

포물형 방정식을 이용한 레이다 표적 탐지의 굴절에 의한 오차 분석 연구

Analysis of Radar Target Detection Error Caused by Refraction Using Parabolic Equation

허준* · 양준모* · 박민규** · 서영광** · 박용배*.*.*

Jun Heo* · Junmo Yang* · Min-Kyu Park** · Young-Kwang Seo** · Yong Bae Park*.*.*.*

요 약

레이다를 이용한 표적 탐지과정에서 전자파의 굴절에 의한 오차가 발생하며, 전자파의 경로 분석을 통해서 표적의 실제 위치를 예측하여 오차를 분석하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 레이다의 운용환경에 맞추어 표적탐지 오차를 분석하는 방법을 제안하였다. 레이다 운용환경을 고려하기 위해 레이다 설치 위치와 분석 영역에 대한 굴절률을 계산했고, 포물형 방정식을 이용해 전자파의 굴절 경로를 예측하는 프로세스를 제안하였다. 제안하는 방법을 이용해 레이다가 판단한 표적의 위치와 실제 표적의 위치를 분석하여 비교하였다.

Abstract

When detecting targets using radars, errors may occur owing to the refraction of electromagnetic waves. It is necessary to analyze these errors by predicting the true location of the target through a path analysis of the electromagnetic wave. In this study, we develop a method for analyzing the target detection error based on the operating conditions of the radar. To consider the radar operating conditions, we calculate the refractive index for the radar installation location and analysis area, and develop a process for predicting the refraction path of electromagnetic waves using a parabolic equation. Using the developed method, the location of the target determined by the radar and the location of the actual target using the developed method are analyzed and compared.

Key words: Refractive Index, Radar Detection Error, Parabolic Equation, Atmosphere Conditions

I. 서 론

레이다의 표적 탐지 오차의 발생 원인에는 대기에 의한 전자파의 굴절 현상이 있다. 특히 장거리 환경에서 레

이다를 운용하는 경우, 전자파가 굴절되는 정도가 커져 이에 대한 분석이 필요하다. 전자파의 굴절은 대기 환경에 의해서 발생하는 현상으로 전파 경로와 진행 속도에 변화를 주어 표적에 대한 탐지 오차를 발생시킨다. 표적

「이 연구는 2021년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

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

**한화시스템 (Hanwha Systems Co.)

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

· Manuscript received March 18, 2022 ; Revised April 11, 2022 ; Accepted May 13, 2022. (ID No. 20220318-027)

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

탐지 오차는 고도와 거리에 대해서 모두 발생하게 된다. 오차가 발생하는 원인으로는 첫 번째로 레이더의 안테나가 조향하는 방향과 전자파의 진행 경로가 일치하지 않기 때문이다. 두 번째는 전자파의 진행 경로에 대해서 굴절률이 변하면 진행 속도가 변하기 때문이다. 따라서, 표적에 대한 거리, 고도 오차를 모두 분석하기 위해서는 레이더 운용환경의 대기 환경을 고려하여 전자파의 전파 경로와 진행 속도를 예측하는 방법이 필요하다.

