

실제 지형 환경과 지구 곡률이 반영된 재밍 유효거리 분석을 위한 M&S 기법

M&S Technique for Burn Through Range Analysis Considering Terrain Environment and Earth Curvature

허 준* · 문효상** · 김상수** · 최남우** · 박용배*,***

Jun Heo* · Hyo Sang Moon** · Sang Su Kim** · Nam Woo Choi** · Yong Bae Park*,***

요 약

재머가 존재하는 전자전 환경에서, 재밍 신호에 의해 레이다가 영향을 받는 정도를 분석하고 재밍 유효거리를 예측할 수 있으면, 재머가 방출하는 재밍 신호에 따라 대응할 수 있는 체계를 갖출 수 있다. 본 논문에서는 실제 지형 정보와 지구 곡률을 고려하여 수신 전력을 계산하고, 레이다 및 재머의 제원을 반영해 재밍 유효거리를 분석할 수 있는 M&S 기법을 제안한다. 실제로 사용되는 레이다의 제원을 이용해 제안한 M&S 기법을 적용하였고, 다양한 레이다 단면적을 가지는 표적에 대하여 재밍 유효거리를 분석하였다. 표적의 레이다 단면적이 줄어들수록 그리고 재머의 유효 복사전력이 작아질수록 레이다로부터의 재밍 유효거리가 줄어드는 것을 확인하였다.

Abstract

Jammers are commonly employed in electronic warfare (EW) environments. A system that can respond according to the jamming signals emitted by jammers can be developed by predicting the affected radar detection range and burn through range. In this paper, we propose an M&S technique for calculating the received power by considering the actual terrain information and the curvature of the Earth, and analyze the burn through range with the specifications of the radar and jammer. The proposed M&S technique was applied by using the specifications of the experimented actual radar, and the burn through range was analyzed for targets with various radar cross sections. It was confirmed that the burn through range from the radar decreased as the radar cross section of the target decreased, and the effective isotropic radiated power of the jammer decreased.

Key words: Electronic Warfare, Radar System, Burn Through Range, Terrain Profile, The Earth Curvature

I. 서 론

전자전 환경에서 레이다 탐지지역 주변을 배회하는 미

식별 물체가 나타나는 경우, 레이다는 전자파를 방출하여 미식별 물체에 반사되어 수신기로 되돌아오는 신호를 분석하여 미식별 물체에 대한 정보를 얻는다. 미식별 물체

†이 연구는 2022년도 LIG넥스원(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.

*아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of AI Convergence Network, Ajou University)

**LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

***아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received February 3, 2023 ; Revised February 14, 2023 ; Accepted February 25, 2023. (ID No. 20230203-010)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

는 탐지 레이더의 정보 수집을 방해하기 위한 수단으로 재밍 신호를 방출하게 되는데, 이는 레이더 탐지범위에 변화를 일으킨다. 재밍 유효거리(burn through range)란, 재밍 신호가 존재하는 조건에서 레이더가 표적을 탐지할 수 있는 거리를 말한다. 재밍 유효거리 내에서는 미식별 물체에 반사되어 돌아오는 레이더 신호의 세기가 재밍 신호의 세기보다 더 크게 되어 재밍을 뚫고 표적을 탐지할 수 있다. 따라서, 재밍 신호에 의한 영향 정도를 분석하고, 재밍 유효거리를 예측할 수 있으면, 재머가 방출하는 재밍 신호에 따라 대응할 수 있는 레이더 체계를 갖출 수 있다. 이를 위해서는 레이더 운용 환경을 고려하여 신호 탐지가 가능한 탐지거리를 분석하고, 재밍 신호가 있는 경우에 대하여 재밍 유효거리 예측 방법이 필요하다. 기존 연구들에 의하면, 국내 기상 환경을 고려하여 레이더의 성능 예측을 위한 모델링 및 분석 연구들이 수행되었다^{[1]~[3]}. 하지만, 장거리 환경에서 레이더로부터의 전자파는 지형에 의해 차폐되거나 반사되고, 지구의 곡률에 의해 음영지역이 형성되기 때문에 이러한 환경을 고려한 신뢰도 높은 분석 방법이 필요하다.

