

우주감시레이다에 대한 지구 대기권 영향 분석 연구

A Study on the Effect of Atmosphere on the Space Surveillance Radar

문현욱 · 최은정* · 이종현** · 염재명 · 권세웅 · 홍성민 · 조성기* · 박장현* · 조중현*

Hyun-Wook Moon · Eun-Jung Choi* · Jonghyun Lee** · Jaemeung Yeum · Sewoong Kwon ·
Sungmin Hong · Sungki Cho* · Jang-Hyun Park* · Jung Hyun Jo*

요약

본 논문에서는 우주감시레이다에 대한 지구 대기권 영향을 분석하기 위해 대기 굴절에 의한 고도 오차 및 주파수별 전리층 시간 지연에 의한 거리 오차를 레이다 고각에 따라 도출하였다. 이를 위해 국내 기상관측소 측정 데이터를 이용하여 지역별/계절별 특성을 고려한 전파 굴절도 프로파일을 모델링하고, 광선추적법을 이용하여 전파 굴절에 의한 고도 오차를 도출했으며, 주파수에 따른 전리층 거리 오차를 도출하였다. 또한, 해외 우주감시레이다 및 국내 제안된 우주감시레이다를 토대로 레이다 오차 특성에 따른 레이다 설계 고려사항에 대해 알아보았다. 따라서 이러한 지구 대기권에 의한 우주감시레이다 오차 특성 분석은 향후 우주감시레이다 설계 시 레이다 위치, 레이다 조향 범위 및 주파수 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this study, both the altitude error due to the refraction and the range error due to the delay in the ionosphere with respect to the frequency are extracted according to the radar elevation to analyze the effect of atmosphere on the space surveillance radar. To achieve this, the radio refractivity profile is modeled using the measured data from domestic weather stations. Then, the altitude-error due to the refraction is extracted using the ray tracing method, and the range error in the ionosphere is extracted according to the frequency. Further, considerations for radar design with respect to the radar error characteristics are discussed based on the abroad space surveillance radar and proposed domestic space surveillance radar. This analysis of the error characteristics is expected to be utilized for the determination of radar location, range of steering, and frequency in the space surveillance radar design.

Key words: Space Surveillance Radar, Refraction Error, Range Error, Radio Refractivity, Ionosphere

I. 서론

최근 우주개발의 중요성이 갈수록 증가함에 따라 선진국을 중심으로 다양한 우주개발 노력이 지속되고 있으며,

그 결과로 현재('18년 4월 기준) 전 세계적으로 약 19,000여 개의 인공우주물체가 지구궤도상에서 남아있다^{[1],[19]}. 그러나 이러한 우주개발과 더불어 인공위성의 추락 위험이나 우주 파편의 충돌위험 등 우주위험 또한 급격히 증

「이 연구는 2017년 한국천문연구원 우주위험 대응기술 연구의 ‘우주감시레이다시스템 기초기술연구’의 지원으로 연구되었음.」

LIG 넥스원(주) 감시정찰연구센터(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance(ISR) Lab., LIG Nex1)

*한국천문연구원 우주위험감시센터(Center for Space Situational Awareness, Korea Astronomy and Space Science Institute)

**알에프코어(주) (RFcore)

· Manuscript received April 13, 2018 ; Revised June 20, 2018 ; Accepted August 28, 2018. (ID No. 20180413-049)

· Corresponding Author: Hyun-Wook Moon (e-mail: hyunwook.moon@lignex1.com)

가함에 따라 우주감시의 중요성이 높아지고 있다^{[1],[2]}. 이러한 우주감시 임무 수행을 위한 시스템 중 하나가 우주감시레이다이다. 우주감시레이다는 RF(radio frequency) 대역의 전파를 우주로 송수신함으로써 표적의 거리, 고각, 방위각 정보를 획득하게 되며, 이를 통해 표적의 좌표 및 고도를 추정하게 된다. 그러나 우주로 전파를 송수신하기 위해서는 전파가 지구 대기권을 통과해야 하며, 이 때 대류권(troposphere)의 전파 굴절을 변화에 의한 굴절 오차와 전리층(ionosphere)에서 발생하는 시간 지연에 의한 거리 오차가 발생한다. 이러한 오차는 우주감시레이다에서 획득하는 표적 정보의 정확도를 감소시키는 주요 외부요인이 된다^[3].

우주감시레이다에 있어서 고도에 따른 전파 굴절을 변화에 의한 굴절 오차는 주파수와 상관없이 기상 환경 및 레이다 고각에 따라 발생하는 오차로 일반적으로 낮은 고각에서 장거리 표적에 대한 레이다 운용 시 매우 큰 오차를 발생하는 것으로 알려져 있다^{[3]~[5]}. 따라서 이를 보상하기 위해 실환경을 반영할 수 있는 전파 굴절률을 도출하기 위한 연구^{[6],[7]} 및 레이다 오차를 보상하는 알고리즘에 관한 연구^{[3],[8]}들이 다각도로 이루어졌으나, 실시간으로 변화하는 전파 굴절률에 의한 영향을 정확히 보상하기란 매우 어렵다. 한편, 전리층에 의한 거리 오차는 전리층의 시간 지연에 의한 오차로 주파수 및 전파 경로의 총 전자함유량(total electron content: TEC)에 의해 결정된다^{[3],[9]}. 이 또한 주야간, 계절, 태양 활동 등에 따라 전자 밀도가 변화하기 때문에 정확히 보상하기가 매우 어렵다^[9]. 따라서 지구 대기권을 통해 전파를 송수신해야 하는 우주감시레이다의 효율적인 설계를 위해서는 지구 대기권에 의한 오차 특성을 정확히 이해할 필요가 있다.

