

장거리 다기능 레이더에서 기상에 의한 고도 탐지 정확도 영향 분석 연구

Analysis of an Altitude Detection Accuracy by a Weather Effect for Long Range and Multi Function Radar

권세웅 · 이종현 · 권양원 · 이기원 · 김한생 · 선 웅

Sewoong Kwon · Jong-hyun Lee · Yangwon Kwon · Kiwon Lee · Han Seng Kim · Woong Sun

요 약

고도 탐지 정확도는 장거리 다기능 레이더 등에서 필수적으로 분석되어야 하는 성능이지만, 기상 등 대기 현상에 의한 영향이 크기 때문에 정확한 분석이 어렵다. 따라서 고도에 따른 굴절율을 사용하여 보상을 수행하는데, 본 논문에서는 고층 기상에 의한 대기 굴절율을 고려할 수 있는 광선 추적 모의환경을 구축하고, 실환경 굴절율과 모델링된 굴절율을 각각 고려하여, 모델링된 굴절율을 실환경에 적용시 발생할 수 있는 고도 오차를 분석하였다. 모델링된 굴절율을 이용하여 고도 오차 보상값을 산출하였으며, 보상에 의한 결과를 모델링하여 고도 보상시 발생할 수 있는 고도 정확도를 정규 함수로 모델링하여 통계적으로 분석하였다.

Abstract

This paper presents an altitude detection accuracy for long range and multifunction radar. The accuracy is difficult to estimate because it is affected by an time varying atmosphere refractivity. We analyze altitude accuracy with a raytracing simulator with atmosphere refractivity. An altitude error is simulated with measured and modeled refractivity, and the modeled refractivity is used for compensate an altitude accuracy. As a result, the error is modeled with normal distribution function, and analyzed.

Key words: Multitfunction Radar, Radar Detection Accuracy, Raytracing, Atmospheric Refraction

I. 서 론

장거리 레이더에서 각도 오차는 신호 크기의 손실을 발생시킬 뿐 아니라, 항공기의 위치에 대한 탐지 오차를 증가시키게 된다. 오차의 증가는 레이더 성능의 중요한 파라미터인 정확도를 낮추게 된다^[1].

특히 군사용 목적으로 사용되는 다기능 레이더의 경우,

표적의 정확한 위치 정보가 활용되어야 하기 때문에 위치에 대한 정확도가 중요한 설계요소이다. 또한, 항공기는 고도에 따라 속도 등 운항 특성이 결정되기 때문에, 관제용 레이더에서는 정확한 항공기 고도 정보가 요구된다^[2].

정확도를 높이기 위한 노력이 신호의 품질을 높이기 위해 신호처리나 하드웨어 설계 단계에서 이루어지며^[1], 외부 기상 환경 변화에 의한 굴절율 변화는 대기 굴절에

LIG 벅스원(LIGNEX1)

· Manuscript received August 23, 2013 ; Revised November 14, 2013 ; Accepted December 11, 2013. (ID No. 20130823-13S)

· Corresponding Author: Sewoong Kwon (e-mail: sewoongkwon@lignex1.com)

의한 고각 오차 예측을 통한 보상값 산출 및 적용으로 정확도를 높이게 된다³⁾. 보상값을 산출하기 위해서는 고도별 굴절율에 대한 정확한 정보가 요구되나, 물리적 한계로 굴절율 모델을 사용하여 고도별 굴절율에 대한 값을 예측하게 된다.

대류권 내의 정상 기상 환경에서 굴절율은 고도에 따라 감소하며, 레이더를 출발한 전파 경로가 지구 방향으로 굽어지게 된다. 이 효과에 의해 레이더에서는 실제 표적의 위치보다 높은 고각에 표적이 위치한 것으로 탐지되며, 이에 대한 고각 오차가 발생하게 된다^{3),4)}. 대류권에서 정상 대기 상태일 때 굴절율은 일반적으로 지수형태로 모델링되며, 표면의 굴절율과 지수 감소 계수로 모델링한다^{5),6)}.

지수 감소 계수는 고도별 굴절율로부터 계산될 수 있으나, 고도별 굴절율을 지속적으로 측정하기 어렵기 때문에, 지면에서 측정된 굴절율로부터 지수 감소 계수를 예측하는 모델을 사용한다⁴⁾. 이 방법은 지면에서 측정된 굴절율로부터 굴절 변화율을 예측하기 위하여 CRPL 모델을 일반적으로 사용하며, 국내에서 측정된 기상 자료를 이용하여 파라미터가 보완된 모델이 연구되었다⁴⁾.