기존 연구에서는, 광선 추적법과 레이더 운용환경을 고려한 대기 굴절률을 이용해 표적 탐지의 고도 오차를 분석하였다^[1]. 하지만 표적 탐지 오차를 고도 오차에만 집중해서 분석하였고, 전자파의 진행 속도도 오차에 영향을 미친다는 점에서 더 자세한 분석이 필요하다. 현재까지 국내의 레이더 운용환경을 고려하여 레이더의 표적 탐지의 고도, 거리 오차를 종합적으로 분석한 사례가 없다. 본 논문에서는 레이더의 안테나로부터 전자파의 대기 중 경로 분석을 진행하였고, 경로에 대한 굴절률 분석을 통해 전자파의 진행 속도를 고려하여 표적에 대한 고도, 거리 오차를 분석하였다. 장거리 레이더 운용 상황을 가정하여, IDW(inverse distance weighted) 보간 방법을 이용해 운용환경의 시작 위치와 끝 위치의 굴절률을 계산하여 분석에 사용하였다. 굴절률 보간에 필요한 기상 측정 자료는 국내의 고층기상관측소에서 제공하는 자료를 이용하였다^[2]. 전자파의 진행 경로 분석을 위해서는 대기 굴절률이 고려 가능한 수치해석 방법이 필요하다. 포물형 방정식은 Helmholtz 파동 방정식을 근사하여 풀어내는 모델로 저고도 영역에서 대기 굴절률을 고려하여 전자파의 경로 손실(path loss)를 계산할 수 있다^[3]. 본 논문에서는 IDW 보간을 이용한 2차원 굴절률과 포물형 방정식의 해를 이용해서 전자파의 경로와 표적 탐지 오차를 분석하였다. II 장에서는 구성된 알고리즘에 관하여 기술하였고, III 장에서는 전파 경로의 예측 결과 및 표적탐지 오차에 대한 결과를 기술하였다.

II. 본 론

레이더의 표적 탐지는 그림 1에서와 같이 레이더의 안테나가 조향하고 있는 방향과 전자파가 표적까지 왕복한

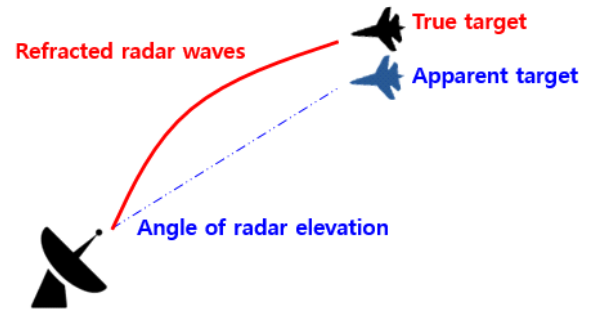


그림 1. 레이더의 표적 탐지 및 오차

Fig. 1. Radar target detection and error.

시간을 이용하여 계산된다. 전자파의 경로는 대기에 의한 영향으로 굴절되기 때문에, 실제 표적의 위치와 레이더가 탐지한 위치에 대해서 거리, 고도 오차가 발생하게 된다. 따라서, 레이더의 표적 탐지 오차를 분석 및 예측하기 위해서는 레이더와 표적 사이의 대기 환경에 의한 굴절 현상 분석과 전자파의 전파 분석이 필요하다.

굴절 현상을 분석하기 위해서는 분석 위치에 대한 굴절 계수 계산이 필요하다. 굴절 계수 N 은 ITU R P. 453에서 식 (1)과 같이 정의하고 있다^[4].

$$N = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

P 는 기압(hPa), e 는 수증기압(hPa), 그리고 T 는 기온(K)을 의미한다. 식 (1)과 같이 굴절 계수 계산에는 기상 정보가 필요하고, 이 정보들은 국내 고층기상관측소에서 매일 측정하여 제공하고 있다. 계산에 사용한 고층기상관측소의 위치는 그림 2와 같으며, 각 관측소의 번호와 자세한 위치는 표 1과 같다.

기상관측소에서 제공하는 기상정보를 이용해 굴절 계수를 계산하면, 그림 2의 각각의 기상관측소 위치에서의 값을 의미하게 된다. 하지만 실제 레이더 운용환경은 기상관측소에서 멀리 떨어진 임의의 위치일 수 있기 때문에 이에 대해서 보간할 방법이 필요하다. IDW 보간 방법은 값을 이미 알고 있는 위치와 값을 구하려는 위치 사이의 거리를 이용해 값을 보간하는 방법이다. 기상관측소의 위치와 보간할 위치 사이의 거리를 d_i 라고 할 때, 기상관측소별 가중치를 고려한 보간값 u_i 는 식 (2)와 같이 계산된다.



