

협조표적 기반 빔 경로 모델링 및 대기 굴절률 추정

김민각*, 정용식°, 안성진*, 홍창인*, 권경일**

Beam Path Modeling and Atmospheric Radio Refractivity Estimation Based on Co-Operative Target

Min-Gak Kim*, Young-Seek Chung°, Sung-Jin Ahn*, Chang-In Hong*, Kyung-Il Kwon**

요약

대기 굴절률은 장거리 레이다 송수신 신호의 전파 경로를 곡선으로 만들어, 표적의 거리와 위치 추정에 오차를 초래한다. 대기 굴절률을 알고 있는 경우 표적추정 오차를 보상할 수 있지만, 그렇지 못한 경우 ITU-R의 평균대기 굴절률을 참고하여 표적 위치를 추정할 수 있다. 그러나 이는 실제 위치와의 오차를 초래하게 된다. 본 연구에서는 실제 대기 굴절률을 추정하기 위해 사전에 알고 있는 협조 표적의 정보를 활용하여 송수신 빔의 경로를 모델링하고, 추정된 송수신 빔의 경로를 기반으로 대기 굴절률을 실시간으로 추정하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 대기 굴절률 모델과 라디오존데를 이용한 실제 측정 데이터와의 비교를 통해 유효성을 검증하였다.

키워드 : 대기 굴절률, 빔 경로 모델, 라디오존데

Key Words : Atmospheric Radio Refractivity, Beam Path Modelling, Radiosonde

ABSTRACT

The refractive index of the atmosphere curves the path of long-range radar signals, causing errors in estimating the distance and position of targets. If the atmospheric refractive index is known, it is possible to compensate for target estimation errors. However, in cases where this information is unavailable, the target position is estimated based on the ITU global mean atmospheric refractive index. This can introduce errors compared to the actual position. In this paper, the author utilized information from co-operative target known in advance to model the path of beam, enabling real-time estimation of the atmospheric refractive index. The proposed algorithm was validated by comparing it with previous atmospheric refractive index model and actual measurement data from radiosonde.

I. 서론

레이더는 표적에 의한 반사 신호를 기반으로 표적의 위치 정보나 속도 정보를 추정한다. 표적에 대한 정보를

추정할 때, 이상적인 환경에서는 송수신 전파의 경로가 직선이라고 가정한다. 그러나 실제 환경에서 전파는 대기 환경에서 대기 굴절률의 영향을 받고, 대기 굴절률은 고도에 따른 대기압, 수증기압, 온도 등에 의해 다른

* 본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의한 연구 결과임. (계약번호 UI220077JD)

• First Author : Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, rlaalsrkr97@kw.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, yschung@kw.ac.kr, 정회원

* Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, kunho0407@kw.ac.kr; changin0058@kw.ac.kr,

** Agency for Defense Development, kikwon@add.re.kr

논문번호 : 202312-168-B-RN, Received December 19, 2023; Revised November 26, 2023; Accepted December 26, 2023

값을 갖게 된다¹¹. 이러한 고도에 따른 대기 굴절률의 변화는 전파의 전파경로에 굴절을 초래하여 직선경로가 아닌 다른 경로를 나타내게 된다. 대기 굴절률에 의한 전파의 굴절 현상은 탐지 거리가 늘어남에 따라, 직선 경로로 추정된 표적의 거리 및 위치 정보가 오차가 증가한다. 이러한 오차를 보정하기 위해서는 레이더의 운용 환경에서의 대기 굴절률을 고려하는 것이 중요하다.

