

에인형 수동소나에 적합한 전방위 표적 자동탐지 및 추적기법 성능 분석

Performance Analysis of Omni-Directional Automatic Target Detection and Tracking for a Towed Array Passive Sonar System

서 익 수*

Seo, Iksu

ABSTRACT

In towed array passive sonar system, sonar operators cannot detect and track the all targets simultaneously in the omni-directional area by just Operator Initiated Tracking(OIT). In this paper, omni-directional automatic target detection and tracking algorithm is described and optimize the parameters through ocean data to overcome the drawbacks of OITs. The algorithm is verified through sea trials with submarines.

주요기술용어(주제어) : Operator Initiated Tracks(OITs)(운용자에 의한 수동추적), Omni-Directional Automatic Target Detection and Tracking Algorithm(전방위 자동 표적 탐지 및 추적 알고리즘), A Towed Array Passive Sonar System(에인형 수동소나), Parameter Optimization(파라미터 최적화)

1. 서 론

에인형 수동소나는 음향센서를 예인하여 장거리에 서 수중표적을 탐지하고 스펙트럼 분석으로 식별하여 표적의 정보를 수집하는 장비이다. 한국해역은 어선 및 상선들의 해상 교통량이 매우 많아 수중 소음이 극히 높은 탐지환경이다. 따라서 에인형 수동소나로 광범위한 탐색반경 내에 분포하는 수많은 선박 소음 중에서 극도로 정숙한 수중 위협 표적을 지속적으로

탐지하는 것은 매우 어려운 일이다. 국내의 에인형 수동 소나는 기존의 추적 알고리즘을 기반으로 운용자에 의한 수동 추적에 대부분 의존하고 있는 현실이다^[1~4]. 일반적으로 수동소나 운용자는 방위, 주파수, 시간의 3차원 공간영역의 데이터를 탐색하면서 잠수함과 같은 위협 표적이 탐지된 경우 해당 방위의 협대역 주파수 분석결과를 수 분 동안 분석 한 후 표적이라고 판단하면 수동추적을 수행한다. 이 과정에서 운용자는 하나의 표적을 추적하기 위해 간헐적으로 약하게 탐지되는 다른 방위의 많은 표적들을 놓치게 되는 경우가 대부분이다. 실제 운용자가 전방위의 모든 표적들을 동시에 탐지·추적하는 것은 불가능한 일이다.

† 2006년 5월 11일 접수~2006년 6월 13일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : isseo@add.re.kr

이러한 문제점을 개선하기 위하여 국내에서 자동 표적 탐지 및 추적기법이 연구되었으며^[5], 개발된 기법을 실제 소나 장비에 적용하기 위한 연구가 수행되었다^[6]. 본 논문에서는 3차원 영역의 데이터를 동시에 탐색해야 하는 운용자의 부담을 줄여 표적의 자동 탐색, 추적 시작, 유지, 특징정보 관리, 자동경보 설정으로 인한 조기경보까지 자동으로 수행하는 알고리즘을 설계하고 실제 해상실험 데이터를 이용하여 그 결과를 검증하였다.

2장에서는 탐지 및 추적의 전체적인 구조를 설계하고 갱신하는 과정을 기술하였고, 3장에서는 표적의 특징정보를 저장하고 이를 이용하여 추적 성능을 향상하는 기법을 소개하였다. 4장은 제안한 기법을 수년간 획득한 해상 데이터에 적용하여 실험한 결과를 제시하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 자동탐지 및 추적 알고리즘

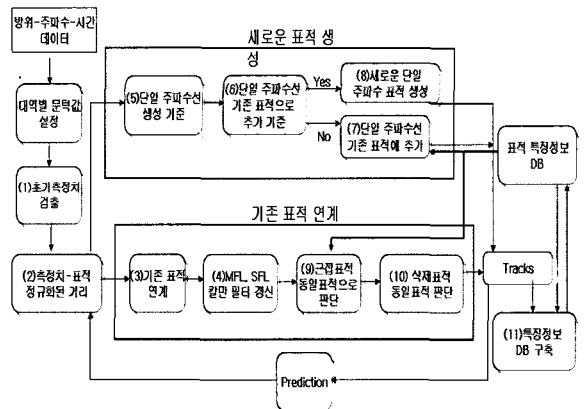
가. 탐지 및 추적 구조

수중 표적은 최소한 하나 이상의 특징 주파수 정보를 가지고 있으며 항해 조건에 따라 발생하는 주파수가 다르다. 따라서 표적에서 발생하는 주파수 성분들을 개별적으로 추적하는 단일 주파수선(SFL : Single Frequency Line)으로 추적하면서 동시에 동일 표적임을 계산하여 하나의 표적으로 판단하고 개별적 추적선들을 묶어 다중 주파수선(MFL : Multi Frequency