그림 2. 국내 고층기상관측소 위치정보
Fig. 2. Location of domestic meteorological stations.

표 1. 국내 고층기상관측소 위치정보 상세
Table. 1. Information of the stations.

Station number	Station
47102	Baengnyeong-do
47104	Gangneung
47122	Osan
47138	Pohang
47158	Kwangju
47169	Heuksan-do
47186	National Typhoon Centre

$$u_i = \frac{\sum_{k=1}^n \omega_k m_k}{\sum_{k=1}^n \omega_k}$$

$$\omega_i = \frac{1}{d_i} \quad (2)$$

식 (2)를 이용해 7개의 기상관측소에서의 굴절 계수를 계산해 그림 2의 점 A, B의 위치에서 보간값을 계산한 결과가 그림 3과 같다.

본 논문에서는 전자파의 전파 해석을 위해 계산된 굴절 계수와 포물형 방정식 기법을 사용하였다. 포물형 방정식의 해는 식 (3)과 같이 계산된다^[5].

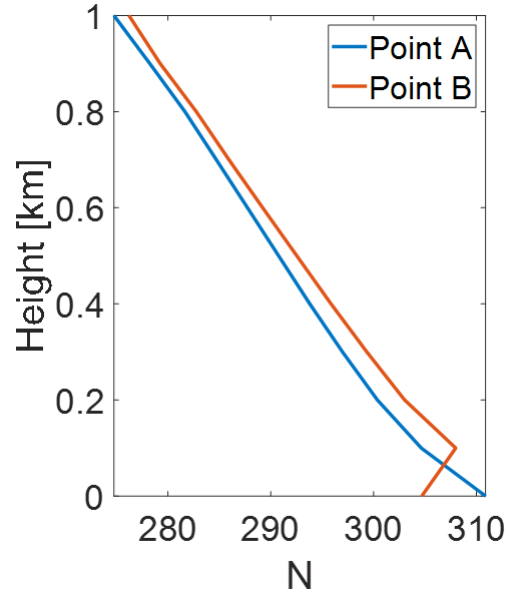


그림 3. IDW 방법을 이용한 굴절 계수 계산 결과
Fig. 3. Refractivity using IDW method.

$$u(z + \Delta z, x) = e^{ik_0(m(z,x)-1)\Delta z} \times F^{-1}\left\{e^{i(\sqrt{k_0^2-p^2}-k_0)\Delta z} F\{u(z,x)\}\right\} \quad (3)$$

$p = k_0 \sin \theta$, z, x 는 각각 고도, 거리를 나타내며, u 는 필드의 세기, k_0 는 파수, m 은 지구 곡률이 반영된 굴절률, θ 는 지평선 기준 레이더의 안테나가 조향하는 각도를 의미한다. 식 (3)에서, 임의의 거리에서의 필드 세기 $u(z + \Delta z, x)$ 를 계산하기 위해서 이전 단계의 값인 $u(z, x)$ 이 필요하다. 그렇기 때문에 포물형 방정식의 계산을 시작하기 위해서는 거리 0 m에서의 안테나 패턴이 필요하다. 포물형 방정식의 계산은 장거리 환경을 고려하는 경우가 많아, 안테나 패턴의 메인 빔만을 가정하여 가우시안 안테나 패턴을 주로 사용한다. 가우시안 안테나 패턴은 빔의 너비와 고도각을 쉽게 변경할 수 있다는 장점이 있다. 계산에 사용된 안테나 패턴은 식 (4)와 같이 계산된다. θ_{bw} 는 빔의 너비를 의미한다.

$$f(p) = \exp\left[\frac{-p^2 \ln 2}{2k_0^2 \sin^2(\theta_{bw}/2)}\right] \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)를 이용해 포물형 방정식을 계산하는 과정은 그림 4와 같다. 거리 $z = 0$ 인 시작점으로부터 식

