순차 검증과 자료융합을 이용한 수중 표적 판별

곽 은 주*
*한국통신 서울통신운용연구단

Underwater Target Discrimination using Sequential Testings and Data Fusion

*Eun-Joo Kwak
*Seoul Telecommunications O&M Research Center, Korea Telecom

Abstract - In this paper we discuss an algorithm to discriminate a target under track against multiple acoustic counter-measure (ACM) sources, based on sequential testings of multiple hypotheses. The ACM sources are separated from the target under track and generate, while drifting, measurements with false range and Doppler information. The purpose of the ACM is to mislead the target tracking and to help the true target evade a pursuer. The proposed algorithm uses as a test statistic a function of both the sequences of processed waveform signature and the innovation sequences from extended Kalman filters to estimate the target dynamics and the drifting positions of the ACM sources. Numerical experiments on various scenarios show that the proposed algorithm discriminates the target faster with a higher probability of success than the algorithm using only the innovation sequences from extended Kalman filters.

1. 서 론

수중 운동체를 수중 표적으로 유도하기 위해서는 적절한 표적 추적 알고리듬이 요구된다. 특히 표적이 능동 음탐 수중 운동체에 의한 추적을 회피하기 위해서 음향교란(ACM: Acoustic Counter-Measure)근원들을 발생시켜 추적을 혼란시키고 ACM 근원으로의 그릇된 유도를 시도하는 경우, 수중 운동체의 표적 추적 알고리듬은 빠른 시간내에 표적과 표적으로부터 분리된 ACM 근원들을 판별할 수 있어야 한다. 보다 구체적으로 설명하면, 표적으로부터 분리된 M-1개의 ACM 근원들이 어떤 순간부터 음향교란신호를 발생시키면 이때부터 M개의 측정이 탐지되기 시작한다. 표적과 ACM 근원을 구분하기 위해 일단 이 측정들로부터 적절한 데이타 연관을 통해 M개의 항적을 구성하게 된다. 물론 이 항적중 하나는 표적으로부터, 다른 M-1개는 ACM 근원으로부터 비롯된 것이다. 표적과 ACM 근원들로부터 비롯된 M개의 항적을 각각 구분하기 위해서는 실제 표적의 항적과 ACM 근원들에서 비롯된 항적의 기하학적 특성을 이용하여야 한다. 또 이와 함께 측정신호파형의 특성(signature)을 이용하여 표적과 ACM 근원을 구분할 수도 있다. 이러한 다중표적의 판별문제를 풀기 위한 방법으로 다중 순차적 가설 검증[1,2]의 적용을 생각해 볼 수 있다. 다중 순차적 가설 검증에는 먼저 Wald의 이진 순차적 가설 검증[3]을 일반화시킨 Armitage 검증, 각 가설의 공산함수(likelihood function)와 각 가설 공산함수의 기하평균비를 이용하여 가설을 제거하는 Reed 검증, 그리고 가장 큰 공산함수와 그 다음으로 큰 공산함수의 로그공산비(log likelihood ratio)를 문턱값과 비교하는 Palmer 검증등이 있다. 이 순차적 가설 검증방법들은 레이다의 표적 판별 및 인식등에 응용되고 있다[1,2,4].