본 논문에서는 우주감시레이다에 대한 지구 대기권에 의한 굴절 오차 및 거리 오차를 도출함으로써 지구 대기권 영향을 분석하였다. 이를 위해 굴절 오차의 경우 고층 기상데이터 측정이 가능한 국내 기상관측소 중 지역 및 계절적 특성을 고려하여 전파 굴절도 프로파일(radio refractivity profile)을 도출하고, 광선추적법을 이용해 실제 전파 경로를 계산한 후, 이를 표준 대기 기준으로 레이다에서 보상했을 때 발생하는 고도 오차를 레이다 고각별로 도출하였다. 또한 거리 오차는 전리층에 의한 총 전자

함유량이 $10^{-16} \sim 10^{-18}$ 범위 내에 존재^[9]하므로 이 범위에서 레이다 주파수 및 고각에 따라 도출하였다. 이러한 지구 대기권에 의한 오차 도출을 통해 지역, 계절, 주파수, 레이다 고각 등에 따른 오차 특성을 분석하였으며, 이러한 결과는 향후 우주감시레이다 설계 시 레이다 조향 범위 및 주파수 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 전파 굴절도 프로파일 모델링 방법에 대해 설명하고, 한국기상관측소에서 측정한 데이터를 통해 실환경 전파 굴절도 프로파일 모델링 및 특성을 분석하였다. 또한, 전리층에 의한 지연 시간 모델링 방법에 대해 설명하였다. 3장에서는 지구 대기권에 의한 레이다 오차 도출 모형에 대해 설명하며, 4장에서는 도출한 레이다 오차 특성을 분석하고, 우주감시레이다 설계 시 고려사항에 대해 논의하였다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 기술하였다.

II. 지구 대기 전파 모델링

2-1 전파 굴절도 프로파일 모델링

전파 굴절은 고도에 따른 대기 굴절률 변화에 의해 발생하기 때문에 전파 굴절을 모의하기 위해서는 고도별 대기 굴절률(또는 전파 굴절도)을 나타내는 전파 굴절도 프로파일이 필요하다. 이러한 전파 굴절도 프로파일을 모델링하는 방법은 크게 표준 대기 모델과 지수 모델이 있다^{[10]~[12]}. 표준 대기 모델은 전 세계 기상관측소에서 측정한 데이터를 기반으로 한 모델로 ITU-R(International TeleComMuniCation Union-Recommendation)에서는 세계 연간 표준 대기 및 저위도/중위도/고위도별 여름철 및 겨울철 표준 대기를 제시하고 있다^[10]. 이러한 표준 대기는 대기 상태에 대한 정보가 없을 경우 가장 신뢰할만한 전파 굴절도 프로파일을 제공 가능하지만, 시공간적으로 변화하는 전파 굴절도 특성을 모델링하기에는 한계가 있다. 반면, 지수 모델은 표면 굴절도(surface refractivity) 및 굴절도 감쇄율(refractivity gradient)에 따른 지수 함수로 전파 굴절도 프로파일을 나타내는 모델로 표면 굴절도 및 굴절도 감쇄율 정보가 있다면 시공간적인 특성을 반영하여 전파 굴절도 프로파일을 모델링할 수 있다는 장점이 있지만, 굴절도 감쇄율 측정이 어려운 단점이 있다^{[11],[12]}. 지

수 모델에 따른 전파 굴절도 프로파일은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$N = N_s \exp(-c_e h) \quad (1)$$

여기서 h 는 고도 [km]를 나타내고, N_s 는 표면 굴절도 [N-unit]를 나타내며 N 은 고도 h 에서의 전파 굴절도 [N-unit]를 나타낸다. 그리고 지수 감소 계수 c_e 는 다음과 같다.

$$c_e = \ln \frac{N_s}{N_{1km}} = \ln \frac{N_s}{N_s + \Delta N} \quad (2)$$

이 때 N_{1km} 는 고도 1 km에서의 전파 굴절도를 나타내고, 1 km까지 전파 굴절도의 감쇄는 선형적으로 근사화가 가능하기 때문에, 이는 $N_s + \Delta N$ 으로 표현할 수 있으며, ΔN 는 1 km까지의 굴절도 감쇄율 [N-unit/km]을 나타낸다. 따라서 실험환경을 반영한 표면 굴절도 및 굴절도 감쇄율을 도출이 가능한 경우 지수 모델을 이용하여 전파 굴절도 프로파일을 도출할 수 있다.

2-2 한국 전파 굴절도 프로파일 모델링

앞서 설명한 바와 같이 표준 대기는 전세계 표준 대기 모델로 대기 상태에 대한 정보가 없을 경우, 가장 신뢰할 만 하지만 시공간적인 대기 상태를 반영하기는 어렵다. 반면, 지수 모델은 표면 굴절도 및 굴절도 감쇄율 정보가 있을 경우 시공간적인 대기 상태를 반영하여 전파 굴절도 프로파일 생성이 가능하다. 본 논문에서는 한국의 실제 대기 상태에 따른 전파 굴절도 생성을 위해 고층 기상 데이터 측정이 가능한 국내 기상관측소로부터 6년간 측정된 고층 대기 정보를 이용하여 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율을 도출하고, 이를 식 (1) 및 식 (2)의 지수 모델에 적용하였다. 그림 1은 고층 기상데이터 측정이 가능한 국내 기상관측소를 나타낸다. 이때 본 논문에서 지역별 대기 상태에 따른 굴절 오차 도출을 위해 총 7개 기상관측소 중 동해(속초), 서해(백령도), 남해(제주도) 및 육지(오산)로 구분하여 기상관측소 데이터를 사용하였으며, 계절별로는 여름철(6~8월) 및 겨울철(12~2월) 데이터를 사용하였고, 6년간 3개월 데이터를 사용하여 약 180개 데이터 샘플을 이용해 한국 전파 굴절도 프로파일을 생성하였다. 또한, 지수 모델 이용 시 실제 대기 상태를 잘 반영



그림 1. 고층 기상데이터 측정 가능 국내 기상관측소
Fig. 1. Domestic weather stations which are able to measure weather data according to the altitude.

할 수 있는가를 확인하기 위해 그림 2와 같이 계절별 지수 모델과 측정 데이터를 비교하였다. 그림 2(a) 전체에서 보면 대기 굴절률이 약 50 km 이상 고도에서는 거의 일정하여 전파 굴절이 없음을 알 수 있으며, 그림 2(b) 확대 그림에서 보면 지수 모델과 측정 데이터가 잘 들어맞음

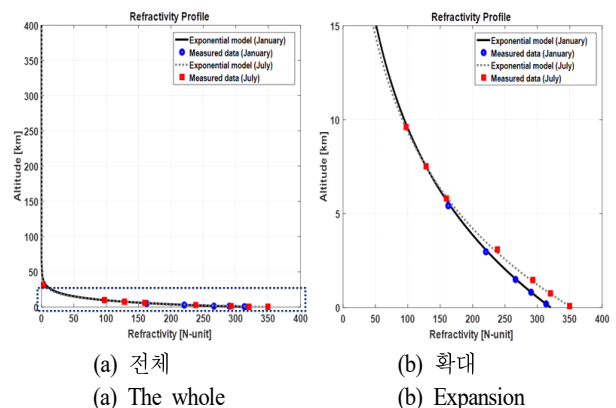


그림 2. 계절별 지수 모델과 측정 데이터 비교 결과
Fig. 2. Compared results between exponential model and measurement data according to season.