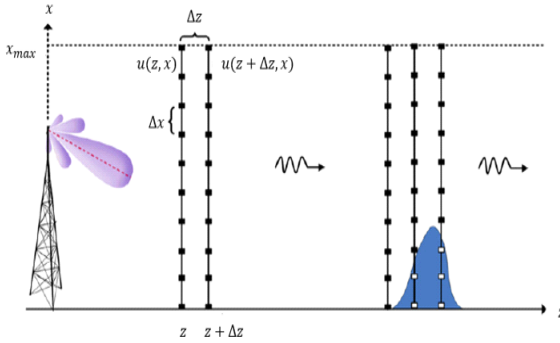


그림 4. 포물형 방정식 계산 과정
Fig. 4. The calculation process of parabolic equation method.

(4)를 이용해 $u(0, x)$ 를 계산하고, 식 (3)을 이용해 한 단계씩 거리별로 진행하며, $u(z + \Delta z, x)$ 를 계산하여 전자파의 전파를 분석한다. 포물형 방정식의 계산 결과는 거리, 고도에 대해서 경로 손실로 나타난다. 임의로 안테나를 고도 500 m에 위치시키고, 빔폭과 고도각을 각각 1°, 2°로 설정하여 계산하였다. 계산 결과로 거리, 고도 별 경로 손실의 분포를 확인한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 붉은색 실선은 레이더의 안테나가 조향하고 있는 방향을 나타낸다. 경로 손실값이 가장 낮은 영역은 푸른색 영역으로, 가장 푸른 영역이 지나가는 경로를 보면 붉은색 실선보다 위쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 레이더의 안테나가 조향하고 있는 방향보다 전자파가 더 위

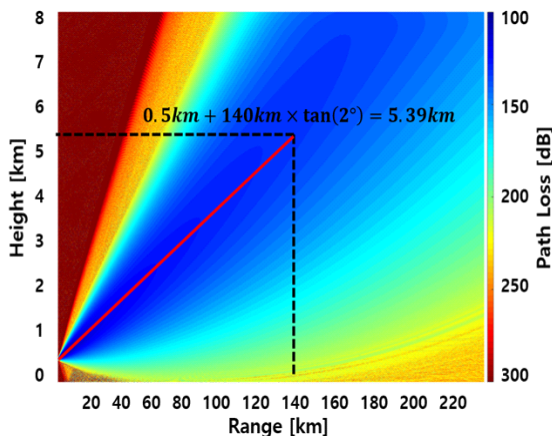


그림 5. 포물형 방정식 계산 결과(안테나 고도: 500 m, 빔폭 1°, 조향각 2°)
Fig. 5. The path loss result of the parabolic equation.

쪽으로 굴절되어 전파되는 것을 의미한다. 더 정확한 분석을 위해서는 전자파의 경로를 분석하여 안테나의 조향 방향과의 비교가 필요하다. 그림 5의 결과를 일정 거리 간격으로 나누어, 각각의 거리에서 고도별로 경로 손실이 가장 낮은 값을 추적하는 방법으로 전자파의 경로를 분석하였고, 그림 6에 나타내었다.

이 결과는 거리별로 전자파 세기가 가장 센 고도를 추적한 것으로 안테나 메인 빔의 전파 경로를 의미한다. 정확한 비교를 위해서 그림 5에서 거리 140 km일 때 안테나가 조향하고 있는 고도를 계산하면 약 5.39 km로 계산된다. 하지만 그림 6에서의 분석 결과로는, 거리 140 km에서 고도 약 6.67 km에 안테나의 메인 빔이 위치해 있는 것으로 분석된다. 즉, 레이더가 조향하고 있는 경로와 실제로 전자파가 진행하는 경로에 차이가 있어 고도 오차가 발생하는 것을 의미한다.

