

지면 기반 레이더에 대한 지표면 클러터 RCS 분석

Surface Clutter RCS Analysis for Ground-Based Radar

문 창 만 · 안 도 진 · 이 준 호

Chang-Man Moon · Do-Jin An · Joon-Ho Lee

요 약

레이더 안테나에서 송신한 신호가 어떠한 물체에 도달한 뒤 다시 안테나로 수신되는 과정에서, 환경에 의해 생성되는 클러터는 원하지 않는 요소이다. 클러터는 안테나의 빔 패턴과 어떠한 물체의 거리, 고도 등에 의해 계산되며, RCS로 나타낼 수 있다. 지면 기반 레이더에서 임의의 물체에 대한 지표면 클러터 RCS를 구하고, 레이더 방정식을 이용하여 지표면 클러터 RCS가 지면 기반 레이더 안테나에 수신되는 신호에 미치는 영향을 분석해본다.

Abstract

A radar receives reflected signals from various objects to detect a target. Undesired object, called clutter, as well as the target generates reflected signals. The clutter radar cross section(RCS) is dependent on many factors, which are the antenna pattern, distance between the radar and the target, and the height of the target and the radar. Herein, surface clutter RCS for ground-based radar is analyzed, and the effect of the surface clutter RCS on the received signal is investigated.

Key words: Clutter, Radar Cross Section(RCS), Radar Equation, Signal to Interference Ratio(SIR)

I. 서 론

현대 전자전 환경에서 작전수행능력을 향상시키기 위한 수단으로 적의 정보를 파악하는 탐지능력이 중요해졌다. 탐지장치는 표적에서 반사되는 고주파 대역의 전자파 에너지나 표적이 발산하는 적외선 대역의 전자파 에너지를 찾는 방식이다. 이 과정에서 표적이 발산하는 전자파 에너지 이외에도 잡음이나 환경에 의한 방해요소들과 같은 원하지 않는 에너지도 무작위적으로 안테나에 수신된다.

방해요소는 여러 가지가 있는데, 이 중에 하나가 클러터이다. 대부분의 경우, 안테나에 수신되는 클러터 반사 신호의 전력은 주변 환경에 의한 잡음 전력보다 크다. 따

라서 레이더의 탐지능력은 신호 대 잡음비보다 신호 대 클러터 비에 더 의존한다고 할 수 있다.

클러터는 표적이 신호를 반사하여 안테나로 발산하는 것과 같이 신호를 반사하는 역할을 하기 때문에 레이더에서 수신되는 표적 반사 신호와 클러터 반사 신호를 구별하기 위해 Radar Cross Section(RCS)을 이용한다.

본 논문에서는 표적 RCS와 지표면 클러터 RCS에 의한 표적 반사 신호전력과 지표면 클러터 반사 신호전력을 레이더 방정식을 이용하여 구한다. 또한 안테나 빔 패턴^[1]과 표적의 형태를 변화했을 때, 신호 대 클러터 전력비를 분석하여 임의의 환경에서 지면기반 레이더의 탐지능력을 예측해본다.

「이 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 연구되었음.」

세종대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Sejong University)

· Manuscript received September 28, 2017 ; Revised November 22, 2017 ; Accepted May 15, 2018. (ID No. 20170928-103)

· Corresponding Author: Joon-Ho Lee (e-mail: joonhlee@sejong.ac.kr)

II. 지면기반 레이더에 수신되는 클러터 RCS

지면기반 레이더에서 지면을 향해 빔을 방사할 때, 지면에 비추지는 면적(footprint)은 지표 각(grazing angle)과 안테나 3 dB 빔폭에 의해 결정된다.