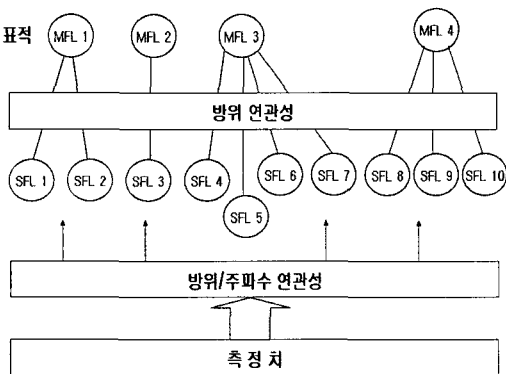
Line)으로 추적을 수행한다. 다중 주파수선 표적 추적의 구조는 그림 1과 같다.

예인형 수동소나는 신호처리된 결과로서 방위, 주파수, 시간의 3차원 정보를 입력받아 방위와 주파수 영역에서 수 프레임동안 관측하여 지속적으로 탐지되는 경우 표적으로 판단하고 칼만필터 추적을 수행한다.

측정치 검출, 단일 주파수 표적 생성 및 근접 표적 융합, 특징정보 처리 및 자동 종료 등의 전체적인 알고리즘 구조는 그림 2와 같다. 우선 센서로부터 측정된 신호에서 표적의 방위각, 고유주파수, 신호 대 잡음비 정보를 대역별로 자동으로 검출한다. 자동 검출된 초기 측정치를 3프레임 동안 판단하여 연속으로 탐지되는 경우 표적의 단일 주파수선으로 초기화 및 추적을 수행한다.



[그림 2] 자동탐지 및 추적 구조



SFL : Single Frequency Line(단일 주파수선) / MFL : Multi Frequency Line(다중 주파수선)

[그림 1] 다중 주파수 표적 구조

초기 측정치를 검출하고 기존에 추적중인 표적과의 거리를 비교하여 기존 표적에 연계된 측정치인지 혹은 새로운 표적의 측정치인지 판단한다. 거리 판단 후 새로운 표적으로 인정되면 새로운 표적 생성 과정을 거치며 기존 표적의 측정치로 판단되면 기존 표적 연계 과정을 거쳐서 추적정보를 갱신한다. 연관되지 않은 측정치들은 새로운 표적으로 생성될 가능성이 있으므로 메모리에 저장한다. 갱신된 추적 정보로부터 프레임마다 표적의 특징정보 데이터 베이스를 구축하고 특징정보를 이용하여 표적의 추적 성능을 향상시킨다.

나. 초기 측정치 추출

표적으로부터 발생한 음향신호에는 표적의 방위각, 고유 주파수, 신호대 잡음비 등 다양한 정보가 포함되어 있다. 신호처리된 방위별 빔 에너지 정보를 적절한 문턱값과 비교하여 표적의 고유주파수를 탐지한다. 예인형 수동소나가 실제로 운용되는 환경에서는 표적신호와 잡음신호의 확률적 분포가 운용지역, 운용시간, 해상환경 등 많은 환경변수에 따라 변화함으로 인해 일정하지 않으므로 모든 상황에 적합한 탐지 문턱값을 결정하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다양한 해양환경과 다중 표적의 존재로 인하여 적응적인 문턱값을 구하기 위하여 보편적으로 사용되는 CA-CFAR(Cell Averaging-Constant False Alarm Rate)기법을 토대로 다중표적상황에 적합한 문턱값을 추출하였다^[7]. 해상실험 데이터를 분석한 결과 LF (Low Frequency) 대역은 많은 간섭현상으로 인해 MF(Medium Frequency), HF(High Frequency) 대역보다 문턱값이 많이 가변됨을 확인하여 대역별로 문턱값을 설정하였다.

