

Multistatic 소나망의 효과도 분석

구본화*, 홍우영**, 고한석***

*고려대학교 영상정보처리협동과정, **해군사관학교, ***고려대학교 전자컴퓨터공학과

Effectiveness Analysis of Multistatic Sonar Network

Bonhwa Goo*, Wooyoung Hong**, Hanseok Ko***

*Dept. Visual Information Processing, Korea University, ** Korea Naval Academy, ***Dept. Electronics and Computer Engineering, Korea University

*bhku@ispl.korea.ac.kr, **wyhong@navy.ac.kr, ***hsko@korea.ac.kr

요약

본 논문에서는 multistatic 소나망의 효과도 분석을 하였다. 특히 본 논문에서는 multistatic 소나망의 탐지 성능 분석을 통해 효용성을 알아보았다. Multistatic 소나망은 송/수신기가 분리된 일종의 다중 분산 센서 시스템으로, 최적의 탐지 성능을 갖기 위해서는 적절한 융합 규칙 및 센서 배치가 필요하다. 분산 센서 융합 기법으로 bayesian 결정 기법을 기반으로 한 융합 기법을 적용하였으며, 실제 해양 환경하에서의 탐지 성능 분석을 위해 개선된 bistatic 표적 강도 모델과 거리 종속 전송 손실 모델을 이용한 multistatic 소나망 탐지 모델을 제안하였다. 기존 소나망과의 모의 비교 실험을 통해 multistatic 소나망의 우수성을 입증하였다.

Keywords: Multistatic sonar, Detection, Multisensor fusion

1. 서론

수중 표적 은닉 기술의 발전으로 인해 기존의 수동 소나망의 효용성이 점차 희박해지고 있다. 이에 수중 표적의 음파를 수신만 하는 수동 센서망에서 능동적으로 표적의 음파를 수신할 수 있는 송/수신기 일체형 능동 소나망이 제안되었다. 그러나 송/수신기 일체형 소나망은 적의 공격을 받음에 따라 탐지 시스템에 치명적인 문제점이 발생하였다. 이에 대한 방안으로 송, 수신기가 분리된 bistatic 소나망의 개념이 등장하였다. 이와 더불어 bistatic 소나망을 기반으로 한 다중 송, 수신기 시스템인 multistatic 소나망의 연구가

활발히 진행중이다. 본 논문에서는 탐지 성능 분석을 통해 multistatic 소나망의 효과도를 분석하였다. Multistatic 소나망은 송/수신기가 분리된 일종의 다중 분산 센서 시스템으로, 최적의 탐지 성능을 갖기 위해서는 적절한 융합 규칙 및 센서 배치가 필요하다. 본 논문에서는 bayesian 결정 기법을 기반으로 한 융합 규칙을 통해 multistatic 소나망의 탐지 향상도도모하였다. 또한 탐지 성능의 객관성을 보장하기 위해 실제 해양 환경하에서의 전송 손실 모델과 표적 강도 모델을 기반으로 탐지 모델을 완성하였다. 이러한 탐지 모델을 토대로 기존의 monostatic 소나망과 신개념으로 대두된 multistatic 소나망의 탐지 성능 효과도를 분석하였다.

2. Multistatic 소나망 탐지 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 탐지 모델을 제안하여 탐지 성능 분석을 하였다. 각각의 파라미터 입력값을 통해 multistatic 소나망의 탐지 거리 및 탐지 확률값을 구한다.

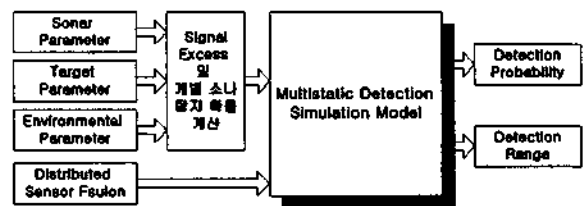


그림 1. Multistatic 소나망 탐지 모델

2.1 표적 강도 모델

1) Monostatic 소나 표적 강도

표적 강도란 송신기에서 보내진 음파를 수중 표적이 되돌려 보낼 수 있는 능력의 척도이다. 이것은 식 (1)과 같이 송신기에서 표적으로 입사된 음파의 세기(I)와 표적에서 반사되어 돌아온 1 yard 상에서의 음파 세기(I_0)의 비를 말한다[1,2]. 일반적인 탄환형 표적의 monostatic 소나의 표적 강도는 표적에 입사되는 음파의 방위에 따라 다른 값을 갖게 된다[1,2].

$$TS = 10 \log \frac{I_0}{I} \quad (\text{db}) \quad (1)$$

2) 개선된 Bistatic 소나 표적 강도

기존의 bistatic 정리만을 이용한 표적 강도 계산시, bistatic 소나각이 증가하게 될 경우 실제 현상과는 다른 결과가 유도되게 된다[1]. 즉 송/수신기의 일직선 사이에 표적이 존재할 경우 표적 강도는 최소값을 갖게 될 것이다. 그러나 bistatic 정리를 이용할 경우 bistatic 소나각은 180도가 되며, 이럴 경우 90도에서의 monostatic 표적 강도 값을 취하게 된다. 이럴 경우 표적 강도는 최대가 되며, 실제 현상과 상반되는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 실제 현상과 유사한 표적 강도를 예측할 수 있는 표적 강도 계산법을 유도해야 한다.