ITU-R에서는 전 세계의 측정된 대기 굴절률 데이터를 이용하여 고도에 대한 지수 함수로 표현한 대기 굴절률 표준모델을 제시하였다¹². 이외에도 표면 대기 굴절률과 특정 고도에서의 대기 굴절률을 계산하여 반영한 고도에 따른 지수 함수 형태 대기 굴절률 모델도 연구되었다^{3,4}. 그러나 앞서 언급된 대기 모델들은 시공간에 대한 변화를 반영하지 못하거나, 대기 굴절률의 데이터가 필요한 단점이 있다. 대기 환경에서의 굴절률을 측정하기 위해 라디오존데를 기구에 매달아 비양시켜 지상으로부터 30km 이상 상공까지 고층기상관측을 실시한다. 이를 이용하여 측정된 데이터로 대기 굴절률을 계산할 수 있다. 그러나 라디오존데를 하루에 2번 일정 시간 간격을 두고 띄운다는 점과 국내 7개 기상관측소에서 측정된다는 점에서 시공간에 대한 변화를 반영하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 실시간 대기 굴절률 추정을 위해 위치정보를 알고 있는 협조 표적을 이용하여, 빔의 굴절 현상에 의해 휘어진 빔 경로를 이차 다항식과, 지수 함수로 각각 모델링하고, 빔 경로의 정보를 이용하여 대기 굴절률을 실시간으로 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 판단하기 위해 기존의 대기 굴절률 지수 모델과 실제 측정된 대기 굴절률을 제안하는 알고리즘의 결과와 비교하였다.

II. 대기 굴절률

대기 굴절률은 대기 중의 온도, 압력, 습도 등의 요소에 의해 결정되며, 이것이 전파의 속도와 방향을 변화시킨다. 굴절 계수(Refractivity index)에 의해 전파가 굴절되는 현상은 스넬의 법칙으로 설명할 수 있다. 스넬의 법칙은 서로 다른 매질의 경계에서 전파가 굴절될 때, 입사각과 굴절각 사이의 관계 및 각 매질에서의 속도를 다음과 같이 정의한다¹³.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

여기서 θ_1, θ_2 는 입사각과 굴절각으로, 매질 경계의 법선과 광선이 이루는 각도를 의미한다. v_1, v_2 는 각 매질에서의 전파 속력을 의미하고, n_1, n_2 는 각 매질에서의 굴절 계수를 의미한다. 대기의 굴절 계수 n 은, 대기의 굴절률 N 과 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (2)$$

이와 같이 굴절 계수와 굴절률을 따로 표현하는 이유는, 일반적으로 대기의 굴절 계수 값이 1보다 크고, 그 변동이 매우 작기 때문에 편의성을 위해 굴절률 N 을 사용하여 나타낸다. 굴절률은 다양한 대기 환경에 의해 변하는 온도, 압력, 수증기압의 변수로 결정되고, 식 (3)과 같이 표현할 수 있다¹⁴.

$$N = N_{Dry} + N_{Wet} = \frac{77.6P}{T} + \frac{3.73 \times 10^5 e}{T^2} \quad (3)$$

국내에서는 국내 7개의 기상관측소에서 라디오존데를 이용하여 고도 별 대기의 압력, 온도, 상대 습도 등의 데이터를 측정한다. 이러한 기상관측 데이터는 미국 University of Wyoming, Department of Atmospheric 홈페이지에서 획득할 수 있다¹⁵.

위의 그림에서 Wyoming Data는 2023년 7월 13일 12시 포항에서의 라디오존데 데이터를 이용하여 계산한 대기 굴절률 그래프이고, ITU Global은 ITU에서 제공하는 global mean 데이터이다. Sandia model은 Sandia에서 제안하는 지수 모델로 다음과 같다¹⁶.

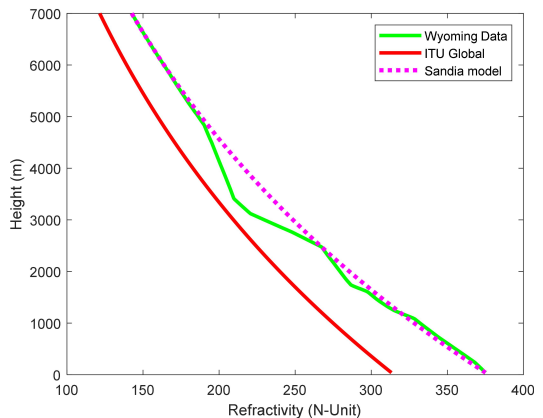


그림 1. 실제 대기 굴절률과 대기 굴절률 모델 비교
Fig. 1. Comparison of atmospheric radio refractivity models with real data

$$N(h) = N_s e^{\frac{-(h-h_s)\ln(N_s/N_b)}{(h_b-h_s)}} \quad (4)$$

N_s, N_b 는 각각 표면에서의 대기 굴절률과 최대 관심 높이에서의 대기 굴절률을 의미하고 h_b, h_s 는 각각 최대 관심 높이와 표면의 높이를 의미한다.

