

수중음향 시간 지연 추정 성능향상을 위한 디노이징 방법 연구

주상국, 이호준*, 고학림**

호서대학교

commzz1993@naver.com, *hjlee@hoseo.edu, **hlko@hoseo.edu

A Study on Denoising for Underwater Acoustic Time Delay Estimation

Zhu Xiangguo, Lee Ho Jun, Ko Hak Lim

Hoseo Univ.

요약

수중음향 시스템에서 시간 지연 추정(TDE)은 위치추정 및 통신의 핵심 기술이지만, 저신호대잡음비(low-SNR) 환경에서는 잡음에 의한 성능 저하가 심각하다. 이를 개선하기 위해 특이값 분해(SVD) 기반 전처리가 활용되며, 이때 랭크 추정 기준이 디노이징 성능을 크게 좌우한다. 본 연구에서는 정보이론적 기준인 Akaike Information Criterion(AIC)과 Minimum Description Length(MDL), 그리고 기존 Lipschitz 지수 기반 방법을 적용하여 전처리 성능을 비교하였다. 성능 비교 결과 AIC는 랭크를 과대 추정하여 노이즈가 친존하는 경향을 보였으며, MDL은 보다 보수적인 추정으로 신호 왜곡은 줄였으나 일부 정보 손실이 발생하였다. Lipschitz 기반 방법은 신호의 스펙트럼 특성을 잘 유지했으나 잡음 환경 변화에 대한 안정성 한계가 관찰되었다. 이에 본 연구에서는 SVD와 웨이블릿 임계처리를 결합한 디노이징 기법을 적용한 후에 랭크를 추정하는 연구를 수행하였으며, 제안된 결합 전처리 방식이 낮은 SNR 환경에서도 RMSE를 크게 줄이며 기준 GCC 기법보다 견고한 TDE 성능을 확보함을 알 수 있었다.

I. 서 론

수중음향 환경에서 시간 지연 추정(Time Delay Estimation, TDE)은 위치추정 및 통신 시스템의 핵심 요소이다. 일반화 상호상관(Generalized Cross-Correlation, GCC) 계열 방법은 구현이 간단하고 널리 활용되고 있으나[1], 낮은 신호대잡음비(SNR) 환경에서는 잡음의 영향으로 정확도가 급격히 저하되는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 다양한 전처리 기법이 제안되었으며, 특히 특이값 분해(SVD) 기반 접근은 신호와 잡음을 효과적으로 분리할 수 있어 주목받고 있다. 그러나 SVD 전처리 과정에서 랭크 추정 방식의 차이에 따라 디노이징 성능이 크게 달라지는 문제가 있다. 기존 Lipschitz 지수 기반 추정은 신호 특성을 잘 보존하지만 안정성에 한계가 있으며, 정보이론적 기준인 Akaike Information Criterion(AIC)과 Minimum Description Length(MDL)은 서로 다른 경향을 보여 잡음 억제 성능에 영향을 미친다. 본 연구에서는 SVD와 웨이블릿 임계처리를 결합한 디노이징 기법을 적용하고, 다양한 랭크 추정 기준(AIC, MDL, Lipschitz 기반)을 비교 분석함으로써 저 SNR 환경에서 기준 GCC 방법 대비 성능 향상 가능성을 검증한다[2].

II. 본론

수중음향 신호는 해양 채널 특성상 심각한 잡음과 간섭의 영향을 받는다. 특히 저 SNR 환경에서는 원래 신호의 구조적 특성이 손상되어, 상호 상관 기반의 전통적인 시간 지연 추정 알고리즘이 올바른 지연값을 검출하기 어렵다. 이 문제는 위치추정이나 수중 통신 시스템의 정확도와 신뢰성을 크게 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 본격적으로 지연 추정 알고리즘을 적용하기에 앞서, 원 신호에서 잡음을 억제하고 신호 품질을 개선하는 전처리 과정이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 이러한 목적을 위해 SVD-웨이블릿 기반 디노이징 기법을 적용하였다. 먼저 관측된 신호를 행켈(Hankel) 행렬로 변환하여 시간적 상관성을 반영한 후, 특이값 분해(SVD)를 수행한다[4]. 이때 큰 특이값은 원 신호의 주요 성분에 대응하고, 작은 특이값은 잡음 성분에 해당한다. 따라서 잡음 억제를 위해 작은 특이값을 제거하는 방식이 사용된다. 여기서 중요한 것은 유효한 랭크를 결정하는 과정인데, 본 연구에서는 ** 정보이론적 기준(AIC, MDL)을 도입하여 자동으로 최적의 신호 차원을 추정하였다.