그림 1에서 지면에 비추진 면적만큼 클러터가 생성된다. R 은 탐지거리, θ_{3dB} 은 방위(方位) 빔 폭, c 는 전파속도를 나타내며, 펄스 폭 τ 와 지표 각 ψ_g 에 의해 나뉘진 면적을 클러터 면적 A_c 라고 할 때, 식은 다음과 같다^[2].

$$A_c \approx R\theta_{3dB}\frac{c\tau}{2}\sec(\psi_g) \quad (1)$$

클러터 RCS σ_c 는 클러터 산란계수 σ^0 와 면적 A_c 의 반사로부터 정의된다. 클러터 산란계수(backscatter coefficient) σ^0 는 지표면 매질에 따라 통계적 특성이 반영된 여러 모델이 있지만, 본 논문에서는 constant gamma model^[3]을 사용한다. σ^0 는 레이더와 지표사이의 거리(slant range) R 에 따라 변하는 지표 각 ψ_g 에 의하여 정의된다. γ 는 식 (3)과 같이 전압 반사율(voltage reflectivity) Γ_0 로 계산된다^[4].

$$\sigma^0 = \gamma \sin \psi_g \quad (2)$$

$$\gamma = |\Gamma_0|^2 \quad (3)$$

클러터 RCS σ_c 는 식 (4)와 같다.

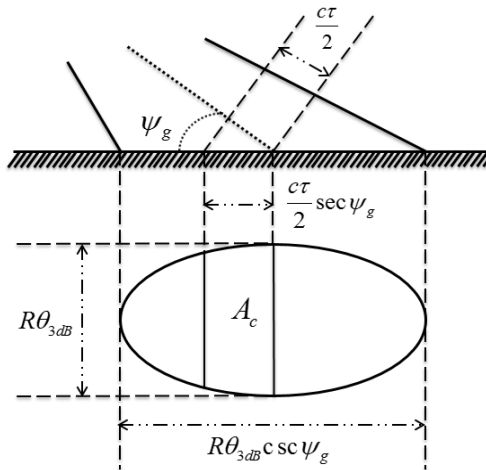


그림 1. 지면 클러터 면적 정의
Fig. 1. Ground clutter area definition.

$$\sigma_c = \sigma^0 A_c \quad (4)$$

식 (1)에서 구한 클러터 면적 A_c 와 (2)에서 구한 클러터 반사계수 σ^0 을 식 (4)에 대입하면 클러터 RCS를 구할 수 있다. 또한 이를 통해 지면기반 레이더에서 수신되는 지표면 클러터 반사전력을 구할 수 있다.

$$S_C = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5)$$

III. 지면 기반 레이더와 표적 간 거리에 의한 지표면 클러터 RCS 계산

식 (4)를 이용하여 지면 기반 레이더의 탐지범위 내에 표적이 존재한다고 가정할 때, 총 클러터 RCS σ 를 구할 수 있다.

$$\sigma_{TOTc} = \sigma_{Mbc} + \sigma_{SLc} \quad (6)$$

식 (6)에서 σ_{Mbc} 와 σ_{SLc} 는 각각 그림 2에서 나타내고 있는 main-beam 클러터와 side-lobe 클러터의 RCS이다. 그

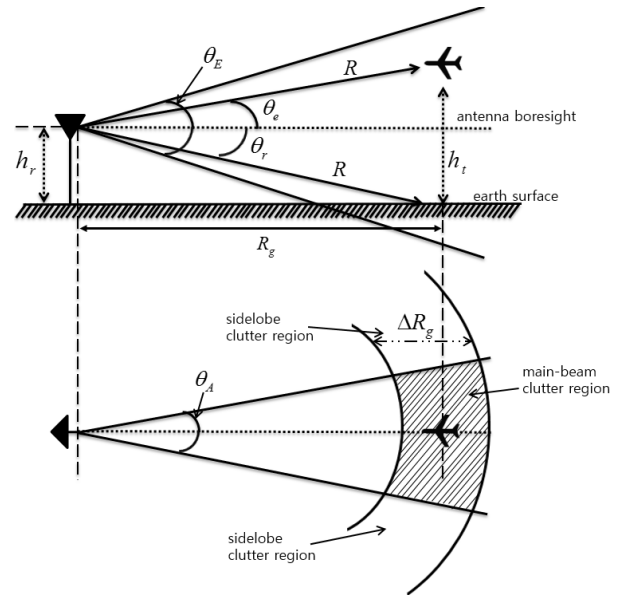


그림 2. 지면 기반 레이더 클러터의 기하학적 구조(측면 시점과 평면 시점)

Fig. 2. Geometry for ground-based radar clutter(side view and top view).

