

미지표적의 식별과 시간지연 차의 추적연구

염석원*, 윤동현, 윤동욱, 고한석
고려대학교 전자공학과 지능 정보 및 신호 처리 연구실

Detection and Time Delay Estimation of Unknown Target

Seok-Won Yeom*, Dong-Hun Yoon, Dong-Uk Yoon, Han-Seok Ko
II&SP lab. Dept. of Electronics Engineering Korea University
(swyeom, koppie, duyoon, hsko)@ispl.korea.ac.kr

요약

본 논문에서는 한 쌍의 수동소나를 이용하여 미지의 잠항물체의 존재 유무를 확인하고 각 센서에 도달하는 시간 지연의 차를 평가하는 Detection과 Tracking 알고리즘을 연구한다. 이 과정에서 이동하는 표적의 속력에 의한 도플러효과를 보상하는 2차원 확률분포 함수를 적용함으로써 보다 정확한 결과를 도출한다. 관측신호의 Cross-Correlation과 Bayesian Method를 이용하여 계산한 시간지연과 도플러효과 비의 이차원 Likelihood 함수로부터 사후확률(Posterior Probability)을 구하여 발견 평가와 추적을 수행한다.

I. 서론

미지의 적 잠수함을 발견하고 위치와 필요한 정보를 추적하는 시스템의 구현은 해상무기체계의 기반을 이루는 요소이다. 표적의 위치를 계산하기 위하여, 추적하고자 하는 주된 관심사는 한 쌍의 센서에 도달하는 공통된 표적 신호의 시간 지연(Time Delay of Arrival)의 차이이다. 이러한 시간 지연은 신호의 속력이 일정하다는 가정 아래 각 센서와 잠수함과의 거리에 비례하며 여러 쌍의 센서로부터 구한 시간지연 차를 근거로 위치의 계산이 가능하다.

본 논문에서는 이산적인 이차원 Likelihood 함수는 시간지연 차와 도플러효과 비의 가설에 따라 변화하는 신호의 Cross-correlation으로부터 구하고 Bayesian Method를 이용하여 이차원 Joint 사후확률을 산출한다. 또한 신호의 존재 유무를 확인하기 위한 발견평가 작업을 동시에 수행하며 이를 위해 추적확률 분포함수를 합성하고 분리하는 과정을 더불어 병행하게 된다.

최적의 평가(Optimal Estimation)로 이차원 사후 확률분포 함수의 Minimum Mean Square Error(MMSE)와 Maximum A Posteriori probability(MAP)의 해를 구한다.

II. 관측신호 모델

표적에서 방사된 신호는 감쇠 되고 센서와의 거리에 의해 시간지연과 도플러효과에 의하여 주파수 변화가 일어난다. 각 두 센서에서 관측된 신호는 방사된 표적 신호에 독립적인 백색잡음이 더해진다고 가정한다.

도플러효과와 시간지연은 독립적으로 평가할 수 없고 단지 도플러효과 비와 시간지연의 차만이 측정 가능하다.

$$a = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} : \text{도플러효과 비} \quad (1)$$

$$d = (\beta_2 - \beta_1) : \text{시간지연 차}$$

그러므로 관측되는 신호는 다음과 같이 모델링이 된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= s(at) + n_1(t) \\ r_2 &= s(t-d) + n_2(t) \end{aligned} \quad (2)$$

측정된 신호는 Sampling과정을 거쳐 이산적인 신호로 바뀐 후 그림 1의 짧은 관측구간(Block)으로 나누어진다. 이때 시간지연 차의 해상도는 Sampling 시간과 동일하다. 실제 신호는 표적의 이동에 따라 두 변수가 시시각각 변하는 Non-stationary 신호지만 각 관측구간에서 이러한 변화가 없는 Stationary 신호라고 가정한다. 즉 각 관측구간에서 구하고자 하는 표적신호의 존재 유무와 시간지연 차, 도플러효과 비는 일정하다. 또한 구간의 변화에 따라 발견확률 분포함수와 추적확률 분포함수는 First-order Markov process의 특성을 포함한다고 가정한다.

두 신호의 Cross-Correlation을 통하여 시간지연 차를 추적하는 방식으로 각 관측구간마다 Updating이 이루어진다. 이 과정에서 도플러효과 비의 보상을 위하여 측정된 신호의 Resampling이 필요하다.