이 논문에서는 다중 순차적 가설 검증을 이용하여 수중 표적과 ACM 근원들을 구분하기 위한 방법을 제안하였다. 여기서 고려하는 ACM 근원들은 표적으로부터 분리되어 수중의 표류 위치에서 수중 운동체의 능동 음탐 신호를 지연 발생시켜 시선 방향으로 운동하는 표적으로 혼동하도록 한 것이다. 제안된 알고리듬은 항적의 기하학적 특성을 이용한 각 가설에 정합된 필터부분과 정합필터의 이노베이션(innovation)으로부터 로그 공산비를 계산하는 부분, 신호처리된 측정신호파형의 특성을 이용한 로그 공산비 계산부분, 그리고 이들을 융합한 판별부분으로 이루어진다. 항적의 기하학적 특성에 정합된 필터들은 표적에 대해서는 일반적 형태의 확장 Kalman 필터로, ACM 근원들에 대해서는 방위각 측정만을 이용하는 변형 극좌표계[5]에서의 확장 Kalman 필터로 구성된다. 여러가지 시나리오에 대한 수치실험을 통해 제안된 알고리듬의 성능을 검토하였다. 특히, 항적의 기하학적인 특성과 측정신호파형의 특성을 융합한 가설 검증 방식의 효율성을 알아보았다. 이 논문은 참고문헌[6,7]에서 제안한 표적 판별 알고리듬에 대해 측정신호파형의 특성을 이용할 수 있도록 확장한 것이다.

2. 측정신호파형의 특징을 융합한 표적 판별

먼저 항적의 기하학적 특징을 이용하여 각 가설에 정합된 필터를 구성하고 정합필터의 이노베이션으로부터 로그공산비를 계산한다. 다중 순차적 가설 검증 방법들과 각 가설에 정합된 필터의 구성, 그리고 이를 이용한 가설 검증은 참고문헌[7]의 2, 3장에 자세히 설명되어 있다. 여기서는 신호처리된 측정신호파형의 특성을 융합할 수 있도록 앞의 결과를 확장한다. 우선 ${}^{s}Z^{k}_{a_1} = \{ {}^{s}z_{a_1}(n) : n = 1, \ldots, k \}$, ${}^{s}Z^{k}_{a_2} = \{ {}^{s}z_{a_2}(n) : n = 1, \ldots, k \}$, $\cdots$, ${}^{s}Z^{k}_{a_M} = \{ {}^{s}z_{a_M}(n) : n = 1, \ldots, k \}$ 을 각각 항적 $a_1, a_2, \ldots, a_M$을 발생시킨 신호처리된 측정신호파형의 특성으로 정의한다. 이때 ${}^{s}Z^{k} = \{ {}^{s}Z^{k}_{a_1}, {}^{s}Z^{k}_{a_2}, \ldots, {}^{s}Z^{k}_{a_M} \}$ 이다. ${}^{s}z_{a_i}(n)$, $i = 1, \ldots, M$, 가 표적에서 발생한 측정일 때는 평균이 0이고 분산이 σ^2인 가우시안 분포를 가진다고 가정하고, ACM 근원에서 발생한 측정일 때는 평균이 m이고 분산이 σ^2인 가우시안 분포를 가진다고 가정한다. 여기서 m은 평균이 0이고 분산이 σ_m^2인 가우시안 확률밀도함수를 가지는 미지의 확률적 매개변수이다. 그리고 이렇게 신호처리된 측정신호파형의 특성은 기하학적 운동에 대해 독립적이라고 가정한다. 따라서, 앞에서 기하학적인 특성에 대한 공산함수와 독립적으로 신호처리된 측정신호파형특성에 대한 공산함수를 구성할 수 있다. 가설 H_i는 $Z^{k}_{a_i} = \{ {}^{d}Z^{k}_{a_i}, {}^{s}Z^{k}_{a_i} \}$ 는 표적으로부터, $Z^{k}_{a_j} = \{ {}^{d}Z^{k}_{a_j}, {}^{s}Z^{k}_{a_j} \}$, $j = 1, \ldots, M, j \neq i$, 는 ACM 근원으로부터 얻어진 측정이라는 가설을 의미한다. 따라서, 가설 H_i, $i = 1, \ldots, M$는 ${}^{s}Z^{k}_{a_i}$는 표적에서 발생한 측정이라는 한 개의 단순 가설과 ${}^{s}Z^{k}_{a_j}$, $j = 1, \ldots, M, j \neq i$는 ACM 근원에서 발생한 측정이라는 $M-1$개의 복합 가설들이 결합된 가설이다. 이 가설의 검증을 위해서는 각 가설에 대한 공산함수와 공산비를 구해야 한다. 각 가설에 대한 신호처리된 측정신호파형특

징의 공산함수는 기하학적 운동에 대한 공산함수와 독립적이므로, 2.1절에서는 측정신호파형특성의 공산함수와 공산비만 먼저 얻고 항적의 기하학적인 특징을 이용한 결과와 결합한 전체 공산함수와 공산비를 얻도록 한다.

