

## 다중 상태 소나의 최적 수신망 배치

### Optimal Sensor Placement in Multistatic Sonar

이 광 희\*

Kwang-Hee Lee

한 등 석\*

Dong-Seog Han

#### Abstract

It is very important to place receiver in multistatic sonar. Inefficient placement of the receiver reduce detection probability and to increase the probability of detection should be used more receivers. Therefore, detection of targets in searching area, detection performance of limited receiver depends on how to place. Through the optimized receiver placement, detection area between each sonar as much as possible avoid duplication, as optimization, the minimum receiver can be maintained detection performance. In this paper we prove mathematical verification of maximum signal excess value based on sonar placement and we calculate a signal excess value by using computer simulations and suggest optimal sonar placement.

Keywords : Multi-Target(다중 표적), Detection(탐지), Signal Excess(신호 초과), Sonar(소나)

#### 1. 서론

수중 탐지 시스템에서 사용되는 소나는 크게 능동 소나 시스템과 수동 소나 시스템으로 분류된다<sup>[1]</sup>. 최근에는 탐지 성능 및 신호 처리 기술의 발전으로 능동 소나가 많은 주목을 받고 있다<sup>[2]</sup>. 능동 소나는 송신기와 수신기의 구성 방법에 따라 단상태 소나와 양상태 소나, 한 개 이상의 송신기와 다중 수신기로 구성된 다중상태 소나로 구분할 수 있다. 그러나 다중상태 소나의 경우 수신기를 많이 사용함에 따라 통신 부하, 처리 데이터 증가 등의 문제점이 발생하게 된다. 이러한 이유로 수신기의 효율적인 배치 없이는 다

중 상태 소나의 장점을 활용하기 어렵다<sup>[3-6]</sup>.

기존의 논문에서는 수신기의 배치를 고려하지 않고 신호의 파형 특성에 따른 신호 초과비(signal excess)<sup>[3]</sup>의 특성과 이상적인 수신기 배치조건에서의 탐지 확률에 대한 특성을 다루었다<sup>[4]</sup>. 또한, 30개 이상의 수신기 사용 및 100회 이상 핑(ping)의 사용으로 인하여 실제 조건, 실제 상황에 현실적으로 적용하기 어렵다<sup>[2]</sup>.

그러므로 본 논문에서는 신호 초과비값이 최적화 되는 조건에 대한 수학적 검증을 하고, 표적의 탐지 확률을 높이기 위하여 표적 이동 시나리오, 수신기 배치 시나리오에 따른 신호 초과비 값을 계산한다. 그리고 수신기 배치에 따른 신호 초과비 값이 다른 원인을 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하고, 비교, 분석 데이터를 바탕으로 수신기 배치 시나리오 중 최적의 수신기 배치 방법을 도출하여 표적의 탐지 확률을 높이고자 한다.

† 2012년 6월 8일 접수~2012년 9월 14일 게재승인

\* 경북대학교(Kyungpook National University)

책임저자 : 이광희(leeac2025@gmail.com)

본 논문의 구성은 서론에 이어 II장에서는 실험을 위한 이론적 내용, 신호 초과비 인자 분석, III장에서는 실험을 위한 조건 즉, 표적 이동 시나리오, 수신기 배치 방법에 대한 정의, 신호 초과비 시험 결과를 비교 분석하고, IV장에서 결론을 맺는다.

## 2. 신호 특성

수신기는 배치 방법에 따라 수신기에서 받는 신호 초과비의 값이 다르다. 능동 소나의 수신기는 문턱값  $DT$  이상의 신호 초과비 값을 수신하면, 수중 표적이 탐지되었다고 보기 때문에 수신기의 효율적 배치 방법이 중요하다. 본 장에서는 수신기의 효율적 배치를 위한 신호 초과비 계산 식의 인자에 대한 설명을 한다. 신호 초과비(SE)는 다음과 같이 표현된다.

$$SE = TS - SS - 10 \log \left( \frac{c R_{RP} \Omega B(\gamma)}{2} \right) - Q(\Delta v) - DT \quad (1)$$

여기서  $TS$ 는 표적강도이며,  $SS$ 는 해저 산란 강도이고 일반적으로  $-43$  dB이다<sup>[3]</sup>.  $c$ 는 수중에서의 음파 속력이며, 보통  $1500$  m/s이다.  $R_{RP}$ 는 표적에서 수신기까지의 거리이며,  $\Omega$ 는 수신기의 빔폭이다.  $DT$ 는 검파 문턱치이며,  $B(\gamma)$ 는 바이스테틱 보정 계수이다. 이때  $TS$ ,  $Q(\Delta v)$ ,  $B(\gamma)$  항을 제외한 다른 인자들은 상수값이며,  $B(\gamma)$ 의 변화 폭은 다른 두 인자에 비해 작으므로 상수값으로 가정할 수 있다.

