구형 도파관의 협벽에 이중 슬롯을 가진 비공진형 슬롯 도파관 안테나의 설계

Design of the Non-Resonant SWG Antenna with Double Slots in the Narrow Wall of Rectangular Waveguide

허 문 만

Moon-Man Hur

요 약

본 논문에서는 구형 도파관의 협벽에 이중 슬롯을 가진 비공진형 슬롯 도파관 안테나를 설계하였다. 설계된 협벽 슬롯 도파관 안테나는 슬롯의 기울임 각도에 의해 복사되는 에너지가 결정되기 때문에, 요구되는 부엽 크기를 만족시키는 복사에너지의 크기 분포가 나오도록 각 슬롯의 기울임 각도를 조정하였다. 기울임 각도의 조정은 기존의 슬롯 도파관 안테나의 설계에서 주로 사용되는 슬롯 컨덕턴스 추출 방법이 아닌, 개개의 슬롯 개구면 필드를 푸리에 변환하여 원전계 복사 패턴을 계산하고, 원전계 복사 패턴으로부터 최대 크기의 분포를 산출하는 방법을 사용하였다. 제안된 방법으로 비공진형 이중 슬롯 도파관 안테나를 설계하고, 실제 제작하여 안테나 성능을 측정, 비교하였다.

Abstract

In this paper, the non-resonant SWG(Slotted Waveguide) antenna with double slots in narrow wall of rectangular waveguide is designed. Because energy radiated from each slot depends upon inclination angle of slot of the designed antenna, inclination angle of each slot is controlled to satisfy the amplitude distribution for required sidelobe level. Instead of the conventional extraction method of slot conductance, this amplitude distribution is made by the proposed method, which employs far-field radiation pattern calculated by Fourier transform of aperture field distribution on slot. The non-resonant double SWG antenna is designed by the proposed method and is manufactured. The antenna performances are measured and compared with the simulated results.

Key words : Antenna, Slotted Waveguide, Design Method, Fourier Transform

I. 서 론

슬롯 도파관 안테나는 도파관이 복사체와 급전부의 역할을 동시에 수행하여 따로 급전부가 필요하지 않기 때문에, 전체적으로 가볍고 급전부에 의한 손실을 줄일 수 있으며, 안테나 효율이 높다. 그리고 유전체를 사용하는 안테나와는 달리 금속으로만 구성되어 있어서 큰 전력의 복사가 가능하다. 그리고

도파관 자체를 지지 구조로 사용할 수 있어서 기구적으로 견고한 구조를 갖게 된다^[1]. 따라서, 높은 복사전력과 큰 개구 면적을 필요로 하는 레이더 시스템에 적합한 안테나이다.

그러나 진행파(traveling wave) 안테나 구조의 슬롯 도파관 안테나는 전송 선로인 도파관의 관내 파장(guide wavelength)과 자유 공간 파장의 차이에서 기인하는 사시각(squint) 현상이 발생하며, 사시각도

「이 논문은 2010년도 삼성탈레스(주) 재원을 지원 받아 수행된 연구임.」

삼성탈레스 레이더연구소 요소기술그룹(Core Technology Group, Radar R/D Center, Samsung Thales)

· 논문 번호 : 20101112-164

· 교신저자 : 허문만(e-mail : mhurm@dongguk.edu)

· 수정완료일자 : 2010년 12월 14일

는 동작 주파수에 따라 달라진다. 그러므로 사시각 현상은 레이더 시스템의 주파수 도약(frequency hopping) 시, 불감대(blind sector)를 발생시킨다. 그리고 슬롯의 주기적인 경사 모양이나 어긋남(offset) 위치와 같은 기하학적인 요인에 의해서, 나비 부엽(butterfly-lobe)이 발생하게 되며, 이러한 나비 부엽은 안테나의 복사 효율을 낮추고 레이더 시스템이 나비 부엽의 방향으로 입사하는 재밍(jamming) 신호에 취약하게 만드는 단점을 가지고 있다. 이에 따라, 사시각 현상을 보상할 수 있는 레이더의 빔 스케줄링 (beam scheduling) 기법에 대한 연구와 나비 부엽을 저감할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다^[2].

슬롯 도파관 안테나를 설계하는 일반적인 방법은 요구하는 성능의 복사 패턴을 생성하는 슬롯 컨덕턴스 또는 어드미턴스의 분포를 산출하고, 이 분포와 동일한 컨덕턴스 또는 어드미턴스를 갖도록 슬롯의 각도나 어긋남 위치 등의 구조를 결정하는 것이다. 이에 따라, 슬롯의 구조로부터 슬롯 컨덕턴스를 계산하는 방법에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

슬롯 컨덕턴스를 계산하는 방법은 슬롯 구조로부터 전자기학을 바탕으로 수학적 유도를 통해서 계산하는 고전적인 방법에서부터^{[3][4]}, 실제 슬롯 도파관을 제작하고 시스템 파라미터를 측정해서 컨덕턴스를 추출하는 방법^[5], 그리고 모멘트법이나 유한요소법 등과 같은 전자계 해석 방법으로 슬롯 개구면의 필드를 구하고, 이 필드로부터 컨덕턴스를 계산하는 방법이 있다^{[6][7]}.