빔형성된 출력을 이용하여 방위각을 추정할 때 지향빔 사이의 방위각에 표적이 존재하는 경우 보간기법을 이용하여 표적의 방위각을 추정하고 초기 측정치의 방위정보로 이용하였다. 고차의 다항식으로 보간하면 빔패턴의 좀더 정확한 근사값을 구할 수 있으나 실제 표적으로부터 멀리 떨어진 조향빔에 대해서는 부엽준위를 이용함으로써 추정 성능이 저하될 수 있다^[5]. 따라서 3개의 조향빔을 이용한 2차 다항식으로 보간하였다.

다. 오경보 판별

시간 k 에서 여러 표적을 추적 중이고 새로운 초기 측정치들이 들어오면 추적중인 기존 표적과의 연관성을 조사하기 위하여 정규화된 거리를 판단기준으로 사용한다.

$$d_{ijk} > \eta_1 \text{ for all } i \text{ and } j \tag{1}$$

η_1 은 기존 표적과의 연계여부를 판단하는 기준이며 d_{ijk} 는 i 번째 표적의 j 번째 주파수선과 k 번째 측정치와의 거리로서 다음 식과 같이 표현 가능하다.

$$d_{ijk} = \frac{(x_{m_k} - x_{P_i})^2}{\sigma_{X_{m_i}}^2 + \sigma_{X_{P_i}}^2} + \ln(\sigma_{X_{m_i}}^2 + \sigma_{X_{P_i}}^2) + \frac{(y_{m_k} - y_{P_j})^2}{\sigma_{Y_{m_i}}^2 + \sigma_{Y_{P_j}}^2} + \ln(\sigma_{Y_{m_i}}^2 + \sigma_{Y_{P_j}}^2) \tag{2}$$

$\sigma_{X_{P_i}}$ 와 $\sigma_{Y_{P_j}}$ 는 필터 예측치의 방위각과 주파수에 대한 표준편차이고 $\sigma_{X_{m_i}}$ 와 $\sigma_{Y_{m_i}}$ 는 측정치의 방위각과 주파수에 대한 표준편차로서 다음의 수식으로부터 구한다.

$$\sigma_{X_k} = \theta_3 \frac{\sqrt{1 + \frac{l_k}{\sqrt{N_{FFT}}}}}{l_k}, \quad \sigma_{Y_k} = \Delta_{FFT} \frac{\sqrt{1 + \frac{l_k}{\sqrt{N_{FFT}}}}}{l_k} \tag{3}$$

θ_3 는 방위각 해상도이며 Δ_{FFT} 는 주파수 해상도, N_{FFT} 는 FFT한 데이터의 적분 횟수이다.

만일 연속된 3 프레임 동안 방위, 주파수 영역으로 일정한 기준내에서 연속으로 탐지되면 측정치들은 새로운 단일 주파수선 표적으로 생성된다.

$$\text{Max}_{i,j} |x_{k_i}(t_i) - x_{k_j}(t_j)| < \eta_1 \tag{4}$$

$$\text{Max}_{i,j} |y_{k_i}(t_i) - y_{k_j}(t_j)| < \eta_2$$

여기서 $i, j = 1, 2, 3, t_i \neq t_j$ 이다.

식 (4)의 η_1 과 η_2 는 각각 방위각과 주파수에 대한 단일 주파수선 생성 기준을 나타낸다.

단일 주파수선과 기존 추적중인 표적과의 방위각상 연관성을 판단하기 위한 판별 기준은 다음과 같다.

$$\min_i \left[\frac{(x_m - x_{F_i})^2}{\sigma_{X_m}^2 + \sigma_{X_{F_i}}^2} + \ln(\sigma_{X_m}^2 + \sigma_{X_{F_i}}^2) \right] < \eta \tag{5}$$

여기서 $i = 1, 2, \dots, M$ 이다.

