

포물형 방정식을 이용한 레이더 안테나 고도각도 보정 연구

Radar Elevation Angle Correction Using Parabolic Equation Method

허준* · 서영광** · 박민규** · 배준우** · 박용배*,***

Jun Heo* · Young-Kwang Seo** · Min-Kyu Park** · Joonwoo Bae** · Yong Bae Park*,***

요 약

레이더는 전자파를 송신하고 나서 돌아온 신호를 해석해서 특정 기능을 수행하는 시스템이다. 레이더와 미지의 표적 사이에서 오고 가는 전자파는 대기를 통해 진행하면서 굴절 현상을 겪게 되는데, 이는 레이더 운용 시 결과 해석에 오차를 만들 가능성을 증가시킨다. 사전에 전자파가 어느 정도로 굴절되어 진행하는지 예측할 수 있다면, 미지의 표적이 운용될 가능성이 큰 영역을 목표로 전자파가 진행할 수 있도록 하여 레이더 운용에 응용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 조향각을 따라서 전자파가 진행했을 경우와 굴절하여 진행했을 경우를 분석하여, 안테나의 조향각을 보정하는 방법을 제안했다. 4곳의 임의의 위치에 대해서 보정 방법을 적용함으로써 안테나의 주 빔이 목표로 하는 영역을 향하게 설정할 수 있음을 확인했다.

Abstract

A radar system transmits radio waves and interprets the returned signal to perform a specific function. Radio waves traveling between the radar and an unknown target are affected by refraction as they travel through the atmosphere, which increases the possibility of errors in the interpretation of the results when the radar is operating. If it is possible to predict the extent to which radio waves are affected by refraction, this capability can be applied to radar operation to direct radio waves to an area where an unknown target is likely to be operating. In this study, a method for correcting the elevation angle of the antenna was investigated by analyzing a case in which the radio wave propagates along the elevation angle and a case in which it is refracted. It was confirmed that the main beam of the antenna can be set toward the target area by applying the correction method to four arbitrary positions.

Key words: Radar System, Parabolic Equation, Elevation Angle Correction, Refraction

I. 서 론

레이더는 전자파를 송신하여 미지의 표적으로부터 돌아오는 신호를 해석해 표적을 탐지, 구별하는 기능을 한

다. 표적으로부터 신호가 돌아와야 해석할 수 있기 때문에, 레이더에서는 원하는 방향으로 전자파를 보낼 수 있어야 기능을 확실히 수행할 수 있다. 대기를 통해 송, 수신되는 전자파는 레이더와 표적 사이를 오고 가는 과정

「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 July 5, 2022 ; Revised July 14, 2022 ; Accepted August 11, 2022. (ID No. 20220705-055)

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

에서 굴절 현상에 의해 진행 경로에 변화가 생긴다. 굴절 현상으로는 레이더의 안테나가 하는 방향에 대해서 전자파가 아래로 굴절되어 진행하는 초굴절, 위로 진행되는 아굴절, 그리고 특정 높이의 층에 갇혀 진행되는 덕트 현상이 있다^[1].

이러한 굴절 현상은 레이더가 미지의 표적을 탐지하게 되었을 때, 탐지 거리나 표적의 방위 및 고도 판단에 오차를 발생시킬 수 있는 원인이 된다. 레이더를 운용하기에 앞서 전자파가 어떻게 굴절되어서 어느 방향으로 진행하는지 사전에 예측하여 레이더 안테나의 고도각을 어느 정도로 조정해야 하는지 알 수 있으면, 굴절 현상으로 틀어지는 안테나의 주 빔의 방향을 원하는 위치로 보정시킬 수 있다. 안테나의 위치로부터 장거리의 영역까지 실제 기상정보를 토대로 계산한 굴절률을 이용해 전자파의 굴절 현상을 분석하면 보다 자세한 안테나 고도각의 보정이 가능하겠으나, 장거리에 걸친 실제 기상정보를 획득하는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 실측되는 국내의 여러 고층 기상관측소의 기상정보^[2]를 2차원 보간 하여 원하는 영역에서의 굴절률을 고려하여야 한다.