을 확인할 수 있다.

2.3 한국 전파 굴절도 특성 분석

앞서 지수 모델에서 보듯이, 전파 굴절도 프로파일의 특성은 표면 굴절도와 굴절도 감쇄율에 의해 결정되며, 그 중에서도 전파 굴절도는 주로 굴절도 감쇄율에 의해 결정된다^[12]. 따라서 한국 전파 굴절도 특성을 분석하기 위해 지역별/계절별 굴절도 감쇄율 특성을 분석하였다. 또한 비교를 위해 ITU-R에서 제시한 중위도 여름철/겨울철 표준대기^[10]의 굴절도 감쇄율과 비교하였다. 그림 3은 국내 기상관측소 중 동해/서해/남해 및 육지의 굴절도 감쇄율에 대한 평균 및 표준 편차를 나타낸다. 비교 대상인 중위도 여름철 표준 대기의 굴절도 감쇄율은 52.77 N/km이며, 겨울철 표준 대기의 굴절도 감쇄율은 35.92 N/km였다. 평균 굴절도 감쇄율에 대해 그 결과를 살펴보면, 여름철 동해는 표준 대기과 비슷한 특성을 갖는 반면, 타 지역에서는 표준 대기보다 큰 것을 확인할 수 있으며, 겨울철에는 동해 및 육지에서 표준 대기과 유사한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 그 차이에 있어서 겨울철에 전체적으로 표준 대기과 차이가 감소하며, 표준 편차 역시 겨울에는 작고, 여름에 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 표준 대기과 굴절 오차를 보정할 경우 여름철에 오차가 크게 나타날 수 있음을 의미하며, 동해의 경우 서해 및 남해에 비해 오차가 작을 수 있음을 의미한다. 육지의 경

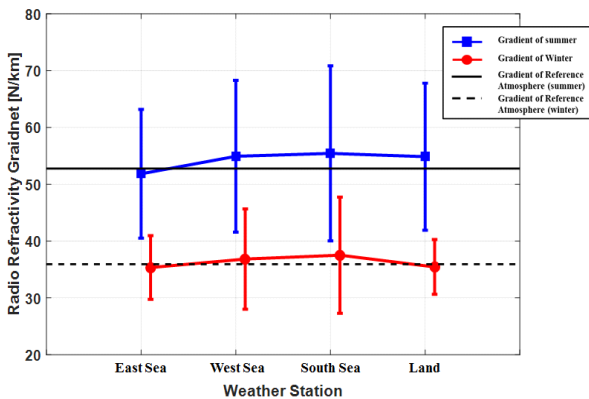


그림 3. 지역별/계절별 한국 굴절도 감쇄율 특성

Fig. 3. Characteristics of radio refractivity gradient in Korea according to location and season.

우엔 겨울철에는 표준 대기과 유사하지만, 여름철에는 차이가 크게 발생하는데, 이는 여름철 지면 복사열로 인한 현상으로 판단된다.

2.4 전리층에 의한 지연 시간 모델링

지표면으로부터 고도 약 50~2,000 km에 존재하는 전리층에서는 전파가 그 경로를 따라 전파되면서 전파 속도가 감소하게 된다. 이는 시간 지연을 발생시키며, 이러한 지연 시간은 식 (3)과 같다^{[3],[9]}.

$$t = 1.345 N_T / f^2 \times 10^{-7} \quad (3)$$

여기서 t 는 진공에서의 전파 속도 대비 지연 시간 [sec]을 나타내고, f 는 주파수 [Hz], N_T 는 전파 경로 상의 총 전자함유량(total electron content: TEC) [el]을 나타낸다. 이 때 총 전자함유량은 전파 경로 상의 총 전자를 나타내기 때문에 전파 경로 상의 전자 농도를 적분하여 계산할 수 있다^[3].

$$N_T = \int_s n_e(s) ds \quad (4)$$

여기서 s 는 전파 경로 [m]를 나타내고, n_e 는 전파 경로 상의 전자 농도 [el/m³]를 나타낸다. 여기서 전자 농도는 태양 활동 및 계절 등에 따라 변하며, 이를 반영하여 총 전자함유량 계산을 위한 모델로 IRI(International reference ionosphere) 모델^[13] 및 NeQuick2 모델^[14] 등이 있다. 이러한 모델을 통해 태양 활동, 계절 등의 영향을 고려하여 특정 시간에 따른 총 전자함유량 도출이 가능하다. 그러나 전리층에 대한 레이다 영향을 분석하기 위해서는 특정 시간이 아닌 전반적인 특성이 중요하며, 전리층의 총 전자함유량은 천정 방향 기준으로 $10^{-16} \sim 10^{-18}$ 의 범위 내에 존재한다^[9]. 즉, 위의 총 전자함유량의 범위는 최소값 및 최대값을 나타내므로 전리층에 의한 오차 범위 분석이 가능하기 때문에, 본 논문에서는 이를 기준으로 총 전자함유량을 계산하였다. 또한 이는 천정 방향 기준이므로 레이다 고각이 감소할수록 전파 경로가 증가하여 총 전자함유량이 증가하게 되며, 이는 다음과 같이 계산할 수 있다^[3].

$$N_T^s = N_T^v / \cos(\theta) \quad (5)$$

여기서 N_T^v 는 천정 방향에 대한 총 전자함유량 [el]이며, N_T^s 는 레이더 고각에 따른 총 전자함유량 [el]을 나타내고, θ 는 레이더 고각 [°]을 나타낸다. 따라서 위 식들을 적용하면, 전리층 시간 지연에 의한 주파수 및 레이더 고각별 거리 오차 도출이 가능하다.

