

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.2.109>

JIIBC 2020-2-15

함정용 다기능 레이다 성능 분석을 위한 해상 클러터 모델 설계

Development of Sea Clutter Model for Performance Analysis of Naval Multi Function Radar

전우중*, 김현승*, 박명훈*, 정동민*, 권세웅**, 조명훈**, 강연덕**, 유승기*

Woo-Joong Jeon*, Hyun-Seung Kim*, Myung-Hoon Park*, Dong-Min Jung*,
Se-Woong Kwon**, Myeong-Hoon Jo**, Yeon-Duk Kang**, Seung-Ki Yoo*

요약 아군을 위협하는 해상 표적이 저고도화, 소형화 및 고속화됨에 따라 해상 상태에 따른 클러터 변화 분석 및 모델링의 필요성이 증가하고 있다. 해상 상태에 따른 클러터는 저고도 소형 해상 표적의 탐지율을 저하시키는 등 레이다 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 함정용 다기능 레이다의 탐지 성능 분석을 위하여 여러 해상 클러터 모델 중 레이다가 운용될 환경에 적합한 해상 클러터 모델을 선정하고 클러터 환경 하에서의 저고도 소형 표적 탐지에 대한 분석을 진행하였다. 기 설치된 해상 표적 탐지용 레이다의 실측 데이터를 활용하여 기존에 알려진 4가지 해상 클러터 모델을 해상상태별로 구현하고 이를 비교, 분석하였다. 이를 통해 실제 레이다 환경을 가장 잘 반영한 클러터 모델을 선정함으로써 클러터 모델에 대한 신뢰성을 확보하였다. 이후 선정된 모델을 활용하여 저고도 소형 표적 ($RCS 1m^2$)에 대한 탐지 가능 거리를 분석하였다.

Abstract As the maritime targets that threaten allies become lower, smaller, and faster, the need for analysis and modeling of clutter according to sea state increases. Clutter according to the sea state has a great influence on radar performance, such as lowering the probability of detection of low-altitude small maritime targets. In this paper, to analyze the detection performance of a multi function radar for a ship, a sea clutter model suitable for the radar operating environment is selected from several sea clutter models, and analysis of low-altitude, small target detection under a clutter is performed. By using the actual data of the already mounted radar for maritime target detection, four known clutter models have been implemented for each sea state and compared with the actual data. Through this, by selecting a clutter model that best reflects the actual radar environment, reliability of the clutter model is improved. Subsequently, the selected model is used to detect the detectable distance to the low-altitude small target.

Key Words : Sea Clutter Model, Sea State, Naval Multi Function Radar, Radar Simulation, Radar Performance

*정회원, LIG넥스원(주) 지능형SW연구소

**정회원, LIG넥스원(주) 레이다연구소

접수일자 2020년 3월 25일, 수정완료 2020년 4월 3일

게재확정일자 2020년 4월 3일

Received: 25 March, 2020 / Revised: 3 April, 2020 /

Accepted: 3 April, 2020

*Corresponding Author: woojoong.jeon@lignex1.com

Software Lab. of LIGnex1, Korea

I. 서 론

레이다는 전파 신호를 송신하여 물체에 반사되어 돌아 오는 수신 신호를 검출한 후 이를 이용해 탐지 대상에 대한 정보를 판단한다.^{[1]-[2]} 이 때, 대부분의 레이다는 특정 목표물을 관측하기 위해 운용하는데 이 특정 목표물을 제외한 다른 물체에 의해 되돌아오는 수신 신호를 클러터라고 한다.^[3]

함정용 레이더 체계에서 아군을 위협하는 해상 표적의 형태가 점차 다양한 형태로 저고도화, 소형화, 고속화 되고 있다. 이에 따라 다양한 클러터 중에서 운용환경에 따라 발생하는 해상 클러터에 대한 분석의 중요성이 부각되고 있다. 하지만 해상 클러터는 해상상태, 해수면 특성 레이더 주변의 환경에 매우 민감한 특성이 있어 적절한 모델링 기법을 찾기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 실측 데이터를 활용하여 해상 클러터를 모의하는 다양한 방법이 알려져 있다.^{[4]-[9]}

본 논문에서는 클러터 환경 하에서 함정용 다기능 레이더의 탐지 성능 분석을 위하여 여러 해상 클러터 모델 중 레이더 운용 환경에 적합한 해상 클러터 모델을 선정하고 저고도 소형 표적 탐지에 대한 분석을 진행하였다. 해상 클러터 모델 선정 시 이미 설치되어 운용하고 있는 해상 표적 탐지용 레이더의 실측 데이터를 활용하여 모델을 검증하였다.

