

능동 소나에서 다중경로를 고려한 표적 도플러 검출

Target Doppler Detection for Active Sonar in Multipath Environment

진 해동*, 윤 경식**, 박 도현*, 이 균경*

Hae-Dong Jin*, Kyung-Sik Yun**, Do-Hyun Park*, Kyun-Kyung Lee*

*경북대학교 대학원 전자공학과, **김천대학 전자통신과

*Kyungpook National University, **Kimchun Chollege

email: kklee@ee.knu.ac.kr*

※ 이 논문은 수중음향특화센터와 2000년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

요약

수중환경에서 표적의 탐지 성능을 향상시키기 위하여 능동 소나에서는 높은 시간-대역폭의 파형들을 사용하며 대표적인 것으로 LFM 펄스를 들 수 있다. LFM 펄스를 사용하여 표적까지의 거리와 표적의 속도를 추정하는 방법으로는 모호함수를 사용하는 방법과 deconvolution 방법 및 FFT-기반 기법 등이 있다. 이러한 기법중 모호함수 사용 방법과 deconvolution 방법은 능동 소나의 운용 주파수 대역에서 많은 연산량이 요구되므로 실제 시스템에 적용하기에는 제약을 받는다. 그리고 다른 기법에 비해 적은 연산량을 가지는 FFT-기반 상관관계 기법은 실제 시스템에 적용이 가능하지만 다중경로에 의한 성능 저하를 가지고 있다. 본 논문에서는 적은 연산량을 가지는 FFT-기반 기법을 보완하여 다중경로에 적용 가능한 새로운 탐지기를 제안한다.

I. 서론

수중환경에서 능동소나를 운용할 경우 수신신호는 표적신호가 단일 경로를 통해서만 들어오지 않고 다중경로로 전달된다. 이러한 다중경로 전달은 시간확산왜곡(Time spreading distortion)의 원인이 되기도 하여, 기존의 표적까지의 거리와 표적의 속도를 탐지하기 위한 모호함수를 사용하는 방법과 Deconvolution 방법 및 FFT-기반 기법 등으로는 연산량과 추정오차관점에서

문제점을 가지게 된다. 모호함수 사용 방법과 deconvolution 방법은 능동 소나의 운용 주파수 대역에서 많은 연산량이 요구되므로 실제 시스템에 적용하기에는 제약을 받는다. 그리고 다른 기법에 비해 적은 연산량을 가지는 FFT-기반 기법은 단일경로만을 고려한 신호처리기법이므로 다중경로가 존재하는 경우 도플러 추정오차를 가지게 되어 성능의 저하를 가진다. 그래서 본 논문에서는 다중 경로를 고려한 신호처리를 통해서 FFT-기반 탐지기의 성능을 향상시킨 새로운 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I장의 서론에 이어 II장에서는 능동소나 시스템의 능동음원으로 많이 사용되고 있는 LFM 펄스의 신호모델을 정의한다. III장에서는 LFM 펄스 탐지기로 이용되고 있는 FFT-기반 탐지기 보였다. IV장에서는 다중경로를 고려하여 표적의 도플러를 탐지해내는 알고리즘을 제안한다. V장에서는 III장과 IV장의 신호처리 모델을 기본으로 해서 모의실험을 수행하였다.

II. LFM 펄스 신호모델

LFM (Linear Frequency-Modulated) 펄스를 능동음원으로 사용할 때 송신신호는 다음과 같이 정의된다.

$$x(n) = \begin{cases} \exp\{j2\pi[f_0 n/f_s + mn^2/(2f_s^2)]\} & -N/2 \leq n \leq N/2-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기에서 주파수 변화율인 m 은 Wf_s/N 과 같으며 W 는 Hz 단위로써 주파수 변화의 범위이다.