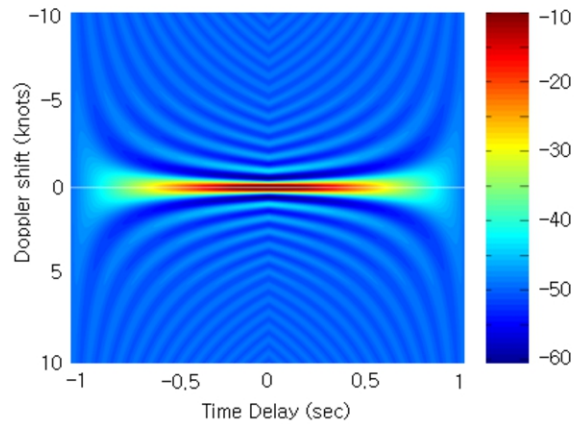
$Q(\Delta v)$ 는 모호함수의<sup>[3]</sup> 시간 영역에서 수신된 에너지의 합을 나타낸다. 수신기에서 수신된 잔향의 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$Q(\Delta v) = 10 \log_{10} \left[ \int_{-T}^T |\chi(\Delta v, \tau)|^2 d\tau \right] \quad (2)$$

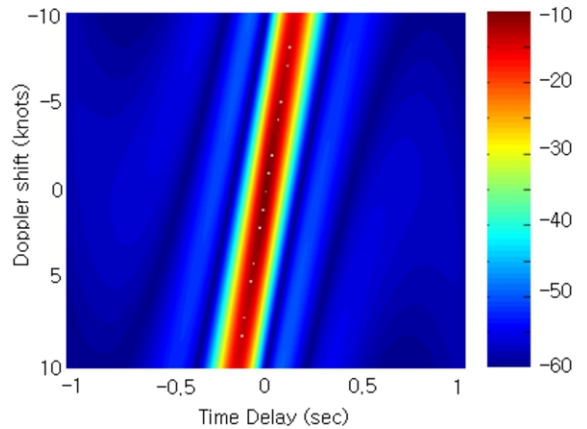
여기서  $|\chi(\Delta v, \tau)|^2$ 은 파형의 모호 함수,  $T$ 는 신호의 발생시간이다.  $\Delta v$ 는 도플러 천이 값이며,  $\tau$ 는 시간 지연 값이다.  $Q(\Delta v)$ 는 송신 신호 펄스에 따라 값이 달라지는데, 대표적인 능동소나 송신 파형에는 CW(continuous wave) 파형과 FM(frequency modulated wave) 파형이 있다<sup>[7]</sup>.

Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)는 능동소나 송신 파형에서 사용

하는 CW(중심 주파수=2000Hz, 신호 발생시간=1초)와 FM(중심 주파수=2000Hz, 신호 발생시간=1초, 대역폭=200Hz) 파형의 모호 함수이다<sup>[3]</sup>. CW 파형과 FM 파형의 모호 함수를 식 (2)를 이용하여 나타낸  $Q$  함수는 Fig. 2와 같다. 수신기에서는 잔향 성분의 에너지가 낮을수록 탐지 확률이 높아지므로 CW 파형과 FM 파형의  $Q$  함수를 비교 하였을 때 도플러 천이 값이 3노트(knot) 이상일 경우 CW 파형이, 3노트(knot) 이하일 경우에는 FM 파형이 더 효율적임을 알 수 있다.



(a) CW



(b) FM

Fig. 1. Signal ambiguity functions

CW 파형과 FM 파형의 효율성은 도플러 천이 값으로 알 수 있다. 도플러 천이 값은 송신기, 수신기와 움직이는 표적의 상대 속도로 인해 발생되며 다음과 같이 표현된다.