2장에서는 운용 중인 해상 표적 탐지 레이더의 실측 데이터를 첨부하여 설명하고, 3장에서 기존의 해상 클러터 모델을 해상상태 별로 구현하고 그 결과를 제시하였다. 4장에서는 2장의 실측 데이터와 3장의 해상 클러터 모델을 비교하여 국내의 운용환경에 가장 적합한 모델을 선정한 후, 5장에서는 선정된 해상 클러터 모델을 적용하여 RCS $1m^2$ 의 소형 표적 탐지 거리에 대한 분석을 첨부하였다. 마지막으로 6장에서는 논문을 요약하고 결론을 맺는다.

II. 실측 데이터 분석

해상 클러터 모델 설계에 앞서 실제 레이더 환경을 가장 잘 반영한 클러터 모델을 선정하기 위해 기 설치되어 있는 레이더의 실측 데이터를 이용하여 클러터 수신 신호 세기($P_{c,Real}$)를 획득하였다. 해상 상태가 1인 경우 클러터가 레이더 수신 잡음에 묻혀 클러터 신호를 추출하기 어려워 분석에서 제외하였다. 확보한 실측 데이터를

유의파고 및 해상상태로 분류한 내용은 아래 표 1과 같다.

표 1. 실측 데이터 : 일자, 유의파고, 해상상태 (WMO 기준)
Table 1. Radar data : date, significant wave height, sea state (WMO)

Date	Significant Wave Height [m]	Sea State (WMO)
1 (18.07.16)	0.3	2
2 (18.06.14)	1.0	3
3 (18.09.12)	1.4	4
4 (18.12.11)	1.3	4

클러터 수신 신호 획득 시 해상에 해당하는 방위각을 선정한 후 해당 방위각에 대한 클러터 수신 신호를 추출하였다. 일자 별 클러터 수신 신호 세기는 아래 그림 1과 같다. 레이더로부터 거리가 멀어질수록 클러터 수신 신호 세기가 감소하고 해상 상태가 낮을수록 클러터 영향이 줄어드는 것을 확인하였다.

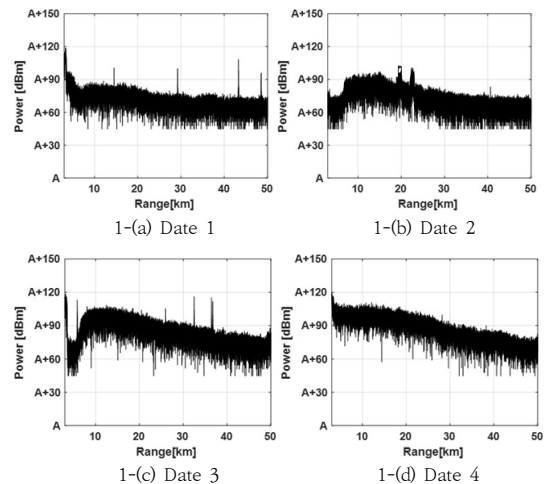


그림 1. 일자 별 클러터 수신 신호 세기 ($P_{c,Real}$)
Fig. 1. Received clutter power of date ($P_{c,Real}$)

III. 해상 클러터 모델

클러터 RCS는 클러터 반사계수와 클러터 단면적의 곱으로 정의된다. 클러터 RCS의 수식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_c = \sigma_0 A_c \quad (1)$$

1. 해상 클러터 반사계수 모델 (σ_0)

실제와 유사한 해상 클러터 모델링을 위해 먼저 반사계수를 고려한다. 반사계수 σ_0 는 해수면의 단위 면적당 RCS를 의미하며 지표각이나 해상상태 등에 의해 영향을 받는다. 반사계수는 표적과 해상클러터 비(Signal to Clutter Ratio: SCR)를 정의할 때 사용된다.