III. 레이더 오차 도출 모형

우주감시레이더에서 운용 환경에 의한 오차는 크게 전파 굴절에 의한 고도 오차 및 전리층 시간 지연에 의한 거리 오차로 구분되며, 각 오차에 대한 영향 분석을 위해서로 분리하여 레이더 오차를 도출하였다.

먼저 굴절에 의한 고도 오차는 고도별 전파 굴절도가 변함에 따라 전파가 굴절되어 발생하는 오차로 그 개념은 그림 4와 같다. 그림 4에서와 같이 특정 고도 h_1 에 대상 표적이 존재할 경우 레이더에서는 굴절된 전파에 의한 고각(θ)과 거리 정보를 획득하게 되며, 이 정보를 통해 표적 고도를 추정하게 된다. 이 때 굴절을 고려하지 않고 표적 고도를 추정하게 될 경우 표적 고도는 h_3 가 되어 $h_3 - h_1$ 만큼 오차가 발생하게 된다. 따라서 이에 대한 보상이 필요하게 되며, 이를 보상하기 위해서는 실시간으로 고층 대기 정보가 필요하다. 그러나 이는 현실적으로 어렵기 때문에 표준 대기를 가정하여 보상할 수 있다. 그러나 표준 대기 또한 실제 대기와는 차이가 있기 때문에 $h_2 - h_1$ 의 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 레이더에서 표준 대기를 이용해 오차를 보상하였다고 가정하여

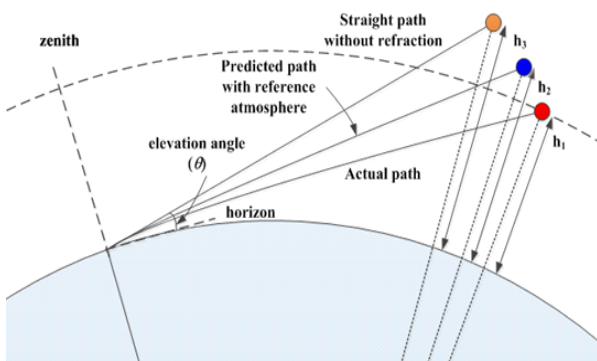


그림 4. 우주감시레이더의 굴절 오차

Fig. 4. Refraction error of space surveillance radar.

$h_2 - h_1$ 의 오차를 도출하였다. 거리 오차는 식 (5)를 통해 레이더 고각에 따른 총 전자함유량을 계산하고 식 (3)에 의해 전리층에 의한 시간 지연을 계산 후 빛의 속도를 곱해 거리 오차를 계산하였다.

그림 5는 위와 같은 대기 굴절에 의한 고도 오차 및 전리층에 의한 거리 오차를 도출하는 모형을 나타낸다. 이러한 레이더 오차 도출 모형을 보면, 우선 레이더 및 표적 파라미터로 레이더 주파수, 레이더 사이트 높이, 레이더 고각, 표적 고도를 입력하고, 대기 굴절 관련 파라미터로 기상관측소와 계절을 입력하면, 기상관측소의 계절별 표면굴절도와 굴절도 감쇄율로부터 지수 모델을 이용해 실제 대기의 전파 굴절도 프로파일을 생성한다. 그리고 이 전파 굴절도 프로파일을 이용해 광선 추적 모델(ray tracing model)로부터 레이더 고각별 표적 고도까지의 실제 전파 경로를 계산하게 되며, 이로부터 표적까지의 거리가 도출된다. 그러면 레이더는 표적까지의 거리 및 레이더 고각으로부터 표적 고도를 산출하게 되는데 이 때 실제 대기 상태를 모르는 상태에서 대기 굴절을 보상하기 위해 표준 대기를 가정하여 광선 추적 모델로부터 표적 고도를 추정한다. 그 후 모의 상에서 실제 표적 고도를 알고 있으므로 위와 같이 추정된 표적 고도를 이용해 고도 오차를 계산한다. 또한 레이더 주파수 및 고각에 따라 평균 총 전자함유량 및 지연시간을 계산하고, 이로부터 전리층에 의한 거리 오차를 계산하게 된다. 표 1은 레이더 및 표적에 대한 입력 파라미터를 나타낸다. 레이더 사이트 높이는 100 m로 가정하였으며, 표적물 고도는 우주감시레이더의 주 감시영역인 저궤도영역(low earth orbit: LEO)인 400

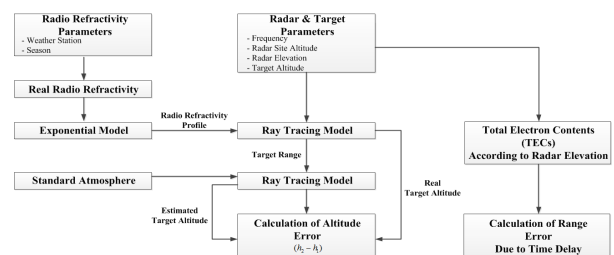


그림 5. 대기 굴절에 의한 고도 오차 및 전리층에 의한 거리 오차 도출 모형

Fig. 5. Extraction model of altitude-error due to tropospheric refraction and range-error due to ionosphere.

표 1. 레이다 및 표적 관련 입력 파라미터

Table 1. Input parameters related to the radar and the target.

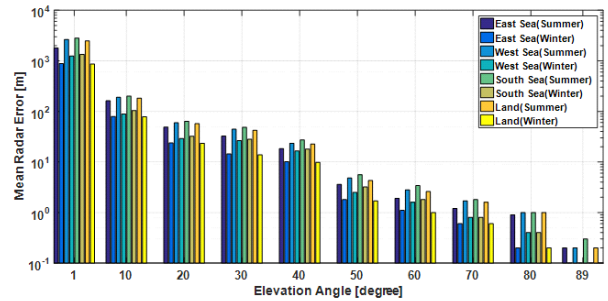
Parameter	Input value
Frequency [GHz]	0.3, 1, 3, 6, 10
Radar site altitude [m]	100
Radar elevation [°]	1, 10, 20, ... 70, 80, 89
Target altitude [km]	400

km로 설정하였다. 레이다 고각은 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 까지 10° 간격으로 설정하였는데, 0° 및 90° 는 전파 굴절도 프로파일 영향이 없기 때문에 1° 및 89° 로 대체하여 모의하였다. 또한 주파수는 VHF(300 MHz), L-band(1 GHz), S-band(3 GHz), C-band(6 GHz), X-band(10 GHz)로 설정하였다.