레이더가 표적을 탐지했을 때 전자파의 경로가 굴절됨에 따라서 거리 오차도 발생하게 된다. 거리 오차는 전자파의 경로가 굴절되므로, 그리고 경로별 굴절을 변화에 의한 전파 속력 변화에 의해서 영향을 받는다. 전자파가 진행함에 따라서 굴절률값이 미세하게 변하기 때문에 전자파의 속력이 달라진다. 전자파의 속력을 자유공간을 가정한 3×10^8 m/s으로 계산하면 실제 표적의 위치와 비교했

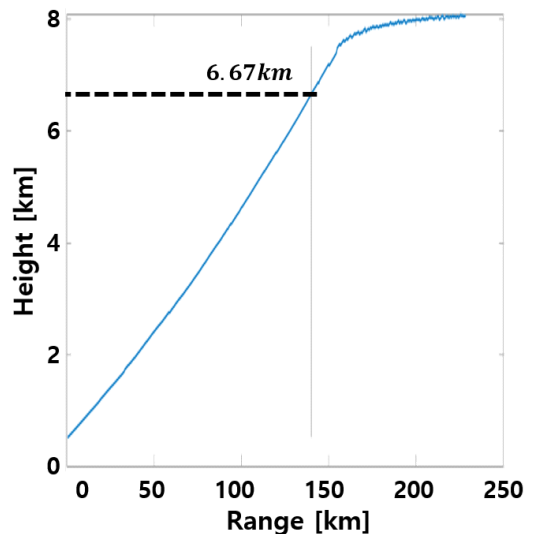


그림 6. 안테나 메인 빔의 경로 분석 결과
Fig. 6. Result of the path for antenna main beam.

을 때, 약간의 거리 오차가 생기게 된다. 따라서, 종합적으로 거리 오차를 분석할 필요가 있으며, 이를 위해서는 레이더로부터 방사된 후 표적에 반사된 전자파가 레이더에 도달하기까지의 시간 τ 가 필요하다. 그림 6과 같이 전자파의 진행 경로를 분석하고, 경로의 위치별로 굴절률값을 구해 전자파의 속력을 계산하여, $\tau/2$ 의 시간 동안 굴절 경로상으로 어디까지 진행했는지를 찾으면 경로의 굴절에 의한 오차, 그리고 전파 속도 변화에 의한 오차를 모두 고려할 수 있다. 위 과정을 고려한 레이더 표적탐지 오차 계산과정은 그림 7과 같다.

먼저 전자파의 전파 경로를 분석해야 한다. 그림 4와 같이 포물형 방정식으로 계산된 전파 경로는 거리 방향 성분의 길이 Δz 만큼의 거리에 대해서 해석된다. Δz 는 해석하는 주파수의 파장보다 긴 길이로 임의로 설정할

수 있다^[5]. 안테나로부터 $\Delta z, \Delta 2z, \dots, z_{\max}$ 만큼의 거리 별로 전파 경로 각각 점 P_1, P_2, \dots, P_i 로 구분하고, 대응하는 굴절률을 찾아 식 (5)를 이용해 각 점에서의 전자파의 속력을 계산한다.

$$v = 3 \times 10^8 \times \frac{1}{n} \quad (5)$$

n 은 매질의 굴절률을 의미한다. 이 과정으로 각각의 점 사이의 거리와 전자파의 속력을 알 수 있기 때문에, 점과 점 사이를 전자파가 진행하는 데 걸린 시간을 계산할 수 있다. 각각의 경로를 진행하는 데 걸린 시간을 누적시켜 총합이 $\tau/2$ 가 될 때까지 그림 7의 과정을 반복하면 전파 경로상에서의 표적 위치를 찾을 수 있다. 이 위치를 레이더의 안테나가 조향하는 방향에서의 표적 위치와 비교하면 레이더 운용 시 발생하는 거리 및 고도 오차를 계산할 수 있다. 분석을 위해 레이더로부터 표적 그리고 다시 레이더로 전자파가 돌아오는 데 걸린 시간 τ 가 0.6 ms에서 1.4 ms 범위라고 가정하였다. 레이더로부터 표적까지의 직선거리를 계산하고, 안테나의 조향각 θ 와 안테나의 고도 h_s 를 이용해 식 (6) 및 식 (7)로 표적의 예상 위치 (apparent location)의 거리 r 과 고도 h 를 계산했다.