현재까지 국내 기상 파라미터를 사용하여 레이더의 고도 오차가 분석된 사례가 없으며, 따라서 본 논문에서는 레이더에서 고도 오차를 굴절율 모델을 통해 보정한 경우, 실제 환경에서 오차가 얼마나 발생하는지를 통계적으로 분석하였다.

광선 추적법 기반의 전파 굴절 모의 환경을 사용하여 실환경에서 굴절율 변화 현상을 분석하고, 실환경 굴절율과 모델링된 굴절율을 각각 적용하여 고도 정확도를 시뮬레이션하였다. 또한, 모델링된 굴절율을 사용하여 고도 오차를 보상하였으며, 보상 후의 정확도에 대한 통계 분석을 수행하여 그 결과를 제시하였다.

II. 본 론

2-1 전파 모의 환경

고도 오차를 예측하기 위하여 대기굴절율을 고려한 광선추적법 기반 전파 모의 환경 구축을 수행하였다.

광선추적법은 그림 1과 같이 고도별로 다른 굴절율 층

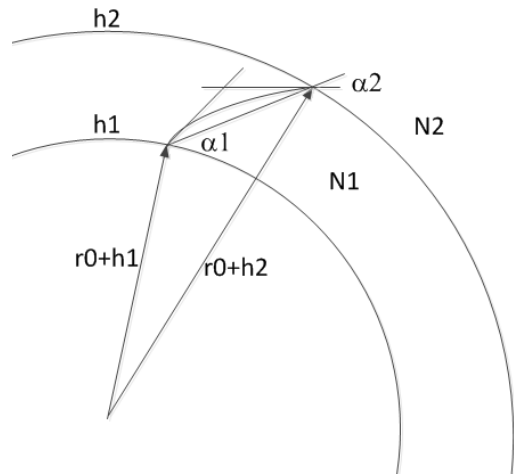


그림 1. 광선 추적법의 기하 구조
Fig. 1. Geometry of raytracing method.

으로 이루어진 지구에 대하여 식 (1)을 반복적으로 계산하여 레이더에서 송신된 신호가 특정 위치의 표적에 도달할 때까지의 경로를 계산하여 탐지 고각을 결정하는 방법이다^{7),8)}.

$$\cos\alpha_2 = \left| 1 + (N_1 - N_2) \times 10^{-6} - \frac{\Delta H}{r_0 + h_1} \right| \cos\alpha_1 \quad (1)$$

여기서 r_0 는 지구 반경, h_1, h_2 는 각각 현재 대기층의 시작과 끝 높이, N_1, N_2 는 각각 현재 대기층과 다음번 층의 굴절율, ΔH 는 현재 층의 높이, α_1, α_2 는 각각 현재층에 의한 굴절각과 다음층의 굴절각이다.

여기서 α_1, α_2 는 각각 굴절율층에 입사하는 입사각과 굴절각이며, N_1, N_2 는 현재와 다음번 굴절율 층이다. ΔH 는 굴절율 층의 두께이며, r 은 지구 중심에서 굴절층까지

표 1. 모의환경 입력 파라미터
Table 1. Simulation input parameters.

항목	값
측정 기준	0 m
표적 거리	300 km
표적 고도	10 km
굴절율 간격(ΔH)	1 m
적용 굴절율	실환경 굴절율 또는 지수굴절율 모델

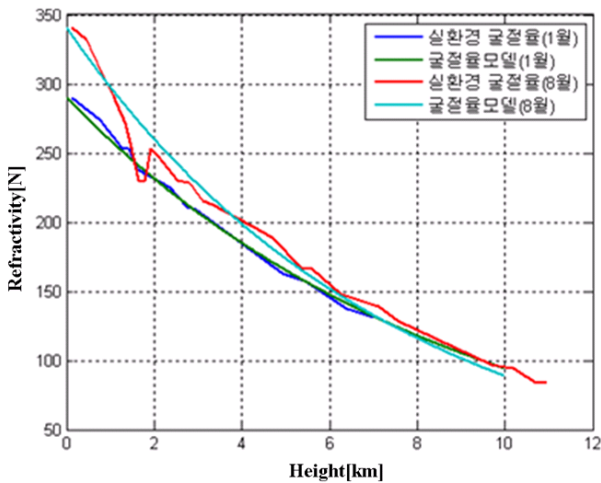


그림 2. 실환경 굴절율과 모델링된 굴절율의 고도별 프로파일(겨울, 여름)

Fig. 2. Measured and modeled refractivity profile(winter, summer).