III. 빔의 경로 모델링 및 대기 굴절을 추정

3.1 빔 경로 모델링

대류권에서의 대기 굴절에 대한 연구는 다양한 측면으로 진행되어왔다. 그 중 대기 굴절률의 모델링에 대한 연구가 하나의 주제였는데, 이는 대류권에서의 대기 굴절률이 고도에 따른 지수 함수의 형태와 비슷하다는 점을 이용하였다. 위의 기존 연구들과 다른 측면에서, 본 논문에서는 대기 굴절률에 의해 휘는 빔이 곡선의 형태를 갖는다는 점과 위치를 알고 있는 협조 표적으로부터의 수신 신호를 이용하여 빔의 경로를 이차 다항식 및 지수 함수로 모델링하였고, 이를 기반으로 대기 굴절률을 추정하였다. 제안하는 방법의 대기 굴절률 추정 방식은 실시간으로 추정이 가능하고, 대기 굴절률을 알려고 하는 해당 환경에서 실제 신호를 송수신한 정보를 이용하기 때문에 시공간의 대한 차이를 고려할 수 있다. 먼저 빔의 경로를 추정하기 위해 협조 표적의 위치, 수신된 신호의 입사각 그리고 안테나의 현재 위치를 알고 있다고 가정한다. 빔의 경로를 모델링하기 앞서 지구 곡률을 반영하기 위해 수정 굴절률(Modified Refractivity)을 사용하고, 굴절률과의 관계는 다음과 같다⁷⁾.

$$M(y) = N(y) + 0.157y \quad (5)$$

$$M = (m - 1) \times 10^6 \quad (6)$$

식 (5)에서 y 는 높이를 의미하고, 0.157은 지구의 곡률을 고려하기 위해 반영된 지구 반지름의 역수이다. 식 (6)은 수정 굴절률과 수정 굴절 계수와의 관계를 나타낸다.

그림 2와 같이 평평한 지구의 환경에서는 식 (6)에서의 수정 굴절 계수를 이용하여 빔의 굴절을 표현할 수 있다. 그림 2에서 빔의 경로는 포물선과 같은 형태를 보인다. 빔의 경로를 모델링하기 위해 x 축 변화에 따른 높이 y 의 함수를, 포물선 형태를 잘 표현할 수 있는 이차 다항식과 지수 함수로 표현했다.

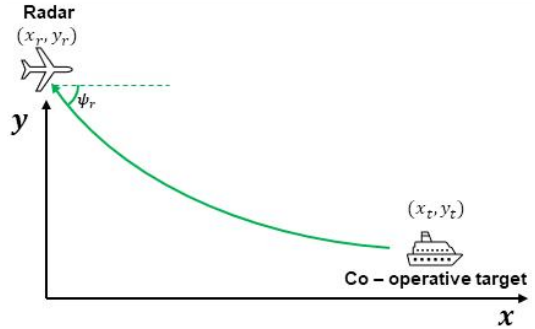


그림 2. 대기 굴절률에 의한 빔 경로 휘어짐
Fig. 2. Beam refraction by atmospheric refractivity

$$y_e = A_e e^{B_e x} + C_e \quad (7)$$

$$y_p = A_p x^2 + B_p x + C_p \quad (8)$$

식 (7)과 (8)의 3개의 계수들은 그림 2와 같은 환경에서 레이더의 위치와 사전에 알고 있는 협조 표적의 위치 그리고 아래의 식으로 표현할 수 있는 수신 신호의 입사각을 통해 도출할 수 있다.

$$y'(x_r) = \tan(-\psi_r) \quad (9)$$

먼저 식 (7)의 지수 함수의 경우 계수 $[A_e B_e C_e]$ 는 다음과 같다.