본 논문에서는 안테나의 보어사이트 방향과 안테나로부터 전자파가 굴절되는 방향을 분석하여, 원하는 위치로 전자파를 전달하는 데 필요한 안테나의 고도각 보정 수치를 계산하는 방법을 제안한다. 분석 위치에서의 굴절률을 파악하기 위해서 2차원 보간 방법의 하나인 IDW (inverse distance weighted) 보간법을 이용했고, 전자파의 굴절 방향 판단과 레이더 안테나의 고도각 보정을 위한 계산에는 2차원 포물형 방정식을 사용하였다^[3]. 2차원 포물형 방정식은 Helmholtz 파동 방정식을 근사하여 거리, 고도축의 2차원 평면에서 전자파의 경로손실을 계산할 수 있는 수치 모델이다. 포물형 방정식 계산으로 구해진 거리, 고도별 경로손실을 분석하면 전자파의 굴절 경향을 판단할 수 있다^[4]. 본 논문에서는 참고 문헌 [4]와 동일한 방법을 이용하여 전자파의 굴절 경향을 판단하였다. 표적이 탐지되었을 때를 가정하여 표적의 측위 오차를 분석한 참고 문헌 [4]와 다르게, 본 논문에서는 표적을 탐지하기 전에 안테나를 조향하였을 때 원하는 방향으로 전자파가 전파되도록 안테나의 고도각을 보정하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 고도각을 보정하고 나서, 다

시 굴절 정도를 판단하여 원하는 영역으로 안테나의 주빔이 향할 때까지 반복된다. 여러 위치를 목표로 제안하는 방법을 적용하여 반복이 종료되었을 때 안테나의 주빔이 원하는 영역으로 향해 있는 것을 확인하였다.

II. 본 론

미지의 표적에 대한 탐지, 구별의 기능을 하는 레이더는 표적이 있을 가능성이 큰 특정 영역을 향하도록 레이더 안테나의 고도각을 설정하여 운용한다. 하지만 대기층을 통해 전자파가 진행함에 따라 굴절되기 때문에, 안테나의 고도각에 따른 탐지 영역과 실제로 탐지되는 영역에는 차이가 발생한다.

이러한 현상을 그림 1에 나타내었다. 목표로 하는 영역을 향해 안테나를 조향시켰기 때문에, 전자파가 조향 방향으로 진행하여 그림 1의 파란 사각형을 탐지하는 것처럼 보이지만, 실제로는 위 혹은 아래로 굴절되어 붉은 사각형을 탐지하게 된다.

따라서 실제로 탐지되는 영역과 목표로 한 탐지 영역의 고도차를 보상하여 레이더 안테나의 고도각 보정이 필요하다. 우선 실제로 탐지되는 영역이 어디인지를 판단하기 위해서는 굴절률을 계산하여 굴절 정도를 확인해야 한다. 굴절률 계산에는 기상정보가 필요하고, 국내의 고층 기상관측소에서 레인 존데를 이용해 기상관측을 진행하여 제공하고 있다^[2]. 제공되는 정보에는 기온, 기압, 수증기량 등 굴절률 계산에 필요한 값은 모두 포함되어 있

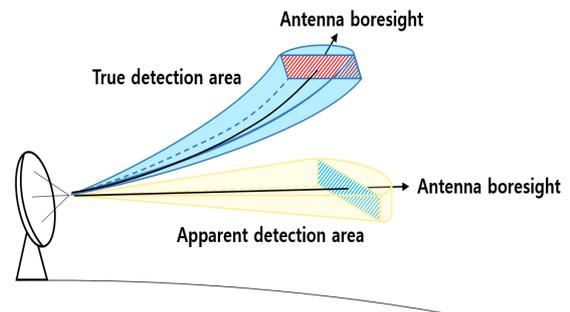


그림 1. 레이더에서 전자파의 진행과 실제 탐지 영역
Fig. 1. Radio wave propagation from the radar and true detection area.

어, 정보를 제공한 관측소의 위치에서의 고도별 굴절률 계산이 가능하다. 레이다를 운용하는 위치와 탐지하려는 영역 각각의 위치에서 기상정보를 측정하여 굴절률을 계산할 수 있다면, 더욱 자세한 분석이 가능하겠으나, 이는 물리적으로 측정이 불가능하다. 따라서 이미 값을 알고 있는 관측소에서의 굴절률값을 이용해 원하는 위치에서의 굴절률을 보간을 통해 추측하여야 한다. 본 논문에서는 2차원 보간 방법 중 이미 값 u_i 를 알고 있는 위치와 값을 알고자 하는 위치의 거리 d_i 에 가중 ω_i 를 두어 보간을 하는 IDW 보간 방법을 이용한다. 보간의 결과로 나오는 값 u 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i u_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

$$\omega_i = \frac{1}{d_i} \tag{1}$$

굴절 정도를 확인하기 위해서 계산에 사용하는 포물형 방정식은 지구의 곡률을 계산에 반영할 수 있도록 지구 곡률이 반영된 수정 굴절률을 입력으로 사용한다. 따라서 고층기상관측소의 기상정보를 이용해 수정 굴절률을 계산하여 식 (1)을 적용하여야 포물형 방정식 계산이 가능하다. 굴절률 n 과 수정 굴절률 m 은 식 (2) 및 식 (3)과 같은 관계식으로 계산할 수 있다^{[1],[5]}.

