



Received: 2026/07/27  
Revised: 2026/08/10  
Accepted: 2026/09/08  
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

# 천해 다중경로 환경에서 펄스압축 소나를 이용한 표적 탐지 연구

## Target Detection Using Pulse-Compression Sonar in a Shallow-Water Multipath Environment

최영두<sup>1</sup>, 김세라<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>해군 소령/해군사관학교 전자제어공학과 조교수

<sup>2</sup>해군사관학교 기초과학과 부교수

Youngdoo Choi<sup>1</sup>, Sera Kim<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval  
Academy

**Abstract**

본 논문에서는 천해 다중경로 환경에서 LFM 펄스압축 소나의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위한 통합 신호처리 기법을 제안한다. 제안 기법은 정합필터 기반 후보구간 선정, OMP/LASSO 희소복원에 의한 경로 지연·진폭 추정, 반사경로 재구성 및 제거, 적응형 부엽 억제와 CA-CFAR 검출로 구성된다. 천해 다중경로를 모사한 합성 희소 채널 모델과 MATLAB 시뮬레이션 구조를 제시하고, PSLR 및 ISLR을 성능지표로 정의하였다. 제안기법은 정합필터의 처리이득을 유지하면서 다중경로 허위표적과 거리 편향을 감소시키는 것을 목적으로 한다.

This paper proposes an integrated signal-processing method to improve the target-detection performance of linear frequency-modulated (LFM) pulse-compression sonar in shallow-water multipath environments. The proposed method consists of matched-filter-based candidate-window selection; path-delay and amplitude estimation using orthogonal matching pursuit (OMP) and/or least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) sparse recovery; reconstruction and cancellation of reflected paths; adaptive sidelobe suppression; and cell-averaging constant false alarm rate (CA-CFAR) detection. A synthetic sparse channel model that simulates shallow-water multipath propagation and a MATLAB simulation framework are presented, and the peak sidelobe ratio (PSLR) and integrated sidelobe ratio (ISLR) are defined as performance metrics. The proposed method is intended to preserve the processing gain of the matched filter while reducing multipath-induced false targets and range bias.

**Keywords**

천해(Shallow Water),  
다중경로(Multipath Propagation),  
희소복원(Sparse Recovery)  
펄스압축(Pulse Compression),  
소나(SONAR)

**Acknowledgement**

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

### 1. 서론

능동소나는 송신 음파가 표적에서 반사되어 되돌아오는 에코를 분석함으로써 표적의 존재와 거리 및 위치를 추정하는 대표적인 수중 탐지체계이다. 최근에는 함정 탑재 소나뿐만 아니라 기뢰탐색소나, 전방주시소나, 항만 감시체계, 무인잠수정 및 무인수상정 탑재 소나로 적용범위가 확대되고 있다. 이에 따라 높은 탐지거리와 우수한 거리분해능을 동시에 확보할 수 있는 신호처리 기술의 중요성이 증가하고 있다.

LFM 기반 펄스압축은 긴 펄스를 송신하여 충분한 에너지를 확보하면서도, 수신단의 정합필터 처리를 통해 짧은 펄스에 준하는 거리분해능을 얻는 대표적인 방법이다[1]. 그러나 천해에서는 음파가 수면과 해저에서 반복적으로 반사되기 때문에 동일한 표적 에코가 서로 다른 지연, 감쇠 및 위상을 갖는 여러 경로로 수신된다. 이러한 전달환경은 복수의 음선과 도달신호로 표현할 수 있으며, bellhop과 같은 음선추적 모델을 통해 분석할 수 있다[2,3]. 이러한 다중경로는 펄스압축 출력에서 피크 중첩, 주엽 왜곡, 부엽 증가, 허위표적 및 거리 추정오차를 유발한다[4].

기존 정합필터는 백색 가우시안 잡음 환경에서 출력 신호대잡음비를 최대화하지만, 다중경로를 직접경로와 반사경로로 구분할 수

없다. 또한 Hamming, Taylor 및 Kaiser 등의 창 함수는 부엽을 감소시키는 대신 주엽폭 증가와 압축손실을 발생시키며, 반사경로의 주 피크 자체를 제거하지 못한다. 이에 따라 수중 다중경로 채널을 희소하게 모델링하고 지연과 복소 진폭을 추정하는 희소복원 기법이 연구되고 있다[4-6].