$$\tan(-\psi_r) = \frac{y_r - y_t}{e^{B_e x_r} - e^{B_e x_t}} B_e e^{B_e x_r} \quad (10)$$

$$A_e = \frac{y_r - y_t}{e^{B_e x_r} - e^{B_e x_t}} \quad (11)$$

$$C_e = y_t - A_e e^{B_e x_t} \quad (12)$$

식 (10)의 방정식을 풀어 B_e 를 구한 후, (11), (12)를 계산하면 계수를 모두 구할 수 있다. 식 (8)의 이차 함수 계수 $[A_p B_p C_p]$ 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$C_p = \frac{(x_r - x_t)x_t x_r \tan(-\psi_r) + y_r x_t (x_t - 2x_r) + y_t x_r^2}{(x_t - x_r)^2} \quad (13)$$

$$B_p = \frac{2(y_r - C_p)}{x_r} - \tan(-\psi_r) \quad (14)$$

$$A_p = \frac{\tan(-\psi_r) - B_p}{2x_r} \quad (15)$$

빔 경로 근사를 위한 환경은 그림 1.에서와 같이 2023년 7월 13일 12시 포항의 데이터를 이용하였다. 레이더의 위치는 $(x_r, y_r) = (0m, 7000m)$ 이고, 협조 표적의 위치는 $(x_t, y_t) = (140km, 20m)$ 인 시나리오 환경을 구성하였다.

그림 3의 'Exp model'는 지수 함수로 모델링한 빔의 경로이고, 'Poly model'는 이차 다항식으로 모델링한 경로이다. 두 빔 모두 실제 빔의 경로를 따라 가는 모습을 확인할 수 있고, 지수 모델의 경우가 이차 다항식의 모델에 비해 더 정확하게 모델링 되는 것을 확인할 수 있다.

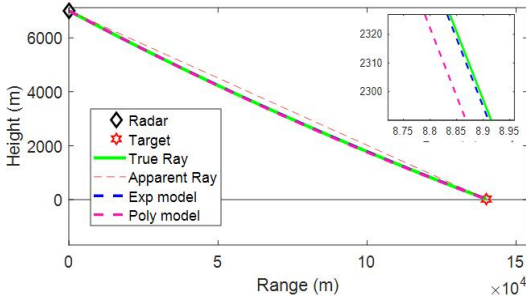


그림 3. 실제 빔 경로와 빔 경로 모델 비교
Fig. 3. Comparison of beam path model with true ray

3.2 대기 굴절을 추정

본 절에서는, 3.1절에서 모델링된 빔의 경로와 수신된 신호의 지연 시간을 기반으로 대기 굴절률을 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 먼저 대기 굴절률을 추정하기 위해서, 모델링된 빔의 경로를 이용하여 대기의 수정 굴절 계수 비를 도출할 수 있다. 지수 모델과 이차 다항식 모델의 식 (7), (8)에서 식 (9)와 같이 모든 y 축에서 지표각 (grazing angle) $\psi(y)$ 을 구할 수 있다. 그러나 아직 수정 굴절 계수에 대한 정보가 없기 때문에, 수정 굴절 계수의 비 $\hat{m}(y)$ 를 식 (16)와 같이 정의하고, 식 (1)의 스넬의 법칙과 식 (9)의 지표각 관계를 이용하여 아래와 같이 수정 굴절 계수의 비를 표현할 수 있다.

$$\hat{m}(y) = \frac{m(y)}{m(y_r)} \quad (16)$$

$$\hat{m}(y) = \frac{\hat{m}(y_r) \cos(\psi_r)}{\cos(-\tan(y'))} \quad (17)$$

식 (17)에서 구한 수정 굴절 계수 비 $\hat{m}(y)$ 를 이용하여 수정 굴절 계수를 추정하기 위해 수신 신호의 지연 시간을 이용하였다.