기존에 알려진 해상 클러터 반사계수 모델로는 NRL (Naval Research Laboratory), GIT (Georgia Institute of Technology), TSC (Technology Service Corporation), HYB (HYBrid) 모델이 있다.^{[3]-[7]}

4가지 모델에서 해상상태, 거리에 따른 클러터 반사계수 산출 결과는 아래 그림 2와 같다. GIT 모델의 경우 거리에 따른 산란계수 변화가 가장 크고, HYB 모델 결과는 NRL과 TSC 결과 사이에 존재한다.

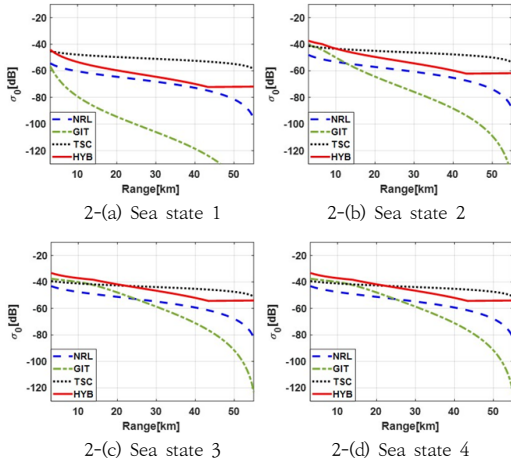


그림 2. 해상 클러터 반사계수 (NRL, GIT, TSC, HYB)
 Fig. 2. Sea clutter reflectivity (NRL, GIT, TSC, HYB)

2. 해상 클러터 단면적

해상 클러터의 단면적은 레이더에서 빔을 방사할 때 해수면에 비추는 면적(Foot Print)을 의미한다. 이는 그림 3과 같이 지표각(ψ_g)과 안테나의 방위각 3dB 빔폭(θ_{3dB})에 의해 결정된다. 레이더 신호는 거리 셀(Range Cell) 별로 모의 되므로 하나의 거리 셀에 영향을 주는 클러터 면적은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_c \approx R\theta_{3dB} \frac{cT}{2} \sec(\psi_g) \quad (2)$$

여기서 R 은 레이더에서 클러터까지의 거리, c 는 전파 속

도, τ 는 펄스폭, ψ_g 는 지표각을 나타낸다. 수식으로부터 거리에 따른 해상 클러터 단면적을 그림 4와 같이 구할 수 있다.

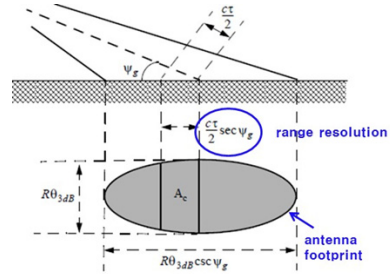


그림 3. 해상 클러터 단면적
 Fig. 3. Footprint of sea clutter

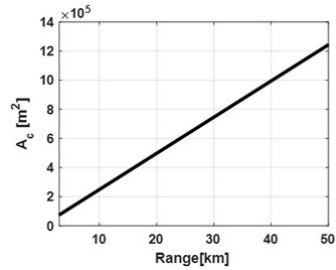


그림 4. 거리에 따른 해상 클러터 단면적
 Fig. 4. Footprint of sea clutter according to range

해상 클러터 반사 계수 모델과 단면적을 식 (1)에 대입하여 산출한 클러터 RCS (σ_c)는 그림 5와 같다.