본 연구에서는 천해 다중경로를 단순한 확률적 잡음이 아닌 추정 가능한 희소 채널로 해석한다. 이를 바탕으로 정합필터 기반 후보구간 선정, 희소복원 기반 경로 추정, 반사경로 재구성·제거 및 적응형 부엽 억제제를 결합한 통합 신호처리 구조를 제안한다. 압축 센싱은 희소 신호를 제한된 관측자료로부터 복원할 수 있는 이론적 기반을 제공하며[5], OMP는 비교적 낮은 계산량으로 희소 지지집합을 추정할 수 있다[6]. 본 연구의 주요 기여는 다음과 같다.

첫째, 천해 다중경로 펄스압축 문제를 희소 채널 추정 문제로 정식화한다. 둘째, 정합필터를 초기 처리 이득 확보와 후보구간 제한에 활용하여 희소복원의 계산량을 줄인다. 셋째, 희소복원 결과를 채널 임펄스 응답으로 해석하고 반사경로를 재구성하여 제거한다. 넷째, 적응형 부엽 억제제와 CFAR를 결합하여 거리 정확도 및 부엽 성능을 종합적으로 개선한다.

## 2. 천해 음파전달과 다중경로 채널 모델

### 2.1 천해 다중경로 특성

천해 음향환경은 수면과 해저로 둘러싸인 도파관 형태를 가지며, 음파는 음속구배에 의해 굴절되고 경계면에서 반복적으로 반사된다. Bellhop은 가우시안 빔 추적을 기반으로 음선, 고유음선, 전달손실 및 도달신호를 계산할 수 있는 대표적인 수중 음향전달 모델이다[2,3]. 주요 전파경로는 직접경로, 수면반사, 해저반사 및 수면-해저 반복반사로 구분된다. 각 경로는 서로 다른 전달거리와 반사횟수를 가지므로 수신신호에는 경로별 전달지연, 감쇠 및 위상차가 발생한다. 지연확산이 증가하면 동일 표적에 대한 복수의 펄스압축 피크가 형성된다. 특히 천해 도파관에서는 고차 반사경로가 분리와 식별이 중요한 문제로 다루어지고 있다[7].

천해 채널은 제한된 수의 이산 경로로 근사할 수 있으며, 수중 다중경로 채널이 지연영역에서 희소성을

갖는다는 가정은 기존 수중 음향 채널 복원 연구에서도 적용된 바 있다[4]. 천해 채널을  $L$ 개의 이산 경로로 가정하면 채널 임펄스 응답은 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \sum_{l=1}^L a_l e^{j\phi_l} \delta(t - \tau_l) \quad (1)$$

여기서  $a_l, \phi_l, \tau_l$ 은 각각  $l$ 번째 경로의 감쇠계수, 위상 변화 및 전달지연이다. 송신신호를  $s(t)$ , 잡음과 잔향을 포함한 외란을  $n(t)$ 라 하면 수신신호는 수식 (2)와 같다.

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) \quad (2)$$

수식 (1)을 수식 (2)에 대입하면 수식 (3)으로 표현된다.

$$r(t) = \sum_{l=1}^L a_l e^{j\phi_l} s(t - \tau_l) + n(t) \quad (3)$$

수식 (3)은 천해 수신신호가 서로 다른 시간지연과 복소 진폭을 갖는 송신신호 복사본의 합으로 구성됨을 의미한다.

### 2.2 경계면 반사 및 전달지연

평탄한 이상적 수면의 압력 반사계수는 공기와 해수의 큰 음향임피던스 차이로 인해 다음과 수식 (4)와 같이 근사할 수 있다.

$$\Gamma_s \approx -1 \Gamma_s \quad (4)$$

따라서 수면반사에서는 약  $180^\circ$ 의 위상반전이 발생한다. 실제 해면에서는 파랑과 표면 거칠기에 의해 결맞음 반사성분이 감소하므로 반사계수는 시간과 입사각에 따라 변화할 수 있다.