2.1. 측정신호파형에 대한 가설의 공산함수와 공산비 구성

가설 H_i, $i=1,\ldots,M$,의 공산함수는 측정 집합 ${}^{s}Z^{k}_{a_1}, {}^{s}Z^{k}_{a_2},\ldots, {}^{s}Z^{k}_{a_M}$가 서로 독립적이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p[{}^{s}Z^{k}|H_i] = \prod_{l=1}^{M} p[{}^{s}Z^{k}_{a_l}|H_i] = p[{}^{s}Z^{k}_{a_i}|H_i]\cdot\prod_{l\neq i}^{M} p[{}^{s}Z^{k}_{a_l}|H_i] \quad (1)$$

위 식에서 $p[{}^{s}Z^{k}_{a_i}|H_i]$는 ${}^{s}Z^{k}_{a_i}$가 표적에 의한 측정이라는 가설의 공산함수로서 측정 시간 지수를 n이라 할 때 그 분포는 아래 식과 같다.

$$p[{}^{s}Z^{k}_{a_i}] = \prod_{n=1}^{k} p[{}^{s}z_{a_i}(n)] = \frac{1}{(2\pi)^{k/2}\sigma^{k}}\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{n=1}^{k}{}^{s}z^2_{a_i}(n)\right) \quad (2)$$

그리고 나머지 $\prod_{l\neq i}^{M} p[{}^{s}Z^{k}_{a_l}|H_i]$는각각의 측정 ${}^{s}Z^{k}_{a_l}$, $l=1,\ldots, M$, $l\neq i$가 ACM 근원에 의한 측정이라는 가설의 공산함수로서 그 평균 m은 분포가 알려져 있는 확률적 매개변수이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\prod_{l\neq i}^{M} p[{}^{s}Z^{k}_{a_l}|H_i] = \prod_{l\neq i}^{M}\prod_{n=1}^{k}\int p[{}^{s}z_{a_l}(n)|H_i, m]\, p[m|H_i]\, dm \quad (3)$$

$$= \prod_{l\neq i}^{M}\frac{1}{(2\pi)^{k/2}(\sigma^2+\sigma_m{}^2)^{k/2}}\cdot\exp\left(-\frac{1}{2(\sigma^2+\sigma_m{}^2)}\sum_{n=1}^{k}{}^{s}z^2_{a_l}(n)\right)$$

위 식(1)에 식(2), (3)을 각각 대입하면 각 가설에 대한 공산함수를 구할 수 있다.

로그 공산비 ${}^{s}\Lambda_{i,j}(k)$는 $2M$개의 로그 공산함수로 분리된다.

$${}^{s}\Lambda_{i,j}(k) \triangleq \sum_{l=1}^{M}[{}^{s}\Lambda_{a_l i}(k) - {}^{s}\Lambda_{a_l j}(k)],$$

$${}^{s}\Lambda_{a_l i}(0) = 0,\ l=1,\ldots, M,\ i=1,\ldots, M \quad (4)$$

여기서 ${}^{s}\Lambda_{a_1 i}, {}^{s}\Lambda_{a_2 i},\ldots, {}^{s}\Lambda_{a_M i}$과 ${}^{s}\Lambda_{a_1 j}, {}^{s}\Lambda_{a_2 j},\ldots, {}^{s}\Lambda_{a_M j}$는 측정신호파형의 특성 ${}^{s}Z^{k}_{a_1}, {}^{s}Z^{k}_{a_2},\ldots, {}^{s}Z^{k}_{a_M}$에 대한 H_i과 H_j 가설의 독립된 로그 공산함수이다. 즉, ${}^{s}\Lambda_{a_l i}$는 측정 ${}^{s}Z^{k}_{a_l}$에 대한 표적 모델의 로그 공산 함수, ${}^{s}\Lambda_{a_l i}$, $l=1,\ldots, M$, $l\neq i$,는 각각 측정 ${}^{s}Z^{k}_{a_l}$에 대한 ACM 모델의 로그 공산함수이다.