이와 같은 송신신호가 다중경로를 통해 수신되는 신호는 M 개의 송신신호가 서로 시간차를 가지고 들어오는 형태로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$s(n) = \sum_{k=0}^{M-1} x(n - \tau_k) + v(n) \quad (3)$$

여기서 $v(n)$ 은 백색 가우시안 잡음이며 τ_k 는 k 번째 다중경로에 의한 시간차를 나타낸다.

III. FFT-기반의 탐지기

농동소나에서 표적의 거리와 도플러를 추정하는 신호 처리기법중에서 모호함수를 이용하는 방법은 표적신호의 시간지연과 도플러에 대해서 2차원 탐색을 해야하므로 과도한 연산량을 가지는 단점을 가지고 있다. 따라서 일반적으로 연산량을 줄이기 위해서 FFT-기반 탐지기를 이용한다.

그림 1에서 수신신호 $s(n)$ 을 Mixer를 통과시키면서 기저대역 신호로 바꾼 후 저역통과필터를 거쳐 데시메이션 시킨다. 복소 신호로 나누어진 신호는 식 (3)의 기준신호들과의 곱을 FFT를 취한다. 각 FFT 결과에서 최대 출력을 갖는 주파수부분을 찾음으로서 도플러 변이를 구한다[2].

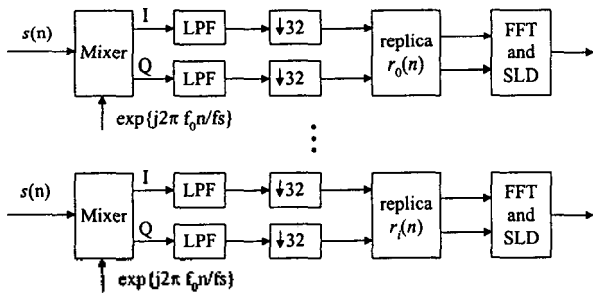


그림 1. FFT-기반의 LFM 펄스를 위한 탐지기

Fig. 1. FFT-based detector for the LFM pulse.

탐지하고자 하는 영역의 임의의 속도에서 기준신호에 대해서는 기울기에 의한 상관관계 손실은 3dB보다 적어야 하며 탐지하고자하는 표적의 속도는 여러 개의 기준신호로 나누어 맡는다. 식 (1)로부터 이 기준신호는 식 (3)과 같다[2].

$$r_i(n) = \exp\{j2\pi[f_0 n \delta_i / f_s + mn^2(1 + \delta_i)^2 / (2f_s^2)]\} \quad (3)$$

여기에서 $\delta_i = 2v_i/c$ 이다.

실제 수중환경에서 수신신호는 표적신호가 단일 경로를 통해 들어온 것이 아니라 다중경로를 통해 들어온 것이기 때문에 저역통과된 수신신호와 복소 기준신호의 곱을 FFT하면 오차를 가지게 되는데 그 예로서 그림 2를 볼 수 있다.

그림 2는 표적속도를 4knots, 경로시간차를 40msec로 하고 첫 번째 경로의 크기를 단위크기로 했을 때, 두 번째 경로의 크기를 0.9로 하는 다중경로 두 개를 가정한 경우의 FFT 결과를 나타낸 것이다. 실제 도플러 변이가 20Hz임에도 불구하고 두 번째 경로와의 FFT에서 3Hz에 최대치를 가지게 되어 약 17Hz의 도플러 오차가 생긴다.

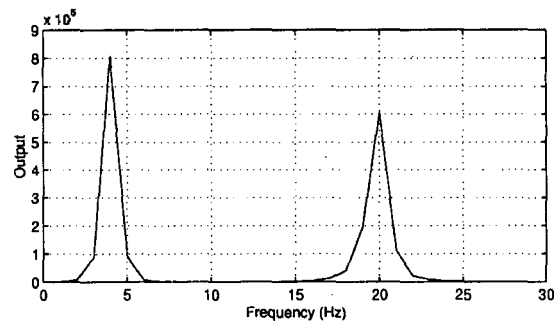


그림 2. 다중경로 2개, 표적속도 4 knots, 시간 간격 40 msec.