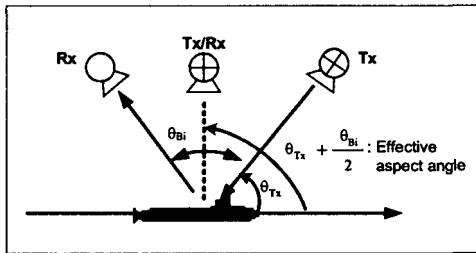


그림 2. 개선된 표적 강도 모델

그림 2는 개선된 bistatic 소나 환경하에서 표적 강도를 나타낸 것이다. 개선된 bistatic 소나 표적 강도는 기존의 bistatic 정리를 기반으로 하였으며, 여기에 보정항을 추가한 형태이다. 개선된 bistatic 소나 표적 강도를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 우측 두 번째 항은 bistatic 정리의 결점을 보정하는 항으로 bistatic 소나각이 증가함에 따라 표적 강도를 감소시키는 역할을 하게 된다.

$$TS_{Bi}(\theta_{Tx}, \theta_{Bi}) = TS_{mo} \left(\theta_{Tx} + \frac{\theta_{Bi}}{2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{180 - \theta_{Bi}}{180} \right) \quad (2)$$

if $\theta_{Bi} > 170^\circ$, $\theta_{Bi} = 170^\circ$

2.2 전송 손실 모델

표적의 탐지 거리를 구하기 위해서는 전송 손실에 대한 모델링이 선행 되어야 한다. 수중 음파 전송 손실을 계산하는 모델 개발은 70년대 이후로 꾸준히 발전되고 있다. 전송 손실 모델은 크게 거리 독립 모델과 거리 종속 모델로 구분할 수 있다. 거리 독립 모델은 오직 수심에 의한 변화와 음파의 전송형식이 원통형으로 대칭을 이룬다고 가정하였다. 거리 종속 모델은 수심뿐만 아니라 거리 및 각도에 영향을 받는다고 가정하였다. 본 연구에서는 거리 종속 BELLHOP 모델을 이용하여 전송 손실을 반영하였다.

BELLHOP-RD를 적용시 가능한 소나 주파수 대역은 1kHz 이상이며 전송 손실을 비상관(Incoherent) 방법으로 계산한다. 해저 수심은 51개까지 입력할 수 있으며, 내삽법(Interpolation)을 통해 그 중간값들을 계산한다. 음속 구조는 해저 수심과 동일하게 거리 방향으로 51개까지 입력 가능하다. 해지면 손실은 10단계로 입력이 가능하며, 0으로 입력될 경우 사용자 입력을 말하며, 1~9사이의 값으로 입력 될 경우 MGS 등급을 나타낸다. 해수면 조건은 거리 방향으로 51개까지 입력 가능하며 해상상태에 따라 0~9 등급의 입력이 가능하다.

2.3 다중 센서 융합 기법

표적의 존재 유무를 판정하는 시나리오인 이진 가설 검정(Binary Hypothesis Testing)으로 모델링할 수 있다. 그림 3과 같이 각 수신기에서 이진 결정을 내리며 이를 바탕으로 융합 센터에서는 최종적인 탐지 결정을 내리게 된다. 즉, 각 수신기에서 및 융합 센터에서의 결정 u_k , $k=0, 1, \dots, n$, 은 1 혹은 0의 값을 갖는다. 각각의 수신기와 융합 센터에서의 결정 방법은 우도 비율(likelihood ratio)과 임계치와의 비교를 통해 이루어 진다. 본 논문에서는 Bayesian 이론을 기반으로 한 융합 방법을 적용하였다[3]. 이 방법은 어떤 판단을 내렸을 때, 그 판단에 대한 평균 오류를 최소화하는 융합 법칙을 도출하는 것을 목적으로 한다. 평균