$$n = 1 + 77.6 \times 10^{-6} \frac{P}{T} + 0.373 \frac{e}{T^2} \tag{2}$$

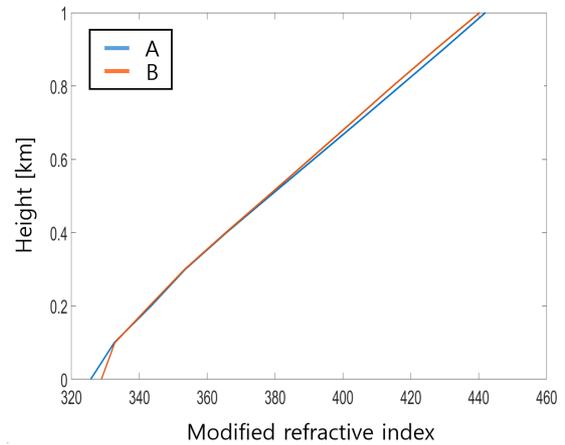
$$m = n + \frac{z}{a} 10^6 \tag{3}$$

P 는 기압, T 는 기온, e 는 수증기압, z 는 고도, 그리고 a 는 지구 반지름을 의미한다. 식 (2) 및 식 (3)을 이용해 수정 굴절률을 계산하고, 식 (1)의 보간을 이용하여 임의의 영역 A~B 구간에 대한 굴절률 보간결과가 그림 2와 같다. 그림 2에서의 5개의 숫자 표시는 고층기상관측소의 번호를 의미한다. 이러한 과정으로 레이다의 위치로부터 탐지 영역까지의 굴절률을 추측이 가능하며, 이 값은 포물형 방정식의 입력으로 사용된다.

포물형 방정식의 계산은 식 (9)으로 계산된다^[3].



(a) 임의의 구간 A~B
(a) Arbitrary region A~B



(b) 수정 굴절률 보간 결과
(b) Modified refractive index interpolation result

그림 2. 분석 영역 A~B에 대한 굴절률 보간 결과
Fig. 2. Refractive index interpolation results for analysis areas A to B.

$$u(z + \Delta z, x) = e^{ik_0(m(z,x)-1)\Delta z} \times F^{-1} \left\{ e^{i(\sqrt{k_0^2 - p^2} - k_0)\Delta z} F\{u(z,x)\} \right\} \tag{4}$$

$p = k_0 \sin \theta$, z , x 는 각각 고도, 거리를 나타내며, u 는 필드의 세기, k_0 는 파수, m 은 수정 굴절률, θ 는 지평선 기준 안테나의 고도각을 의미한다. 식 (4)에서, 거리 $z + \Delta z$ 에서의 필드 세기 $u(z + \Delta z, x)$ 를 계산하기 위해서 거리 z 에서의 필드 세기 $u(z, x)$ 가 필요하다. 따라서 계산의 시작인 거리 0 m, 즉 안테나의 위치에서부터의 필드 세기값이 필요한데 이는 식 (5)와 같이 빔폭을 θ_{bw} 로

하는 가우시안 안테나 패턴 식을 이용하여 계산된다³⁾.

$$f(p) = \exp \left[\frac{-p^2 \ln 2}{2k_0^2 \sin^2(\theta_{bw}/2)} \right] \quad (5)$$

그림 3에서는 영역 A~B에서의 수정 굴절률을 입력으로 안테나의 고도 10 m에서의 포물형 방정식 계산 결과와 탐지하려 하는 목표 위치 4곳을 가정하여 각각 P1~P4로 표시하였다. 각 위치의 거리, 고도는 (140 km, 5 km), (140 km, 6 km), (150 km, 5 km), (150 km, 6 km)이다.

