잔차와 가장 높은 상관도를 갖는 지연 성분을 반복적으로 선택하여 주요 다중경로만을 추정하므로, 실제 천해 수중음향 채널의 희소 특성을 효과적으로 반영할 수 있다. 추정된 채널은 iterative sparse-MMSE 등화기에 입력되며, 채널 추정과 등화를 반복 수행하여 다중경로에 의한 간섭을 점진적으로 제거한다. 이 과정은 단일 MMSE 등화보다 채널 추정 오차에 대한 강인성이 높고, 펄스압축 성능을 향상시키는 장점이 있다.

등화가 완료된 신호는 매치드필터를 이용하여 펄스압축을 수행한 후, CA-CFAR 알고리즘을 적용하여 표적을 검출한다. CA-CFAR는 주변 참조 셀의 평균 잡음전력을 이용하여 적응적으로 탐지 임계값을 계산하므로, 다양한 잡음 환경에서도 일정한 오경보확률을 유지할 수 있다. 제안한 알고리즘은 광대역 도플러 보상과 희소 다중경로 등화를 하나의 통합 구조로 설계되었다.

4. 시뮬레이션 환경 및 성능 분석

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB R2024a 환경에서 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 천해 환경의 능동소나를 가정하여 광대역 LFM 송신신호, 희소 다중경로 채널 및 AWGN(additive white Gaussian noise) 환경에서 수행하였다. SNR은 -30 dB부터 0 dB까지 2 dB 간격으로 변화시켰으며, 각 SNR에서 1000회 Monte Carlo 반복실험을 수행하여 평균 성능을 산출하였다. 성능평가 항목은 도플러 스케일 추정 정확도, 희소 채널 추정 성능, 탐지확률(P_d), 도플러 추정 RMSE, 계산시간 및 수신자 조작 특성(receiver operating characteristic, ROC)으로 구성하였다.

4.1 광대역 도플러 스케일 추정

Fig. 1은 FFT 기반 coarse-to-fine search를 이용한 광대역 도플러 스케일 추정 결과를 나타낸다. 실제 도플러 스케일은 약 $\varepsilon = 0.006$ 부근에서 최대 상관값을 가지며, 추정된 값 역시 동일한 위치에서 최대 FFT 매치드필터 출력을 나타내었다. 전체 탐색 구간에서 단일 최대값이 형성되어 큰 추정오차(gross estimation error)가 발생하지 않았으며, 제안한 FFT 기반 탐색 알고리즘이 광대역 도플러 스케일을 안정적으로 추정함을 확인하였다.