AIC와 MDL의 일반적인 수식은 다음과 같다:

$$AIC(\hat{L}) = -2N \ln \left[\frac{\prod_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-\hat{L}} \sum_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i \right]^{B-\hat{L}}} \right] + 2\hat{L}(2B-\hat{L}) \quad (1)$$

$$MDL(\hat{L}) = -N \ln \left[\frac{\prod_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-\hat{L}} \sum_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i \right]^{B-\hat{L}}} \right] + \frac{1}{2}\hat{L}(2B-\hat{L}) \ln N \quad (2)$$

식에서 L 은 추정된 랭크이고 N 은 샘플 개수를 나타낸다.

두 기준 모두 로그-우도 항과 복잡도 패널티 항으로 구성되며, AIC는 상대적으로 자유도를 크게 허용하는 반면, MDL은 표본 수에 따라 더 강한 패널티를 부여하여 보수적인 랭크를 산출한다.

이후 웨이블릿 임계처리(thresholding)를 적용하여 고주파 대역에 잔존하는 잡음을 추가로 억제하였다[3]. 이러한 전처리 절차를 통해 신호의 구조적 특징은 유지하면서도 전반적인 신호 대 잡음비(SNR)를 향상시킬 수

있었다.

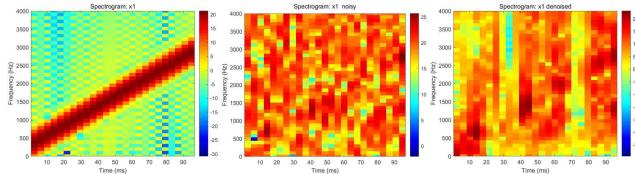


그림 1. 전처리 과정 전후의 신호 비교

이러한 전처리 효과는 그림 1의 스펙트로그램 비교를 통해 확인할 수 있다. 원 신호(왼쪽)는 Chirp 신호의 특성이 시간에 따라 선형적으로 주파수가 증가하는 형태로 뚜렷하게 나타난다. 그러나 잡음이 포함된 신호(오른쪽)는 주파수 전 대역에 걸쳐 스펙트럼이 확산되어, 원래 신호의 주파수 성분을 식별하기 어려운 상태가 된다. 반면, 전처리 과정을 거친 신호(가운데)는 잡음 성분이 상당 부분 제거되었으며, 원래의 Chirp 패턴이 다시 뚜렷하게 드러난다. 이는 SVD와 웨이블릿을 결합한 디노이징 기법이 신호 품질을 유효하게 복원함을 보여주는 시각적 증거라 할 수 있다.

전처리 과정을 거친 신호는 이후 시간 지연 추정 알고리즘에 입력된다. 본 연구에서는 대표적인 기법인 GCC-WSP(Without Signal Processing)와 GCC-ASP(After Signal Processing)를 비롯하여, 이차 상호관련 기반의 GQCC-WSP/ASP, 그리고 고차 누적량을 활용한 FOC-ASP 알고리즘을 비교 대상으로 선정하였다[5]. WSP 계열은 원 신호를 기반으로 하며, ASP 계열은 전처리된 신호를 기반으로 한다. 따라서 ASP 계열의 성능은 전처리 효과를 반영하여 잡음에 대한 강인성을 보여줄 것으로 기대된다.