의 거리이다.

입력 데이터는 고도별 굴절율과 레이더 고도, 표적의 거리, 고도이며, 세부 설정은 표 1과 같다. 항공기 정보는 참고문헌 [4]에서 제시한 정보와 유사하게 설정하였다.

2-2 굴절율 모델

대기 굴절율은 고도별 온도, 기압, 이슬점 압력으로부터 계산되며, 일반적으로 ITU 모델을 사용하여 결정될 수 있다. 이러한 굴절율 특성은 그림 2와 같이 고도에 따라 지수적으로 감소하는 특성을 보이며, 이를 지수굴절율 모델(exponential refractivity model)로 모의할 수 있다.

일반 기상 환경에서 굴절율 지수 감소 모델의 굴절율의 특성은 식 (2)로부터 결정된다^[2].

$$N(h) = N_s \exp(-c_e h) \tag{2}$$

$N(h)$: 고도별 굴절율, N_s : 표면 굴절율,
 c_e : 지수 감소 계수, h : 측정고도

이 모델에서 지수 감소 계수는 고도별 굴절율 측정으로부터 구해질 수 있으나, 실환경에서 주기적으로 고도별 굴절율을 획득하는 것은 어렵기 때문에, 표면 굴절율(N_s)로부터 지수 감소 계수(C_e)를 환산하는 CRPL 모델이 적

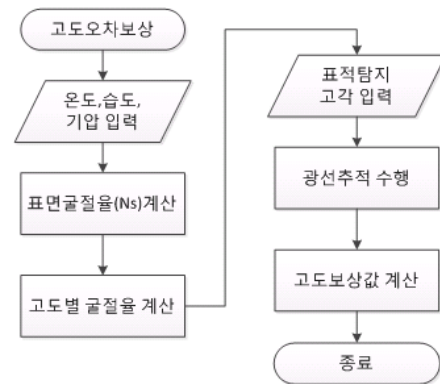


그림 3. 고도오차 보상 알고리즘 흐름도
 Fig. 3. Flowchart of altitude compensation algorithm.

용되고 있다^[3].

$$c_e = \ln \frac{N_s}{N_{1km}} = \ln \frac{N_s}{N_s + \Delta N} \tag{3}$$

$$\Delta N = A \exp(BN_s) \tag{4}$$

여기서 A, B 는 환경에 따른 계수이며, 한국형 지수 모델의 A, B 값은 참고문헌 [4]에 제시되었다.

2-3 고도 오차 보상 알고리즘

레이더에서 굴절율에 의해 발생한 고도 오차는 고도 오차 보상 알고리즘을 통해 보상된다. 이 알고리즘은 그림 3과 같은 구성을 갖는다.

고도별 실환경 대기굴절율은 고도별 온도, 기압, 이슬점 압력으로부터 계산되며, ITU 모델을 적용하여 계산하고, 광선추적법을 통해 표적 탐지 고도(h_D)를 계산한다.

지수굴절율 모델에 의한 굴절율은 운용 사이트에서 측정된 온도, 습도, 기압 데이터로부터 표면굴절율(N_s)을 계산한다. 계산된 표면굴절율로부터 식 (3), (4)을 이용하여 지수 감소 계수(C_e)값을 계산한다. 이 값을 식 (2)에 넣어 고도별 굴절율을 계산하고, 광선추적법을 통해 오차 보상 값(h_c)을 계산한다.

이로부터 고도오차(h_E)는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{고도오차}(h_E) \\ = \text{탐지 고도}(h_D) - \text{고도보상값}(h_c) \end{aligned} \tag{5}$$

III. 결과 분석

3-1 전파굴절환경 분석

속초지역에서 2004~2009년까지 측정된 기상 자료로부터 표면굴절율을 산출하였다. 측정된 자료는 1일 2회 0시와 12시에 측정이 수행되었으며, 30 km까지 고도에 따른 기상 정보 측정을 수행하는 장비(라디오존데)를 이용하여 측정된 온도, 습도, 기압 값을 측정된 자료이다. 이 자료를 고도별 대기굴절율로 환산하고, 지수 감소 계수와 표면굴절율을 regression fitting 방식으로 계산하였다.