그러나 이러한 방법들은 다양한 슬롯 구조에 따라 계산 방법이 달라지기 때문에 범용으로 사용할 수 없으며, 일반적으로 단일 슬롯 구조의 조건에서 컨덕턴스가 유도되기 때문에, 여러 슬롯이 배열되어 발생하는 슬롯 간의 상호 결합(mutual coupling) 효과가 배제되어 있다.

따라서 최근에는 충분한 개수의 동일한 구조를 갖는 슬롯 도파관을 모델링하고 전자계 해석 상용 프로그램으로 시스템 파라미터를 계산하여 슬롯 컨덕턴스를 추출하는 방법이 사용되고 있다^{[8][9]}. 이 방법은 동일한 구조를 갖는 슬롯 간의 상호 결합 효과는 반영되지만, 실제 슬롯 도파관 안테나는 서로 다른 각도가 어긋남을 갖는 슬롯들이 배열되기 때문에, 정확한 상호 결합 효과를 반영하기 어렵다.

본 논문에서는 일반적인 슬롯 컨덕턴스 추출 방법이 아닌, 전자계 해석 상용 프로그램으로 슬롯 도파관 안테나를 모델링하여 해석하고, 각각의 슬롯 개구면의 필드를 계산하여, 이를 푸리에 변환(Fourier transform)함으로써 각 슬롯에 의한 원전계 복사 패턴을 구하였다^[10]. 이러한 각각의 배열 소자에 의한 원전계 복사의 패턴의 크기 분포가 원하는 부엽 크기를 갖는 테일러(taylor) 분포가 되게 함으로써, 슬롯 도파관 안테나를 설계하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 구형 도파관의 협벽(narrow wall)에 이중 슬롯을 갖고 슬롯 간의 간격이 $\lambda_g/2$ 보다 작은 비공진형(non-resonant) 슬롯 도파관 안테나를 설계하였다. 협벽 슬롯 구조는 슬롯의 기울임 각도에 의해 복사되는 에너지가 결정되기 때문에, 요구되는 부엽 크기를 갖는 복사 패턴을 생성하는 크기 분포가 나오도록 각 슬롯의 각도를 조정하였다.

설계된 슬롯 도파관 안테나는 실제 제작하여 안테나 복사 패턴을 측정하였다. 반사 손실, 이득, 빔 폭, 부엽 크기 등의 안테나 성능을 측정한 결과, 제안된 방법은 슬롯 도파관 안테나의 설계 방법으로 유용한 것으로 판단된다.

II. 슬롯 도파관 안테나의 구조

그림 1과 같은 구형 도파관의 협벽에 이중 슬롯을 갖는 비공진형 슬롯 도파관 안테나를 본 논문에서 제안한 방법으로 설계하였다.

안테나의 요구 사항은 표 1과 같다.

협벽 슬롯 구조는 슬롯의 기울임 각도에 의해 복사되는 에너지의 양이 결정되기 때문에, -25 dBc의 부엽 크기를 갖는 복사 패턴을 생성하는 복사 에너지의 크기 분포가 나오도록 각 슬롯의 각도를 조정하

표 1. 안테나 요구 사항

Table 1. Antenna specifications.

동작 중심 주파수	f_c
주파수 대역폭	12.9 %
이득	xx.x dBi
빔 폭	x.x°
부엽 크기	-25 dBc
VSWR	1.5:1

그림 1. 설계된 슬롯 도파관 안테나의 구조
Fig. 1. The structure of designed SWG antenna.

표 2. 안테나 설계 파라미터
Table 2. Antenna design parameters.

슬롯 개수(방위각)	94개
도파관 개수(고각)	2개
슬롯 간의 간격	$0.57 \lambda_0$
도파관 간의 간격	$0.64 \lambda_0$
슬롯의 너비	$0.05 \lambda_0$
이중 슬롯 간의 간격	$0.27 \lambda_0$
슬롯의 길이	$0.51 \lambda_0$
레이돔	Taconix TRF-43-0400

였다. 제안된 방법을 적용하기 위한 슬롯 각도의 초기치는 15° 로 설정하였으며, 다른 설계 파라미터는 표 2에 나타내었다. 그리고 슬롯 도파관 안테나의 동작 주파수를 결정하는 슬롯의 길이는 도파관의 협벽에 파지는 슬롯의 길이와 양쪽 광벽(broad wall)에 파지는 슬롯의 깊이를 더한 것이 되며, 전체 길이가 $0.51 \lambda_0$ 가 되도록 슬롯의 각도에 따라 슬롯의 깊이를 조정하였다. 초기 각도는 모든 슬롯이 15° 로 동일하기 때문에 슬롯의 초기 깊이도 모두 동일하다.