해저를 유체-유체 경계면으로 단순화하고 정상 입사를 가정하면 해저 반사계수는 수식 (5)로 표현된다.

$$\Gamma_b = \frac{Z_b - Z_w}{Z_b + Z_w} \quad (5)$$

여기서  $Z_b$ 와  $Z_w$ 는 각각 해저와 해수의 음향임피던스이다. 실제 해저반사는 주파수, 입사각, 퇴적층 구조 및 감쇠특성의 영향을 받으므로 bellhop 기반 실환경 모델에서는 주파수·입사각 의존 반사계수를 적용하는 것이 바람직하다.  $l$ 번째 경로의 전달지연은 수식 (6)으로 정의된다.

$$\tau_l = \frac{D_l}{c_{eff}} \quad (6)$$

여기서  $D_l$ 은 전체 음선 경로길이이고,  $c_{eff}$ 는 해당 경로의 유효음속이다. 단상태 능동소나에서는 왕복 전달시간을 이용하여 표적거리를 수식 (7)과 같이 계산한다.

$$\hat{R} = \frac{c_{eff}\hat{\tau}}{2} \quad (7)$$

채널의 지연확산은 수식 (8)로 정의된다.

$$T_D = \max_l(\tau_l) - \min_l(\tau_l) \quad (8)$$

지연확산이 압축펄스 폭보다 크면 동일 표적에 대한 여러 피크가 분리되어 허위표적으로 나타날 수 있으며, 지연차가 압축폭보다 작으면 피크가 중첩되어 주엽 왜곡과 거리 편향이 발생한다.

### 2.3 시간변동성과 도플러

플랫폼 및 표적의 이동, 파랑과 조류 등의 영향으로 실제 천해 채널은 시간에 따라 변한다. 시간변화 채널은 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L a_l(t) e^{j\phi_l(t)} \delta(\tau - \tau_l(t)) \quad (9)$$

단상태 능동소나에서 표적의 방사방향 상대속도가  $v_r$ 이고  $v_r \ll c$ 인 경우, 협대역 도플러 주파수는 근사적으로 수식 (10)과 같다.

$$f_D \approx \frac{2v_r}{c} f_c \quad (10)$$

광대역 LFM 신호에서는 단순 주파수 이동보다 시간축 압축 또는 팽창으로 모델링하는 것이 더 정확하며, 수식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_l(t) = a_l e^{j\phi_l} s[(1 + \epsilon_l)(t - \tau_l)] \quad (11)$$

이때 단상태 조건에서  $\epsilon_l$ 는 수식 (12)와 같이 근사화할 수 있다.

$$\epsilon_l \approx \frac{2v_{r,l}}{c} \quad (12)$$

경로별 도플러가 서로 다르면 하나의 전역 도플러 보상만으로 모든 다중경로 성분을 정합시키기 어렵다.

## 3. LFM 펄스압축 소나이론

### 3.1 LFM 신호

복소 포락선 형태의 up-chirp LFM 신호는 수식 (13)과 같이 정의된다.

$$s(t) = A \exp[j2\pi(f_0 t + \frac{K}{2} t^2)], 0 \leq t \leq T \quad (13)$$

여기서  $A$ 는 진폭,  $f_0$ 는 시작주파수,  $T$ 는 펄스폭이며 chirp rate는 수식 (14)이다.

$$K = \frac{B}{T} \quad (14)$$

순간주파수는 수식 (15)로 나타낸다.

$$f(t) = f_0 + Kt \quad (15)$$

### 3.2 정합필터와 펄스압축

송신신호  $s(t)$ 에 대한 정합필터의 임펄스 응답은 수식 (16)이다.

$$h_{MF}(t) = s^*(-t) \quad (16)$$

수신신호에 정합필터를 적용한 출력은 수식 (17)이다.

$$y_{MF}(t) = r(t) * h_{MF}(t) \quad (17)$$

이상적인 단일경로 환경에서는 수식 (18)과 같이 나타난다.

$$y_{MF}(t) = aR_s(t - \tau) + n_0(t) \quad (18)$$

여기서  $R_s(t)$ 는 송신신호의 자기상관함수이고,  $n_0(t)$ 는 필터 출력 잡음이다. LFM 펄스압축의 이론적 거리분해능은 수식 (19)이다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (19)$$

처리이득은 시간-대역폭 곱을 이용하여 수식 (20)으로 근사화할 수 있다.

$$G_{PC, dB} \approx 10 \log_{10}(BT) \quad (20)$$

### 3.3 부엽 성능지표

최대 부엽 수준비는 수식 (21)과 같이 정의한다.