2.2. 전체 로그 공산함수와 로그 공산비

전체 측정 Z^k는 다음과 같이 항적을 발생시킨 측정 ${}^{d}Z^{k}$과 신호처리된 측정신호파형의 특성 ${}^{s}Z^{k}$의 집합이다.

$$Z^k = \{{}^{d}Z^{k}, {}^{s}Z^{k}\} = \{({}^{d}z(n)^T\ {}^{s}z(n)^T)^T : n=1,\ldots,k\} \quad (5)$$

$p[Z^k|H_i]$는 가설 H_i에 대한 전체 측정의 공산함수이고, 전체 로그 공산비는 ${}^{d}Z^{k}$, ${}^{s}Z^{k}$가 서로 독립적이므로 다음과 같이 2개의 로그 공산비의 합으로 정의된다.

$$\Lambda_{i,j}(k) = \ln\frac{p[Z^k|H_i]}{p[Z^k|H_j]} = \ln\frac{p[{}^{d}Z^{k}|H_i]}{p[{}^{d}Z^{k}|H_j]} + \ln\frac{p[{}^{s}Z^{k}|H_i]}{p[{}^{s}Z^{k}|H_j]} = {}^{d}\Lambda_{i,j}(k) + {}^{s}\Lambda_{i,j}(k) \quad (6)$$

따라서 각 가설, H_i, $i=1,\ldots,M$,의 전체 로그 공산비는 각각의 로그 공산비의 합이다.

3. 수치실험

여기서는 수치실험을 통해 항적의 기하학적 특성만을 이용한 Armitage 검증과 Reed 검증을 사용한 표적 판별 알고리듬의 성능과 측정신호파형의 특징을 융합한 표적 판별 알고리듬의 성능을 비교, 검토한다. 이 수치실험을 위해 2개의 궤적을 구성하였고, 100회의 Monte Carlo 실험을 통해 각 경우에 대한 판별성공 횟수와 실패 횟수, 그리고 판별에 필요한 측정수를 얻었다.

3.1. 표적과 수중 운동체의 운동궤적

첫 번째 궤적은 표적이 등속 운동하는 경우이며, 두 번째 궤적은 표적이 급속하게 방향을 전환하는 경우이다. 두 시나리오 모두 3개의 ACM 근원이 발생하며 ACM 근원은 표적에서 분리된 시간에 그 위치에서 측정신호를 발생시키기 시작한다. 이 측정신호는 운동체의 음탐신호를 지연 발생시키고 도플러의 주파수를 변위하여 시선방향으로 각각 6.8m/sec, 12.8m/sec, 18.8m/sec속도로 이동하고 있는 표적으로 혼동하도록 한 것이다.