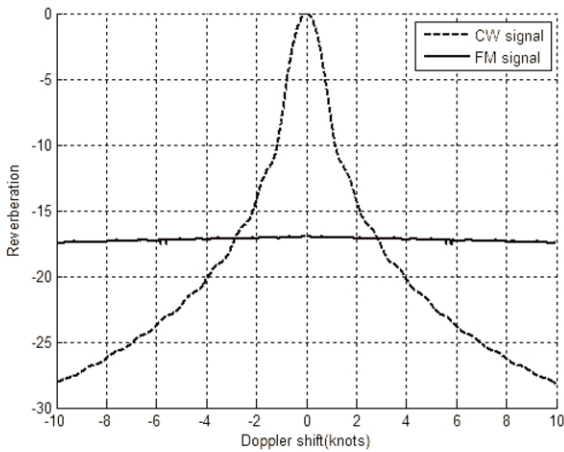


Fig. 2. Q function of CW & FM wave

$$\Delta v = \left( \frac{1 + \frac{V_R}{c} \cos \theta_{RT}}{1 - \frac{V_S}{c} \cos \theta_{ST}} \right) V_T \cos \theta_{TB} \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (3)$$

여기서  $V_S$ ,  $V_T$ ,  $V_R$ 은 송신기와 표적 그리고 수신기의 속도를 나타내며, Fig. 3의  $\theta_{RT}$ ,  $\theta_{ST}$ 는 표적 이동 방향에 대한 송신기와 수신기의 방위각(bearing angle)이다.  $\beta$ 는 양상태 방위각(bistatic angle)으로 송신기, 표적, 수신기 사이의 각을 나타내며,  $\theta_{TB}$ (bistatic aspect angle)는 표적의 방향과  $\beta$ 의 이등분선이 이루는 각도이다.

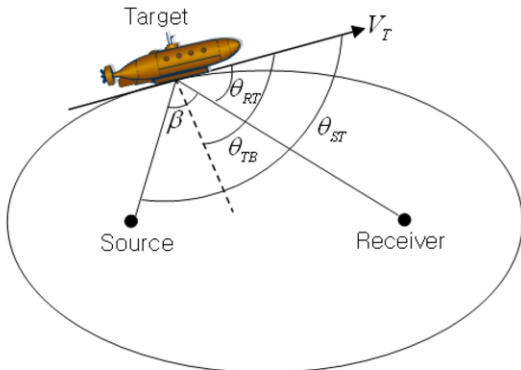


Fig. 3. Bistatic geometry

해석의 편의를 위하여 송신기와 수신기는 고정되어 있다고 가정한다. 이 경우,  $V_S = V_R = 0$ 이 되고, 식

(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta v = V_T \cos \theta_{TB} \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (4)$$

표적의 속도,  $\theta_{TB}$ , 표적의 위치에 따라  $\Delta v$ 의 값이 달라지며, 그 값에 따라 CW 파형과 FM 파형 사용을 결정한다. 그러나  $V_T$ ,  $\theta_{TB}$ , 표적의 위치에 따라 CW 파형, FM 파형의 효율성이 달라진다. 그러므로 두 파형 모두 사용하여 표적의 이동 시나리오, 수신기 배치 시나리오에 따른 신호 초과비 값을 계산하고자 한다. CW 파형과 FM 파형의 신호 초과비 값을 이용하여 수신기 배치 시나리오에 따른 성능을 비교 평가하고 가장 성능이 좋은 수신기 배치 방법을 제안하고자 한다.

### 3. 모의 실험

신호 초과비의 계산을 위하여 고려한 표적 강도, 표적의 속도, 표적의 이동 시나리오, 수신기 배치 시나리오에는 다음과 같다. 표적 강도는 길이 75m, 함폭 7m의 로미오급 잠수함<sup>[8]</sup>을 실린더 형태로 단순화한 표적 강도 값은 Fig. 4와 같다. 속도는 로미오급 잠수함의 수중 최대 속도인 14노트로 가정하였다.

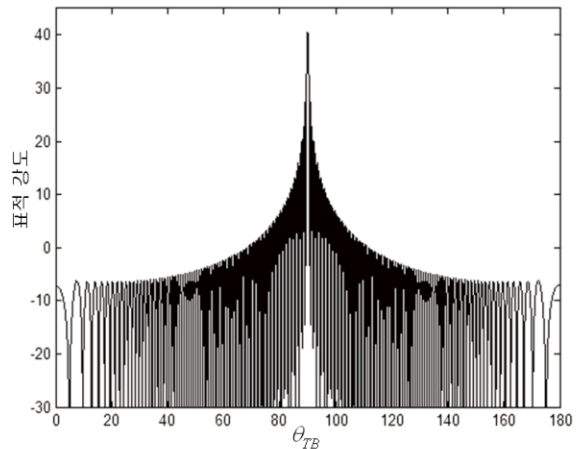


Fig. 4. Target strength of romeo class submarine

표적의 이동 시나리오는 표적의 현 위치와 이동 방향을 알고 있을 경우, 일정 시간 후 표적의 이동에 따

른 표적의 예상 위치를 알 수 있다. 표적 예상 위치의 범위는  $5\text{km} \times 5\text{km}$ 로 가정하였으며, 표적의 진행 방향에 따라 Fig. 5와 같이 4개의 이동 시나리오, 각 시나리오당 12가지 이동 경로로 가정하였다.