림 2에서 보여주고 있는 main-beam과 side-lobe 클러스터 면적은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_{MBc} \approx R_g \theta_A \Delta R_g^{[1]} \quad (7)$$

$$A_{SLc} \approx \pi R_g \Delta R_g^{[1]} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서 ΔR_g 는 지면에 정사영된 거리 분해능을 의미한다.

레이더와 표적 간의 거리가 변화하거나 레이더 안테나의 빔 패턴을 변화시키면 σ 또한 변하게 되는데, 이러한 관계를 굴절과 지구에 의한 효과를 고려하여 표현하면 식 (9)와 같다. 식 (9)는 거리에 대한 클러스터 RCS의 변동을 설명하기 위한 거리의 함수로서 총 클러스터 RCS를 계산할 수 있다.

$$\sigma_{TOTc}(R) = \frac{\sigma_{MBc} + \sigma_{SLc}}{(1 + (R/R_h)^4)^{[1]}} \quad (9)$$

식 (9)에서 R_h 는 레이더 탐지 범위의 성분 중 지평선 축의 거리를 의미하며, 이 거리는 레이더의 높이(지면에서 안테나 중심점까지의 거리)와 지구의 반지름을 이용하여 구한다^[5].

$$R_h = \sqrt{\frac{8h_r r_e}{3}}^{[1]} \quad (10)$$

위와 같은 식을 적용하게 되면 지면 기반 레이더에서 표적까지의 거리에 대한 총 지표면 클러스터 RCS를 구할 수 있다.

IV. 신호 대 클러스터 잡음비

지면기반 레이더 안테나에서 수신되는 표적 반사 신호 전력과 클러스터 반사 신호전력은 레이더 방정식^{[6][7]}을 이용하여 구할 수 있다. 레이더 안테나에 수신되는 신호는 표적에 반사된 신호와 클러스터에 반사된 신호가 있으므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 BFL}^{[1]} \quad (11)$$

식 (11)에서 SNR 은 신호 대 잡음비이고, 식 (12)에서

CNR 은 클러스터 대 잡음비를 나타낸 식이다.

$$CNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 BFL}^{[1]} \quad (12)$$

레이더가 얻고자 하는 신호는 표적 반사 신호이며, 그 이외에 신호들은 방해요소로 볼 수 있다. 만약 클러스터의 통계가 가우시안 분포를 따른다고 가정하면, 클러스터 반사 신호와 잡음 신호는 결합이 가능하다.

$$SCR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_t}{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_c} \quad (13)$$

식 (13)에서 SCR 은 신호 대 클러스터 비를 나타낸 식이다. 이때, 표적 반사 신호를 필요한 신호로 나타내고, 잡음 및 클러스터 반사 신호를 방해신호라는 개념으로 레이더의 탐지능력을 신호 대 클러스터 잡음비(SIR 또는 $SCNR$)로 표현할 수 있다.

$$SIR = \frac{1}{\frac{1}{SNR} + \frac{1}{SCR}}^{[1]} \quad (14)$$

식 (14)를 이용하면 전자전 환경에서 레이더의 탐지능력을 예측해 볼 수 있다.

V. 안테나 빔 패턴별 시뮬레이션 결과

다음 그림들은 레이더 안테나의 중심점에서 클러스터까지의 거리 R_s (slant range)에 따라 변화하는 클러스터 산란계수 σ^0 와 클러스터 면적 A_c 로 계산되어, 레이더 안테나에 수신되는 클러스터 반사 신호 전력과 잡음 신호 전력의 비를 나타내기 위한 그래프이다. 그림 3과 그림 4는 표 1의 파라미터를 토대로 나타낸 빔 패턴별 클러스터 대 잡음비(CNR)의 그래프이다.