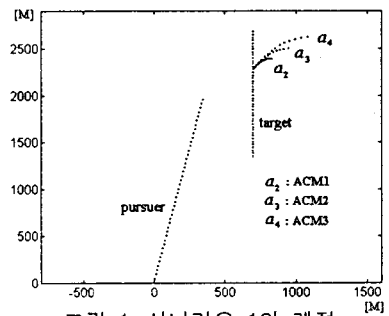


그림 1. 시나리오 1의 궤적

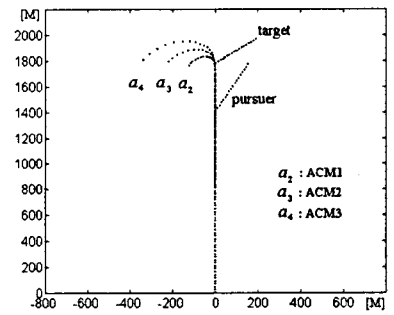


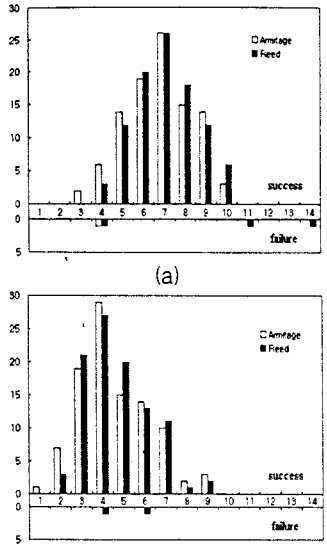
그림 2. 시나리오 2의 궤적

시나리오 1: 그림 1과 같이 표적은 15.4m/sec로, 운동체는 23.1m/sec로 90sec동안 등속운동. 표적이 ACM 근원들을 분리한 시간은 60sec, 이때 운동체와 표적과의 상대거리는 1000m. Scan 간격 T = 2 sec.

시나리오 2: 그림 2와 같이 표적과 운동체는 구간[0sec, 60sec]에서 각각 15.4m/sec, 23.1m/sec로 등속운동, 표적은 구간 [60sec, 61.2sec]에서 가속도 10m/sec^{2}으로 45° 우회전, 운동체는 구간 [60 sec, 60.9sec]에서 가속도 10m/sec^{2}으로 22.5° 우회전, 나머지 구간에서 등속운동. 표적이 ACM 근원들을 분리한 시간은 60sec, 이때 운동체와 표적과의 상대거리는 400m. Scan 간격 T = 1 sec.

3.2. 수치실험 결과 및 검토

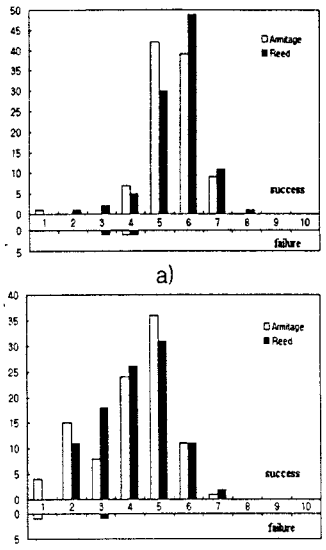
우선, 표적이 발생하는 항적을 a_1, 그리고 6.8m/sec,



(a)

(b)

그림 3. 시나리오 1에 대한 scan별 판별 성공 및 실패횟수
a) 항적의 기하학적 특징만을 이용한 판별
b) 측정신호파형의 특징을 융합한 판별



a)

(b)

그림 4. 시나리오 2에 대한 scan별 판별 성공 및 실패횟수
a) 항적의 기하학적 특징만을 이용한 판별
b) 측정신호파형의 특징을 융합한 판별

12.8*m*/sec, 18.8*m*/sec로 시선방향으로 이동하는 표적으로 혼동하도록 한 ACM이 발생하는 항적을 각각 a_2, a_3, a_4로 표시하였다. 제안한 표적판별 알고리듬의 성능을 검토하기 위해 항적의 기하학적 특성만을 이용한 경우와 측정신호파형의 특성을 융합한 경우에 대하여 각 시나리오에 대해서 100회의 Monte Carlo실험을 통하여 판별 성공횟수와 실패횟수, 판별에 필요한 scan수를 얻었다.