본 논문에서는 Altair사의 무선 전파 모델링을 위한 시뮬레이터 Winprop을 이용하여, 실제 지형 및 지구의 곡률이 반영된 재밍 유효거리를 분석할 수 있는 M&S 기법을 제안한다. Winprop은 분석을 진행하기 위해 실제 지형에 대한 수치표고 모델이 입력된다. 지형 및 해수면에 의해 발생할 수 있는 모든 다중경로에 대해서 해석을 하는 것은 비효율적이기 때문에, Winprop은 목표 지점까지 가장 영향이 큰 핵심 경로에 대해서만 수신 전력을 계산하는 DPM(dominant path model) 해석 방법을 사용한다^[4]. 제안하는 M&S 기법은 실제 지형 정보와 지구 곡률을 고려하여 레이더로부터 표적까지의 신호 전달 세기를 Winprop을 이용해 계산하고, 그 결과에 레이더와 표적에 대한 제원을 반영하여 재밍 유효거리를 분석한다. 제안하는 M&S 기법을 남해 임의의 위치로부터 남동쪽으로 약 400 km의 영역에 적용하여, 다양한 RCS를 가지는 표적에 대하여 재밍 유효거리를 분석하여 결과를 확인했다.

II. 본 론

재밍 유효거리를 분석하기 위해서는 레이더로 수신된

에코 신호 세기와 표적으로부터의 재밍 신호 세기의 비교가 필요하다. 각각의 신호는 그림 1에서 나타낸 것처럼 각각 양방향, 단방향 전파 경로를 가진다. 레이더에서는 표적을 향해 전자파를 송신하고 반사되어 수신되는 신호로 표적을 탐지하며, 수신되는 신호의 세기는 식 (1)과 같이 정의된다^[5].

$$P_{R.Radar} = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma A_e}{4\pi R^2} \quad (1)$$

P_T 는 레이더의 송신 출력, G_T 는 송신 안테나의 이득, R 은 레이더와 표적 사이의 거리, σ 는 표적의 레이더 단면적, A_e 는 안테나 유효면적을 의미한다. 안테나 유효면적은 수신 안테나의 이득 G_R 과 파장 λ 를 이용하여 표현 가능하며, 이를 이용해 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$P_{R.Radar} = \frac{P_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2)$$

또한, 표적으로부터 수신한 재밍 신호의 세기는 식 (3)과 같다.

$$P_{R.Jamm} = P_J G_J G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3)$$

P_J 와 G_J 는 각각 재머의 송신 전력과 송신 안테나 이득을 의미한다.

재밍 유효거리는 식 (2) 및 식 (3)의 계산 결과의 비교 분석하여 예측할 수 있다. 하지만, 수식 내에 거리 R 을 제외하면 레이더와 표적 사이의 환경에 대한 파라미터가 없다. 즉, 지형에 대한 차폐 및 반사에 의한 다중경로와

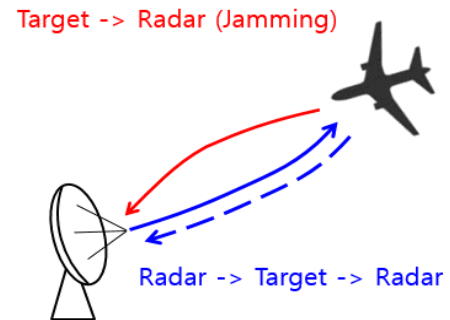


그림 1. 레이더와 표적 사이의 전자파 경로
Fig. 1. The radio wave path between radar and target.

지구 곡률에 의한 음영지역이 고려되지 않는다. 따라서, 지형 및 지구 곡률의 영향이 추가된 분석이 진행되어야 더욱 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다. 우선, 분석 영역 내에 지형이 존재하게 되면, 전자파가 차폐되는 영역이 생기기도 하고, 반사로 인해 다중경로가 형성되게 된다. 형성된 모든 경로 중에서, 수신 전력에 결정적인 역할을 하는 전파 경로는 2개 혹은 3개 정도이기 때문에, 모든 경로에 대한 가중치를 분석하여 수신 전력을 계산하는 것 보다는, 핵심적인 경로만을 찾아 분석하는 것이 효율적인 방법이다. Altair사의 Winprop 시뮬레이터는 DPM 해석 방법을 이용하여, 분석 영역 내에서 핵심적인 경로에 대해서만 수신 전력을 분석한다^[4]. 또한, Winprop 시뮬레이터는 지구의 곡률을 반영하여 레이더 지평선을 경계로 신호를 구분하여 해석한다. 분석하려는 고도를 h_{anal} 이라고 할 때, 레이더 지평선에 대한 개념을 그림 2에 나타내었다. a_e 는 유효 지구 반지름, h_T 는 레이더 안테나의 고도, θ 는 레이더 지평선까지의 각도, 그리고 d 는 레이더의 위치로부터 레이더 지평선이 분석 영역과 교차하는 점까지의 거리를 의미한다. 레이더 안테나의 위치로부터 레이더 지평선까지의 거리는 $(a_e + h_{anal})\theta$ 로 계산할 수 있고, θ 는 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{A^2 + B^2 - d^2}{2AB} \right)$$