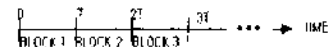


그림 1 신호벡터의 관측구간

III. 발견평가, 추적수행 알고리즘

3.1 발견확률과 추적확률 분포함수

이차원 확률분포 함수의 영역은 실제 시간지연과 도플러효과를 충분히 포함하도록 잡아야한다. 만약 M개의 시간지연의 차와 L개의 도플러효과 비가 있다고 가정하면 발견, 추적수행 과정에서의 세울 수 있는 가설(Hypothesis)은 표적이 존재하지 않는다는 가설과 추적확률 분포함수의 M*L개의 가설이 더해져 총 M*L개의 셀(Cell)이 형성된다.

표적이 있다는 가설은 H_1 없다는 가설은 H_0 이고 H_{ml} 을 m 시간지연 차와 l 도플러효과 비를 가지는 가설이라고 본다면 각 확률분포 함수가 다음과 같이 되고

$$\begin{aligned}
 P_{d_i}(H_1), P_{d_i}(H_0) &: \text{발견 확률 분포 함수} \\
 P_{ij}(H_{ml}) &: \text{추적 확률 분포 함수}
 \end{aligned} \quad (3)$$

아래와 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned}
 P_j(H_0), P_j(H_{ml}) &: \text{통합확률 분포함수} \\
 P_{d_i}(H_0) &= P_j(H_0) \\
 P_{d_i}(H_1) &= \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M P_{ij}(H_{ml}) \\
 P_{ij}(H_{ml}) &= \frac{P_j(H_{ml})}{\sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M P_j(H_{ml})}
 \end{aligned} \quad (4)$$

만약 이산된 시간지연 차와 도플러효과 비가 한정된 영역에서 충분히 큰 해상도를 갖는 M, L개의 값들 중에서 하나가 될 수 있다면 Bayesian Rule에 의하여 다음과 같은 식이 전개될 수 있다.

$$P(H_{ml}|R_i) = \frac{P(\mathbf{r}_i|H_{ml}, \mathbf{R}_{i-1})P(H_{ml}|\mathbf{R}_{i-1})}{P(\mathbf{r}_i|\mathbf{R}_{i-1})} \quad (5)$$

\mathbf{r}_i : 각 구간의 신호 벡터

\mathbf{R}_i : i 구간을 포함한 모든 신호 벡터

(- [$\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_{i-2}, \dots$])

$P(\mathbf{r}_i|\mathbf{R}_{i-1})$ 은 모든 가정 H_{ml} 에 대하여 일정하므로 정규화 상수로 대체될 수 있다

3.2 Projection 과정

이전 관측구간의 사후확률 함수를 현재 구간의 사전확률 함수로 수정하는 과정이다. 이를 위하여 통합확률 분포 함수는 발견확률과 추적확률 분포함수로 나뉘어진다.

발견평가 수행과 추적수행 과정은 독립적인 확률연산작용이라고 생각할 수 있고[6] 각각 관측구간 사이의 First order Markov Process라고 가정한다.

그러면 발견확률의 Projection 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} P_{d_i}(H_0) \\ P_{d_i}(H_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q & 1-q \\ 1-q & q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{d_{i-1}}(H_0) \\ P_{d_{i-1}}(H_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

시간지연 차와 도플러효과 비 역시 이산적인 관측구간에서 이산적인 First order Markov Process이고 다음과 같은 각 변수에 가우시안 프로세스 잡음을 더하는 형태로 모델링된다.

$$\begin{aligned}
 d_i &= d_{i-1} + w_{i-1} \\
 a_i &= a_{i-1} + w_{i-1}
 \end{aligned} \quad (7)$$

이러한 과정은 추적 확률분포 함수를 Projection 하는 과정이며 확률분포 함수의 필터링으로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{i+1}(H_{ml}) = P_i(H_{ml}) * q(H_{ml})$$

$P_{i+1}(H_{ml})$: i+1 번째 관측구간의 추적수행
사전확률 (8)

$P_i(H_{ml})$: i 번째 관측구간의 추적수행
사후확률

$q(H_{ml})$: m, l 번째 셀 의 w_i 의 확률분포

가우시안 확률밀도 함수인 $q(H_{ml})$ 를 효과적으로 표현하기 위하여 순방향과 역방향의 IIR(Infinite Impulse Response) 필터를 사용한다[4].