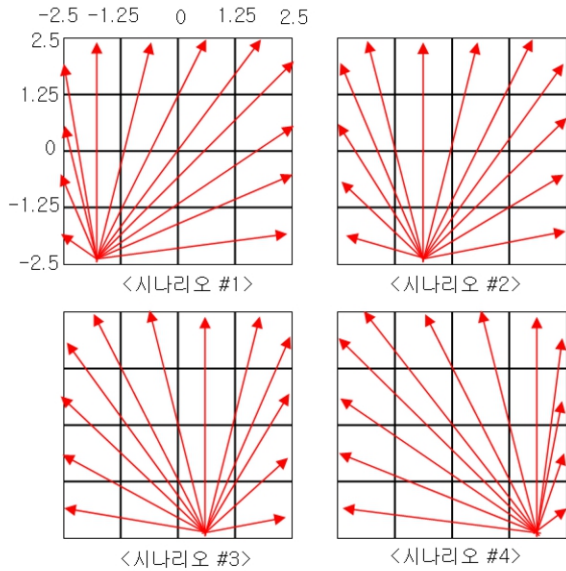


Fig. 5. Target moving scenario

표적 탐지를 위해 송신기는 1개, 수신기는 6개를 사용하였다. 수신기는 대칭이 가능한 원, 삼각형, 사각형, 육각형의 8가지 배치 조건을 고려하였으며 송신기, 수신기 배치 방법은 Fig. 6과 같다.

신호 초과비 값은 각 시나리오의 이동 경로 12가지를 각각 200등분 하여 각 위치에 따른 CW 파형과 FM 파형의 신호 초과비 평균값을 계산하였으며, 결과는 다음과 같다. CW 파형 조건에서 수신기 배치 시나리오에 따른 신호 초과비의 평균값은 Fig. 7과 같다. Rec\_1 수신기 배치 조건에서 신호 초과비 평균값이 가장 높으며, Tri\_2 배치 조건에서 신호 초과비 평균값이 가장 낮다. FM 파형 조건의 실험 결과도 CW 파형 조건의 결과와 유사하며 신호 초과비의 평균값은 Fig. 8과 같다. Rec 1, Rec2, Rec3 배치 조건이 신호 초과비 평균값이 가장 높으며, 원형 배치 조건이 신호 초과비 평균값이 가장 낮다. CW 파형 조건과 FM 파형 조건의 신호 초과비 평균값의 합은 Fig. 9와 같다. CW 파형과 FM 파형에서 가장 높은 신호 초과비 평균값을 보인 Rec\_1 배치 방법의 신호 초과비 평균값이 가장 높음을 알 수 있다.