$$PSLR = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{SL, \max}}{A_M} \right) \quad (21)$$

여기서  $A_M$ 은 주엽 최대진폭이고  $A_{SL, \max}$ 는 최대 부엽진폭이다. 통합 부엽 수준비는 수식 (22)로 정의한다.

$$ISLR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{n \in \Omega_{SL}} |y[n]|^2}{\sum_{n \in \Omega_M} |y[n]|^2} \right) \quad (22)$$

$\Omega_M$ 과  $\Omega_{SL}$ 은 각각 주엽과 부엽의 평가구간이다. PSLR과 ISLR은 값이 더 작은 음수일수록 부엽 억제

성능이 우수함을 의미한다.

다중경로 환경에서 정합필터 출력은 수식 (23)으로 나타난다.

$$y_{MF}(t) = \sum_{l=1}^L a_l e^{j\phi_l} R_S(t - \tau_l) + n_0(t) \quad (23)$$

따라서 동일 표적에 대응하는 여러 자기상관 함수가 중첩되며, 가장 큰 피크가 반드시 직접경로를 의미하지 않는다[4].

## 4. 제안하는 다중경로 인지형 펄스압축 기법

### 4.1 전체 처리구조

제안기법은 Fig. 1과 같이 구성된다.

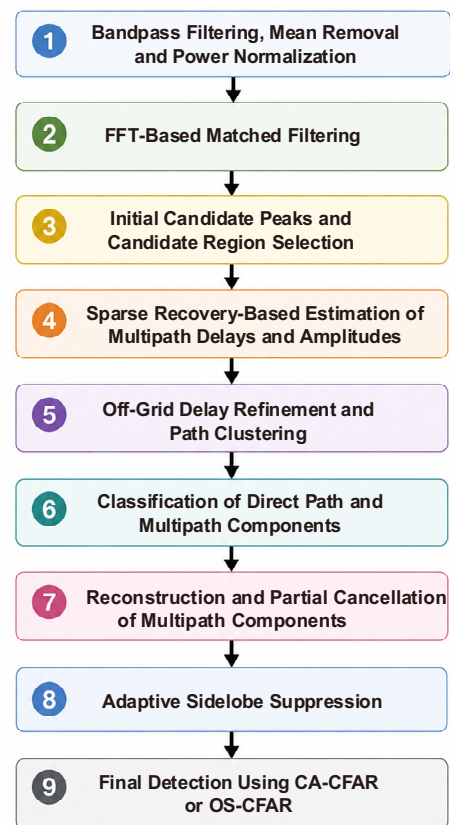


**Fig. 1.** Processing flow of the proposed pulse-compression sonar in shallow-water multipath environment

정규화된 수신신호는 수식 (24)로 정의한다.

$$r_n[n] = \frac{r_f[n] - \bar{r}_f}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |r_f[n] - \bar{r}_f|^2 + \epsilon}} \quad (24)$$

#### 4.2 후보구간 기반 희소 채널 추정

FFT 기반 정합필터 출력은 수식 (25)로 계산한다.

$$y_{MF}[n] = \text{IFFT}(R_N[k]S^*[k]) \quad (25)$$

정합필터 출력에서 유효 피크 주변의 후보구간만 추출한 후, 각 후보구간에 대해 수식 (26)과 같이 희소 선형모델을 구성한다.

$$r = Sx + n \quad (26)$$

여기서  $S$ 는 가능한 지연값에 대응하는 송신신호 원자로 구성된 사전행렬이고,  $x$ 는 경로별 복소 계수를 포함하는 희소벡터이며, 다중경로의 전달지연과 복소 진폭을 나타낸다.

희소복원 문제는 일반적으로  $l_1$ 정규화를 이용한 LASSO(low absolute shrinkage and selection operator) 또는 OMP와 같은 탐욕적 알고리즘으로 해결할 수 있다[5,6].

LASSO 기반 복원은 수식 (27)과 같이 정의한다.