$$A = a_e + h_T, \quad B = a_e + h_{anal}$$

$$d = \sqrt{(2a_e + h_T)h_T} + \sqrt{(2a_e + h_{anal})h_{anal}}$$

$$a_e = 6378.1 \times 1.3333 \text{ [km]}$$
(4)

식 (4)의 계산 결과와 Winprop에서 지구 곡률을 고려 시

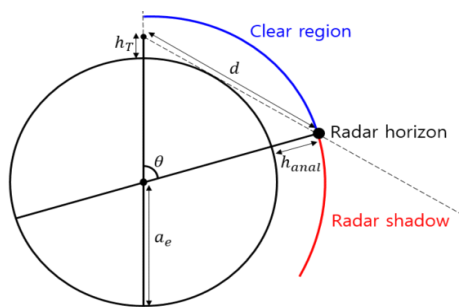


그림 2. 분석 영역의 구분과 레이더 지평선
Fig. 2. Classification of analysis area and radar horizon.

발생하는 레이더 지평선까지의 거리를 비교하면 그림 3과 같다. Winprop의 결과가 지구 곡률을 올바르게 반영하여 해석결과를 도출함을 확인할 수 있다.

재밍 유효거리를 레이더 및 재머의 제원을 고려하여 계산할 수 있도록 레이더 신호에 대한 수식을 식 (5) 및 식 (6)와 같이 정리한다.

$$P_{R.Radar} = 4\pi \times P_T G_T G_R \sigma \lambda^2 \times P_{\sim ul}^2 \quad (5)$$

$$P_{R.Jamm} = P_f G_f G_R \lambda^2 \times P_{\sim ul}$$

$$P_{\sim ul} = \frac{\alpha}{(4\pi R)^2} \quad (6)$$

α 는 지형과 지구의 곡률이 반영된 환경 파라미터를 의미하며, $P_{\sim ul}$ 은 표 1과 같은 입력으로 시뮬레이션이 진행되었을 때의 결과를 의미한다.

표 1의 값으로 Winprop 시뮬레이션을 진행하면, 식 (5) 및 식 (6)에서의 송신 전력, 안테나 이득, 주파수를 무시

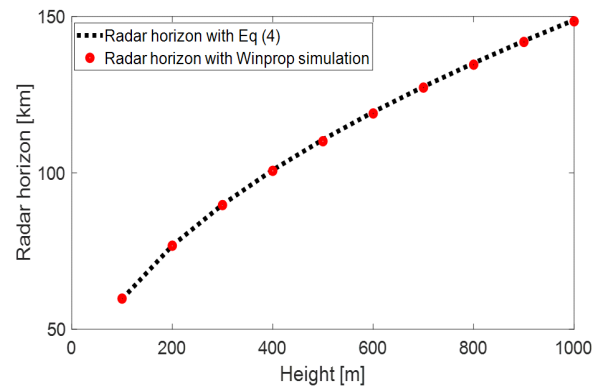


그림 3. 레이더 지평선 계산값과 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 3. Simulation result compared with the radar horizon.

표 1. $P_{\sim ul}$ 계산을 위해 입력한 변수들의 값

Table 1. Parameters on calculating $P_{\sim ul}$.

Parameter	Value
Frequency	300 MHz
Transmit power	0 dBm
Antenna gain	0 dBi
Antenna pattern	Directional

한 채로 P_{ul} 에 대한 결과만을 얻어낼 수 있으며, 이 결과에는 지형과 지구 곡률에 의한 영향이 반영되어 있다. 따라서 이 결과를 이용해 레이더 체계에서 사용하는 제원이나 특정 표적에 대한 RCS 등의 정보를 곱해주면 원하는 분석 상황에 맞추어 유연하게 재밍 유효거리를 계산할 수 있다. 이 방법을 요약하여 순서도로 나타내면 그림 4와 같다.