그림 4는 이 결과로 얻어진 표면굴절율 그래프이다. 이 그래프에서 볼 수 있는 것과 같이 표면굴절율은 1년 단위 주기성이 관찰되며, 여름철에 표면굴절율 증가, 겨울철에는 표면굴절율이 낮아진다. 또한, 표면굴절율 분포는 260~400 범위에서 발생한다.

3-2 고각/고도 오차 분석

대기굴절율에 의한 오차를 분석하기 위해 단순 굴절율 변화에 대한 고각/고도 오차를 분석하였다. 고도별 굴절율은 한국형 지수 감소 모델을 사용하였으며, 그림 4에서 확인된 것과 같이 300 km에 위치한 고도 10 km 표적에 대하여 260~400 범위에서 굴절율별 고각 오차를 분석하였다.

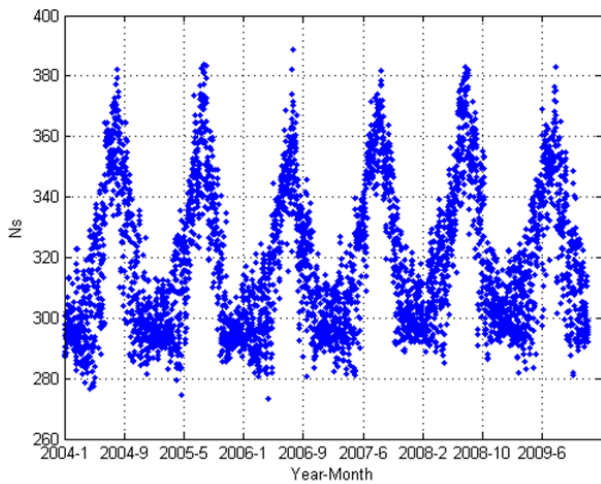
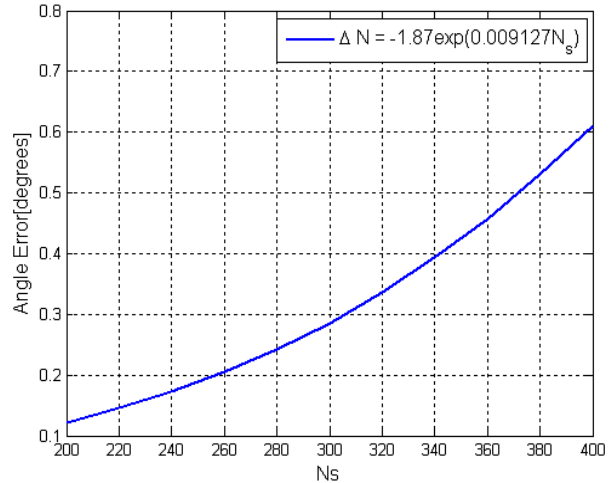


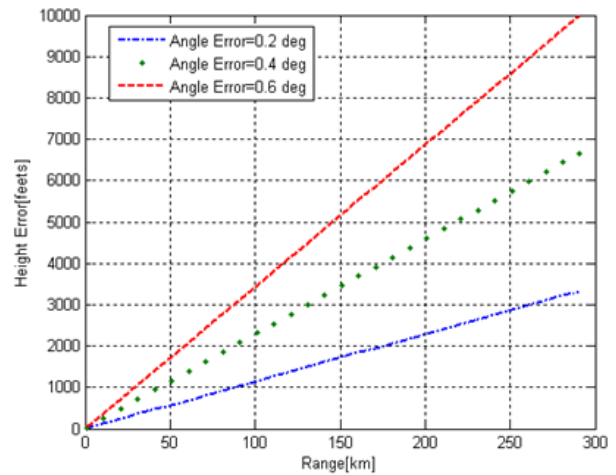
그림 4. 기상 자료로부터 얻어진 표면굴절율
Fig. 4. Surface refractivity obtained from atmosphere data.