라. 표적 갱신 및 그룹화

실제 동일 표적에서 생성된 단일 주파수선들의 방위 결과를 비교해보면, 주파수별로 차이를 보이며 최대 약 1.0°까지 차이를 발생한다. 또한 간섭신호에 의하여 잠시 동일 표적으로 융합된 후 소실되는 단일 주파수선들에 의해서 다중 주파수선의 방위 추적의 성능저하가 발생한다. 따라서 다중 주파수선의 방위 측정치로 입력하기 위한 여러 방법들이 고려되며 대표적으로 단일 주파수선들의 방위추적결과를 단순평균하는 방법, 에너지 크기별 가중치 평균방법, 최소 정규화거리의 측정치 선택방법의 3가지 방법에 대해서 해상실험 데이터를 이용하여 분석하였다. 단순평균방법은 표적이 가지고 있는 단일 주파수선들의 방위각을 산술평균하여 다중 주파수선 추적의 방위 필터에 측정치로 입력하는 방법이다. 이 방법은 우리나라 주변의 해상여건상 주변 선박이나 어선들의 간섭신호 영향으로 추적성능이 저하된다. 에너지 크기별 가중치 평균은 단일 주파수선들의 주파수 신호가 가지고 있는 에너지 크기에 따른 가중치를 주어 최종 방위각을 만들어 내는 방법이다. 실제 탐지 추적하고자 하는 잠수함의 신호의 세기가 주변 간섭신호에 비해 낮으며 간헐적으로 탐지되는 경우가 대부분이므로 이 방법 또한 적절치 않다. 최소 정규화거리의 측정치 선택방법은 표적이 가지고 있는 여러 단일 주파수선들 중 다중 주파수선 추적의 방위각 예측치에 가장 가까운 거리에 있는 측정치 하나만을 선택하는 방법이다. 실제 해상실험 데이터를 이용한 결과 이 방법은 표적 신호의 세기가 약하고 간헐적으로 탐지되는 경우에도 방위 추적 성능이 가장 우수함을 보여 본

논문에서는 세 번째 방법을 사용하였다. 선택과정은 그림 3과 같다.

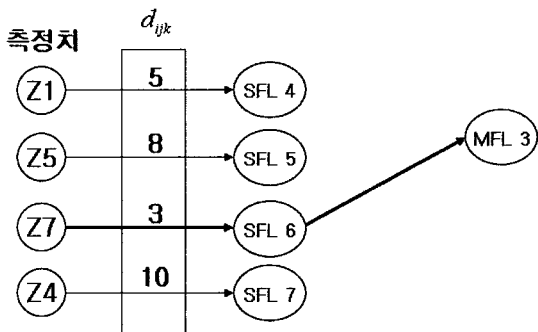
검출된 측정치들 중에서 기존 표적과의 연관성이 있는 측정치는 기존 표적의 추적을 갱신하는 데 사용한다. 실제 예인형 수동 소나를 운용하는 해상 환경에서 적절한 탐지 문턱값이 설정된 경우 초기측정치 의 신뢰도를 바탕으로 계산이 단순하고 확률모델에 의존도가 낮은 NNA(Nearest Neighbor Association) 기법을 이용하여 필터를 갱신하였다.

마. 표적 추적 삭제

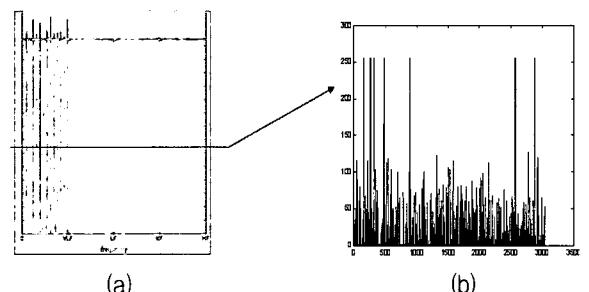
표적 추적중인 필터가 연속하여 수 프레임동안 측정치를 갖지 못하는 경우 자동추적은 이 주파수선 표적을 자동으로 삭제한다. 이때 오래 지속된 표적과 잡음에 의해 잠시 발생한 궤적과의 삭제기준을 달리 하기 위해서 가격함수를 도입하였다. 즉, 측정치와 연계되는 경우 +1, 연계되지 못하는 경우 -2의 값을 더 하며 최대값을 12로 설정하여 0이하의 값을 가지는 표적은 자동 삭제한다.