각 filter의 impulse response는 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 \text{Forward Filter } h_f(l) &= \alpha(1-\alpha)^l & : i \geq 0 \\
 &= 0 & : i < 0 \\
 \text{Backward Filter } h_b(l) &= \alpha(1-\alpha)^{-l} & : i \leq 0 \\
 &= 0 & : i > 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

$q(l)$ 은 각 필터의 연속적인 결합으로 이루어진다.

$$q(l) = h_f(l) * h_b(l) * h_f(l) * h_b(l) \quad (10)$$

그림 2는 $q(l)$ 의 Impulse Response이다. 점선(낮은 곡선)의 같은 값의 분산을 갖는 가우시안 PDF와 비슷한 모양을 보임을 알 수 있다. 그러므로 IIR 필터를 사용하여 PDF를 Projection하는 과정은 가우시안 PDF를 Convolution할 때와 비슷한 결과를 훨씬 빠르게 얻을 수 있다.

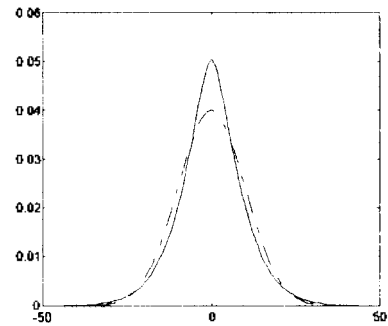


그림 2 $q(l)$ 의 Impulse Response

3.3 Correction 과정

현재 관측된 신호벡터를 이용하여 Conditional Likelihood를 구한 후 이전 구간의 사전확률로부터 현재 시각의 사후확률을 구하는 과정이다. 이러한 사후확률은 최적의 평가 과정을 거쳐 시간 차와 도플러 비의 최종 값이 된다. 이를 위하여 발견평가 확률과 추적확률로 나누어진 분포함수는 통합이 되어야 하고 정규화 된다. 일반적으로 Likelihood 함수를 근사할려는 시도가[1-2],[7-8] 많았고 이를 토대로 Cross-Correlation의 적절한 필터링을 통하여 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$P(r_j|H_m) = C_1 \exp(\lambda_j(m)) \quad m = 1, \dots, M$$

$$\lambda_j(m) = C_2 \sum_{k=1}^K r_{1j}(k) r_{2j}(k-m) \quad (11)$$

K : 관측 구간의 신호 벡터 수

Projection과 Correction 과정을 반복하여 미지의 표적에 대한 시간지연을 평가하는 전체적인 흐름을 그림 3과 같이 도시할 수 있다. Correction 과정을 거친 후 사후 확률에서 시간차와 도플러 비를 평가하는 방법은 MAP와 MMSE가 있다.

그림 4와 5는 도플러효과를 고려하여 만든 사각파를 Generalized Cross-Correlation 한 결과이다. 그림 4에서 각각 다른 도플러효과를 감안하여 생성된 신호들간의 차이를 볼 수 있다. 기본 sampling 시간은 0.5sec이며 시간 지연은 11 sec로 주었다. 그림 5는 위에서 생성된 도플러 효과 비가 0.95인 실선의 사각파(center)를 도플러 비를 보상하여 작은 사각파와 Cross-Correlation 한 결과이다. 가상적인 도플러효과 비, 0.9, 0.95, 1.0을 적용하여 Resampling 한 후 구한 결과는 도플러 보상의 중요성을 보여준다. 신호를 만들 때 감안한 도플러 효과와 가설로 정한 값이 일치할 때 정확한 시간지연에서 최대의 Cross-Correlation 값을 갖는다는 것을 볼 수 있다.

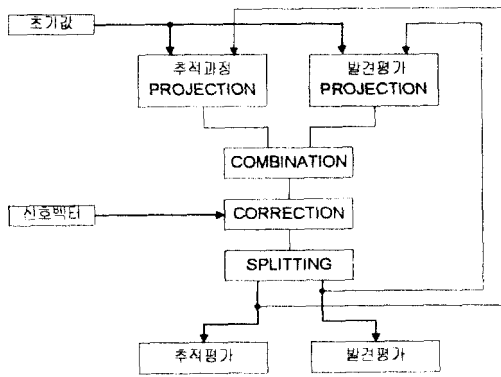


그림 3 발견과 추적수행을 위한 Algorithm

도플러 효과비 : - - - - : 0.9 (left)
 : ———— : 0.95 (center)
 : ———— : 1 (right)