P1(140 km, 5 km)을 향하도록 하는 안테나의 고도각은 약 $\tan^{-1}\left(\frac{5}{140}\right)$ 인 2.04° 정도로 계산된다. 계산된 각도를 가우시안 안테나 패턴에 적용하여 포물형 방정식을 계산하였을 때, 거리 140 km에서 안테나의 주 빔이 위치한 고도는 약 6.2645 km로 분석된다. 즉, 목표로 한 고도 5 km보다 1.2645 km만큼 더 높게 전자파가 진행하기 때문에 이에 대한 보상으로 고도각을 기존보다 낮게 설정해야 한다는 결론이 도출된다. 얼마만큼 고도각을 낮춰야 하는지에 대한 계산은 오차가 발생한 만큼을 계산에 반영하여, $\tan^{-1}\left(\frac{5-1.2645}{140}\right)$ 인 1.5284°로 계산하였다. 해당 고도각으로 포물형 방정식을 재계산하였을 때, 안테나의 주 빔은 5.1615 km를 향해 있는 것으로 분석되었고, 위 계산을 반복하였을 때 최종적으로 고도 5.1605 km에서 위 과

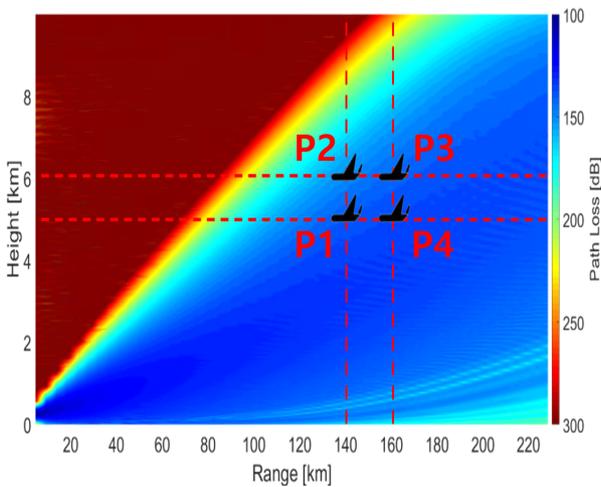


그림 3. 포물형 방정식 계산 결과 및 목표 탐색 위치
Fig. 3. Parabolic equation result and aimed detection area.

표 1. 레이더 안테나 고도각 보정 결과

Table 1. Radar antenna elevation angle correction result.

Point	Elevation angle [°]		Altitude [km]	
	Before	After	Before	After
1	2.0454	1.7584	6.2645	5.1605
2	2.4540	1.9804	6.71	5.8275
3	2.1476	1.4341	7.234	6.0035
4	1.7899	1.1376	6.7694	4.5505

정의 결과가 변하지 않는 포화상태에 이르게 되었다. 이러한 과정을 P1~P4 모두 반복한 결과 약 3회 정도의 반복으로 포화상태가 되었으며 표 1과 같은 보정 결과를 얻게 되었다. 보정 과정 후 안테나 주 빔의 고도를 분석해본 결과, P1과 P4를 목표로 설정했을 때에는 보정 후에 고도 5 km에, P2, P3은 고도 6 km에 더욱 비슷하게 조향됨을 확인했다.

III. 결 론

본 연구에서는 포물형 방정식을 이용하여, 레이더가 원하는 영역을 탐색할 수 있도록 굴절 현상을 고려하여 안테나의 고도각을 찾는 방법을 제안한다. 조향각의 방향으로 전자파가 진행했을 경우의 방향과 굴절된 전자파 진행 방향을 분석하여, 둘의 차이를 이용해 기존의 조향각을 보정하는 방법을 제시하였고, 임의의 영역에 적용한 결과로, 안테나 주 빔이 목표로 하는 영역을 향하게 설정할 수 있음을 확인했다.

References

- [1] *Effects of Tropospheric Refraction on Radiowave Propagation*, ITU-R P.834-9, Dec. 2017.
- [2] University of Wyoming, "Department of atmospheric science," 2022. Available: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [3] G. Apaydin, L. Sevgi, *Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2017.
- [4] J. Heo, J. Yang, M. K. Park, Y. K. Seo, and Y. B. Park,

"Analysis of radar target detection error caused by refraction using parabolic equation," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and*

Science, vol. 33, no. 5, pp. 403-409, May 2022.
[5] *The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data*, ITU-R P.453-14, Aug. 2019.

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

배 준 우 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6517-7112>



2007년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 12월~현재: 한화시스템 레이더연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이더 신호처리, 레이더 이미징

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 컴

퓨터 및 정보통신연구소 연구원
2020년 3월~현재: 한화시스템 레이더연구소 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 및 소나 신호처리, 배열 신호처리

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 교

수
[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