제안하는 M&S 기법으로 이용하여 남해상에 임의로 위도 34.675° , 경도 128.816° 에 레이더 안테나를 위치시키고 지향하는 방향은 정북 기준 시계방향으로 135° 로 하여 분석을 진행했다. 해석을 위해 분석 영역에 해당하는 지형의 수치표고 모델이 입력으로 사용되었으며, 전자파의 굴절 때문에 레이더 지평선보다 멀리 전자파가 도달하는 것을 고려하기 위하여 지구 반지름을 4/3배하여 사용하였다. 그림 5에서는 임의로 위치시킨 레이더 위치와 분석 영역에 대한 지형의 고도값을 나타내었다.

표 1의 입력값을 이용해, 분석 고도 100, 500, 1000 m에서 P_{ul} 을 계산하여 그림 6에 나타내었다. 식 (4)에 의하면 각각의 고도에 대한 레이더 지평선은 59.831, 110.17, 148.452 km로 계산된다. 그림 6에서와 같이, 지형에 의한 차폐가 없는 경우라면 수신 전력이 레이더 지평선에 해당하는 거리부터 급격하게 감소하거나, 지형이 있으면 차폐되는 것이 반영된 것을 확인할 수 있다. 따라서, 지형 특성 및 지구 곡률을 반영한 재밍 유효거리 분석을 P_{ul}

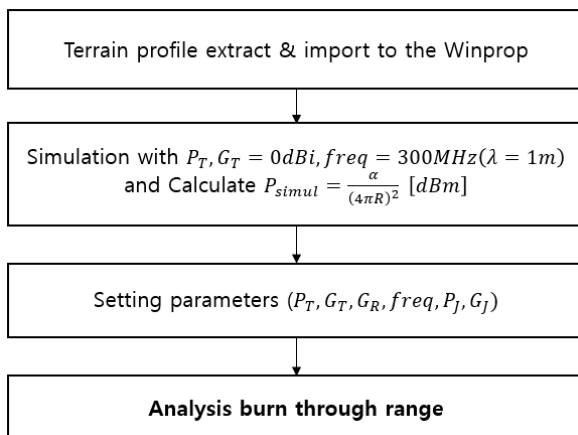


그림 4. 재밍 유효거리 분석을 위한 M&S 기법
Fig. 4. M&S technique to analysis the burn through range.

결과를 기반으로 레이더와 표적의 제원을 반영하여 해석이 가능해진다.

제안하는 M&S 기법으로, 이지스 구축함의 대공 레이더 AN/SPY-1D의 제원을 참고하여 S 대역의 주파수를 사용하고, 출력은 약 500 kW, 이득은 42 dBi로 설정하여 재밍 유효 거리를 분석했다⁶⁾. 표적에 대한 RCS는 표 2와 같이 다양한 값을 가지는 경우를 가정했다. 표적의 재머에 대한 제원은 자세히 알 수 없어, 임의로 40, 50 dBm의 유효복사전력을 가지는 두 경우에 대하여 해석했다. 그림 7은 표 2와 같이 RCS가 80, 20, 8 m²인 표적이 고도 1,000 m에 있는 경우에 제안하는 M&S 기법을 적용하여 레이더 안테나의 지향 방향인 남동쪽으로 식 (5) 및 식 (6)을 계산한 결과를 나타낸다. 지구 곡률에 의하여 레이더 지