3. 특징정보 처리

수중 표적이 가지고 있는 다양한 특징정보를 이용하여 표적 추적 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 다중 주파수선 표적이 가지고 있는 단일 주파수들의 궤적 길이와 신호 대 잡음비를 특징정보로 저장하여 사용하였다. 그림 4는 표적의 특징정보를 보여 준다. (a)와 (b)는 각각 추적중인 표적의 주파수 궤적 길이와 주파수의 신호대 잡음비를 나타낸다.



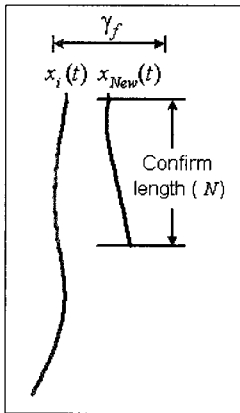
[그림 3] 다중주파수선 방위 필터 측정치 선택 과정



[그림 4] 특징정보

가. 근접표적 융합

수중 표적은 항해조건에 따라 다른 주파수 성분들을 발생하기 때문에 다중 주파수선 추적에 속해 있는 단일 주파수 성분들은 생성과 소실을 반복한다. 이 과정에서 새로운 단일 주파수선이 기존 표적에 연계되지 못하고 새로운 다중 주파수선으로 생성되어 기존 추적과 방위각으로 근접하여 추적을 하는 경우가 발생한다. 이러한 경우 동일한 표적에서 발생한 주파수 성분을 가지고 두 표적으로 추적하기 때문에 하나의 표적으로 융합하여 추적하는 것이 타당하다. 그림 5는 근접 표적을 동일표적으로 판단하는 과정을 보여주며 확정시간(confirm length)은 동일 표적임을 판단하기 위한 최소 시간을 나타낸다.



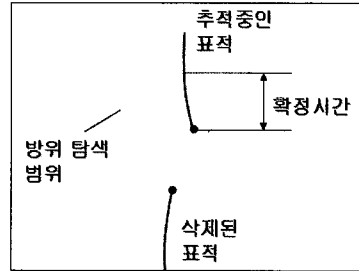
[그림 5] 근접 표적의 동일표적 판단

나. 과거 표적과 연계

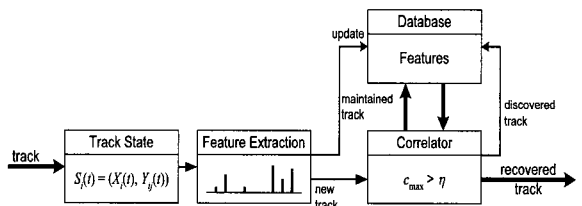
복잡한 해양탐지 환경과 많은 간섭신호의 영향으로 탐지와 소실을 반복하는 수중 표적을 지속적으로 추적하기 위해서 이미 삭제된 표적들과 현재 추적중인 표적들과의 연관성을 비교하여 동일표적임을 판단하는 과정이 필요하다. 삭제된 표적의 특징정보를 저장한 후 새로운 다중 주파수선 추적들이 생성될 때마다 특징정보 상관관계를 비교하여 기존에 삭제된 표적과 동일 표적으로 인정되면 삭제된 표적과 연계하여 계속 추적을 수행하여 성능을 향상시킨다. 삭제된 기존 표적과 새로운 표적의 상관관계를 비교할 때 기존 표적의 삭제된 시점으로부터 표적의 방위변화율과 이동방향을 고려하여 방위 탐색 범위를

설정하고 이 범위 내에서 생성되는 새로운 표적들만을 연계대상으로 간주한다. 그림 6은 기존 표적과의 연계과정을 보여준다.

표적의 특징정보는 그림 4와 같이 표적별로 저장하며 그림 7은 특징정보 처리 과정을 보여준다.



[그림 6] 삭제된 표적과의 동일표적 판단



[그림 7] 특징정보처리 과정

4. 해상실험 데이터 이용 성능분석

개발한 자동탐지 및 추적 기법을 소나 장비에 적용하여 해상에서 실제 수중 표적을 탐지 및 추적하는 실험을 수 차례 수행하였다. 추적 성능 향상을 위하여 수년 간 획득한 실제 해상데이터를 이용하여 설계한 추적 구조를 검증하고 문턱값 자동설정, 측정치 연계, 기존 표적과의 연계, 특징정보 처리시 상관관계 문턱값 등의 파라미터들을 최적화하였다.