그 결과는 그림 5에 나타나 있다. 분석 결과, 굴절율이 260~400인 경우 고각 오차 발생 범위는 0.2~0.6도까지 발생하며, 이 때 표적의 탐지 고도 오차는 3,000~10,000 feet까지 발생하였다.

이로부터 국내 환경에서 굴절율에 의한 고도 오차를 보



(a) 표면굴절율에 따른 고각 오차 특성
(a) Elevation angle error characteristics of surface refractivity variation



(b) 거리별 고각 오차별 고도 오차 특성
(b) Altitude error characteristics of range and elevation angle error variations

그림 5. 표면굴절율에 따른 고각/고도 오차(표적 거리 300 km, 고도 10 km, 속초 지역)

Fig. 5. Elevation/altitude error with surface refractivity(Target range : 300 km, Altitude : 10 km, Sockcho area).

상하지 않으면 300 km에서 최대 10,000 feet까지 오차가 발생하기 때문에 이에 대한 보상이 필수적임을 알 수 있다.

3.3 고도정확도 분석

실환경 굴절율에 의한 고도 오차와 굴절율 모델에 의한 고도 오차에 대하여 표면굴절율과 고도 오차간 상관 관계를 그림 6에 나타내었다. 이 그래프에서 보이는 것과 같이 표면굴절율과 고도 오차 간에는 양의 상관관계가 있으며, 표면굴절율이 증가하면 고도 오차도 증가하는 특성을 보이고 있다. 이는 표면굴절율이 증가하면 전파의 굴절현상이 심해져서 고도 오차가 크게 발생하는 현상으로 파악된다. 굴절율 모델을 적용한 경우는 오차 분산이 적은 반면, 실환경 굴절율은 오차의 분산이 큰 현상이 관찰되었다. 이는 그림 2에서 보이는 것과 같이 모델에 의한 굴절율 결과는 지수함수인데 반해, 실제 환경의 굴절율은 지수형태를 가지더라도 작은 고도 변화구간에서는 굴절율의 변화가 심하며, 이 때문에 고도의 오차 변화폭이 심한 것으로 추정할 수 있다. 따라서 이 오차가 고도 탐지 정확도에 영향을 미치는 것으로 추론할 수 있다.

그림 7은 굴절율 모델을 통해 오차를 보정한 경우, 고도 정확도 결과이다. 해당 알고리즘으로 보정한 경우, 고도 정확도는 정규분포 특성을 가지며, 평균은 173.6 feet, 표준편차는 490.1 feet의 결과를 얻었다. 정규분포 특성을

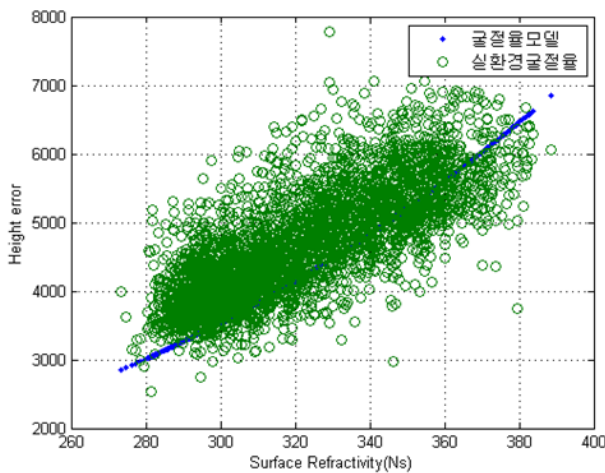
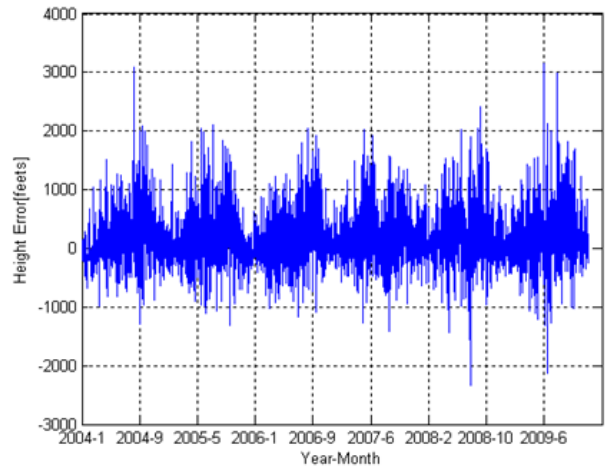
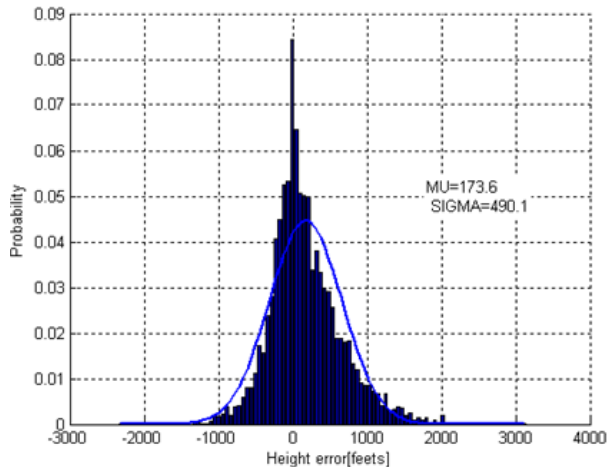