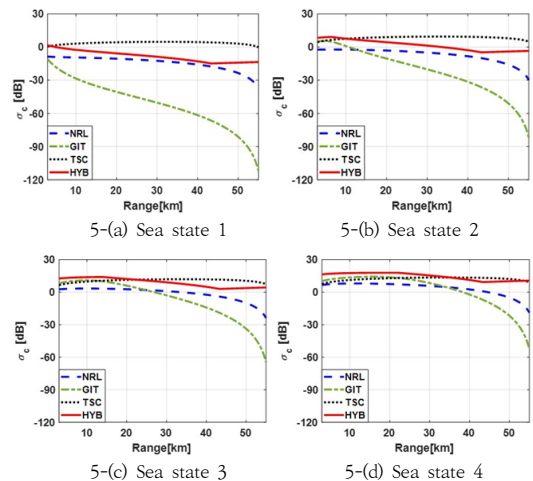


그림 5. 거리/해상상태에 따른 해상 클러터 RCS
 Fig. 5. Sea clutter RCS according to range and sea state

산출한 σ_c 는 식 (3)의 클러터 수신 신호 세기 계산에 사용된다. 여기에서 P_t 는 레이더 송신 전력, G_t , G_r 은 레이더의 송/수신 이득, λ 는 파장, L_p , L_{sys} 는 전파/시스템 손실, G_{sp} 는 레이더 신호처리이득을 나타낸다.

$$P_{c,Model} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R^4 L_p L_{sys}} \right) G_{sp} \quad (3)$$

최종적으로 NRL, GIT, TSC, HYB 모델별 클러터 수신 신호 세기는 아래 그림 6과 같다.

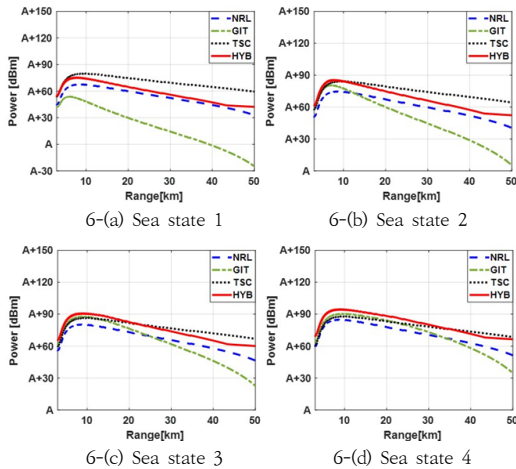


그림 6. 거리/해상상태에 따른 클러터 수신 신호 세기
Fig. 6. Sea clutter power according to range/sea state

IV. 해상 클러터 모델 선정

본 장에서는 2장에서 실측 데이터와 3장에서 해상 클러터 모델을 비교, 분석하여 운용 환경에 적합한 클러터 모델을 선정한다. 수신 신호 오차 e 는 모델과 실측 수신 신호 세기의 차이로 정의하며 식 (4)와 같다.

$$e = P_{c,Model} - P_{c,Real} \quad (4)$$

그림 7은 표 1의 Date 3.에서 클러터 모델별 3-50km 구간에 해당하는 수신 신호 오차에 대한 히스토그램을 나타낸 것이다. 그림 7에서 HYB 모델의 수신 신호 세기 오차가 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 정량적인 분석을 위하여 각 일자별 3-50km 구간 수신 신호 RMS 오차를 구한 결과는 표 2와 같다.

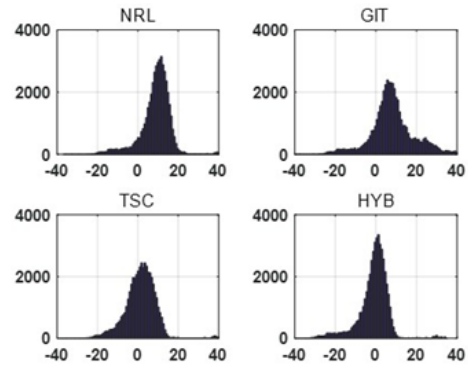


그림 7. 수신 신호 세기 오차 히스토그램 (Date 3)
Fig. 7. Received power error histogram (Date 3)

표 2. 실측 데이터와 클러터 모델 간 수신신호 RMS 오차
Table 2. Received power RMS error between actual data and clutter model.