Fig. 2. Two Multipath, Target velocity 4 knots, Time difference 40 msec.

IV. 제안한 기법

표적신호가 다중경로를 통해 들어오는 수신신호라면 상관관계 탐지기의 출력은 각 경로의 표적신호 도착 때마다 첨두치를 나타내게 되고 기준신호의 도플러 변이와 수신신호의 도플러 변이가 다르게 되면 출력에 있어 식 (4)과 같이 시간에 대해 변이가 일어나게 된다.

$$\Delta\tau \approx \frac{T}{B} \times \Delta\delta f_0 \quad (4)$$

만약 기준신호와 수신신호의 도플러 변이가 일치하더라도 처음 도달 경로에서 최대치를 가진다고 할 수 없으므로 정확한 도착 시간 탐지가 힘들다. 하지만 여기서 경로간의 시간차를 알 수 있다

그림 3은 그 예를 보여주고 있는데 여기서는 두 번째 도달 시간에서 최대치를 나타내고, 시간상에서는 표적의 속도가 4knots이므로 도플러 변이 차가 음의 값을 가지기 때문에 전체적으로 실제 도달 시간 500msec에 대해 앞쪽으로 44msec가 변이되어 나타나지만 각 첨두치간의 시간차를 알 수 있다.

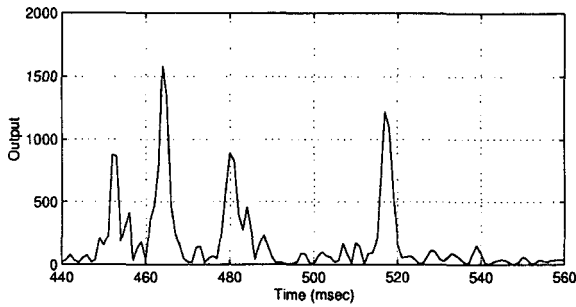


그림 3. 다중경로환경에서의 상관관계 탐지기 출력. 표적의 속도 : 4knots, $\tau_1 = 12\text{msec}$, $\tau_2 = 28\text{msec}$, $\tau_3 = 65\text{msec}$

Fig. 3. Correlator output in multipath environment. velocity of target : 4knots. $\tau_1 = 12\text{msec}$, $\tau_2 = 28\text{msec}$, $\tau_3 = 65\text{msec}$.

여기서 찾아낸 경로간 시간차를 이용하여 상관관계 탐지기의 기준신호를 만들고 이를 이용하여 수신신호와 의 연관관계를 조사함으로써 신호의 도착시간과 도플러 변이를 탐지한다. 식 (5)는 τ_k 의 경로간 시간차를 가진 M개의 기준신호가 합해진 새로운 기준신호를 표현하고 있다.

$$r(n) = r_1(n) + r_2(n + \tau_1) + \dots + r_M(n + \tau_{M-1}), \quad (5)$$

$$-N/2 \leq n \leq N/2$$

이 기준신호와 수신신호 사이의 상관관계를 구하게 되면 단일경로 기준신호 때와는 달리 도플러 변이 차에 비례한 시간 변이를 가지고서 최고치가 첫 번째 경로 도달 시간에 나타나게 되므로 도플러 변이 차가 없다면 최고치 발생 시점을 표적신호의 처음 도달 시간으로 볼 수 있게 된다. 하지만 표적의 속도를 사전에 정확히 알지 못하므로 도플러 변이 차가 없는 기준신호를 만들 수 없다. 그러나 다중경로를 고려한 도플러 변이가 각기 다른 여러 개의 기준신호가 있다면 그 신호들 중에서 표적신호와 의 도플러 변이 차가 가장 적은 기준신호가 상관관계 최대치를 나타내게 된다. 이 최대치를 나타내는 기준신호의 도플러 변이를 중심으로 여러 개의 기준신호를 다시 만들어 상관관계를 비교하는 신호처리를 반복한다. 반복 횟수에 따라 기준신호들의 도플러 변이 간격을 줄여감으로서 실제 도플러 변이와 기준신호의 도플러 변이 사이의 오차를 줄여나가는 미세 조정을 한다.