$$r = \frac{\tau \times 3 \times 10^8}{2} \times \cos(\theta) \quad (6)$$

$$h = \frac{\tau \times 3 \times 10^8}{2} \times \sin(\theta) + h_s \quad (7)$$

표적의 예상 위치와 본 논문에서 제안하는 방법으로 실제 위치(true location)를 계산하여 비교한 결과가 그림 8과 같다. 레이더에서 예상한 표적의 거리는 실제 표적의 거리와 최대 0.4 km 뒤에 위치한 것으로 분석되었다. 또한, 예상한 표적의 고도는 실제 고도보다 최대 1.46 km 아래에 있는 것으로 분석되었다. 계산된 표적의 거리, 고도 결과는 포물형 방정식 계산에 사용한 굴절률로 예측된 전파의 굴절 현상에 의해서 결정되는 값이기 때문에, 일정한 규칙성은 보이지 않는다. 본 논문에서 제안하는 표적 탐지 오차 분석 방법은 사전에 레이더의 오차 발생 정도를 예측할 수 있게 하여 레이더 운용 시 성능 저하 원인 파악 및 보정에 활용이 가능할 것으로 보인다.

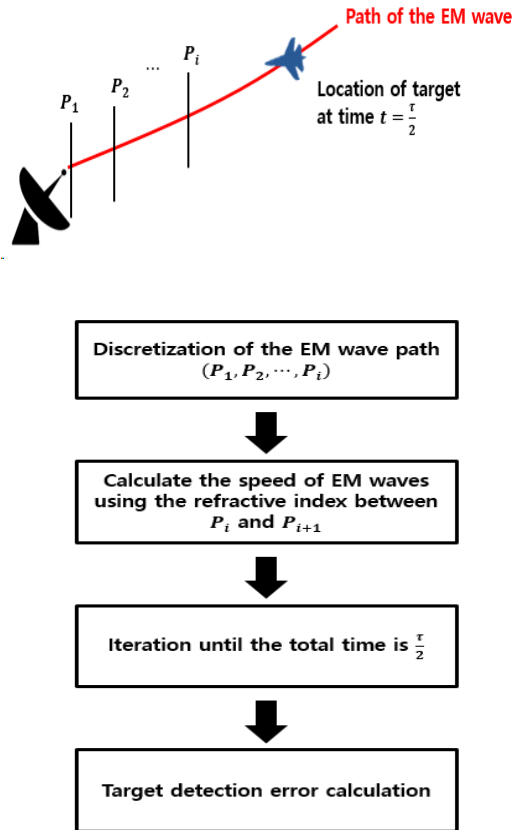


그림 7. 레이더 표적탐지 오차 계산과정

Fig. 7. The calculation process of detection error in radar system.