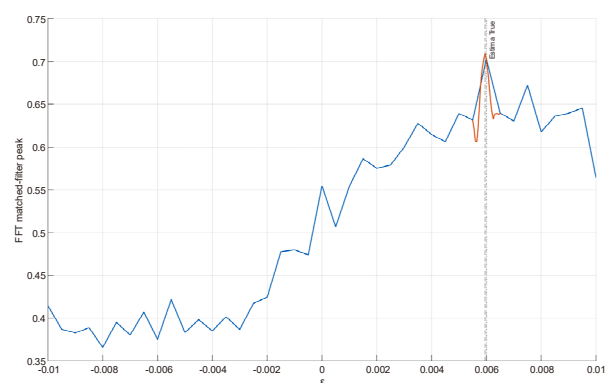


Fig. 1. Coarse-fine wideband Doppler-scale estimation

4.2 희소 채널 추정 및 펄스압축 성능

Fig. 2는 OMP 기반 희소 채널 추정 결과를 나타낸다. 총 4개의 주요 다중경로가 추정되었으며, 각각 약

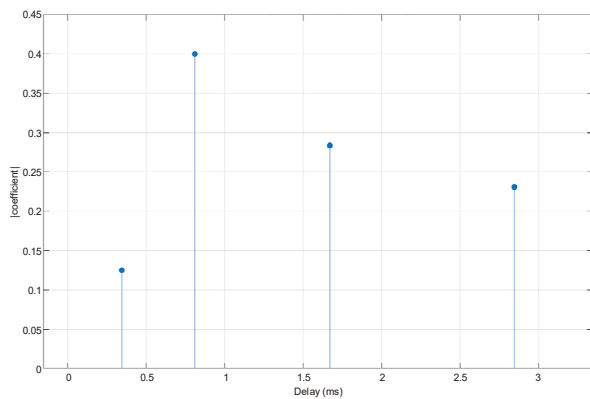


Fig. 2. Estimated sparse delay-Doppler channel taps

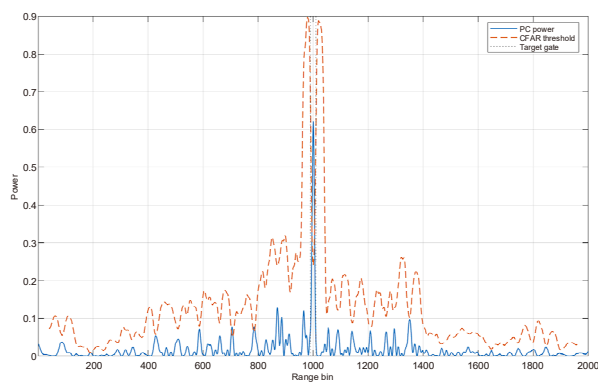


Fig. 3. Pulse compression after sparse-MMSE equalization

0.3 ms, 0.8 ms, 1.7 ms 및 2.9 ms 부근에서 유의미한 채널 계수가 검출되었다. 이는 천해 환경에서 지배적인 반사경로만을 효과적으로 복원하고 있음을 의미한다.

Fig. 3는 sparse-MMSE 등화 후 수행한 펄스압축 결과를 나타낸다. 목표 표적은 약 거리 셀(range bin) 1000에서 가장 큰 피크를 형성하였으며, 주변 부엽은 효과적으로 억제되었다. CA-CFAR 임계값 또한 목표 표적 부근에서만 탐지 조건을 만족하여 허위표적 발생이 크게 감소하였다. 이는 제안한 희소 등화 과정이 다중경로에 의한 간섭을 효과적으로 제거하였음을 보여준다.

4.3 탐지 성능

Fig. 4는 목표 오경보확률에서의 탐지확률을 나타낸다. SNR이 증가함에 따라 탐지확률은 단조롭게 증가하는 특성을 보였다. 약 -18 dB에서 18%, -16 dB에서 약 54%, -14 dB에서 약 85%, -12 dB에서는 약

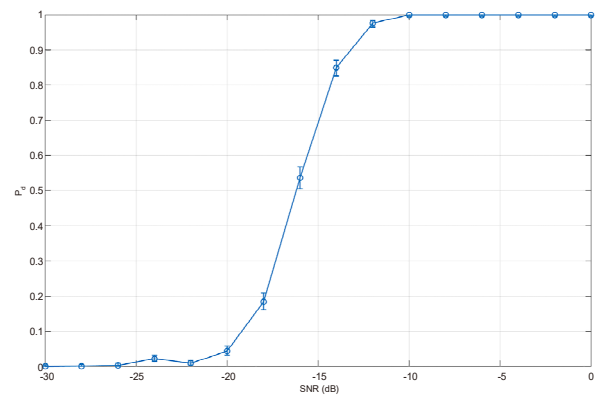


Fig. 4. Detection probability, target gate $P_{fa} = 0.001$

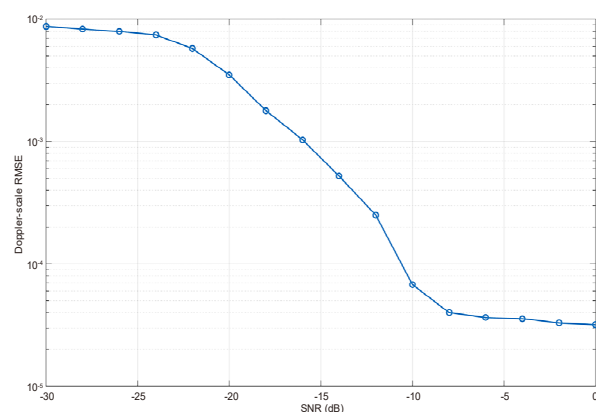


Fig. 5. Doppler estimation RMSE

97%의 탐지확률을 나타내었으며, -10 dB 이상에서는 거의 100%의 탐지확률을 유지하였다. 따라서 제안한 알고리즘은 매우 낮은 SNR에서도 안정적인 탐지 성능을 제공함을 확인하였다.