IV. 레이다 오차 특성 분석 및 토의

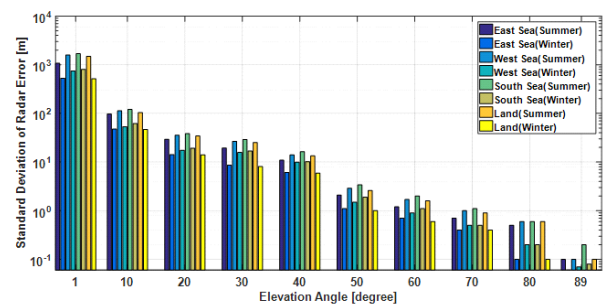
4.1 전파 굴절에 의한 레이다 오차 특성

전파 굴절에 의한 고도 오차의 경우 각 계절별로 약 180여 개 기상데이터 샘플에 대해 도출된 고도 오차의 평균 및 표준 편차를 계산하였으며, 표 2 및 표 3은 각각 레이다 고각에 따른 지역별/계절별 고도 오차의 평균과 표준 편차를 나타내며, 그림 6은 전파 굴절에 의한 레이다 오차 특성을 도식한 그림이다. 그 결과를 살펴보면, 전파 굴절에 의한 평균 고도 오차 및 표준 편차가 비슷한 양상을 보이며, 여름철에는 남해 > 서해 = 육지 > 동해 순이고 겨울철에는 남해 > 서해 > 동해 =육지 순으로 오차가 크게 발생하였다. 이러한 양상은 2-3절에서 살펴본 한국 전파 굴절도의 굴절도 감쇄율 특성과 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 레이다 고각에 따른 특성을 살펴보면, 레이다 고각이 증가함에 따라 오차는 지수적으로 급격히 감소하며, 지역 및 계절에 따른 영향이 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 레이다 조향 범위 설계 시 운용 목적에 따라 레이다 고각이 낮을 경우 레이다 사이트 선정 및 계절적 영향 등을 고려하여야 하며, 표준 대기 모델로는 굴절 오차 보상에 한계가 있으므로 추가적인 보상 알고리즘 연구가 필요하다. 그에 반해 레이다 고각이 높을 경우, 지역 및 계절을 크게 고려할 필요가 없을 뿐 아니라 추가적인 보상 알고리즘이 크게 필요하지 않다. 그러나 일반



(a) 평균

(a) Mean



(b) 표준 편차

(b) Standard deviation

그림 6. 전파 굴절에 의한 레이다 오차 특성

Fig. 6. Characteristics of radar error due to refraction.

표 2. 지역별/계절별 평균 고도 오차 [m]

Table 2. Mean altitude-error according to location and season.

Radar Elevation		1	10	20	30	40	50	60	70	80	89
East Sea	Summer	1,794.3	162.5	48.9	32.4	18.3	3.6	1.9	1.2	0.9	0.2
	Winter	879.7	79.2	23.7	14.4	10.1	1.8	1.1	0.6	0.2	0.1
West Sea	Summer	2,644.3	189.4	59.4	44.5	23.4	4.8	2.8	1.7	1.0	0.2
	Winter	1,238.5	88.8	29.0	26.4	16.5	2.5	1.6	0.8	0.4	0.1
South Sea	Summer	2,812.4	200.7	63.8	48.4	27.2	5.6	3.4	1.8	1.0	0.3
	Winter	1,341.7	104.1	32.2	28.1	18.0	3.2	1.8	0.8	0.4	0.1
Land	Summer	2,484.2	182.3	57.2	42.1	22.5	4.3	2.6	1.6	1.0	0.2
	Winter	862.4	78.2	23.4	13.8	9.8	1.7	1.0	0.6	0.2	0.1

표 3. 지역별/계절별 고도 오차의 표준편차 [m]

Table 3. Standard-deviation of altitude-error according to location and season.

Radar Elevation		1	10	20	30	40	50	60	70	80	89
East Sea	Summer	1,076.6	97.3	29.3	19.4	10.9	2.1	1.2	0.7	0.5	0.1
	Winter	527.6	47.5	14.2	8.6	6.1	1.1	0.7	0.4	0.1	0.06
West Sea	Summer	1,586.3	113.6	35.6	26.7	14.0	2.9	1.7	1.0	0.6	0.1
	Winter	743.1	53.3	17.4	15.8	9.9	1.5	0.9	0.5	0.2	0.07
South Sea	Summer	1,687.2	120.4	38.3	29.0	16.3	3.4	2.0	1.1	0.6	0.2
	Winter	805.0	62.1	19.3	16.9	10.2	1.9	1.1	0.5	0.2	0.08
Land	Summer	1,490.2	104.2	34.3	25.2	13.4	2.6	1.6	0.9	0.6	0.1
	Winter	517.1	46.9	14.1	8.1	5.9	1.0	0.6	0.4	0.1	0.06

적으로 레이다 조향 범위가 기준 방향(boresight)을 중심으로 $\pm 30^\circ \sim \pm 60^\circ$ 임을 감안할 때, 기준 방향이 천정 방향을 향하더라도 일부 고각에서 수 십~수 백 m의 굴절 오차가 발생 가능하므로 이를 감안하여 우주감시레이다를 설계해야 한다.

4.2 전리층 시간 지연에 의한 레이다 오차 특성

전리층의 시간 지연에 의한 거리 오차는 주파수 및 총 전자함유량에 의해 결정된다. 앞서 설명한 바와 같이 전리층의 총 전자함유량은 천정 방향 기준으로 $10^{-16} \sim 10^{-18}$ 의 값을 가지기 때문에 이 최소값 및 최대값에 대해 식 (5)를 통해 고각별 총 전자함유량을 계산하고, 식 (3)에 의해 전리층에 의한 시간 지연을 계산 후 빛의 속도를 곱해 거리 오차를 계산하였다. 이를 통해 주파수 및 레이다 고각별 최대/최소 오차를 도출하였으며, 표 4는 이를 정리한 표이고, 이를 그림 7에 도식하였다. 총 전자함유량의 최소값과 최대값 차이에 의해 거리 오차 또한 레이다 고각별로 100배 차이가 발생하며, 식 (3)에 의해 주파수의 제곱에 반비례하여 오차가 발생하였다. 또한 레이다

표 4. 전리층에 의한 거리 오차 [m]

Table 4. Range error due to ionosphere.