설계된 안테나는 방위각 방향의 나비 부엽 크기를 줄이기 위해서, 인접한 슬롯과 서로 다른 부엽의 각도를 갖는 교번 구조로 배열되어 있으며, 고각 방향으로 두 개의 도파관도 같은 각도의 슬롯들로 교번 배열되어 고각 방향의 나비 부엽 크기를 줄인다. 따라서 두 도파관의 슬롯이 반대 방향이기 때문에, 동일한 위상을 급전하기 위해서 도파관의 급전부에 길이가 $\lambda_g/2$ 인 동위상용 도파관을 삽입하였다. 그리고 도파관의 종단부에 도파관 부하를 연결하여 복사되지 않는 에너지가 반사되어 입사파를 왜곡하지 않도록 하였다. 또한 두 도파관 부하의 연결 위치를 $\lambda_g/4$ 차이가 나도록 하여, 반사파를 서로 상쇄시

킴으로써 반사파에 의한 부엽 크기 증가를 방지하였다.

III. 슬롯 각도의 설계 방법

구형 도파관의 협벽에 이중 슬롯을 가진 비공진형 슬롯 도파관 안테나에서 슬롯 각도의 설계는 각 슬롯 개구면 필드로부터 푸리에 변환을 통해서 원거리 복사 패턴을 계산하고, 이 복사 패턴의 최대 크기비가 원하는 부엽 크기를 갖는 배열 소자의 크기 분포가 되도록 각도를 조정하는 과정으로 진행하였다.

3-1 슬롯 개구면 필드에 의한 원거리 복사 패턴의 계산

무한 크기의 그라운드에 놓인 사각형 또는 원형 슬롯 안테나가 등방성(homogeneous)의 무손실 매질에 에너지를 복사하는 이상적인 경우에는 슬롯 개구면 필드로부터 원거리 복사 패턴을 계산하는데 공간영역(spatial domain) 해석법이 사용되지만, 유한 크기의 그라운드와 비등방성 손실 매질로의 복사와 같은 실제 상황에서는 공간영역 해석이 매우 복잡하기 때문에, 좀 더 손쉬운 해석을 위해서 주파수영역(spectral domain) 해석법을 사용한다^[10].

그림 2와 같은 슬롯 좌표계에서, 주파수영역 해석법에 의한 원거리 복사 패턴은 식 (1), (2)와 같다.

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) \simeq j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} [\hat{\mathbf{a}}_\theta (f_x \cos \phi + f_y \sin \phi) + \hat{\mathbf{a}}_\phi \cos \theta (-f_x \sin \phi + f_y \cos \phi)] \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [\hat{\mathbf{a}}_r \times \mathbf{E}(r, \theta, \phi)] \quad (2)$$

여기서, f_x 와 f_y 는 식 (3), (4)와 같다.

그림 2. 슬롯 개구면의 좌표계
Fig. 2. The coordination of slot aperture.

$$f_x = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} E_{xa}(x', y', z' = 0) \times e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (3)$$

$$f_y = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} E_{ya}(x', y', z' = 0) \times e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (4)$$

그러므로 슬롯 개구면 필드의 접선 성분 E_{xa} 와 E_{ya} 로부터 원거리 복사 패턴을 구할 수 있다.

3-2 원거리 복사 패턴의 최대 크기 분포의 계산

슬롯 도파관 안테나의 각 슬롯의 개구면 필드로부터 각각의 원거리 복사 패턴을 구하기 위해서, 전자계 해석 상용 프로그램인 CST사의 MWS를 이용하여 슬롯 도파관 안테나를 모델링하였다.

94개의 슬롯 각도의 초기치는 모두 15° 로 설정하였다. 이 때, 슬롯 도파관 안테나의 슬롯이 위치한 평면에서의 접선 성분 전계의 크기 분포를 구하면 그림 3과 같다.

각 슬롯에서의 개구면 필드의 접선 성분 E_{xa} 와 E_{ya} 를 구하고, 식 (3), (4)를 이용하여 f_x 와 f_y 를 구

그림 4. 각 슬롯의 원거리 복사 패턴에 대한 최대 크기 분포(초기 각도)
Fig. 4. The distribution of peak value for far-field pattern of each slot(initial angle).

한다. 그리고 식 (1), (2)를 이용하여 각 슬롯의 개구면 필드에 의한 원거리 복사 패턴을 구한 다음, 각각의 원거리 복사 패턴의 최대 크기 분포를 구한다.