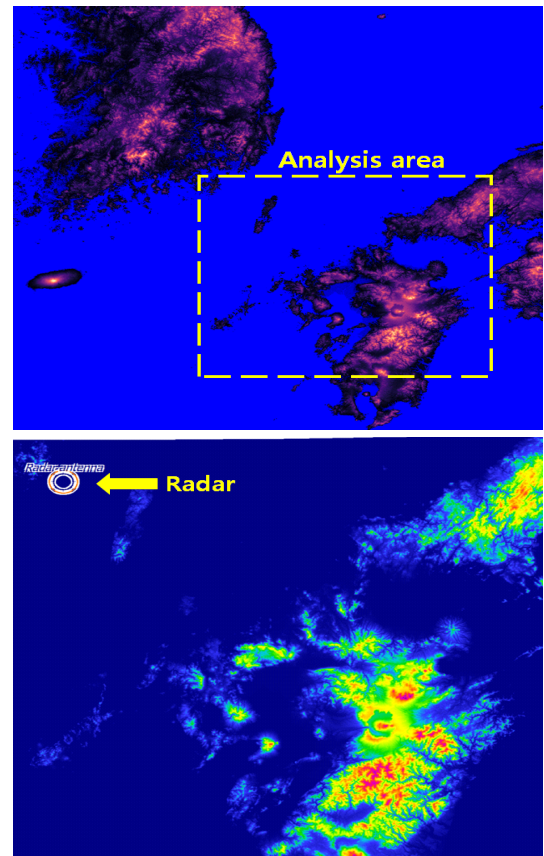


그림 5. 분석 영역(위), 레이더의 위치(아래)
Fig. 5. Analysis area (top) and position of the radar (bottom).

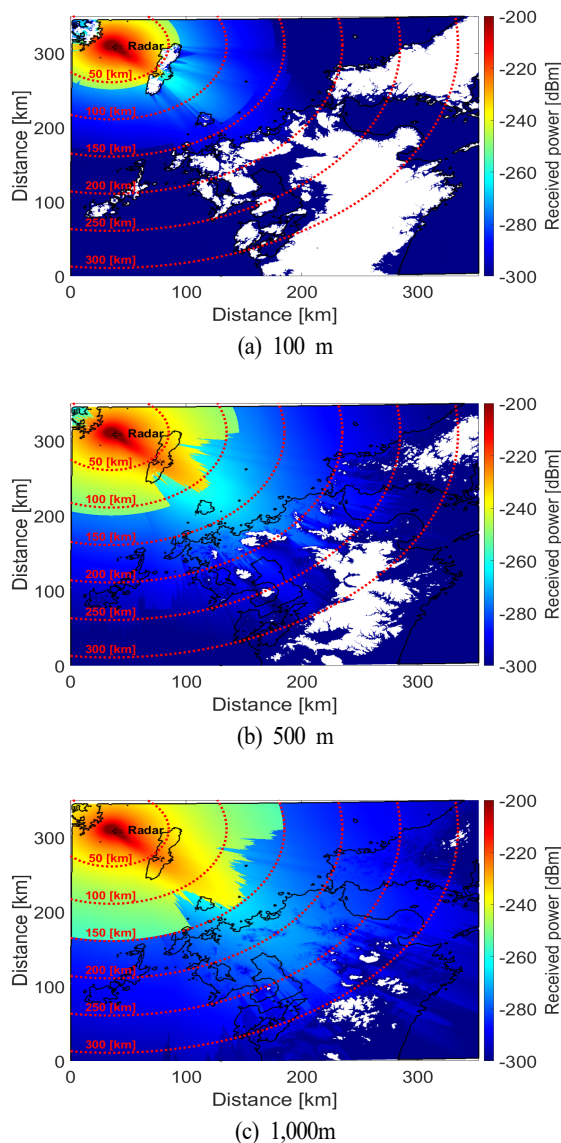


그림 6. 고도 100, 500, 1,000 m에서의 P_{ul} 결과
Fig. 6. P_{ul} results corresponding to the analysis height 100, 500, 1,000 m.

평선 거리인 148.452 km에서 수신 전력이 급격히 감소하며, 지형에 의해 영향을 받기 시작하는 약 150 km 거리에서부터 수신 전력이 크게 변동하는 것이 확인된다. 또한, 표적의 RCS가 80, 20, 8 m²인 각각의 경우에 대하여, 재밍의 유효 복사 전력이 40, 50 dBm일 때 재밍 신호가 수신되는 세기보다 표적에 반사되어 돌아오는 신호 세기가 더 강하게 나타나는 구간을 분석하면 표 3과 같다. 분석