$$\tau_d = \frac{2}{c} \int_{y_t}^{y_r} \frac{n}{\sin\psi} dy \quad (18)$$

식 (18)은 실제 수신 신호의 왕복 지연 시간을 표현한 식이다. 식 (2), (5), (6), (16)을 이용하여 식 (18)의 굴절 계수를 수정 굴절 계수 비로 표현하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_d = \frac{2}{c} \int_{y_t}^{y_r} \frac{m(y_r) \times \hat{m} - 0.157 \times 10^{-6} y}{\sin\psi} dy \quad (19)$$

$$\tau_m = \frac{2}{c} \int_{y_t}^{y_r} \frac{\hat{m} - 0.157 \times 10^{-6} y}{\sin\psi} dy \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{2}{c} \int_{y_t}^{y_r} \frac{0.157 \times 10^{-6} y}{\sin\psi} dy \quad (21)$$

식 (20)은 높이 y_r 에서의 $m(y_r) = 1$ 로 가정했을 때의 왕복 지연 시간이다. 식 (19)의 τ_d 는 실제 측정값을 구할 수 있고, 식 (20), (21)은 빔의 경로 모델을 기반으로 구한 값으로 도출할 수 있다.

$$\frac{\tau_d + \alpha}{\tau_m + \alpha} = \int_{y_t}^{y_r} \frac{\frac{m(y_r) \times \hat{m}}{\sin\psi}}{\frac{\hat{m}}{\sin\psi}} dy \quad (22)$$

$$m(y) = \hat{m}(y)m(y_r) \quad (23)$$

식 (22)에서 $m(y_r)$ 은 상수이므로 구할 수 있고, 따라서 식 (23)과 같이 식 (16)에서 구한 수정 굴절 계수 비를 이용하여 임의의 높이 y 에서 수정 굴절 계수를 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

2절에서 제안한 빔 경로 모델링을 기반으로 대기 굴절률을 추정하는 알고리즘을 실제 데이터에 적용하여 알고리즘의 유효성을 검증하였다. 여러 시나리오에서 레이더와 협조 표적의 좌표는 동일하게 두었고, 대기

굴절률의 데이터만 변동하여 시뮬레이션을 진행했다.

그림 4, 5, 6, 7은 모두 2023년 7월 13일 12시의 데이터이고, 각각 포항, 광주, 오산, 강릉의 라디오존데 데이터를 이용하여 제안한 알고리즘을 적용하였다. 위의 시뮬레이션 결과는 그림 3에서 빔의 경로를 추정할 때와 마찬가지로 이차 다항식의 형태로 대기 굴절률을 추정하는 방법은 실제 대기 굴절률의 데이터를 잘 표현하지 못하는 모습을 보여준다. 그러나 제안하는 지수 함수 모델은 실제 대기 굴절률 데이터를 지수 함수적으로 잘 표현하고 있으며, 대기 굴절률 데이터를 필요로 하는 Sandia의 지수 모델과 거의 유사한 모습을 보인다. 이를 통해 제안하는 이차 다항식 모델보다 지수 함수의 모델이 더 적합하다고 판단하고, 지수 함수 모델의 대기 굴절률 추정의 유효성을 검증하였다.