4.4 도플러 추정 정확도

Fig. 5는 도플러 스케일 추정 평균제곱근오차(RMSE)를 나타낸다. SNR이 증가할수록 RMSE는 지속적으로 감소하였으며, -30 dB에서는 9×10^{-3} 수준이었으나, -10 dB에서는 약 7×10^{-5} , 0 dB에서는 약 3×10^{-5} 수준까지 감소하였다. 이는 제안한 FFT 기반 도플러 추정기가 저 SNR 환경에서도 안정적으로 동작하며, 고 SNR 환경에서는 매우 높은 추정 정확도를 제공함을 의미한다.

4.5 계산시간 분석

Fig. 6는 Monte Carlo 1회 수행당 평균 계산시간을

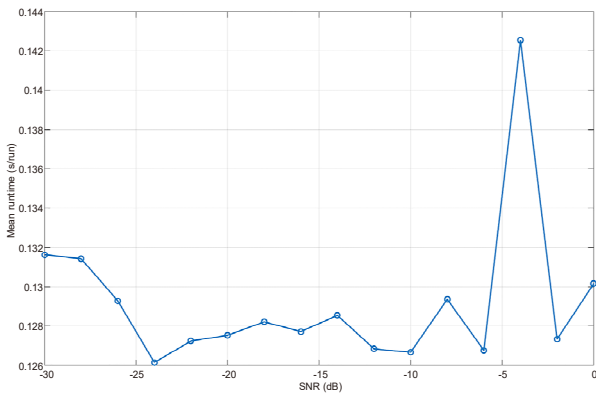


Fig. 6. Computational runtime

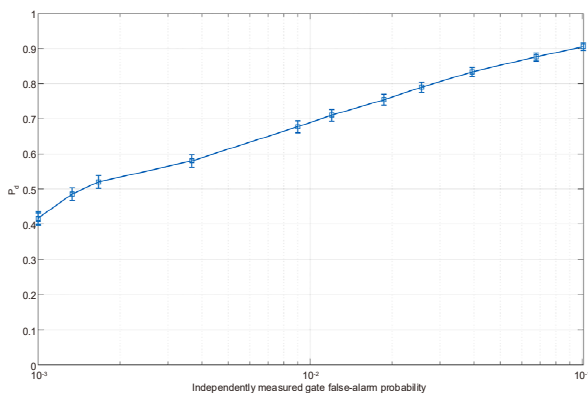


Fig. 7. Validated empirical ROC at SNR = -16 dB, partial AUC = 0.0822

나타낸다. 평균 계산시간은 약 0.126~0.143초 범위에서 유지되었으며, 대부분의 SNR 구간에서는 약 0.128초 수준으로 거의 일정한 계산시간을 보였다. 일부 SNR 구간에서 일시적인 증가가 관찰되었으나 전체적인 변동은 크지 않았으며, 제안한 알고리즘이 안정적인 계산 복잡도를 가짐을 확인하였다.

4.6 ROC 성능 분석

Fig. 7은 SNR = -16 dB에서의 ROC 성능을 나타낸다. 오경보확률이 0.001에서 0.1까지 증가함에 따라 탐지확률은 약 0.41에서 0.91까지 증가하였다. 특히 낮은 오경보확률 영역에서도 비교적 높은 탐지확률을 유지하였으며, 부분 곡선하면적(partial area under the curve, partial AUC)은 0.0822로 계산되었다. 이는 제안한 광대역 도플러 보상과 희소 다중경로 등화 기법이 저 SNR 환경에서도 우수한 탐지 성능을 제공함을 의미한다.

종합적으로 제안한 알고리즘은 FFT 기반 광대역 도플러 추정과 OMP 기반 희소 채널 추정, sparse-MMSE 등화를 통합함으로써 천해 능동소나 환경에서 높은 탐지확률과 우수한 도플러 추정 정확도를 달성하였다. 또한 계산시간이 일정하게 유지되어 실시간 능동소나 신호처리 시스템에도 적용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 천해 환경에서 능동소나의 탐지 성능을 저하시키는 광대역 도플러 스케일 왜곡과 희소 다중경로 간섭을 동시에 보상하기 위한 통합 신호처리 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 FFT 기반 광대역 도플러 스케일 추정, OMP 기반 희소 채널 추정, iterative sparse-MMSE 등화, 펄스압축 및 CA-CFAR 탐지를 하나의 처리 과정으로 통합하여 기존 능동소나 신호처리 기법의 한계를 개선하고자 하였다.