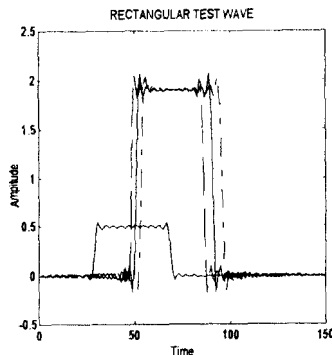


그림 4 Rectangular test wave

기준점(0 sec) -- 151
 - - - - : 도플러 가설 = 1 MAX = 0.9868
 시간지연 = 13 sec (left)
 ———— : 도플러 가설 = 0.95 MAX = 0.9998
 시간지연 = 11 sec (center)
 - - - - : 도플러 가설 = 0.9 MAX = 0.9859
 시간지연 = 9 sec (right)

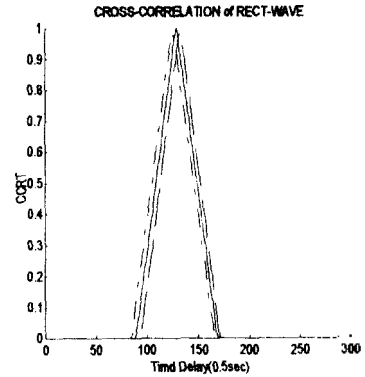


그림 9 Cross-correlation of rectangular wave

IV. 시나리오 전개 및 모의실험

시뮬레이션 실험을 위하여 실제의 상황에 근접한 시나리오를 가상적으로 만들었다. 다음 그림 6은 두 개의 소나가 국소 지역에 배치되어 있고 그 사이로 750초 동안 미지의 표적이 잠항하는 이차원 시나리오를 도식한 것이다. 두 개의 원은 각 센서의 측정 가능한 영역을 뜻하며 공통된 원의 부분에서 표적의 측정이 가능하게 된다. 소나 1과 2의 거리는 약 2km이고 표적은 55km/h의 속력으로 움직이며 125초부터 647초까지 관측이 가능하다.

Sampling 시간은 0.00488 sec로 하나의 관측구간 5 sec 동안 1024개의 신호가 생성된다. 이차원 확률분포 함수의 총 셀의 범위 중 시간지연 차의 영역은 cross-correlation 하는 과정에서 2배로 늘어나 2047 개가 되며 도플러 영역은 Resampling하는 부담을 줄이기 위하여 도플러효과 비의 가설이 0.004의 크기로 0.98에서 1.02까지의 총 11개의 값을 갖는다고 가정하였다. 그러므로 총 이차원 셀의 수는 20,000 여 개에 달한다.

그림 7는 SNR이 -5 dB 일 때 하나의 관측구간으로부터

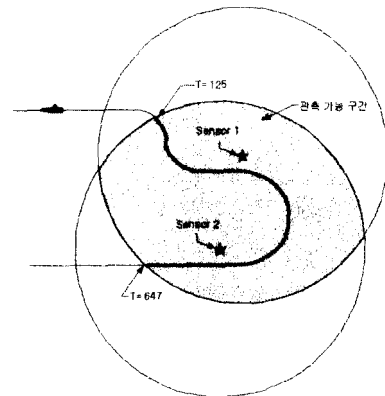


그림 10 센서-표적 가상 시나리오

얻은 Likelihood의 최대값을 취한 결과이다. 급격하게 변화하는 측정의 부정확성과 Threshold 효과는 사전확률 계산의 중요성을 보여준다.

그림 8은 이차원 확률분포 함수영역 중 국소지의 섹에 대하여 평균을 취한 결과이다. 즉 시간지연 영역과 도플러 비 영역에서 Correction에서 사용한 Impulse Response의 분산과 같은 크기의 영역의 확률분포에 대하여 MMSE를 계산한 결과이다.

그림 9는 같은 SNR을 가지는 신호에 대하여 도플러 효과의 보상 없이 시간지연 차만을 고려해서 추적을 한 결과이다. 도플러효과를 고려하지 않고 신호를 해석할 경우 낮은 SNR에 대해서 추적성능이 떨어지는 것을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서 미지의 표적의 존재 유무와 각 센서에 도달하는 시간 지연을 평가하기 위하여 신호의 도플러효과를 고려하여 이차원 확률분포 함수를 구하고 발견 평가와 추적평가를 동시에 수행하였다.

도플러 효과를 고려한 결과 더욱 안정적인 탐지를 수행할 수 있음을 보였다. 즉, 표적 속도에 대한 도플러효과를 보상함으로써 이를 무시했을 경우보다 탐지의 질이 향상됨을 실험을 통하여 알 수 있었다.