가. 문턱값 설정

CA-CFAR를 이용하여 대역별로 문턱값을 자동으로 설정하기 위해서는 오탐지 확률을 설정해야 하며 이는 초기 측정치를 추출하여 표적을 생성하고 기존 표적을 추적 갱신하는 데 중요한 역할을 한다. 문턱값은 주변 간섭(선박, 어선 등) 영향 및 탐지 환경에

따라서 가변됨을 확인하였으며 분석한 결과 오탐지 확률은 간섭신호의 영향에 따라 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 이내에 설정해야 함을 확인하였다.

나. 측정치 연계 및 추적 갱신 변수

탐지된 측정치는 기존 표적과 연계되거나 새로운 표적으로 생성되기 위한 후보로서 메모리에 저장된다. 이때 연계되는 기준은 표 1과 같다. 방위, 주파수의 정규화된 거리값은 측정치를 기존 추적중인 단일 주파수선과 연계하기 위한 기준이며, 주파수와 방위 게이트 변수는 추적필터를 갱신하기 위하여 사용되는 값이다. 표적과의 거리 및 자합과의 이동 경로에 따라 방위각의 변화가 최대 5°까지 발생하는 반면 주파수는 도플러의 영향을 제외하면 거의 변하지 않는 편이며 도플러의 영향 또한 1Hz 이내로 변화가 작다. 표 2의 방위, 주파수 게이트 값은 추적 필터의 분산값에 곱해져서 측정치를 찾기 위한 범위를 구하게 되는 값이다.

[표 1] 추적 갱신 관련 파라미터 설정

변 수	기준값
주파수 정규화된 거리값	20
방위 정규화된 거리값	20
방위 게이트 (최대 게이트)	4.0° (5.0°)
주파수 게이트 (최대 게이트)	3.0 (1.0Hz)

다. 표적 초기화 기준

문턱값보다 큰 크기를 가진 측정치들을 저장한 후 3프레임 연속으로 방위와 주파수 방향으로 일정 기준 이내에서 탐지되면 새로운 단일주파수선으로 생성한다. 방위각 기준은 1.5~2도로 설정하며 주파수 기준은 약 0.5~1.0Hz로 설정한다. 선박, 어선과 같은 주변 표적들은 대부분 수 Hz 이상의 광대역 신호를 생성하는 경우가 대부분이므로 실제 잠수함과 같은 수중표적의 토널신호 탐지는 주파수 해상도를 고려하여

1Hz 전후로 설정하는 것이 타당하다.

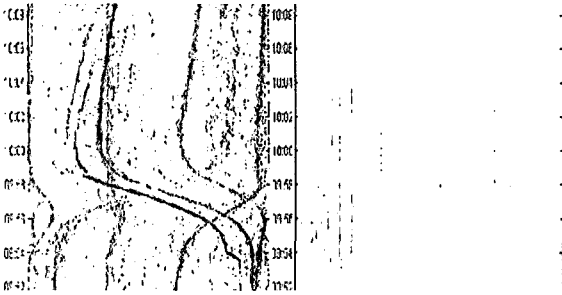
라. 특징정보 연계 기준

표적의 고유 특징 주파수 정보를 이용하여 추적의 성능을 향상시키기 위하여 근접 표적의 동일 표적 처리, 그리고 삭제된 표적과 현재 추적중인 표적의 동일 표적 처리의 두 가지 기능을 수행한다. 평균 방위각 게이트는 두 표적이 근접한 방위에서 확정시간 동안 두 표적의 방위각상 차이가 평균 방위각 게이트 이내에 들어오면 연관관계를 비교한다. 삭제된 표적의 동일 표적 판단은 삭제된 시점에서 변화율과 이동 방향을 고려하여 30 프레임(8초/1프레임) 동안 방위 탐색 범위를 열어서 현재 추적중인 표적들과의 연관성을 비교한다. 표 2는 주요 파라미터 변수들의 최적값을 나타낸다.