그림 6. 표면굴절율과 고도 오차간 상관 관계
Fig. 6. Correlation between surface refractivity and altitude error.



(a) 고도정확도 예측 결과
(a) Altitude accuracy prediction results



(b) 고도정확도 확률 분포
(b) Altitude accuracy probability density function

그림 7. 고도 탐지 정확도 분석 결과
Fig. 7. Altitude detection accuracy results.

고려할 때 표준편차 σ 에 대하여 1σ 인 490.1 feet 이내에는 66.6%의 샘플이 존재하며, 2σ 인 980.2 feet 이내에서는 95%의 샘플이 존재함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기상에 의한 고도 오차를 기상 데이터로부터 얻어진 굴절율로 분석하고, 기상환경 고려시 굴절율이 고도 탐지 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 분

석 결과, 모델링과 실환경에 의한 차이에 의하여 탐지 정확도 오차가 발생하며, 이 정확도를 정규분포로 모의하였을 때 정확도 범위를 확률적으로 분석하였다.

이 결과를 활용할 경우, 모델링의 정확도 향상 및 국내 장거리 다기능 레이더의 고도 정확도 설계에 기여할 것으로 예상된다.

References

- [1] D. K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, 2005.
- [2] 고시 제2008-23호, 항공교통관제절차, 국토해양부, 2008년 4월.
- [3] E. A. Haering, S. Whitmore, "FORTRAN program for analyzing ground-based radar data: Usage and derivations, version 6.2", *National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program*, 1995.
- [4] 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.
- [5] M. P. M. Hall, L. W. Barclay, and M. T. Hewitt, *Propagation of Radiowaves*, The Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [6] ITU-R P.853-3, *Reference Standard Atmospheres*, 1999.
- [7] T. S. Pittman, "A climatology-based model for longterm prediction of radar beam refraction", *Master's Thesis*, School of Eng., Air Force Institute of Tech., Air Univ., Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999.
- [8] M. D. Abel, *The Theory and Use of Raytracing Model Developed at USAFETAC*, USAFETAC/TN-82/005. US-AF Environmental Technical Applications Center, Scott. AFB IL, Sep. 1982.

권 세 웅



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

센터 선임연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등

이 종 현



1997년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2005년 1월~현재: LIG 넥스원 ISR 연구

센터 수석연구원

[주 관심분야] 레이더, 배열신호처리, 병렬신호처리

권 양 원



1999년 2월: 원광대학교 제어계측공학과 (공학사)
2001년 2월: 원광대학교 전기공학과 (공학석사)
2001년 2월~2009년 1월: STX 엔진 전자통신연구소 선임연구원
2009년 2월~현재: LIG 넥스원 ISR 연구

센터 수석연구원
[주 관심분야] 레이더, 회로설계, EMC 등

김 한 생



2000년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월~현재: LIG 넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템, 안테나 시스템, 디지털 회로 설계

이 기 원



2000년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2002년 8월: 충남대학교 전기공학과 (공학석사)
2002년 7월~현재: LIG 넥스원 ISR 연구센터 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계, 안테나, 신호처리 등

선 응



1986년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
1988년 2월~2000년 6월: 국방과학연구소

선임연구원
2009년 3월~현재: LIG 넥스원 ISR 연구센터 수석연구원
[주 관심분야] 레이더, SAR, 신호처리 등