Radar Elevation		1	10	20	30	40	50	60	70	80	89
VHF	Min	256.9	25.8	13.1	8.97	6.97	5.85	5.18	4.77	4.55	4.48
	Max	25689	2582	1311	896.7	697.4	585.3	517.7	477.1	455.2	448.4
L-Band	Min	23.1	2.32	1.18	0.81	0.63	0.53	0.47	0.43	0.41	0.40
	Max	2312	232.4	118	80.7	62.8	52.7	46.6	42.9	41.0	40.4
S-Band	Min	2.57	0.26	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
	Max	256.9	25.8	13.1	8.97	6.97	5.85	5.18	4.77	4.55	4.48
C-Band	Min	0.64	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Max	64.2	6.45	3.28	2.24	1.74	1.46	1.29	1.19	1.14	1.12
X-Band	Min	0.23	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max	23.1	2.32	1.18	0.81	0.63	0.53	0.47	0.43	0.41	0.40

다 고각이 낮아질수록 전파 경로가 기하급수적으로 증가하므로 거리 오차가 급격히 증가한다. 이는 반대로는 레이다 고각이 증가할 경우, 거리 오차 감소폭이 매우 작음을 의미하며, 레이다 조향 범위에 대한 조정만으로는 이온층에 의한 거리 오차를 제거할 수 없음을 의미하므로 레이다 운용주파수와 조향 범위를 동시에 고려하거나, 이온층에 의한 영향을 보상하기 위한 알고리즘이 필요하다.

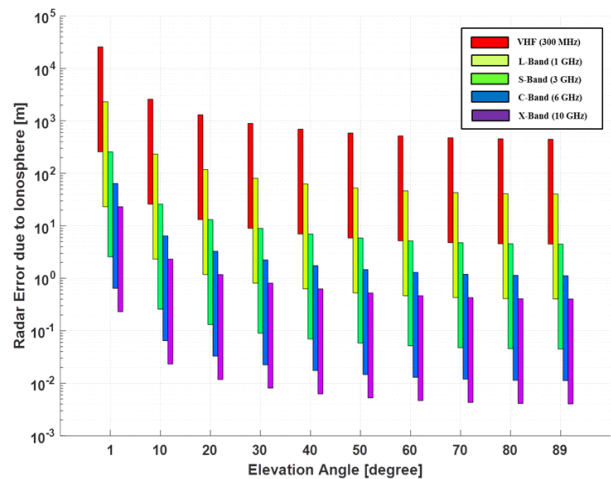


그림 7. 전리층 시간 지연에 의한 레이다 오차 특성

Fig. 7. Characteristics of radar error due to delay of ionosphere.

4.3 레이다 오차 특성에 따른 레이다 설계 고려사항

앞서 우주감시레이다의 외부 환경인 대기권에 의한 굴절 오차 및 전리층 거리 오차 특성에 대해 각각 살펴보았다. 이러한 외부 환경에 의한 오차는 레이다 운용 시 필연적으로 발생하기 때문에 레이다 요구사항 중 정확도 제원을 만족하기 위해서는 오차를 최소화하기 위한 설계 파라미터를 조정하거나 보상 알고리즘을 통해 오차를 보상하는 방법을 주로 사용하게 된다. 본 논문에서는 레이다 오차 특성을 최소화하기 위한 레이다 설계 고려사항에 대해 설명한다.

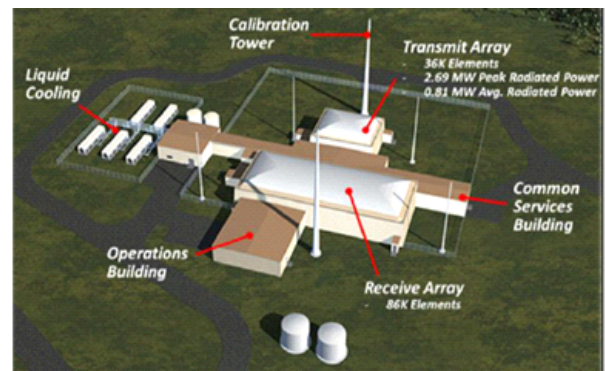
기존 우주감시레이다는 우주감시 임무뿐 아니라, 대륙간 탄도 미사일(international ballistic missile: ICBM)에 대한 조기 경보 임무를 동시에 수행하기 위해 레이다 조향각의 중심이 고각 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 를 기준으로 설정되어 있으며, 최대출력을 낮추기 위해 주파수는 주로 VHF 대역 또는 UHF 대역을 사용하여 왔다. 그러나 이 경우, 앞서 살펴본 바와 같이 전파 굴절에 의한 오차 및 전리층 거리 오차가 매우 크게 발생하여 레이다 정확도가 매우 낮게 된다. 이러한 대표적인 우주감시레이다로 미국의 Pave Paws가 있으며, 그림 8은 그 형상을 나타낸다^[15]. 최근에는 우주개발과 더불어 우주감시 임무의 중요성이 높아짐에 따라 우주감시 임무에 집중한 레이다들이 개발되고 있다. 그 대표적인 사례인 미국의 Space Fence 우주감시레이다^[16]는 그림 9(a)에서 보듯이 송수신 배열안테나가 천정을 바라보게 설치되어 그림 9(b)와 같이 조향 범위가 천정을 기



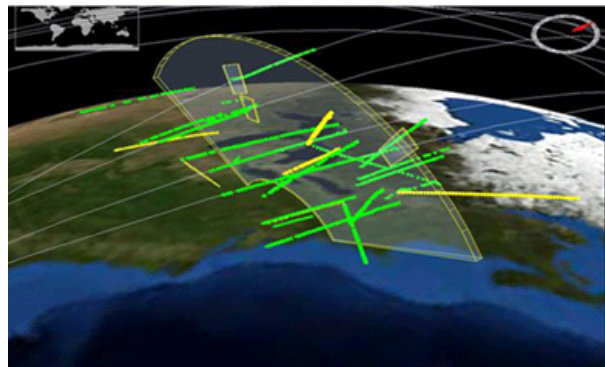
그림 8. Pave Paws 형상^[15]
Fig. 8. Shape of Pave Paws^[15].