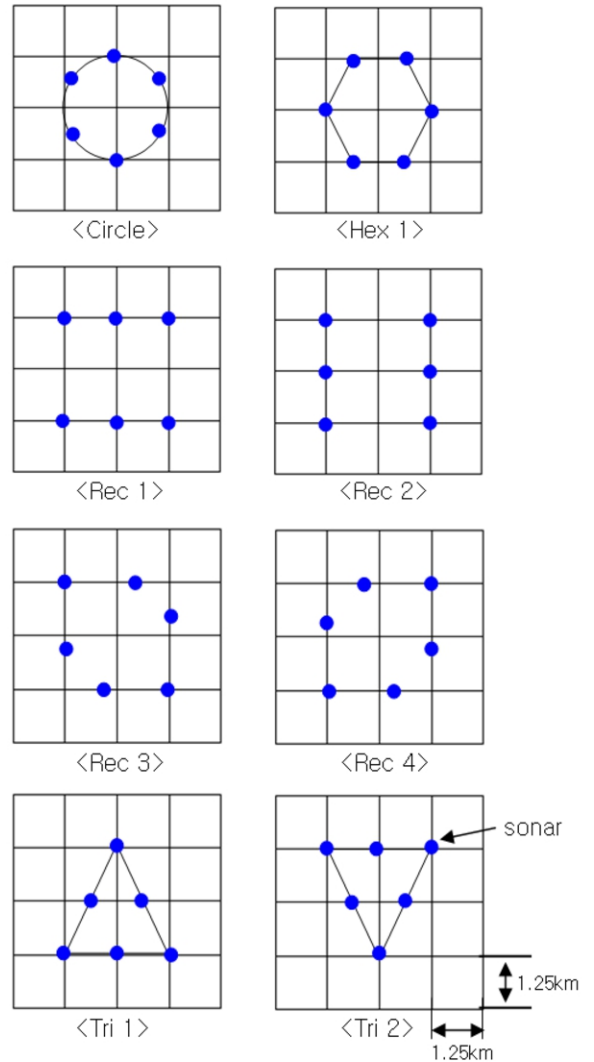


Fig. 6. Receiver placement scenario

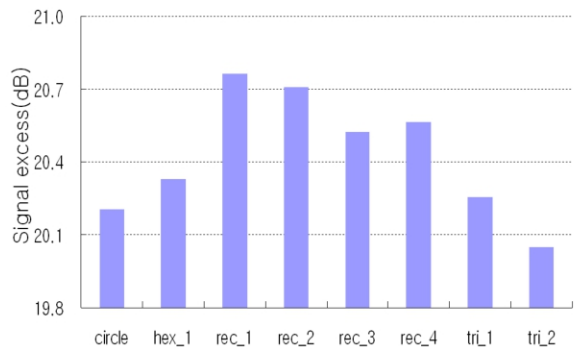


Fig. 7. Signal excess average of CW wave

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.(계약 번호 UD100002KD)

References

- [1] 오원천, “소나 신호처리 기술”, 대한전자공학회, 전자공학회지, 제20권 제10호(통권 제113호), pp. 1116 ~1127, 1993. 10.
- [2] D. Grimmer, “Automatic Identification of Specular Detections in Multistatic Sonar Systems”, OCEANS2009, Proc. of IEEE Conf. pp. 1~10, Oct. 2009.
- [3] D. Grimmer, “Multi-sensor Placement to Exploit Complementary Properties of Diverse Sonar Waveform”, Proc. 9th Int. Conf. Inf. Fusion, p1, pp. 1~8, July 2006.
- [4] D. Grimmer, S. Sullivan, Sr., and J. Alsup, “Modeling Specular Occurrence in Distributed Multistatic Fields”, Proc. of IEEE Conf. on OCEANS’08, pp. 1~8, Kobe, Japan, July 2008.
- [5] O. Erdinc, P. Willett, and S. Coraluppi, “Multistatic Sensor Placement : A Tracking Approach”, Information Fusion Conf., pp. 1~8, July 2006.
- [6] T. Collins and P. Atkins., “Doppler-sensitive Active Sonar Pulse Designs for Reverberation Processing”, Proc. of IEEE Conf., pp. 145(6):347~353, December 1998.
- [7] 조운현, 김강, “수중 음향 환경 변수와 소나 체계 설계”, 대한전자공학회, 전자공학회지, 제22권 제5호(통권 제132호), pp. 552~560, 1995. 5.
- [8] John Pike, “Wuhan-class submarine - People’s Liberation Army Navy”, Globalsecurity.org. Retrieved 2011. 12. 28.



Fig. 8. Signal excess average of FM wave

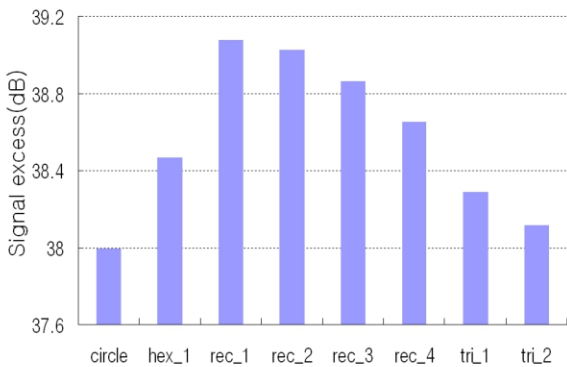


Fig. 9. Signal excess average of CW, FM wave

4. 결론

다중 상태 소나의 경우 단상태 소나에 비해 탐지 가능성이 더 높다. 그러나, 통신 부하, 처리 데이터 증가 등의 문제점이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 수신기의 신호 초과비 값을 이용하여 다중 상태 소나에서 수신기의 배치 시나리오 중 가장 효율적인 배치 방법을 컴퓨터 모의 실험으로 알아보았다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 수신기의 Rec 1 배치 조건이 CW, FM 파형 모두에서 신호 초과비 평균값이 가장 높음을 확인하였다. 그러므로 표적의 이동 방향과 일정 시간 이후 예상 위치를 알고 있다면, 본 논문에서 확인한 Rec 1 배치 조건을 통해 표적의 탐지 확률을 높일 수 있을 것으로 기대된다.