	Date 1	Date 2	Date 3	Date 4	RMS error
NRL	11.79	7.58	11.72	14.19	11.32
GIT	25.95	15.17	13.36	14.59	17.27
TSC	11.58	9.33	7.95	9.97	9.71
HYB	9.78	8.95	7.63	7.14	8.38

표 2에서 HYB 모델의 RMS 오차 평균이 8.38로 다른 모델에 비하여 작음을 확인할 수 있다. 따라서 HYB 모델이 국내의 레이더 운용 환경을 가장 잘 반영한 클러터 모델이라고 결론 내리고 다음 장에서 이 모델을 활용하여 소형표적 탐지 거리에 대한 분석을 진행한다. HYB 모델과 실측데이터 비교는 그림 8에 도시하였다.

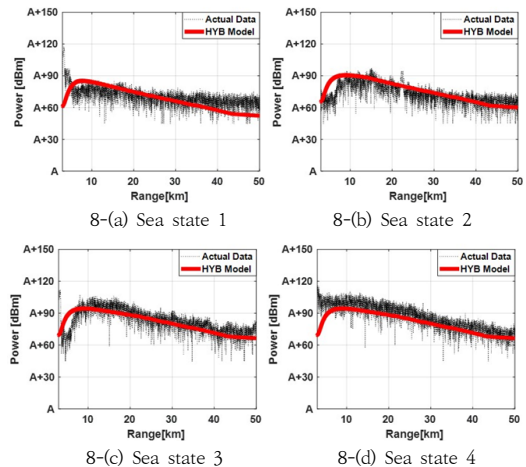


그림 8. 일자별 HYB모델과 실측 클러터 수신 신호 세기
Fig. 8. Sea clutter power of HYB model & radar data

V. 소형표적 탐지 거리 분석

본 장에서는 해상 클러터를 HYB 모델로 가정하고 소형 표적(RCS, $\sigma_t = 1m^2$)에 대한 기 설치된 레이더의 탐지 성능을 분석한다. 소형 표적의 고도는 1m로 가정하였다. 소형 표적의 표적 수신 신호(S)는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$S = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 L_p L_{sys}} \right) G_{sp} \quad (5)$$

여기서 P_t , G_t , G_r , λ , L_p , L_{sys} , G_{sp} 는 식 (3)에서 사용된 레이더 변수 값과 동일하다.

식 (3), (5)로부터 해상 표적과 클러터간의 신호 대 클러터 비율(SCR)은 식 (6)과 같다.

$$SCR = \frac{S}{P_c} \quad (6)$$

그림 9는 해상상태 별 SCR을 도시한 것이다. 그 결과 해상상태가 증가할수록 클러터 수신 신호 세기가 증가하여 SCR이 감소하는 것을 알 수 있다.

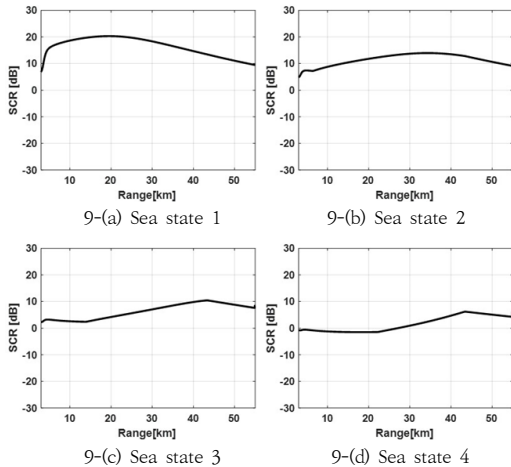


그림 9. 해상 상태 별 SCR (Signal to Clutter Ratio)
 Fig. 9. SCR(Signal to Clutter Ratio) according to sea state

레이더 임계치 (V_T)와 탐지오경보율(False Alarm Rate : P_{fa}) 사이에 다음 식(7)이 성립한다.

$$P_{fa} = 1 - \int_0^{V_T/\sqrt{n_p}} \frac{e^{-\gamma} \gamma^{n_p-2}}{(n_p-2)!} d\gamma \quad (7)$$

여기에서 n_p 는 레이더의 펄스 수를 나타낸다.