$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \left[ \frac{1}{2} \|r - Sx\|_2^2 + \lambda \|x\|_1 \right] \quad (27)$$

잡음표준편차 추정값을  $\hat{\sigma}$ , 사전 원자의 개수를  $M$ 이라 하면 정규화계수  $\lambda$ 는 수식 (28) 형태로 설정할 수 있다.

$$\lambda = \eta \hat{\sigma} \sqrt{2 \ln M} \quad (28)$$

실시간 구현에서는 잔차와의 상관도가 가장 큰 원자를 반복적으로 선택하는 OMP(orthogonal matching pursuit)를 적용한다.

본 연구에서는 MATLAB 구현의 계산 효율성과 실시간 적용 가능성을 고려하여 OMP를 사용하였다. OMP는 잔차(residual)와 가장 높은 상관성을 갖는 사전 원자를 반복적으로 선택하여 희소해를 추정하

는 탐욕적(greedy) 알고리즘으로, LASSO보다 계산량이 작고 구현이 간단한 장점이 있다[6]. 따라서 이후의 다중경로 추정 및 반사경로 제거 과정은 모두 OMP 추정 결과를 기반으로 수행하였다.

지연격자 오버샘플링 계수를  $Q$ 라 하면 지연 및 거리격자는 각각 수식 (29)와 같다.

$$\Delta \tau_g = \frac{1}{Qf_s}, \Delta R_g = \frac{c}{2Qf_s} \quad (29)$$

다만  $Q$ 가 지나치게 크면 인접 사전 원자의 상관성이 증가하므로 정확도와 계산량을 고려하여  $Q = 2 \sim 4Q$  범위가 적절하다.

#### 4.3 반사경로 재구성 및 제거

추정된 채널은 수식 (30)과 같이 구성된다.

$$\hat{h}(t) = \sum_{l=1}^{\hat{L}} \hat{a}_l e^{j\hat{\phi}_l} s(t - \hat{\tau}_l) \quad (30)$$

직접경로 집합을  $D$ , 반사경로 집합을  $M$ 이라 하면 재구성된 반사경로 신호는 수식 (31)이다.

$$\hat{r}_{MP}(t) = \sum_{l \in M} \hat{a}_l e^{j\hat{\phi}_l} s(t - \hat{\tau}_l) \quad (31)$$

다중경로가 제거된 신호는 수식 (32)로 계산한다.

$$r_c(t) = r(t) - \beta \hat{r}_{MP}(t), 0 \leq \beta \leq 1 \quad (32)$$

여기서  $\beta$ 는 채널 추정 신뢰도에 따른 제거계수이며, 추정오차에 의한 직접경로 손상을 방지하기 위해 완전 제거보다 부분 제거를 적용할 수 있다.

#### 4.4 적응형 부엽 억제

다중경로 제거 후 남아 있는 부엽과 잡음성 주파수 성분을 억제하기 위해 다음과 같은 Wiener형 가중합수를 적용할 수 있다.

$$W(f) = \frac{\hat{P}_s(f)}{\hat{P}_s(f) + \alpha \hat{P}_n(f) + \epsilon} \quad (33)$$

적응형 압축필터는 수식 (34)이고 출력은 수식 (35)이다.

$$H_A(f) = S^*(f) W(f) \quad (34)$$

$$y_A(t) = F^{-1}\{R_C(f)H_A(f)\} \quad (35)$$

주엽 손실을 제한하기 위해 정합필터 출력과 적응형 출력을 수식 (36)과 같이 결합한다.

$$y_H(t) = \rho y_{MF,c}(t) + (1 - \rho)y_a(t), 0 \leq \rho \leq 1 \quad (36)$$

#### 4.5 CFAR 검출

최종 검출단에서는 CA-CFAR를 적용한다. 균질한 잡음환경에서는 CA-CFAR가 목표 오경보율에 따라 적응형 임계값을 설정할 수 있지만, 다중표적 및 비균질 잔향 환경에서는 OS-CFAR가 더 강건할 수 있다 [8]. 최종 출력전력은 수식 (37)로 정의한다.

$$P[n] = |y_H[n]|^2 \quad (37)$$

CA-CFAR에서  $N_R$ 개의 독립 참조셀과 목표 오경보율  $P_{FA}$ 를 가정할 때 임계값 승수는 수식 (38)이다.

$$\alpha_{CFAR} = N_R(P_{FA}^{-1/N_R} - 1) \quad (38)$$

시험셀의 검출 임계값은 수식 (39)이며, 수식 (40)을 만족하면 표적 후보로 판정한다.