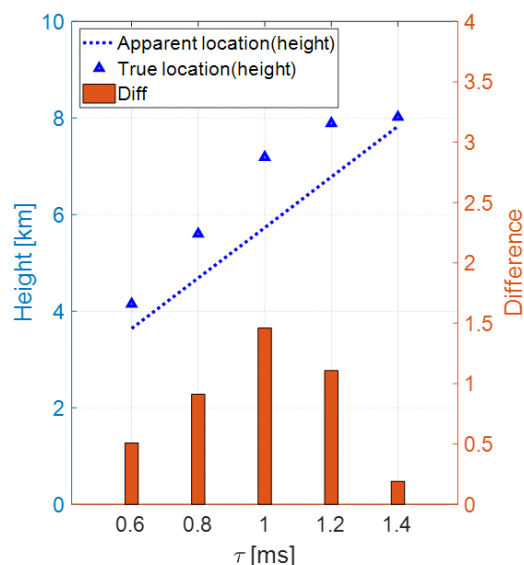
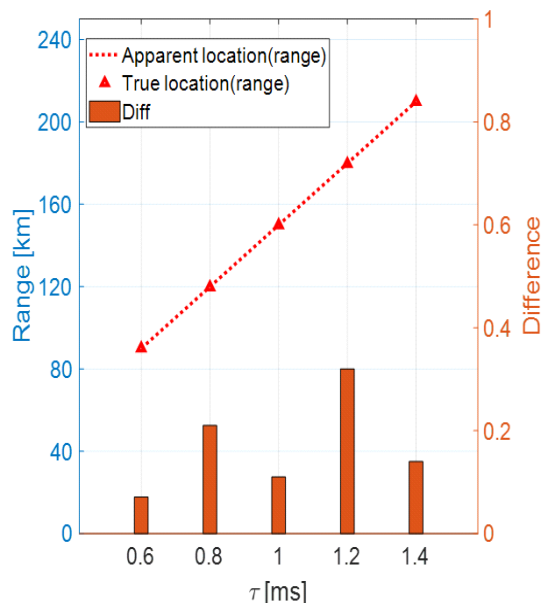


그림 8. 레이더 표적탐지 오차 계산 결과

Fig. 8. The calculation results of detection error in radar system.

III. 결 론

레이더를 이용한 표적 탐지과정에서 전자파의 굴절에 의한 오차 발생은 필연적이다. 오차로 인해 발생하는 레이더의 성능 저하는 내부적인 시스템 설계나 알고리즘

등을 이용해 어느 정도 보완이 가능하겠지만, 근본적으로 표적의 탐지 오차를 분석 및 예측할 수 있다면, 보다 합리적으로 레이더 운용이 가능할 것이다. 본 논문에서는 레이더의 운용환경에 맞추어 표적탐지 오차를 분석하는 방법을 제안하였다. 레이더의 운용환경을 고려하기 위해서 국내 기상관측소에서 제공하는 기상 데이터를 이용해 굴절률을 계산하였고, 이 굴절률을 2차원 보간하여 레이더가 설치된 위치와 분석 영역에 대해서 굴절률값을 새로 도출해냈다. 그리고 포물형 방정식을 이용하여 레이더 운용 시 거리 및 고도 별 경로 손실을 계산하였다. 이 경로 손실값을 이용하여 안테나 메인 빔의 경로를 분석하였고, 계산된 경로를 이용하여 실제 표적의 위치를 예측하는 방법을 제안하였다.

References

- [1] S. Kwon, J. H. Lee, Y. Kwon, K. Lee, H. S. Kim, and W. Sun, "Analysis of an altitude detection accuracy by a weather effect for long range and multi function radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 1. pp. 123-129, Jan. 2014.
- [2] University of Wyoming, "Department of atmospheric science," 2022. Available: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [3] M. Levy, *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*, London, The Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [4] *The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data*, ITU-R P.453-14, Aug. 2019.
- [5] G. Apaydin, L. Sevgi, *Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2017.

허 준 [아주대학교/석·박사통합과정]

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



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

서 영 광 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5340-2562>



2012년 2월: 부산대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2012년 3월~2014년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 3월~2019년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)
2019년 9월~2020년 2월: 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원
2020년 3월~현재: 한화시스템 레이더연구소 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 및 소나 신호처리, 배열 신호처리

양 준 모 [아주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2888-0340>



2021년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 2월~현재: 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정
[주 관심분야] 우주 전파, 안테나, 머신러닝 등

박 용 배 [아주대학교/교수]

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



1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2000년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2003년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2006년~현재: 아주대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC

박 민 규 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1658-3920>



2016년 8월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2016년 7월~현재: 한화시스템 레이더연구소 선임연구원
2021년 3월~현재: 고려대학교 전기전자공학부 (공학석사)
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이더 빔 신호처리, 최적화 알고리즘