[표 2] 특징정보 처리 관련 파라미터 설정

변 수	기준값
평균 방위각 게이트	2.0~3.0도
근접표적의 동일표적 확정시간	5 프레임 이상
삭제표적의 동일표적 연계 확정시간	30 프레임 이내
방위탐색 범위 게이트	방위 변화율의 2~2.5배
근접표적 융합 기준	0.005
삭제표적 연계 기준	0.001
특징정보 저장 추적선 길이	10 프레임

그림 8의 좌측 그림은 실제 수중 표적의 다중 주파수가 탐지와 소실을 반복하는 상황에서 동일 표적으로 지속적으로 추적하고 있음을 방위 궤적으로 보여주고 있으며 우측 그림은 해당 표적의 탐지된 주파수를 나타내고 있다.



[그림 8] 표적의 특징정보처리 후 추적결과

마. 수동추적과의 비교

자동탐지 및 추적 알고리즘의 성능비교를 위해서 해상실험 데이터를 이용하여 기존에 검증되어 사용되고 있는 수동추적과 비교하였으며 결과를 표 3에 나타내었다. 기존에 검증된 수동추적과 유사한 방위오차의 추적결과를 나타내었으며 표적당 추적선의 길이는 평균적으로 15프레임 이상 더 추적을 유지하여 수분 이상 더 추적이 유지됨을 보여주었다.

[표 3] 제안한 알고리즘과 수동추적과 비교

	간섭신호 많은 환경		간섭신호 적은 환경	
	수동 추적	자동 추적	수동 추적	자동 추적
평균 RMSE	0.8179	0.8307	0.5629	0.5576
표적당 추적선 길이	25	40	33	49
평균 주파수 개수	4	30~40	4	10
전방위 표적 개수	8	50	4	10

표적당 단일 주파수선 개수와 전방위 표적 개수에서 수동추적에 비해 많은 표적들과 주파수성분들을 추적하였으며 결과적으로 기존의 수동추적의 방위 정확도를 가지고 전방위, 전대역의 표적들을 놓치지 않고 지속적으로 탐지 가능함을 보여주었다.

5. 결론

본 논문에서는 전방위에 대한 표적을 자동으로 탐지 및 추적하고 다중 주파수선에 의한 주파수 추가 및 삭제 과정을 구현, 설계하여 소나 장비에 적용한 시험 결과를 보여주었다. 기존의 수동추적은 운용자에 의하여 협소한 방위영역을 추적함으로 인해 전방위, 전대역의 많은 표적들을 동시에 추적하지 못했다. 수년 간 획득한 해상실험 데이터를 이용하여 잠수함이 탐지되는 환경을 연구하였으며 이를 바탕으로 자동 탐지 및 추적 구조를 설계하였고 표적의 특징정보처리를 통하여 이미 삭제된 표적도 재 탐지시 다시 연계 추적하였다. 제안한 기법을 해상데이터를 이용하여 검증하였고 실제환경에 적합한 파라미터들을 최적화하는 과정을 수행하였다.

기존의 수동추적과의 방위 추적 성능을 비교하여 유사한 방위추적성능을 나타내었으며 결국 운용자에 의한 수동추적의 정확성을 가지고 전방위의 많은 표적들을 동시에 추적하는 성능을 보여주었다.

향후 표적의 고유 정보가 되는 다양한 특징정보를 연구하고 표적의 기동과 다양한 해양 환경에 적합한 추적 필터를 구현함으로써 더욱 정밀한 추적이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

[1] V. J. Aidala, "Kalman Filter Behavior in Bearings-Only Tracking Application," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-15, pp.29~39, Jan. 1979.

[2] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, Academic Press, San Diego, CA, 1988.

[3] J. A. Roecker, "Multiple Scan Joint Probabilistic Data Association," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-31, pp.1204~1210, Jul. 1995.

[4] S. S. Blackman, *Multiple-Target Tracking with Radar Applications*, Artech House, 1986.

- [5] 이균경, “협대역 신호에 의한 다중표적 추적 및 천이소음 식별 - I 협대역 신호에 의한 다중표적 추적”, 연구보고서 NWSD-417-940755, 국방과학연구소, 1995.
- [6] 오원천, 서익수, 양인식, “저주파예인음탐기체계 정보처리기술보고서,” 연구보고서 NSDC-517-

011482, 국방과학연구소, 2003.

- [7] B. Barbov, A. Lomes and E. Perkalski, “Cell-averaging CFAR for Multiple-Target Situations”, *IEE Proc.*, Vol. 133, Pt. F, No. 2, April 1986.