시나리오 1의 표적운동은 표적 추적필터와 정합된 것으로 이 경우 항적의 기하학적 특징만을 이용해서 판별한 경우는 그림 3(a)에 측정신호파형의 특성을 융합해서 판별한 경우는 그림 3(b)에 판별성공, 실패의 수를 scan별로 성공인 경우는 위쪽, 실패인 경우는 아래쪽에 각각 나타내었다. 그림 3(a)에서 판별 성공률은 Armitage와 Reed 검증 각각 99%와 97%이며 그림 3(b)에서는 100%와 98%로 이론치와 거의 일치하거나 이론치보다 더 높은 판별 성공율을 나타낸다. 그림 3(a)에서 Armitage 검증을 이용했을 경우 판별에 필요한 평균 scan수는 6.76으로 이것은 Reed 검증의 7.15에 비해 약간 빠른 것이다. 그림 3(b)에서 Armitage 검증에 필요한 평균 scan수는 4.60으로 이는 Reed 검증의 4.68에 비해 역시 약간 빠른 것이다.

시나리오 2는 표적이 급격한 방향전환을 한 경우로, 이 경우에 대해서도 두가지 판별의 경우에 대해서 각 검증방법에 따라 판별성공, 실패의 수를 scan별로 그림 4(a)와 4(b)에 나타내었다. 그림 4(a)의 경우 판별 성공률은 Armitage 검증과 Reed 검증에 대해서 각각 99%, 98%로 나타났으며 그림 4(b)의 경우는 두 검증방법 모두 99%의 판별 성공률을 나타낸다. 그림 4(a)에서 Armitage 검증을 이용했을 경우 판별에 필요한 평균 scan수는 5.48, Reed 검증은 5.62이고 그림 4(b)의 경우는 각각 4.08과 4.18이였다. 이것은 Armitage 검증이 Reed 검증에 비해 보다 정확하고 빠른 방법임을 보여준다.

4. 결 론

이 논문에서는 신호처리된 측정신호파형의 특성을 융합한 다중 순차적 가설검증을 이용한 표적 판별 알고리듬을 제안하였다. 제안된 알고리듬은 실제 표적의 항적과 ACM 근원들에서 비롯된 항적의 기하학적 특성에 정합된 표적과 ACM 필터부분 및 그 정합 필터의 이노베이션으로부터의 로그 공산비 계산부분, 신호처리된 측정신호파형의 특성을 이용한 로그 공산비 계산부분, 그리고 이들을 융합한 판별부분으로 이루어진다. 제안된 알고리듬은 빠른 시간 내에 높은 성공률로 표적과 ACM 근원들을 판별할 수 있었다. 특히, 측정신호파형의 특성을 융합한 가설 검증이 항적의 기하학적 특성만을 이용한 표적판별의 경우보다 빠르고 정확하게 표적과 ACM 근원들을 판별함을 수치실험을 통해 확인할 수 있었다. 한편, 이 수중 표적 판별문제에서 Armitage 검증은 Reed 검증에 비해 보다 정확하고 빠른 검증방식임을 역시 확인할 수 있었다. 여러 개의 ACM 근원들이 순차적으로 발생하는 경우에는, 그에 해당하는 가설의 수를 순차적으로 변화시킴으로써 여기서 제안한 다중 순차적 가설 검증을 확장하여 적용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Jouny and F. D. Garber, "*M*-ary sequential hypothesis tests for automatic target recognition," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-28, pp. 473-483, April 1992.

[2] F. D. Garber and I. Jouny, "On *M*-ary sequential hypothesis testing for the classification of radar signals," *IEEE Military Communications Conference*, vol. 2, pp. 684-688, October 1987.

[3] A. P. Sage and J. C. Melsa, *Estimation Theory with Application to Communication and Control.* New York: McGraw-Hill, 1960.

[4] L. C. Palmer, "Sequential tests to select among *M* hypotheses," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-18, pp. 211-214, January 1972.

[5] V. J. Aidala and S. E. Hammel, "Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-28, pp. 283-294, March 1983.

[6] 정영헌, 홍순목, "순차적 가설 검증을 이용한수중 표적 판별," 대한전자공학회논문지, 제33권, B편 제1호, pp. 6-14, 1995년 1월.

[7] 정영헌, 전상운, 홍순목, "다중 순차적 가설 검증을 이용한 수중 표적 판별," 대한전자공학회논문지, 제 35권, S편 제 3호, pp. 110-119, 1998년 3월.