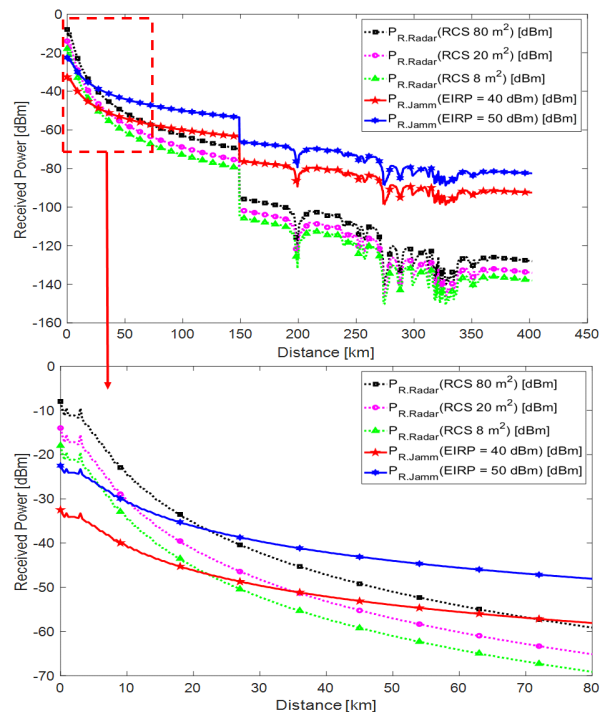


그림 7. 제안하는 M&S 기법을 적용한 신호 분석 결과
Fig. 7. Signal analysis using the proposed M&S technique.

표 2. 분석에 사용한 표적들의 RCS값
Table. 2. RCS values of the targets on analysis.

Target	RCS [m ²]	References
C-130 Hercules	80	[7]
F-15 Eagle	10-25	[8]
F-4 Phantom	6-10	[8]

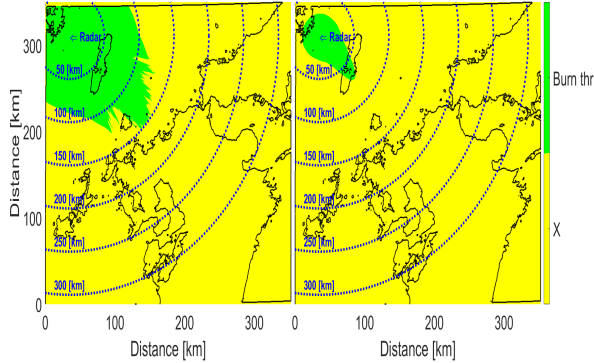
표 3. 각각의 RCS별 재밍 신호보다 표적에 반사되어 돌아오는 세기가 더 강한 구간
Table 3. The distance where $P_{R.Radar} > P_{R.Jamm}$ for each RCS.

RCS [m ²]	EIRP [dBm]	
	40	50
80	71.7 km	22.5 km
20	35.7 km	10.8 km
8	22 km	5.4 km

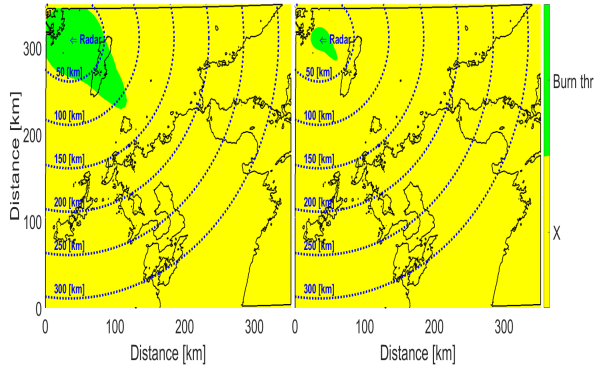
결과를 이용해 재밍 유효거리를 산출할 수 있다.

재밍 유효거리는 표적으로부터 반사되어 돌아오는 신

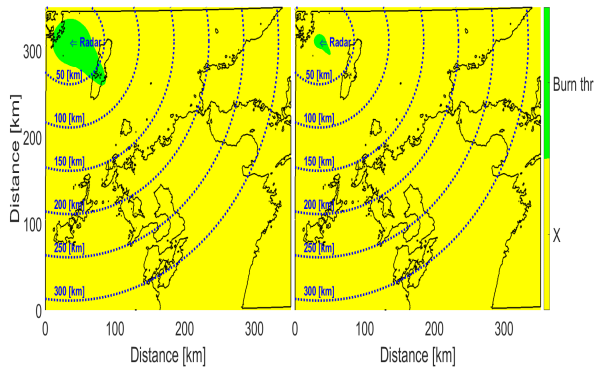
호와 재밍 신호의 수신 세기의 비율인 J/S비를 고려하여 계산하여야 한다. J/S비가 10 dB일 때, 제안하는 M&S 기



(a) $RCS=80m^2$, EIRP=40 dBm (left), 50 dBm (right)



(b) $RCS=20m^2$, EIRP=40 dBm (left), 50 dBm (right)



(c) $RCS=8m^2$, EIRP=40 dBm (left), 50 dBm (right)

그림 8. 제안하는 M&S 기법으로 계산한 실제 지형과 지구 곡률이 반영된 재밍 유효거리 분석

Fig. 8. Analysis of the burn through range using proposed M&S technique in which the actual terrain profile and the earth curvature are reflected.