각각 다른 레이더 안테나 빔 패턴을 사용하여 안테나와 클러스터 간의 거리를 변화시킨 결과로써, 거리가 멀어질수록 클러스터 대 잡음비가 감소하는 현상을 확인할 수 있다.

안테나 빔 패턴이 Gaussian인 경우, 식 (14)로 SIR 을 구할 수 있다. 레이더 탐지작전을 수행할 때, 레이더 방정식을 이용하면 거리에 따른 표적 반사 신호에 대한 SNR 을 예상해볼 수 있다. 그러나 실제로는 클러스터 또한 고려 대

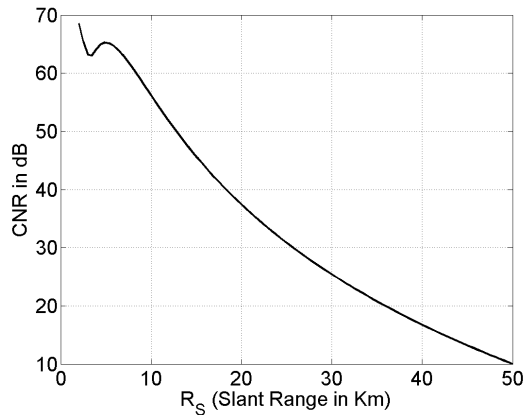


그림 3. Sinc^2 빔 패턴을 사용하는 안테나와 클러터 간 거리에 의한 클러터 대 잡음비

Fig. 3. CNR versus range between antenna using the sinc^2 beam pattern and clutter.

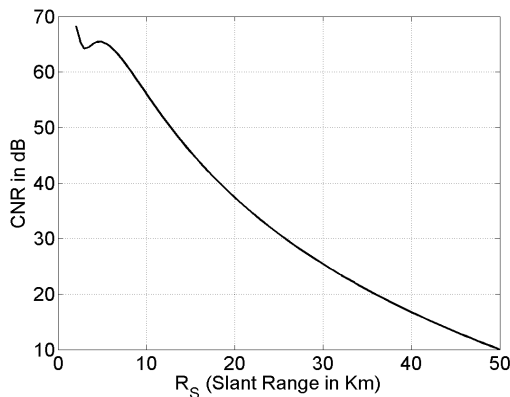


그림 4. Gaussian 빔 패턴을 사용하는 안테나와 클러터 간 거리에 의한 클러터 대 잡음비

Fig. 4. CNR versus range between antenna using the Gaussian beam pattern and clutter.

상에 포함되기 때문에 SIR 에 대한 파악이 필요하다.

VI. 레이더-목표 간 거리에 의한 시뮬레이션 결과

레이더는 목표물을 탐지한 후 추적을 시작하게 된다. 일반적으로 목표물이 미사일인 경우 최대 탐지거리는 55 km 인 반면, 항공기인 경우 최대 탐지거리는 90 km까지 가능하다. 이때 펄스압축 SNR 식을 이용하면 목표물별 최소 요구 SNR 을 구할 수 있다^[8].

표 1. 레이더 탐지환경에 대한 파라미터

Table 1. Parameters for radar detection environment.

Description	Value	Units
Clutter back scatterer coefficient	-20	dB
Antenna 3 dB elevation beamwidth	2	degrees
Antenna 3 dB azimuth beamwidth	1	degrees
Antenna sidelobe level	-20	dB
Range(slant range)	2 to 50	km
Radar height	3	meters
Target height	100	meters
Radar peak power	75	kW
Radar operating frequency	5.6	GHz
Bandwidth	1	MHz
Effective noise temperature	290	Kelvins
Noise figure	6	dB
Radar losses	10	dB

$$SNR = \frac{P_t \tau' G^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 k T_e FL} \quad [1] \quad (15)$$

표 2와 표 3에 파라미터들에 따른 레이더의 표적물 탐지 SNR 의 임계값(detection threshold)은 13 dB로 가정한다.

표 2. 펄스압축 레이더 방정식 파라미터

Table 2. Radar equation with pulse compression.