식 (7)에서 P_{fa} 가 주어졌을 경우 V_T 를 귀납적으로 연산하여 식 (8)과 같이 탐지오경보율과 펄스 수의 함수 형태로 표현할 수 있다.^[8]

$$V_T = f(P_{fa}, n_p) \quad (8)$$

따라서 표적의 탐지확률(Probability of Detection : P_d)은 Swerling case 5일 때 식 (9)와 같이 탐지오경보율(P_{fa})과 SCR의 함수로 표현가능하다.

$$P_d = \frac{\operatorname{erfc}(V/\sqrt{2})}{2} - \frac{e^{-V^2/2}}{\sqrt{2\pi}} K \quad (9)$$

여기에서 erfc (Complementary error function)는 오차함수를 나타내며 V , C_1 , C_2 , K 는 다음 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{V_T - n_p(1 + SNR)}{\sqrt{n_p(2SNR + 1)}} \\ C_1 &= -\frac{SNR + 1/3}{\sqrt{n_p(2SNR + 1)^{1.5}}} \\ C_2 &= \frac{SNR + 1/4}{n_p(2SNR + 1)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$K = C_1(V^2 - 1) + C_2V(3 - V^2) - \frac{C_1^2}{2}V(V^4 - 10V^2 + 15)$$

식 (9), (10)을 활용하여 탐지오경보율 10^{-6} , 10^{-4} 에서의 거리에 따른 탐지확률을 그림 10과 같이 구할 수 있다. 그림 10에서 함정용 다기능 레이더의 탐지확률은 탐지오경보율이 작을수록 감소하고, 해상상태 3, 4일 경우에는 탐지확률의 급격한 변화를 확인할 수 있다. 탐지확률 50%, 80%을 만족하는 탐지 가능거리는 아래 표 3과 같다.

그 결과, 해상상태가 높을수록 표적 탐지가 가능한 구간이 급격히 감소함을 알 수 있다. 기 설치된 레이더의 탐지 성능으로는 해상 상태가 1일 경우는 탐지 오경보율과 탐지확률의 설정 값에 따른 탐지 영역이 5km~10km

까지 차이가 나지만 레이다 가시거리까지 탐지가 가능한 것을 확인할 수 있다. 해상 상태 2, 3일 경우는 탐지 영역이 제한되고, 특히 해상 상태 4일 때는 탐지가 불가능함을 확인할 수 있다.

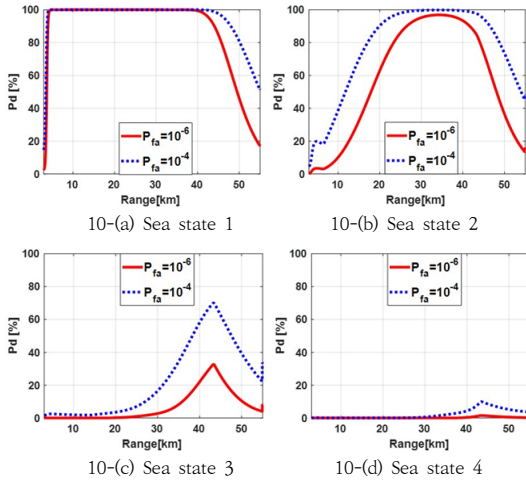


그림 10. 해상 상태 및 탐지오경보율 별 탐지확률
Fig. 10. Probability of detection according to sea state and false alarm rate

표 3. 해상상태, 오경보율, 탐지확률에 따른 탐지가능거리
Table 3. Detectable range according to sea state, false alarm rate, and probability of detection

P_{fa}	P_d	SS1	SS2	SS3	SS4
10^{-6}	80%	~45	23~44	-	-
	50%	~50	18~48	-	-
10^{-4}	80%	~50	17~49	-	-
	50%	~55	12~53	36~48	-

(SS : Sea State, Unit : km)

이와 같이 함정용 다기능 레이다 설계 시 해상상태에 따른 해상 클러터 수신 신호를 HYB 모델을 반영하고 그로부터 레이다의 표적 탐지 성능을 분석함으로써 저고도 소형 표적 탐지 여부에 대한 판단을 할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 함정용 다기능 레이다 설계 사양 및 해상 클러터를 반영하여 해상상태에 따른 소형표적에 대한 탐지 성능을 분석 및 예측하였다.