위험도 함수는 미리 획득된 사전 확률($P(H_0)$, $P(H_1)=1-P(H_0)$)과 결정에 대한 위험도(C_{ij} , $i=0,1, j=0,1$) 값, 우도 함수값을 기반으로 구성된다. 식 (3)은 이것을 수식으로 표현한 것이다. 식 (3)을 최소화하기 위해서는 각 수신기와 융합 센터를 동시에 최적화 해야 한다. 그러나 각 수신기와 융합 센터의 임계치를 동시에 최적화 문제는 아주 복잡한 문제이며 연산량 문제도 발생하게 된다. 일반적으로 이러한 문제에 Person By Person Optimization(PBPO)방법을 적용하는 것이 효과적이다[3]. PBPO란 최적화하려는 것을 제외한 모든 것이 이미 최적화되어 있다고 가정하는 방법이다.

$$R = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 C_{ij} P_i P(\text{Decide } H_i | H_j \text{ is present}) \quad (3)$$

$$= C_F P_F - C_D P_D + C$$

여기서, $C_F = P_0(C_{10} - C_{00})$, $C_D = P_1(C_{01} - C_{11})$,
 $C = C_{01}(1 - P_0) + C_{00}P_0$

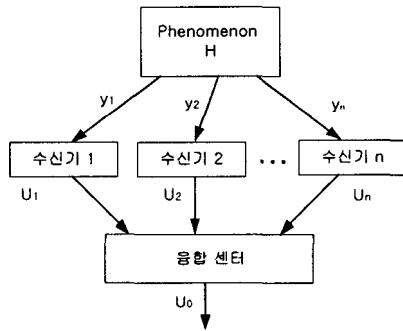


그림 3. 분산 탐지 융합 모델

2.4. 신호획득을 통한 개별 소나 탐지 확률 계산

일반적으로 소나 성능 지수(FOM)와 전송손실 값이 같아 지는 경우 탐지 가능 영역으로 간주한다. 이러한 경우 표적이 존재할 확률이 50%의 값을 갖게 된다. 신호 획득(Signal Excess(SE))은 소나 성능 지수와 전송 손실의 차를 말하며, 이것은 가우시안 분포로 모델링을 하여 탐지 확률을 생성할 수 있다. SE의 값이 0보다 크게 되는 경우 탐지 확률은 50%보다 크게 되며 탐지 가능 영역으로 구분한다. 확률변수 SE는 평균이 0 이고 표준편차가 σ 인 가우시안으로 모델링(σ 는 일반적으로 8~9dB 값을 인가)한다. 즉 아래의 적분을 통해 탐지 확률을 갖게 된다.

$$P_D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{SE} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4)$$

3. 모의 실험

본 실험에서는 기존의 monostatic 소나망과의 탐지 거리 및 탐지 확률의 비교 분석을 통해 multistatic 소나망의 효용성을 알아본다. 본 모의 실험에서는 송신기 1, 수신기 2개의 multistatic 소나망을 가정하였으며 모의 실험 해양 구간의 심도별 음파 속도 및 해저 지형은 그림 4, 5와 같다. 해상 상태와 해저 지형의 상태는 각각 1, 2의 값으로 가정하였다. 이러한 해양 환경 파라미터 입력값과 거리 종속 BELLHOP 모델을 이용하여 전송 손실을 계산하였다. 최적의 융합 규칙 도출시 $P(H_0)=0.01$, $C_{00}=C_{11}=0$, $C_{10}=1$, $C_{01}=1$ 을 가정하였다. 각각의 소나 파라미터는 표 1과 같이 가정하였다.

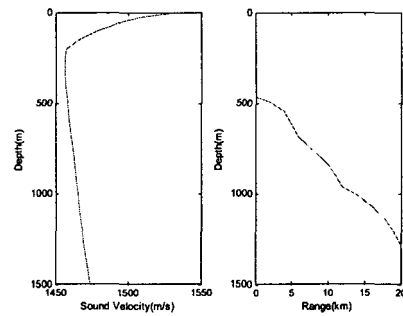


그림 4. 실험 1의 해양 환경 파라미터

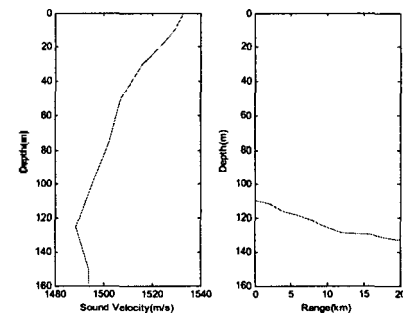


그림 5. 실험 2의 해양 환경 파라미터

표 1. 소나 파라미터

주파수	11kHz	탐지 문턱	30 dB
소나준위	228 dB	소음 준위	57 dB
지향지수	23 dB		

실험 환경 1에서 각 소나의 위치는 표 2와 같이 설정하였다. 각 소나망의 중심별 탐지 성능 결과는 표 3과 같다. 탐지 거리 비교에서 탐지 거리는 탐지 확률이 50% 이상인 구역의 최대 거리를 나타낸다. 또한 탐지 확률 비교에서 탐지 확률은 monostatic 소나망의 탐지 확률이 50% 이상인 구역에서 multistatic 소나망과의 비교를 나타낸다. 각 실험에서 표적의 진입 방향은 그림 6과 같이 설정하였다.