MATLAB 기반 Monte Carlo 시뮬레이션 결과, 제안한 알고리즘은 -30 dB~0 dB의 SNR 환경에서 안정적인 탐지 성능을 유지하였으며, 목표 오경보확률을 만족하는 가운데 -14 dB 이상에서는 85% 이상의 탐지확률을 달성하여 광대역 도플러 보상과 희소 다중경로 등화의 효과를 확인하였다. ROC 분석에서도 낮은 오경보율에서 높은 탐지확률을 유지하여 제안 기법의 우수성을 검증하였다.

제안한 알고리즘은 광대역 도플러 보상과 희소 채널 추정을 하나의 통합 구조로 구현함으로써 우수한 탐지 성능과 거리 추정 정확도를 제공하였다. 또한 FFT와 OMP를 기반으로 구성되어 계산량이 비교적 안정적이므로 실시간 능동소나 신호처리 시스템에도 적용 가능성을 가진다.

향후 연구에서는 실제 해양 환경에서 획득한 수중 음향 데이터를 이용한 성능 검증과 함께, 분수 지연(fractional delay)을 고려한 채널 모델, 지연-도플러(delay-Doppler) 기반 희소 사전(dictionary) 및 적응형 sparse-MMSE 등화기를 적용하여 더욱 강인한 신호처리 기법으로 확장할 계획이다. 또한 GPU 및 FPGA 기반의 실시간 구현과 다양한 해양환경에서의 실험적 검증을 수행하여 실제 능동소나 체계에 적용 가능한 기술로 발전시키고자 한다.

참고문헌

- [1] Xavier Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications* (2nd ed.), Springer, 2010.
- [2] Mandar Chitre, 'A High-Frequency Warm Shallow Water Acoustic Communications Channel Model and Measurements,' *Journal of the Acoustical Society of America*, VOL. 122, NO. 5, 2007, pp. 2580–2586.
- [3] Yaojun Jia, Pingbo Wang, Hongkai Wei, Qiang Chen, & Yunhua Hu, 'Research on High-Resolution Processing of Frequency Modulation Combined Signal for Active Sonar Detection,' *Frontiers in Physics*, VOL. 13, 2025, Article 1542037, 2025. <https://doi.org/10.3389/fphy.2025.1542037>
- [4] P. A. Bello, 'Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels,' *IEEE Transactions on Communication Systems*, VOL. 11, NO. 4, 1963, pp. 360–393.
- [5] J. A. Tropp & A. C. Gilbert, 'Signal Recovery from Random Measurements via Orthogonal Matching Pursuit,' *IEEE Transactions on Information Theory*, VOL. 53, NO. 12, 2007, pp. 4655–4666.
- [6] B. Liu, N. Jia, J. Huang, D. Xiao, Y. Jia, S. Guo, & M. Li, 'An Improved Underwater Acoustic Communication Channel Estimation Based on A* Orthogonal Matching Pursuit Algorithm,' *Acta Acustica*, VOL. 47, NO. 3, 2022, pp. 321–328. <https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2022.03.006>
- [7] Xueru Hu, Lanyue Zhang, Di Wu, & Jia Wang, 'Underwater Acoustic Channel Estimation via an Orthogonal Matching Pursuit Algorithm Based on the Modified Phase-Transform-Weighted Function,' *Journal of Marine Science and Engineering*, VOL. 11, NO. 7, 2023, Article 1397. <https://doi.org/10.3390/jmse11071397>
- [8] Chuanxi Xing, Yanling Ran, Mao Lu, Guangzhi Tan, & Qiang Meng, 'A TMSBL Underwater Acoustic Channel Estimation Method Based on Dictionary Learning Denoising,' *Frontiers in Marine Science*, VOL. 11, 2024, Article 1362416. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1362416>
- [9] Zhen Wang, Maofa Wang, Yangzhen Wang, Zhenjing Zhu, Guanagtao Shang, Jiabao Zhao, & Ning Hu, 'Based on the N2N-SAMP for Sparse Underwater Acoustic Channel Estimation,' *Frontiers in Physics*, VOL. 12, 2024, Article 1460388. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1460388>