Description	Value	Units
Clutter back scatterer coefficient	-15	dB
Antenna 3 dB elevation beamwidth	11	degrees
Antenna 3 dB azimuth beamwidth	1.33	degrees
Antenna sidelobe level	-20	dB
Range(slant range)	25 to 100	km
Radar height	5	meters
Radar peak power	114.6	kW
Antenna gain	34.5139	dB
Radar operating frequency	3	GHz
Bandwidth	1.5	MHz
Effective noise temperature	290	Kelvins
Noise figure	6	dB
Radar losses	8	dB

표 3. 목표물별 파라미터

Table 3. Target-specific parameters.

Description	Value	Units
Missile height	2	km
Missile RCS	0.5	m ²
Aircraft height	10	km
Aircraft RCS	4	m ²

목표물이 미사일인 경우를 나타낸 그림 5는 레이더의 최소 요구 SNR 의 탐지 임계값(detection threshold)인 13 dB 지점에서 SIR 이 이를 만족하지 못한다. 즉, 레이더가 미사일을 제대로 탐지하지 못함을 알 수 있다. 목표물이 항공기인 그림 6에서는 SIR 이 $R_s \leq 70$ km인 지점까지 최소요구 SNR (=13 dB)을 만족함을 볼 수 있다. 이에 따라 타켓이 항공기인 경우 최대 탐지거리(maximum detection range)가 70 km임을 알 수 있다.

항공기의 고도가 미사일의 고도보다 높기 때문에, 미사일의 CNR 이 항공기의 CNR 보다 대부분의 거리에서 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 slant range상에서 높은 고도의 표적물은 상대적으로 높은 각도의 bore-sight를 가짐으로 유추할 수 있다. 즉, bore-sight의 변화에 따

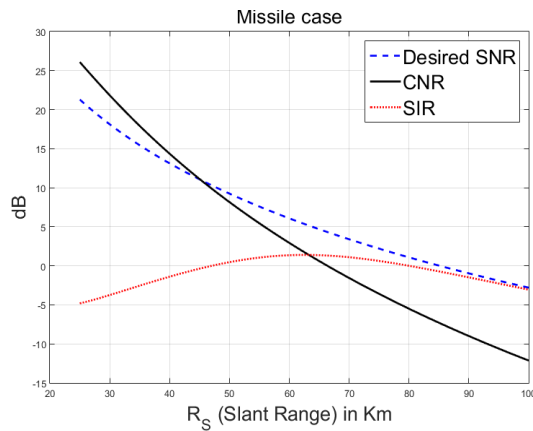


그림 5. 목표물이 미사일인 경우, 안테나와 클러터 간 거리에 의한 신호 대 잡음비, 클러터 대 잡음비 및 신호 대 클러터 잡음비

Fig. 5. SNR, CNR and SIR versus range between antenna using the Gaussian beam pattern and clutter for the target is a missile.

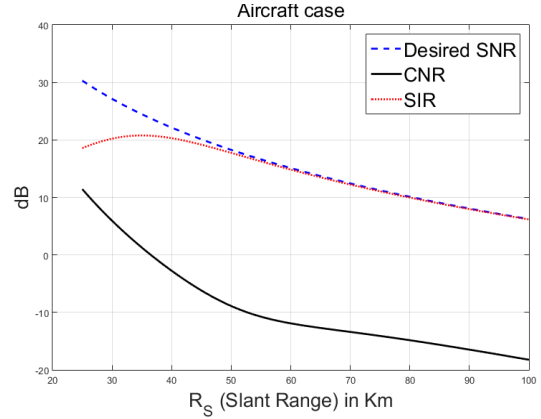


그림 6. 목표물이 항공기인 경우, 안테나와 클러터 간 거리에 의한 신호 대 잡음비, 클러터 대 잡음비 및 신호 대 클러터 잡음비

Fig. 6. SNR, CNR and SIR versus range between antenna using the Gaussian beam pattern and clutter for the target is a aircraft.

라 안테나의 빔폭이 커지고, 이로 인해 지표면을 향한 안테나의 방사전력이 약해지므로 작은 클러터 전력이 발생되기 때문이다.