준으로 $\pm 45^{\circ}$ 인 부채꼴로 설계되었다. 즉, 레이다 고각이 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 이기 때문에 레이다 고각이 커서 굴절 오차의 영향을 최소화하였다. 이러한 레이다 조향 범위는 커버리지(coverage)를 나타내며, 조향 범위가 커질수록 더 다양한 경로의 표적을 감시할 수 있는 장점이 있지만, 더 낮은 레이다 고각에서도 조향이 가능해야 하기 때문에 그림 6에서 보듯이 굴절 오차의 영향을 더 크게 받게 되는 단점이 있다.

또한, Space-Fence 우주감시레이다는 S-band를 운용 주파수로 선택하고 있어 전리층의 거리 오차 영향을 기존 우주감시레이다의 VHF 대역 또는 UHF 대역에 비해 최소화하였다. 이렇게 운용 주파수를 높이면 해상도 면에서 유리할 뿐 아니라, 전리층에 의한 거리 오차를 감소시킬 수 있으나, 이 경우 레이다 공식^[17]에 의해 SNR(Signal to



(a) 형상
(a) Shape



(b) 커버리지
(b) Coverage

그림 9. Space-Fence 우주감시레이다^[16]
Fig. 9. Space-Fence radar^[16].

Noise Ratio)이 감소하여 최대탐지거리 성능이 떨어지게 되므로 trade-off를 통해 레이다 설계를 최적화시킬 필요가 있다.

최근 국내에서도 우주감시레이다 개발 필요성에 따라 관련 연구가 수행된 바 있으며, 이에 대한 연구 결과가 발표되었다^[18]. 이 연구에서 제안된 국내 우주감시레이다는 L-band를 운용 주파수로 선택하고 있으며, 천정 방향을 기준으로 $\pm 45^\circ$ 의 조향 범위를 갖는다. 이 제안된 우주감시레이다를 토대로 대기권에 의한 영향을 분석하기 위해 그림 10에 굴절 오차와 전리층 거리 오차를 함께 도식하였다. 이때 굴절 오차는 지역 및 계절에 따른 평균 고도 오차를 도식하였으며, 거리 오차는 L-band와 S-band에 대해 총 전자함유량 범위의 중간 값인 10^{-17} 에 대해 도식하였다. 우선 L-band에서 레이다 고각이 90° 인 천정 기준으로 $\pm 45^\circ$ 조향 범위를 가질 경우, 가장자리인 $45^\circ \sim 50^\circ$ 구간에서는 굴절 오차가 더 큰 영향을 미치며, 최대 약 10 m의 오차를 발생시킨다. 그에 비해 레이다 고각이 50° 이상에서는 전리층에 의한 거리 오차가 주요 오차 원인이 되며, 약 5 m의 오차를 발생시킨다. 만약 운용 주파수를 S-band로 변경할 경우 전리층에 의한 거리 오차는 거의 영향이 없으나, 굴절 오차는 주파수와 무관하기 때문에 동일하며, 최대탐지거리 성능 면에서 손해를 보기 때문에 L-band가 보다 유리할 것으로 판단된다. 이러한 오차 특성은 우주감시 임무에 따라 요구되는 정확도 성능에 영향을 미치며, 운용주파수 및 조향 범위와 연관되어 있으므로

레이다 설계 시 이를 고려한 최적화가 반드시 필요하다.

V. 결 론

본 논문에서는 우주감시레이다에 대한 지구 대기권에 의한 굴절 오차 및 거리 오차를 도출함으로써 지구 대기권 영향을 분석하였다. 이를 위해 굴절 오차의 경우, 국내 기상관측소 측정 데이터를 이용하여 지역별/계절별 특성을 고려한 전파 굴절도 프로파일을 도출하고, 광선추적법을 이용해 레이다 고각별로 고도 오차를 도출하고, 그 특성을 분석하였다. 그 결과, 레이다 고각이 낮을 경우, 레이다 사이트 선정 및 계절적 영향 등을 고려하여야 하며, 표준 대기 모델로는 굴절 오차 보상에 한계가 있어 추가적인 보상 알고리즘 연구가 필요하다. 반면, 레이다 고각이 높을 경우, 지역 및 계절을 고려할 필요가 없고, 보상 알고리즘 또한 크게 필요하지 않다. 거리 오차는 주파수 및 레이다 고각에 따라 분석한 결과, 레이다 고각이 낮아지면 거리 오차가 기하급수적으로 증가하게 되나, 고각이 높아지면 거리 오차 감소폭이 급격히 감소하므로 조향 범위 조정만으로는 이온층에 의한 거리 오차 제거가 어려우며, 운용 주파수와 조향 범위를 동시에 고려해야 한다. 마지막으로 이러한 굴절 오차 및 전리층 거리 오차에 의해 최근 우주감시레이다는 천정 방향을 기준으로 조향 범위를 설정하고 있으며, 운용 주파수는 최대탐지거리와 이온층 영향을 고려하여 L-band 또는 S-band를 선택하고 있다. 그리고 우주감시레이다 설계 시 운용 요구사항 만족도 및 설계 파라미터 간 trade-off를 통해 최적화된 설계가 필요함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과인 지구 대기권에 의한 우주감시레이다 오차 특성은 향후 우주감시레이다 설계에 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] 김재혁, "우리나라 우주감시기술 중장기 발전방향 제언," 한국과학기술기획평가원(KISTEP), Issue Paper 2012-05, pp. 3-37, 2012년 5월.
- [2] 김해동, 성재동, 문병진, 송하룡, "우주물체 추적용 레이다 시스템 개발을 위한 커버리지 및 체계 분석," 항공우주기술, 13(1), pp. 142-152, 2014년 7월.