국내의 해상 환경을 고려하였을 때, 해상클러터 산란 계수의 경우 NRL, GIT, TSC, HYB 모델 중에서 HYB가

실측 해상 클러터 데이터와 가장 유사한 형태를 가지는 것을 확인하였다. 또한, 해상상태에 따라 기 설치된 함정용 레이다의 탐지오경보율, 탐지확률 설정에 따라 해상상태 별 탐지 가능 거리를 예측하고 소형표적에 대한 탐지 성능을 분석하였다. 그 결과 탐지확률 80%, 탐지오경보율 10^{-6} 기준 해상 상태 1, 2일 경우 탐지 가능거리가 각각 0 ~ 45 km, 23 ~ 44 km 인 반면 해상 상태 3, 4의 경우 탐지가 불가능하다.

이와 같이 설계한 모델을 이용하여 실제 함정용 다기능 레이다 운용환경에서의 표적 탐지 성능을 분석할 수 있고, 특히 유도탄과 같은 해상에서의 빠른 속도로 급기동하고 RCS가 작은 소형표적에 대하여 탐지 성능 예측이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] K. H. Lee, "A Study on Target Direction and Range Estimation using Radar Single Pulse," The Journal of The institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 14, No. 6, pp.113-117, Dec. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.6.107>
- [2] K. H. Lee, "On Analysis Performance for Target Range Detection Estimation of Radar Cross Section using Swerling Case," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 14, No. 6, pp.107-112, Dec. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.6.113>
- [3] F. E. Nathanson, J. P. Reilly, and M. Cohen, "Radar Design Principles (2nd ed)," New York: McGraw-Hill, 1991.
- [4] M. M. Horst, F. B. Dyer, and M. Tuley, "Radar sea clutter model," Proceedings of the 1978 International IEEE AP/S URSI Symposium, pp. 6-10, 1978.
- [5] J. P. Reilly, G. D. Dockery, "Influence of evaporation ducts on radar sea returns," IEE Proceedings, pp.80-88, Apr, 1990.
DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1990.0012>
- [6] G. H. Vilhelm, and M. Rashmi, "An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 49, pp. 3512-3524, Oct. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6324732>
- [7] I. Antipov, "Simulation of sea clutter returns," Defense Science and Technology Organization, DSTO-TR-0679, June, 1999.
- [8] R. M. BASSEM, "Radar Systems Analysis and Design Using Matlab (3rd ed.)," CRC Press, pp.337-338, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9781584888543>

- [9] M. N. Kim, J. S. Lim, G. S. Chae, S. H. Yei, and C. H. Ryu, "Simulation Study on the Multipath Tracking Errors," Journal of the Korea Academia- industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 10, No. 9, pp. 2274-2279, 2009.
 DOI: <https://doi.org/KAIS.2009.10.9.2274>

저 자 소 개

전 우 중(정회원)



- 2010년 7월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원

권 세 응(정회원)



- 1999년 2월 : 연세대학교 전파공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2009년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원

조 명 훈(정회원)



- 1997년 8월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
- 2006년 8월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원

김 현 승(정회원)



- 2014년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원

강 연 덕(정회원)



- 1996년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원 (주) 연구위원

박 명 훈(정회원)



- 2014년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원

유 승 기(정회원)



- 2002년 2월 : 한양대학교 지구해양과학 (이학사)
- 2004년 8월 : 한양대학교 해양환경과학 (이학석사)
- 2013년 8월 : 한양대학교 해양융합과학 (이학박사)
- 2010년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원

정 동 민(정회원)



- 2008년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 2010년 2월 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학석사)
- 2010년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원