그러나 정확한 도플러 보상을 위해서는 계산량의 증가가 불가피하여 프로그램 처리 속도의 문제를 해결해야 한다. 수신단의 성능향상을 위한 적절한 구현 기법을 개발하거나 특수 목적의 DSP processor를 사용을 통해 속도를 실시간에 부합되도록 하는 방안을 생각할 수 있다. 점차 표적들이 빠르고 조용해짐에 따라 이를 탐지하기 위하여 실제 상황에서의 적용이 더욱 요구된다.

※ 이 과제는 1997~1998년도 국방연구소 지원 하에 수 중음향특화센터 과제에 수행했음.

참고문헌

- [1] C. H. Knapp, G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 34, pp. 320-327, Aug. 1976
- [2] J. N. Bradley, R. L. Kirlin, "Delay estimation by expected value", IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 32, pp. 19-27, Feb. 1984
- [3] J. A. Stuller, "Maximum-likelihood estimation of time-varying delay-part I", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 35, pp. 300-313, Mar. 1987
- [4] R. E. Bethel, R. G. Rahikka, "An optimum first-order delay tracker", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, vol. 23, pp. 718-725, Nov. 1987
- [5] R. E. Bethel, R. G. Rahikka, "Optimum time delay detection and tracking", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, vol. 26, pp. 700-711, Sep. 1990.
- [6] H. J. Larson, B. O. Shubert, "probabilistic Models In Engineering Sciences, 1979
- [7] J. C. Hassab, R. E. Boucher, "Optimum estimation of time delay by a generalized correlator", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 27, pp. 373-380, Aug. 1979.
- [8] W. H. Haas, C. S. Lindquist, "A synthesis of frequency domain filters for time delay estimation", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 29, pp. 540-548, June. 1981.
- [9] H. L. Van Trees, Detection, Estimation and Modulation Theory, Part I, New York: Wiley, 1968.
- [10] C. P. Hastell, "Optimal detection of a signal with time-varying carrier phase" IEEE Transaction on AES, vol. 10, Nov 1974
- [11] E. Weinstein, "Delay and doppler estimation by time-space partition of the array data", IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 31, pp. 1523-1535 Dec. 1983

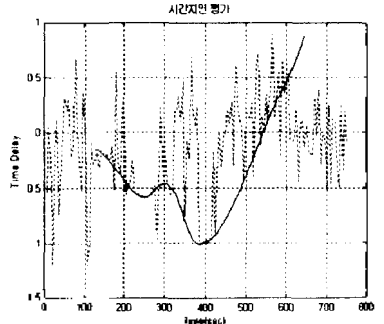
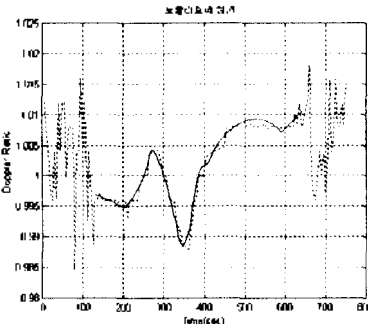
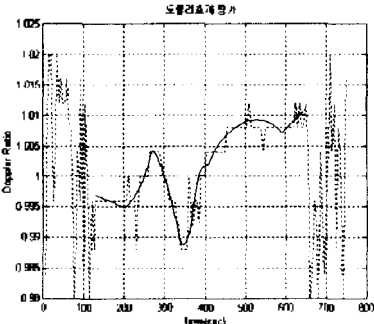
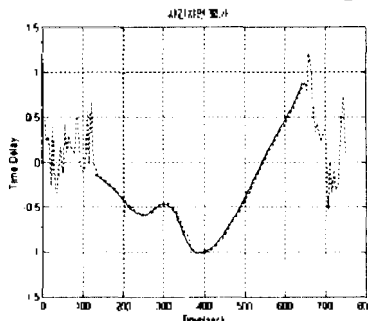
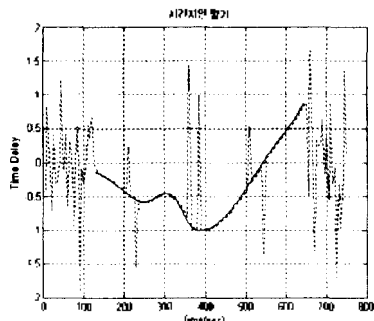


그림 7 Likelihood의 최대값 (SNR : -5 dB)

그림 8 MMSE(2) (SNR : -5 dB)

그림 9 MMSE(2) (SNR : -5 dB)