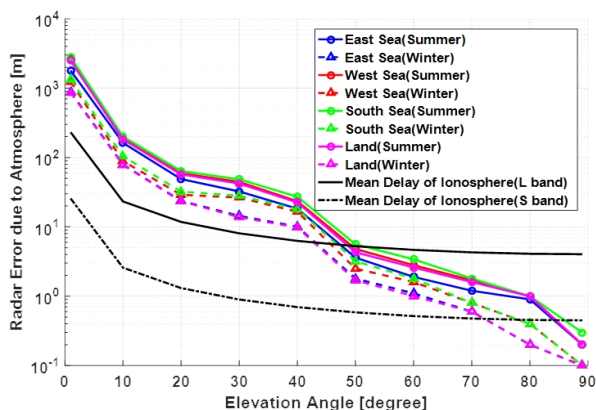


그림 10. 대기권에 의한 레이다 오차 특성
Fig. 10. Characteristics of radar error due to atmosphere.

- [3] R. Varaprasad, V. S. SeshagiriRao, and S. V. B. Rao, "Effect of troposphere and ionosphere on C-band radar track data and correlation of tracking parameters," *Defence Science Journal*, vol. 62, no. 6, pp. 420-426, Nov. 2012.
- [4] J. W. Marini, "Correlation of satellite track data for an arbitrary tropospheric profile," *Radio Science*, vol. 7, no. 2, pp. 223-231, 1972.
- [5] 권세웅, 이종현, 권양원, 이기원, 김한생, 선웅, "장거리 다기능 레이더에서 기상에 의한 고도 탐지 정확도 영향 분석 연구," 한국전자과학회논문지, 25(1), pp. 123-129, 2014년 1월.
- [6] 문현욱, 전민현, 김우중, 오성근, 이종현, 권세웅, 윤영중, "레이더에서 고고도 표적물의 고도 예측 성능 향상을 위한 한국형 지수 모델 개발에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 23(7), pp. 831-839, 2012년 7월.
- [7] 강맹창, 권세웅, 이종현, 이기원, 선웅, 변강일, 추호성, "장거리 탐지 레이더를 이용한 대기상태 분석," 한국전자과학회논문지, 28(2), pp. 120-128, 2017년 2월.
- [8] I. M. Ifadis, "A new approach to mapping of atmospheric effect for GPS observations," *Earth Planets Space*, vol. 52, no. 10, pp. 703-708, 2000.
- [9] *Ionospheric Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Satellite Services and Systems*, ITU-R P. 531-13, 2016.
- [10] *Reference Standard Atmospheres*, ITU-R P.853-3, 1999.
- [11] B. R. Bean, G. D. Thayer, "On models of the atmospheric radio refractive index," in *Proceedings of the IRE*, May 1959, vol. 47, no. 5, pp. 740-755.
- [12] B. R. Bean, G. D. Thayer, "Central radio propagation laboratory exponential reference atmosphere," *Journal Reseach NBS*, vol. 63D, no. 3, pp. 315-317, Jun. 1959.
- [13] D. Bilitza, L. A. Mckinnell, B. Reinisch, and T. Fuller-Rowell, "The international reference ionosphere today and in the future," *Journal of Geodesy*, vol. 85, no. 12, pp. 909-920, Nov. 2011.
- [14] S. M. Radicella, "The NeQuick model genesis, uses and evolution," *Annals of Geophysics*, vol. 52, no. 3-4, pp. 417-422, Aug. 2009.
- [15] Card Index of Radar Sets - Strategic Radar Systems. Available: <http://www.radartutorial.eu/19.kartei/01.oth/karte004.en.html>.
- [16] J. A. Haimerl, G. P. Fonder, "Space fence system overview," in *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technology Conference*, Redhook, NY, Sep. 2015.
- [17] E. Byron, *Radar Principles, Technology, Application*, New Jersey, Prentice-Hall, 1993.
- [18] 이종현, 최은정, 문현욱, 박준태, 조성기, 박장현, 조중현, "우주감시를 위한 L-band 위상배열레이다 시스템 설계," 한국전자과학회논문지, 29(3), pp. 214-224, 2018년 3월.
- [19] Space-Track.org. Available: <http://www.space-trak.org>.

문 현 욱



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2014년 3월~현재: LIG 넥스원 감시정찰

연구센터 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파전파, 무선채널 모델링

염 재 명



1992년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학사)
1994년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 7월~현재: LIG 넥스원 감시정찰 연구센터 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계 및 신호처리, 레이더 모델링 & 시뮬레이션, 우주감시레이더

최 은 정



1997년 2월: 연세대학교 천문대기과학과 (이학사)
1999년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학석사)
2010년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학박사)
2000년 2월~2005년 1월: 한국항공우주산

업(주) 과장

2005년 4월~2012년 10월: 쉐트랙아이(주) 책임연구원

2012년 11월~현재: 한국천문연구원 우주위험감시센터 선임연구원

[주 관심분야] 우주물체궤도분석, 우주위험도분석, 우주감시체계, 우주감시레이더

권 세 응



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG 넥스원 감시정찰

연구소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등

이 중 현



1997년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
2005년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)
2005년 3월~2018년 4월: LIG넥스원 감시

정찰연구센터 수석연구원

2018년 4월~현재: 알에프코어 기술이사

[주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 신호처리, 데이터 처리 등

홍 성 민



2007년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2013년 1월~현재: LIG넥스원 감시정찰연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더시스템 설계, 레이더 신호처리, 우주감시레이더

조 성 기



1990년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이
학사)
1995년 6월: Auburn University 항공우주공
학과 (공학석사)
1999년 6월: Auburn University 항공우주공
학과 (공학박사)
2000년 5월~2004년 9월: 한국전자통신연

구원 선임연구원

2004년 10월~현재: 한국천문연구원 우주위험감시센터 책임연
구원

[주 관심분야] 우주물체궤도결정, 우주위험도분석, 우주감시레
이다, 우주감시체계

조 중 현



1986년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이
학사)
1988년 2월: 연세대학교 천문대기과학과
(이학석사)
2002년 8월: Auburn University 항공우주공
학과 (공학박사)
2005년 11월~현재: 한국천문연구원 우주

위험감시센터 책임연구원

[주 관심분야] 궤도공학, GNSS, 우주감시, 우주감시레이다

박 장 현



1986년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이
학사)
1988년 2월: 연세대학교 천문대기과학과
(이학석사)
1993년 8월: 연세대학교 천문대기과학과
(이학박사)
1991년 9월~현재: 한국천문연구원 우주

위험감시센터 책임연구원

[주 관심분야] 우주물체감시(광학, 레이다)