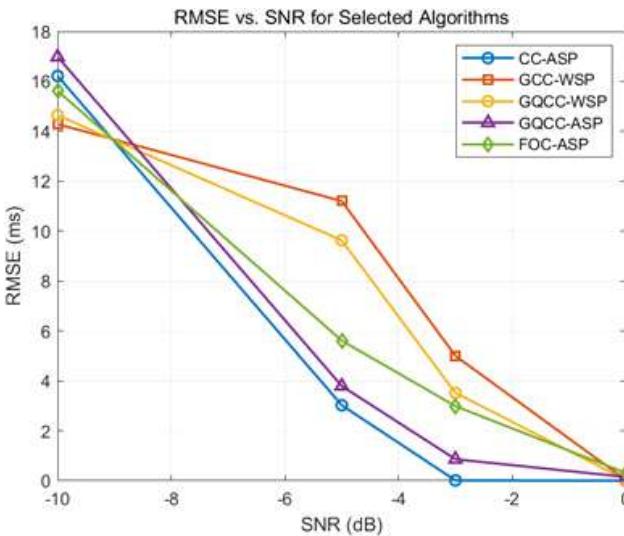


그림 2. 다양한 알고리즘에서 시간 지연 추정 결과

그림 2는 -10 dB에서 0 dB까지 SNR을 변화시켰을 때 각 알고리즘의 RMSE 결과를 나타낸 것이다. 저 SNR 구간에서는 GCC-WSP와 GQCC-WSP가 각각 14~16 ms 수준까지 RMSE가 증가하여 잡음 환경에 취약함을 확인할 수 있었다. 반면 ASP 계열 알고리즘과 FOC-ASP는 동일 조건에서도 상대적으로 낮은 RMSE를 유지하였다. 특히 -4 dB에서 GCC-WSP는 10 ms 이상의 오차를 기록한 반면, GQCC-ASP와 FOC-ASP는 2~4 ms 수준에 머물러 현저한 성능 개선을 보였다. 고 SNR 구간(-2 dB 이상)에서는 모든 알고리즘이 RMSE 1 ms 이하로 수렴하며 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 충분히 높은 SNR에서는 알고리즘 구조적 차이보다 채널 잡음이 주요 요인으로 작용하지 않음을 시사한다.

추가적으로, ASP 계열 전처리 효과는 랭크 추정 기준(AIC, MDL, Lipschitz 기반)에 따라 차이를 보였다. AIC 적용 시 랭크를 과대 추정하여 일부 노이즈 성분이 잔존하였고, MDL은 보수적인 추정으로 안정적인

성능을 확보하였으나 신호 일부 손실이 나타났다. Lipschitz 기반 방법은 Chirp 신호의 구조적 특성을 잘 복원했지만 잡음 환경 변화에 대한 안정성에 한계가 있었다. 이러한 결과는 랭크 추정 방식의 선택이 전처리 성능과 나아가 TDE 정확도에 직접적인 영향을 미친다는 점을 보여준다.

결과적으로, 그림 1과 그림 2를 통해 본 연구의 전처리 기법은 시각적 측면(스펙트럼 복원)과 정량적 측면(RMSE 감소)에서 모두 효과적이 확인되었다. 즉, 제안된 SVD-웨이블릿 기반 전처리 과정은 잡음 환경에서의 시간 지연 추정 성능을 크게 향상시키는 핵심 요소임을 입증하였다.

III. 결론

본 연구에서는 SVD-웨이블릿 기반 전처리를 통해 수중음향 환경에서 시간 지연 추정 성능을 향상시켰다. 제안된 기법은 헴벌 행렬과 SVD, 정 보이론적 기준(AIC, MDL) 기반 랭크 추정, 웨이블릿 임계처리로 구성되며, 스펙트로그램과 RMSE 분석을 통해 저 SNR 환경에서 ASP 계열 및 FOC-ASP 방식의 우수성을 확인하였다. 또한 랭크 추정 기준에 따라 성능 차이가 나타나 전처리 효과가 크게 달라짐을 검증하였다. 따라서 본 방법은 잡음이 지배적인 환경에서 TDE의 신뢰성을 높이는 효과적인 접근임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2024-00436765)

참 고 문 현

- [1] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320 - 327, Aug. 1976.
- [2] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 33, no. 2, pp. 387 - 392, Apr. 1985.
- [3] S. Mallat and W. L. Hwang, "Singularity detection and processing with wavelets," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 38, no. 2, pp. 617 - 643, Mar. 1992.
- [4] A. Rajwade, A. Rangarajan, and A. Banerjee, "Image denoising using the higher order singular value decomposition," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35, no. 4, pp. 849 - 862, Apr. 2013.
- [5] Z. He, Q. Zhang, and X. He, "Generalized cross-correlation time delay estimation based on improved wavelet threshold function," *2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, Dec. 2016.