p번째 반복 때의 기준신호를 r_{-1p}, r_{0p}, r_{1p} 로, 이 기준신호와 수신신호사이의 상관관계 출력을 y_{ip} , $i = -1, 0, 1$ 로 하고 각 반복 때의 도플러 변이 간격을 β_p 라고 하자. 이는 수식 (6)에서 (10)처럼 표현된다.

$$r_{ip}(n, \delta_{ip}) = \exp\{j2\pi[f_0 n \delta_{ip}/f_s + mn^2(1 + \delta_{ip})^2/2f_s^2]\} \quad (6)$$

$$y_{ip}[n] = \left| \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} r_{ip}^*[k] \hat{s}[k+1] \right|^2 \quad (7)$$

$$\delta_{0(p+1)} = \arg \max_{\delta} [y_{-1p}, y_{0p}, y_{1p}] \quad (8)$$

$$\delta_{-1p} = \delta_{0p} - \beta_p, \quad \delta_{1p} = \delta_{0p} + \beta_p \quad (9)$$

$$\beta_p = \frac{1}{2^p} \times (\text{속도허용치}) \quad (10)$$

식(6)과 같은 기준신호들과의 상관관계인 식 (7)의 결과들 중에서 제일 큰 값을 가지도록 하는 도플러 변이를 다음 반복 때의 기준 도플러 변이로 하고, 도플러 변이들 사이의 간격은 식 (10)과 같이 한다. 식 (10)에서 β_p 가 원하는 속도 분해능보다 작은 값을 가질 때까지 반복하게 된다. 즉 식(11)과 같이 나타나게 된다.

$$p = \log_2 \frac{\text{속도허용치}}{\text{분해능}} \quad (11)$$

여기서 속도허용치란 기술기에 의한 상관관계 손실이 3dB보다 적게 나오는 속도를 말한다.

이를 블록 선도로 나타내면 그림 4와 같다.

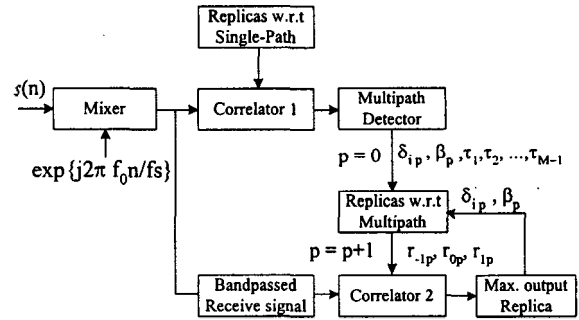


그림 4. 다중경로를 고려한 상관관계 탐지기

Fig. 4. Correlation detector in Multipath

V. 모의실험

제안한 알고리즘은 Correlator 1단에서의 다중경로간의 시간차 추정오차가 작아야 시간지연과 도플러를 정확히 추정할 수 있다. 따라서, 제안한 기법의 Correlator 1단의 출력에서 다중경로를 찾는 데 있어서 실제 경로 시간차에 얼마만큼의 오차를 가지는지 알아보기 위해 100번의 몬테카를로를 하였다. 그 결과 SNR이 -3dB 이상일 때는 1.3msec 미만이고 -8dB까지는 6.3msec만 으로 나타났다.