$$\gamma[n] = \alpha_{CFAR} \hat{P}_N[n] \quad (39)$$

$$P[n] > \gamma[n] \quad (40)$$

### 5. 시뮬레이션 구성 및 결과

제안한 천해 다중경로 대응 펄스압축 알고리즘의 동작을 검증하기 위하여 MATLAB 기반 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 중심주파수 30 kHz, 대역폭

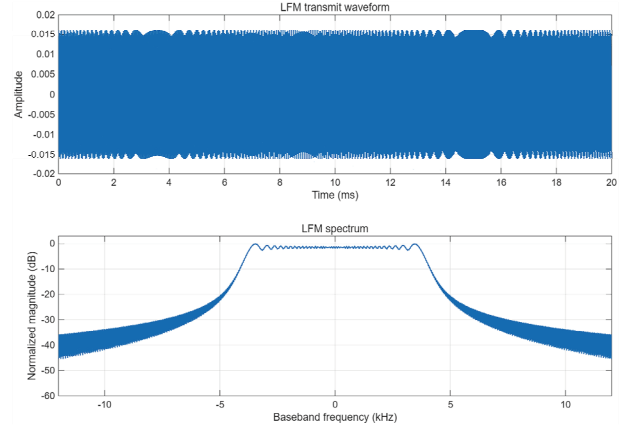


Fig. 2. LFM transmit waveform and LFM spectrum

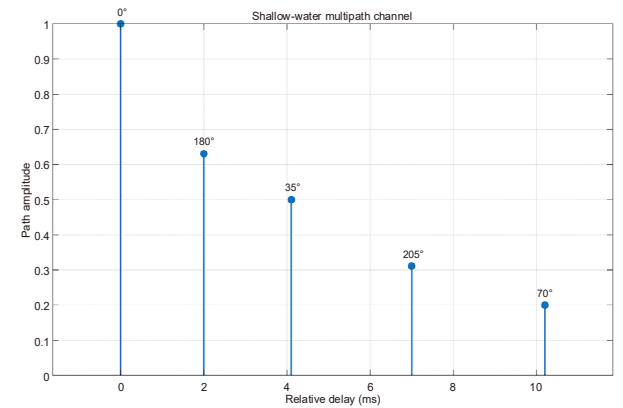


Fig. 3. Shallow-water multipath channel

8 kHz, 펄스폭 20 ms의 LFM(linearly frequency modulated) 송신신호와 그 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 생성된 LFM 신호는 약 8 kHz의 대역폭을 균일하게 사용하며, 펄스압축에 필요한 넓은 대역폭 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 3는 천해 다중경로 채널 모델을 나타낸다. 직접경로를 기준으로 상대지연이 0, 2, 4, 7 및 10 ms인 다섯 개의 전파경로를 구성하였으며, 각 경로는 서로 다른 진폭과 위상을 갖도록 설정하였다. 이는 천해 환경에서 수면 및 해저 반사에 의해 발생하는 대표적인 다중경로 특성을 모사한 것이다.

Fig. 4는 단일경로와 다중경로 환경에서의 정합필터 출력 결과를 비교한 것이다. 단일경로에서는 실제 표적 위치인 500 m에서 하나의 주엽이 형성되는 반면, 다중경로 환경에서는 반사경로에 의해 여러 개의 추가 피크가 발생하여 주엽 왜곡과 허위표적(false target)이 생성됨을 확인할 수 있다. 이는 다중경로 채널에서 정합필터 출력이 복수의 자기상관함 중첩