그림 7과 그림 8에는 클러터 산란계수 σ^0 를 -13 dB로 고정하지 않고, 지표면 매질에 따라 식 (3)에서 표현된 전압 반사율(voltage reflectivity) Γ_0 가 계산된 그래프를 보였다. 즉, 거리에 따라 변하는 지표각과 지표면 매질에 따른 클러터 산란계수(backscatter coefficient)가 반영된 지표면 클러터 RCS가 계산된다. Γ_0 는 식 (16)으로 계산된다.

$$\Gamma_0 = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}, \left(\eta_1 = 120\pi, \eta_2 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (16)$$

η_1 은 자유공간에서의 고유 임피던스이고, η_2 는 각 매질의 비유전율 ϵ_r 이 반영된 고유 임피던스이다. 지표면 매질의 비유전율은 표 4에 나타난다. 표 4는 측정온도 25°C, 측정 주파수 3 GHz를 따른다.

그림 7은 지표면이 모래흙인 경우로써 그림 8에 지표면이 물인 경우(표 4에 따라)보다 작은 비유전율 값을 가진다. 식 (16)으로 계산된 전압 반사율 Γ_0 을 통해 지표면이 모래흙인 환경에서 더 작은 클러터 전력을 발생함을 알 수 있다. 이는 그림 7과 그림 8에 표적물이 동일한 조

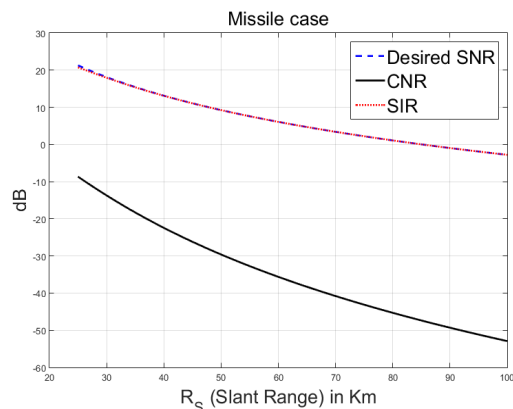


그림 7. 지표면 매질이 모래흙인 경우, 안테나와 클러터 간 거리에 의한 신호 대 잡음비, 클러터 대 잡음비 및 신호 대 클러터 잡음비

Fig. 7. SNR, CNR and SIR versus range between antenna using the Gaussian beam pattern and clutter for surface medium of sandy-soil.

건에서 그림 7에 지표면이 모래흙인 환경에서의 CNR 이 더 작은 값을 가짐을 통하여 확인할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 같은 레이더 탐지 조건이 반영된 그림 5와 그림 6과 비교하여 레이더의 탐지 능력을 나타내는 SIR 이 월등히 좋아짐을 확인할 수 있다. 그림 7과 그림 8은 거리에 따른 지표각의 변화와 지표면 매질에 따른 클러터 RCS의 변화를 유도한 결과 그래프이다. 이는 지면 기반 레이더의 탐지 환경에 따른 정확한 클러터 RCS를 파악한 결과, 지표면 클러터 RCS가 매우 작은 값을 가지며, 시뮬레이션 상에서 지표면 클러터가 지면 기반 레이더에 실질적으로 미치는 영향이 상당히 미미함을 확인할 수 있다.

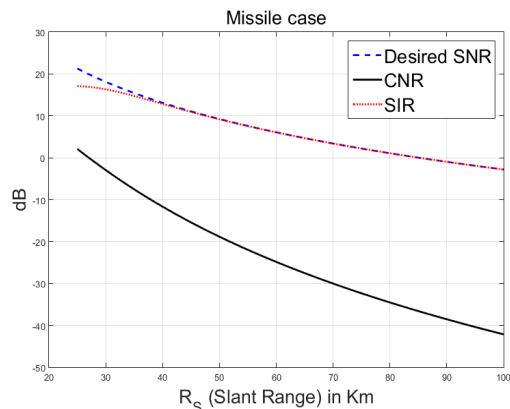


그림 8. 지표면 매질이 물인 경우, 안테나와 클러터 간 거리에 의한 신호 대 잡음비, 클러터 대 잡음비 및 신호 대 클러터 잡음비

Fig. 8. SNR, CNR and SIR versus range between antenna using the Gaussian beam pattern and clutter for surface medium of water.