모의실험에서는 Correlator 1에서 구한 다중경로의 시간차가 정확한 경우와 다중경로의 시간차 추정치가 6msec를 가지는 경우에 대해서, 도착시간과 표적속도의

추정오차를 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 모의실험에 사용된 LFM 펄스는 중심주파수 7kHz, 대역폭 400Hz, 펄스길이 1초, 샘플링 주파수 1kHz로 한다. 수신신호는 백색 가우시안 잡음하에서 다중경로의 개수는 4개, 경로별 신호의 크기는 단위크기의 -3dB이상이라고 가정하고 랜덤으로 가지는 표적신호로 구성한다.

표 1과 2는 100번의 몬테칼로 시뮬레이션을 통해서 얻은 SNR에 따른 각 신호처리 기법의 표적 속도와 표적신호 도착시간에 대한 오차를 보여주고 있다. 제안한 기법의 Correlator 1에서 구한 다중경로의 시간차가 실제 시간차와 일치하는 경우(표 1)는 -8dB를 제외하고 제안한 기법이 FFT-기반 탐지기에 비해 25%의 속도 탐지오차와 20%의 도착시간 탐지오차를 가진다. 그리고 $\pm 6\text{msec}$ 의 오차가 있는 경우(표 2), -8dB를 제외하고 제안한 기법이 FFT-기반 탐지기에 비해 약 70%의 속도 탐지오차와 50%의 도착시간 탐지오차를 가진다.

표 1. FFT-기반 탐지기와 제안한 기법의 탐지오차
Table 1. Detection error of FFT-based detector and Proposed algorithm

기법 \ SNR	FFT-기반 탐지기		제안한 기법	
	속도 (knots)	도착시간 (msec)	속도 (knots)	도착시간 (msec)
0dB	1.92	35.46	0.59	7.01
-3dB	2.84	53.98	0.68	8.05
-5dB	2.770	55.920	0.72	8.75
-8dB	5.137	91.340	3.583	66.860

표 2. FFT-기반 탐지기와 제안한 기법의 탐지오차
Table 2. Detection error of FFT-based detector and Proposed algorithm

기법 \ SNR	FFT-기반 탐지기		제안한 기법	
	속도 (knots)	도착시간 (msec)	속도 (knots)	도착시간 (msec)
0dB	1.92	35.46	1.2	15
-3dB	2.84	53.98	1.37	16.1
-5dB	2.770	55.920	2.295	28.280
-8dB	5.137	91.340	4.070	83.180

VI. 결론

능동소나에서 LFM 펄스를 사용하여 표적까지의 거리와 표적 속도를 탐지할 때 발생하는 다중경로에 의한 FFT-기반 탐지기의 성능저하를 개선하기 위해 다중경로들의 시간차를 이용한 기준신호를 만들고 이를 이용

하여 표적까지의 거리와 도플러를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 여러 가지 모의 실험을 통해 LFM 펄스에 대한 표적신호성분의 검출성능을 분석하였다. 그 결과, 0~-8dB의 신호 대 잡음비에 대하여 제안한 알고리즘이 FFT-기반 탐지기보다 표적신호의 도플러와 시간지연 추정오차가 작게 나타남을 확인하였다.

그러므로, 제안한 알고리즘은 실제 다중경로 수중환경에서 표적까지의 거리와 도플러를 추정하는데 있어 좋은 성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 이균경, "Multistatic 소나 신호처리 기술 - 능동/수동 복합소나 신호처리, 탐지 및 운용 기술", 연구 보고서, 국방과학연구소, 1999.
- [2] R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1991.
- [3] M. D. Hahn, Inverse Filtering in the Presence of Doppler with Application to Specular Multipath Parameter Estimation, *Proceedings ICASSP 95* pp. 3169-3170, May 1995.
- [4] A. W. Habboosh, A Deconvolution Method for Estimating Multipath Delay and Doppler, *Proceedings CISS 96*, pp. 633-638, March 1996.
- [5] A. W. Habboosh, An Algorithm for Detecting Closely Spaced Delay/Doppler Components, *Proceedings ICASSP 97*, vol 1, pp. 535-538, 1997.