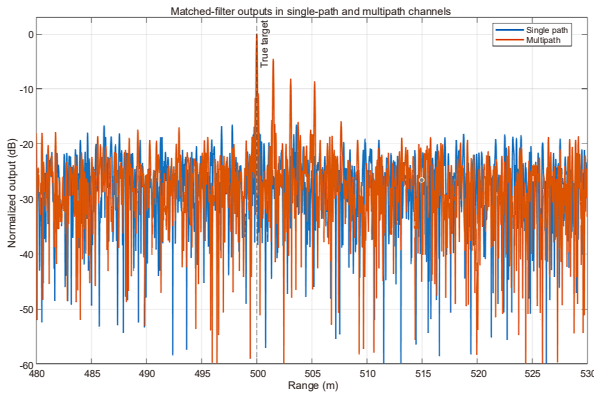


**Fig. 4.** Matched-filter outputs in single-path and multipath channels

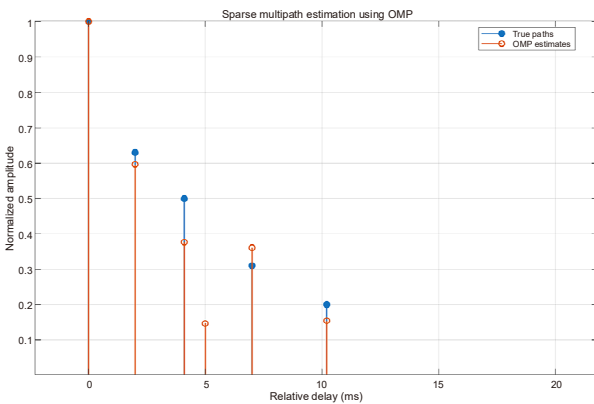


**Fig. 5.** Sparse multipath estimation using OMP

으로 나타난다는 이론적 분석과 일치한다[4]. 이는 기존 정합필터만으로는 천해 다중경로를 효과적으로 제거하기 어려움을 보여준다.

Fig. 5는 OMP를 이용한 희소 다중경로 추정 결과이다. 추정된 경로는 실제 채널의 주요 전달지연과 진폭을 전반적으로 잘 복원하였으며, 일부 작은 오차 성분이 존재하지만 대부분의 주요 반사경로를 정확하게 식별하였다. 이러한 결과는 OMP 기반 희소복원이 다중경로 채널 추정에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다[6].

Fig. 6는 기존 정합필터 출력, 다중경로 제거 후 출력 및 최종 제안 알고리즘의 출력을 비교한 결과이다. 다중경로 제거 이후 반사경로에 의해 형성된 피크가 감소하였으며, hybrid 적응형 부엽 억제제를 적용한 최종 출력에서는 실제 표적 부근의 주엽이 더욱 뚜렷하게 나타나고 주변 부엽이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 제안 알고리즘 출력에 CA-CFAR(constant false alarm rate)을 적용한 결과이다. 적응적