법을 이용하여, 고도 1,000 m에서 분석 영역에 대해 재밍 유효거리를 분석하여 그림 8에 나타내었다. 표적의 RCS가 작아질수록 재밍 신호의 세기에 비해 에코 신호의 세기가 약해져 재밍 유효거리의 범위가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 RCS를 가진 표적에 대하여, 재머의 유효 복사 전력이 작아짐에 따라서 재밍 유효거리의 범위가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이처럼, 제안하는 M&S 기법을 이용하여 분석 영역에 대한 지형 정보와 지구 곡률이 반영된 재밍 유효거리 분석이 가능한 것을 확인했다. 계산 결과를 이용하여, 레이더의 체계 운용시 다양한 표적에 대한 정보를 기반으로 레이더 성능 및 재머에 의한 영향을 사전에 분석할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 실제 지형 정보와 지구 곡률이 반영된 재밍 유효거리 분석을 할 수 있는 M&S 기법을 제안한다. Altair사의 Winprop 소프트웨어를 이용해 레이더로부터 표적까지의 신호 전달 세기를 지형에 의한 차폐 및 반사, 그리고 지구 곡률을 반영하여 계산하고, 이 결과를 토대로 레이더와 재머의 제원, 표적의 RCS를 반영하여 재밍 유효거리를 분석하였다. 남해 임의 위치에 레이더를 두고 남동 방향으로 약 400 km 거리에 대하여 제안하는 M&S 기법을 적용하여 재밍 유효거리를 분석하였다. 분석 결과에는 지구 곡률에 의해 레이더 지평선 거리 이상에서 음영 지역이 생기는 것과 지형에 의한 차폐 및 반사에 의한 영향이 반영되는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제시하는 M&S 기법을 이용하여 재머가 존재하는 전자전 환경에서, 재밍 신호에 의한 레이더 탐지 성능의 영향을 미리 분석해 대응할 수 있는 체계를 갖출 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and H. W. Moon, et al., "Development of modeling & simulation tool for long range radar considering operational environment in time domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 7, pp. 591-602, Jul.

- 2019.
- [2] M. H. Park, W. J. Jeon, H. S. Kim, S. W. Kwon, H. W. Moon, and K. W. Lee, "Radar performance variation according to the change of atmospheric refractive index," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 8, pp. 743-750, Aug. 2021.
- [3] J. S. Lim, G. S. Chae, "Jamming effect of stand-off jammer to main lobe of LPI radar," *Journal of Convergence for Information Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 16-21, Mar. 2020.
- [4] R. Wahl, G. Wölfle, "Combined urban and indoor network planning using the dominant path propagation model," in *1st European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2006)*, Nice, Nov. 2006, pp. 1-6.
- [5] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Boca Raton, FL, Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [6] B. E. Moen, O. J. Møllerlækken, N. Bull, G. Oftedal, and K. H. Mild, "Accidental exposure to electromagnetic fields from the radar of a naval ship: A descriptive study," *International Maritime Health*, vol. 64, no. 4, pp. 177-182, Dec. 2013.
- [7] D. K. Barton. S. A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia(Electronic Edition)*, Boston, MA, Artech House, 1998.
- [8] Z. Konstantinos, S. Alexios, and T. Charisios, "Low observable principles, stealth aircraft and anti-stealth technologies," *Journal of Computations & Modelling*, vol. 4, no. 1, pp. 129-165, Jan. 2014.

허 준 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0151-484X>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 2월~현재: 아주대학교 AI융합네트워킹학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 대류권 전파 해석

김 상 수 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2606-0947>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
2007년 12월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 전자공격 기법 개발

문 호 상 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1128-7249>



2006년 8월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
2008년 8월: 경희대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 7월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나, EM 시뮬레이션

최 남 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8287-3312>



2002년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 10월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 신호처리, 방향탐지

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과 (공학사)

2000년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과 (공학석사)

2003년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과 (공학박사)

2003년~2006년: KT연구소 선임연구원

2006년~현재: 아주대학교 전자공학과 교

수

[주 관심분야] 전자장 해석, 레이돔, 배열 안테나