표 4. 지표면 매질별 비유전율

Table 4. Surface medium-specific permittivity.

Description	Value	Units
Sandy-soil	2.55	C/m ²
Loamy-soil	2.44	C/m ²
Clay-soil	2.27	C/m ²
Water	76.7	C/m ²

또한 그림 7과 그림 8에 그래프들의 최소 요구 SNR 이 13 dB의 탐지 임계값을 가짐을 고려하여 해당 레이더의 SIR 을 통한 레이더의 탐지범위를 파악할 수 있다.

VII. 결 론

전자전 환경에서 레이더 안테나에는 표적 반사 신호 이외에도 잡음 및 클러터 반사 신호가 수신된다. 이러한 신호는 레이더에서 원하지 않는 신호로 분류할 수 있으며, 이러한 요소들이 어떠한 형태로 수신되는지를 확인하기 위해 임의의 전자전 환경에 대한 시뮬레이션을 수행해 보았다. 클러터 반사 신호는 표적 반사 신호와 유사한 방식으로 수신되기 때문에 레이더 방정식에 의해 빔 패턴에 관계없이 거리가 멀어질수록 CNR 이 점점 감소하는 반비례관계가 나타날 것이라고 추측해볼 수 있으며, 그림 3과 그림 4를 통하여 결과를 확인해 보았다.

목표물과 그 특성에 따른 고도가 달라졌을 때 레이더에 수신되는 신호에는 어떤 변화가 생기는지를 분석해볼 필요가 있으며, 이에 따른 결과는 그림 5와 그림 6이다. 또한 그림 5에 표적물이 미사일인 경우, SIR 이 최소 요구 SNR 을 만족시키지 못함을 통해 레이더가 표적물인 미사일을 탐지하지 못함을 알 수 있게 된다.

또한 그림 7과 그림 8을 통해 지표면 매질에 따라 발생하는 지표면 클러터를 각각의 CNR 로 비교할 수 있다. 같은 표적물이라도 지표면 매질에 따라 발생하는 지표면 클러터 RCS의 차이가 존재한다.

결론적으로 안테나의 빔패턴과 타겟의 고도, 지표각 그리고 지표면 매질에 따른 반사계수를 파악하므로 지표면 클러터 RCS 분석을 통한 레이더의 탐지 능력을 파악할

수 있다.

References

- [1] B. R. Mahafza, A. Z. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, Chapman and Hall/CRC, pp. 272-279, 2003.
- [2] P. A. Lynn, *Radar Systems*, Basingstoke, Macmillan, pp. 34-42, 1987.
- [3] T. H. Kim, E. H. Kim, and S. J. Kim, "Time-domain model of surface clutter for airborne phase-array radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 7, pp. 730-736, Jul. 2013.
- [4] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd ed. Scitech Publishing, Inc, Medham, NJ, 1998.
- [5] A. W. Doerry, "Earth curvature and atmospheric refraction effects on radar signal propagation," Sandia National Laboratories, SAND2012-10690, Jan. 2013.
- [6] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems*, 2nd ed. SciTech Publishing Inc., 2006, pp. 44-57.
- [7] J. L. Eaves, E. K. Reedy, *Principles of Modern Radar*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1987, pp. 5-16.
- [8] P. Swerling, "Probability of detection for fluctuating targets," *IRE Transaction on Information Theory*, vol. 6, no. 2, pp. 269-308, Apr. 1960.

문 창 만



2016년 2월: 한경대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 3월~현재: 세종대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

안 도 진



2017년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학사)
2017년 3월~현재: 세종대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

이 준 호



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학박사)

2004년 3월~현재: 세종대학교 정보통신공

학과 교수

[주 관심분야] Signal Processing (Radar Signal Processing, Array
Signal Processing), Smart Antenna