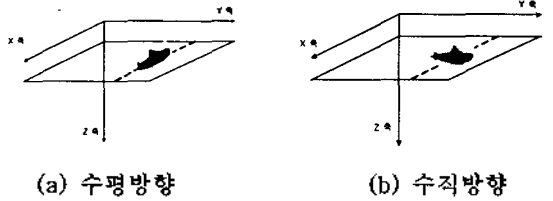


그림 6. 표적 진입 방향

표 2. 소나 위치 정보

Monostatic	(0, 0, 6)m	
Multistatic	송신기	수신기1 (5000, 0, 70)m
	(0,0,6)m	수신기2 (-5500, 0, 50)m

표 3. 탐지 성능 비교 결과

수심	탐지 거리 비교(km)			탐지 확률 비교(%)		
	Mono	Multi	향상률(%)	Mono	Multi	향상률(%)
30m	3.881	8.358	115.38	99.88	98.85	-1.03
60m	4.378	7.264	65.91	99.35	100	0.65
105m	10.249	11.045	7.77	96.09	99.97	3.88

a) 표적 : 수직 방향

수심	탐지 거리 비교(km)			탐지 확률 비교(%)		
	Mono	Multi	향상률(%)	Mono	Multi	향상률(%)
30m	5.174	8.358	61.54	90.69	93.7	3.01
60m	6.766	9.652	42.65	97.52	99.78	2.26
105m	11.443	11.045	-0.03	88.03	96.36	8.33

b) 표적 : 수평 방향

실험 환경 2에서 각 소나의 위치 정보는 표 4와 같이 설정하였다. 탐지 성능 결과는 표 5와 같다.

표 4. 소나 위치 정보

Monostatic	(0, 0, 6)m	
Multistatic	송신기	수신기1 (5500, 0, 70)m
	(0,0,6)m	수신기2 (-5000, 0, 50)m

모의 실험 1,2의 결과에서 보듯이 multistatic 소나망은 기존의 monostatic 소나망보다 탐지 거리 및 탐지 확률 향상 경향을 보여 주고 있다. 특히 multistatic 소나망은 탐지 거리 측면에서 이득을

보여주었다. 또한 monostatic 소나망의 경우 표적 진입 방향에 따라 탐지 거리 저하가 뚜렷한 현상을 보여주었으나 multistatic 소나망은 표적 진입 방향에 무관하게 안정된 탐지 성능을 보여주었다.

표 5. 탐지 성능 비교 결과

수심	탐지 거리 비교(km)			탐지 확률 비교(%)		
	Mono	Multi	향상률(%)	Mono	Multi	향상률(%)
30m	5.174	8.358	61.54	91.17	100	8.83
50m	4.478	8.756	95.56	93.51	100	6.49
70m	4.378	9.055	106.8	96.54	100	3.46

a) 표적 : 수직 방향

수심	탐지 거리 비교(km)			탐지 확률 비교(%)		
	Mono	Multi	향상률(%)	Mono	Multi	향상률(%)
30m	6.766	8.358	23.53	94.48	99.99	5.51
50m	6.766	9.751	44.12	92.53	100	7.47
70m	5.97	9.154	55.33	95.08	100	4.92

b) 표적 : 수평 방향

4. 결론

본 논문에서는 multistatic 소나망의 탐지 성능에 대한 효과도를 분석하였다. 실제 해양 환경하에서의 탐지 성능 효과도 분석을 위해 개선된 bistatic 표적 강도 모델과 거리 종속 전송 손실 모델을 적용하였다. 또한 다중 센서 시스템의 성능 향상을 위해 bayesian 기법을 기반으로 한 융합 기법, 표적 강도 모델, 전송 손실 모델을 통해 multistatic 탐지 모델을 제안하였다. 비교 실험을 통해 multistatic 소나망은 탐지 거리 향상 및 표적 진입 방향에 무관하게 강인한 탐지 성능을 보임을 알 수 있었다. 이것을 통해 수중 감시 시스템 개발시 multistatic 소나망은 시스템 향상을 도모함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Robert. J. Urick, *Principle of Underwater Sound*, 3rd, McGraw-Hill, Inc., 1983
- [2] A.D. Waite, *Sonar for Practising Engineers*, 3rd, John Wiley & Sons, Ltd, 2002
- [3] P.K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*, Springer, 1996
- [4] M. I. Skolink, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, New York, 1962