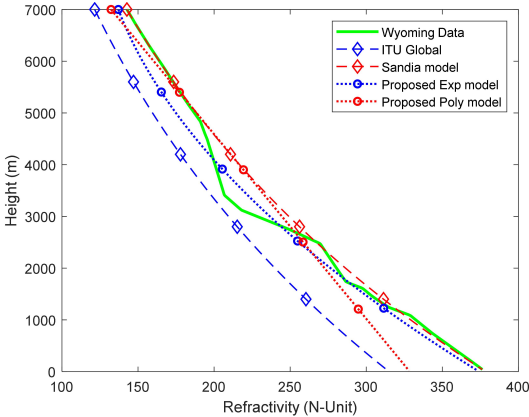


그림 4. 포항의 대기 굴절률 비교
Fig. 4. Comparison of atmospheric refractivity in Pohang

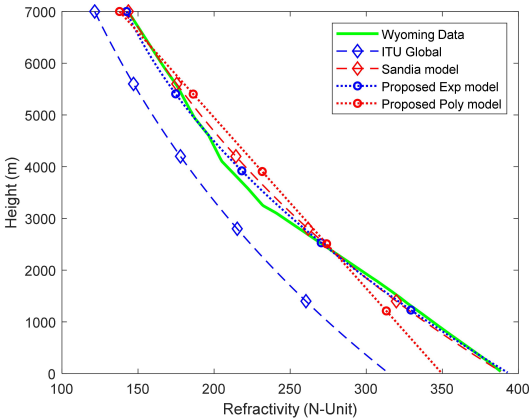


그림 5. 광주의 대기 굴절률 비교
Fig. 5. Comparison of atmospheric refractivity in Gwangju

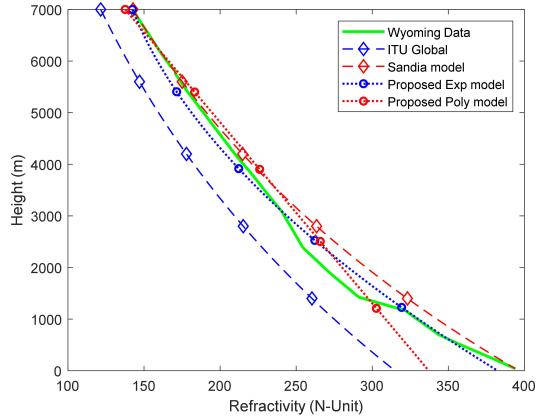


그림 6. 오산의 대기 굴절률 비교
Fig. 6. Comparison of atmospheric refractivity in Osan

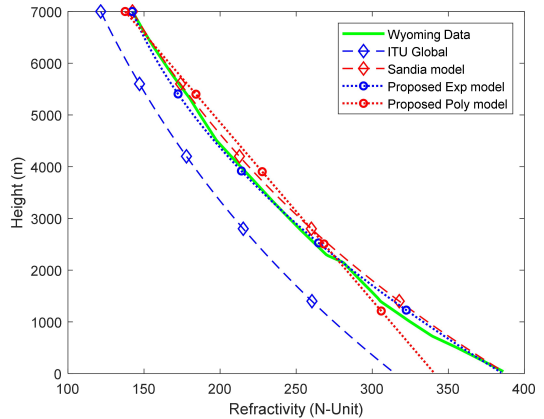


그림 7. 강릉의 대기 굴절률 비교
Fig. 7. Comparison of atmospheric refractivity in Gangneung

V. 결론

대기 굴절률을 추정하는 기존의 지수 모델은 표면 대기 굴절률과 특정 높이에서의 대기 굴절률을 필요로 한다. 이러한 방식은 일정 시간을 주기로 대기 굴절률을 측정하는 라디오존데에 의해 시간적 특성의 반영에 제한을 받고, 마찬가지로 국내의 7곳에서만 측정하기 때문에 공간적인 제한을 받는다. 본 논문에서는 이러한 제한을 해결하기 위해 위치 및 정보를 알고 있는 협조적인 표적에서 수신된 신호를 이용하여 알 수 있는 레이더의 위치, 협조 표적의 위치, 입사각의 정보들을 기반으로 빔의 경로를 지수 함수와 이차 다항식으로 모델링하였고, 추정된 빔의 경로를 기반으로 대기 굴절률을 추정하였다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 한국의 포항, 광주, 오산 및 강릉 4곳의 실제 대기 굴절

를 다른 지수 모델과 비교하였고, 시뮬레이션 결과에서 이차 다항식 모델보다 제안하는 지수 모델이 대기 굴절률을 더 잘 표현하였다. 따라서 제안하는 지수 모델의 사용으로 시공간적 특성을 반영하여 적응적인 대기 굴절률 추정이 가능하다.