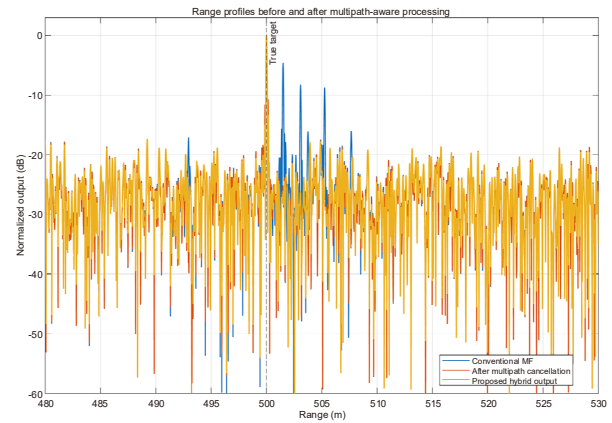


**Fig. 6.** Range profiles before and after multipath-aware processing

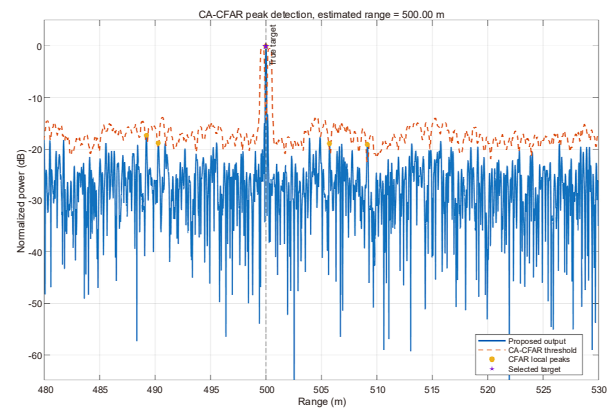


**Fig. 7.** CA-CFAR peak detection, estimated range = 500.00 m

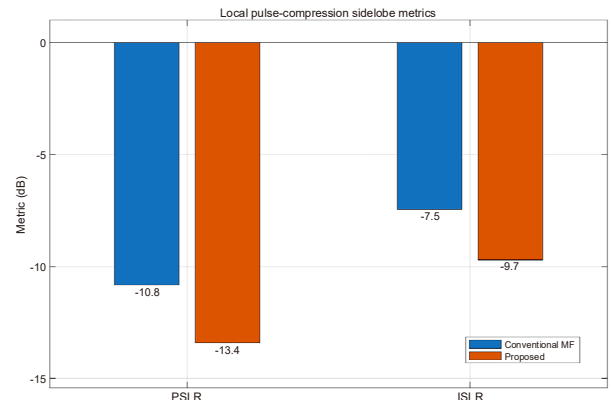


**Fig. 8.** Local pulse-compression sidelobe metrics

으로 계산된 임계값을 이용하여 여러 국부 피크 중 실제 표적 위치(500 m)를 정확하게 선택하였으며, 최종 추정거리는 500.00 m로 계산되어 실제 표적거리와 일치하였다.

마지막으로 Fig. 8은 기존 정합필터와 제안 알고리즘의 국부 부엽 성능을 비교한 결과이다. 기존 정합필터의 PSLR은 -10.8 dB, ISLR은 -7.5 dB였으며, 제안

알고리즘은 각각  $-13.4$  dB와  $-9.7$  dB로 개선되었다. 이는 제안 알고리즘이 최대 부엽과 전체 부엽 에너지를 모두 감소시켜 천해 다중경로 환경에서 허위표적 발생 가능성을 줄이고 표적 검출 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 천해 다중경로를 희소 음향채널로 모델링하고, 정합필터, 희소복원, 반사경로 재구성, 제거, 적응형 부엽 억제 및 CFAR 검출을 결합한 통합 펄스압축 신호처리 기법을 제안하였다. 제안구조는 기존 정합필터의 처리이득을 유지하면서 직접경로와 반사경로를 분리하고, 구조적 다중경로에 의한 허위표적과 거리 편향을 감소시키도록 설계하였다.

다만 제안기법의 성능은 채널의 희소성, 사전행렬과 실제 수신신호 사이의 일치도, 직접경로의 관측 가능성 및 도플러 크기에 영향을 받는다. 따라서 최종적인 실용성을 검증하기 위해서는 bellhop 기반 다중경로 채널, 강한 잔향, 경로별 도플러 및 실측 해역 자료를 적용한 추가 연구가 필요하다. 또한 UUV와 USV 탑재 소나 적용을 위해 후보구간 기반 OMP, GPU 병렬처리 및 다중펄스 채널 추적을 이용한 실시간 경량화 연구가 요구된다.

## 참고문헌

- [1] Bin-bin Zou, Jing-jing Cheng, Cheng-cai Jing, & Run-tian Wang, 'Application of Pulse Compression Technique in Underwater Acoustic Detection,' Technical Acoustics, VOL. 33, NO. 3, 2014, pp. 275-279.
- [2] Michael B. Porter & Homer P. Buckner, 'Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields,' Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 82, NO. 4, 1987, pp. 1349-1359.
- [3] Michael B. Porter, The BELLHOP Manual and User's Guide: Preliminary Draft, Heat, Light, and Sound Research, Inc., 2011.
- [4] Wen-Jun Zeng, Xue Jiang, Xi-Lin Li, & Xian-Da Zhang, 'Deconvolution of Sparse Underwater Acoustic Multipath Channel with a Large Time-Delay Spread,' Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 127, NO. 2, 2010, pp. 909-919.
- [5] D. L. Donoho, 'Compressed Sensing,' IEEE Transactions on Information Theory, VOL. 52, NO. 4, 2006, pp. 1289-1306.
- [6] Joel A. Tropp & Anna C. Gilbert, 'Signal Recovery from Random Measurements via Orthogonal Matching Pursuit,' IEEE Transactions on Information Theory, VOL. 53, NO. 12, 2007, pp. 4655-4666.
- [7] Longyu Jiang, Zhe Zhang, & Philippe Roux, 'Three-Dimensional Higher-Order Raypath Separation in a Shallow-Water Waveguide,' JASA Express Letters, VOL. 2, 2022, Article 076001.
- [8] Hermann Rohling, 'Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations,' IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, VOL. AES-19, NO. 4, 1983, pp. 608-621.