References

- [1] J. M. Yang, J. Heo, J. H. Kim, Y. J. Park, H. S. Choo, and Y. B. Park, "Predicting atmospheric refractivity over the Korean peninsula using deep learning techniques," *J. KIEES*, vol. 34, no. 6, pp. 493-496, Jun. 2023. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.6.493>)
- [2] *The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data*, ITU-R P.453-14, Aug. 2019, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-14-201908-I/en>
- [3] H. W. Moon, M. H. Jeon, W. J. Kim, S. K. Oh, J. H. Lee, S. W. Kwon, and Y. J. Yoon, "Development of exponential model of Korea for improved altitude estimation performance of high-altitude target at radar system," *J. KIEES*, vol. 23, no. 7, pp. 831-839, Jul. 2012. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.7.831>)
- [4] A. W. Doerry, "Correcting radar range measurements for atmospheric propagation effects," in *Proc. Radar Sensor Technol. XVIII*, vol. 9077, pp. 492-503, 2014. (<https://www.osti.gov/biblio/1123291>)
- [5] J. Heo, J. M. Yang, M. K. Park, Y. K. Seo, and Y. B. Park, "Analysis of radar target detection error caused by refraction using parabolic equation," *J. KIEES*, vol. 33, no. 5, pp. 403-409, May 2022. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.5.403>)
- [6] *Atmospheric Soundings*, University of Wyoming, Department of atmospheric science (2023), from <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- [7] G. Apaydin and L. Sevgi, "Radio wave propagation and parabolic equation modeling," Wiley-IEEE Press, 2018.
- [8] C. Y. Oh, H. K. Lee, and S. H. Oh, "Analysis on vehicle tracking error due to radio refraction," *J. KICS*, vol. 35, no. 11, pp. 1078-1084, Nov. 2010.
- [9] 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," *J. KIEES*, vol. 32, no. 8, pp. 743-750, Aug. 2021. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.8.743>)
- [10] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and K. W. Lee, "Development of modeling & simulation tool for long range radar considering operational environment in time domain," *J. KIEES*, vol. 30, no. 7, pp. 591-602, Jul. 2019. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.7.591>)
- [11] S. W. Kwon, J. H. Lee, Y. W. Kwon, K. W. Lee, H. S. Kim, and W. Sun, "Analysis of an altitude detection accuracy by a weather effect for long range and multi function radar," *J. KIEES*, vol. 25, no. 1, pp. 123-129, Jan. 2014. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.1.123>)
- [12] T. H. Lim, S. S. Wang, J. W. Ko, M. H. Go, C. H. Seo, and H. S. Choo, "Atmospheric effect on radar wave propagation in AESA radar applications," *J. IEIE*, vol. 56, no. 1, pp. 11-17, 2019. (<https://doi.org/10.5573/ieie.2019.56.1.11>)
- [13] K. E. Hong, "Packet error rate comparison of different modulation formats over terrestrial optical wireless communication in turbulent atmosphere," *J. KICS*, vol. 39, no. 12, pp. 856-863, 2014. (<https://doi.org/10.7840/kics.2014.39B.12.856>)

김민각 (Min-Gak Kim)



2022년 2월 : 광운대학교 전자
융합공학과 학사
2022년 3월~현재 : 광운대학교
전자융합공학과 석사 과정
<관심분야> 레이더 신호처리,
능동 배열 안테나

홍창인 (Chnag-In Hong)



2018년 3월~현재 : 광운대학교
전자융합공학과 학사
<관심분야> 배열 안테나 신호
처리, 통신 공학

정용식 (Young-Seek Chung)



1989년 2월 : 서울대학교 전기
공학과 학사
1991년 2월 : 서울대학교 전기
공학과 석사
2000년 8월 : 서울대학교 전기
공학부 박사
2003년 3월~2006년 2월 : 명지
대학교 통신공학과 조교수

2006년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
<관심분야> 전자파 수치해석 및 EMI/EMC, 레이더
신호처리

권경일 (Kyung-II Kwon)



1988년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사
1990년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사
1990년 3월~현재 : 국방과학연
구소 수석연구원
<관심분야> RCS 예측/측정,
표적 자동 식별, 모델링&시뮬레이션, 레이더 전
파전파

안성진 (Sung-Jin Ahn)



2023년 2월 : 광운대학교 전자
융합공학과 학사
2023년 3월~현재 : 광운대학교
전자융합공학과 석사 과정
<관심분야> 능동 배열 안테나,
전자파 수치해석