그림 4는 각 슬롯의 각도를 모두 15° 로 설정하였을 때, 각 슬롯의 원거리 복사 패턴의 최대 크기 분포를 나타낸 것이다.

그림 4와 같이, 초기 각도의 경우에는 모든 슬롯이 동일하게 15° 로 설정되었기 때문에, 도파관의 급전부와 가까운 첫 번째 슬롯에서 가장 큰 에너지가 복사된다. 이 초기 각도로부터, 요구되는 부엽 크기를 생성하는 테일러 분포가 되도록 각각의 슬롯 각도를 조정하여 최적화한다.

3-3 슬롯 각도의 최적치

제안된 방법을 이용하여, 원하는 테일러 분포가 나오도록 슬롯 각도를 최적화하였다. 각각의 슬롯 각도를 조정하고 전자계 해석 상용 프로그램을 이용하여 모델링한 후, 슬롯 개구면에서의 접선 성분 필드 분포를 계산하였다. 계산된 접선 성분 필드 분포로부터 각 슬롯에 의한 원거리 복사 패턴을 구하고,

그림 3. 슬롯 도파관 안테나의 접선 성분 전계의 크기 분포(초기 각도)
Fig. 3. The amplitude distribution of tangential electric fields of slotted waveguide antenna(initial angle).

그림 5. 각 슬롯의 원거리 복사 패턴에 대한 최대 크기 분포(최적 각도)

Fig. 5. The distribution of peak value for far-field pattern of each slot(optimum angle).

최대 크기 분포를 산출하여 원하는 테일러 분포와 비교하였다.

슬롯의 각도는 시행착오법으로 최적화하였으나, 계산횟수와 시간을 줄이기 위해서 기존의 슬롯 컨덕턴스 추출 방법에 의해서 계산된 슬롯 각도로부터 시작하였다^[11].

그림 5은 최적화된 슬롯의 각도를 갖는 슬롯 도파관 안테나의 각 슬롯의 원거리 복사 패턴의 최대 크기 분포를 나타낸 것이다. -25 dBc의 부엽 크기를 생성하는 테일러 분포를 갖도록 슬롯 각도를 최적화하였으며, 전체 슬롯의 길이는 $0.51 \lambda_0$ 가 되도록 각 슬롯 각도에 따라 도파관의 광벽에 파지는 슬롯의 깊이를 조정하였다.

그림 6은 94개의 최적화된 슬롯의 각도와 깊이를 나타낸 것이며, 이 최적화된 파라미터를 갖는 슬롯 도파관 안테나의 슬롯면에서의 접선 성분 전계의 크기 분포는 그림 7에 나타내었다. 슬롯 도파관의 중간 부근에서 가장 큰 에너지가 복사하는 것을 알 수 있다.

그림 6. 최적화 된 슬롯의 각도와 깊이

Fig. 6. The optimum values for slot angle and depth.

IV. 제작 및 측정

4-1 슬롯 도파관 안테나의 제작

제안된 설계 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 설계된 슬롯 도파관 안테나를 제작하고, 그 특성을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 밀링 머신을 이용하여, 도파관에 설계된 각각의 각도와 깊이에 맞는 94개의 슬롯을 가공하였다. 그림 8은 제작된 슬롯 도파관을 나타낸 것이다.

도파관 부하는 흡수체 물질을 기구물에 부착하여 급전부의 반대쪽에 삽입하였으며, 급전부에는 플랜지(flange)를 따로 제작하여 접착 방식으로 부착하였다. 또한 2개의 슬롯 도파관은 서로 반대 방향을 슬

그림 8. 제작된 슬롯 도파관

Fig. 8. The picture of manufactured slotted waveguide.

그림 7. 슬롯 도파관 안테나의 접선 성분 전계의 크기 분포(최적 각도)

Fig. 7. The amplitude distribution of tangential electric fields of slotted waveguide antenna(optimum angle).

그림 9. 측정을 위한 슬롯 도파관 배열 안테나
Fig. 9. The picture of slotted waveguide array antenna for measurement.

롯 각도를 갖기 때문에, 동위상 급전을 위하여, 위쪽의 슬롯 도파관에 $\lambda_g/2$ 길이의 동위상용 연장 도파관을 삽입하였다.

안테나의 복사 패턴 측정은 근거리장 스캐닝 시스템(near-field scanning system)을 이용하여 근접 전자기장을 측정 후, 원거리 복사 패턴으로 변환하는 방법을 사용하였다. 이 때, 근거리장 측정 프로브의 수직 방향 스캔 한계($< 60^\circ$)로 인하여, 피측정 안테나의 수직 방향의 복사 패턴을 제한하는 플레어(flare)를 부착하였다. 그리고 레이더를 슬롯면에 부착하여 안테나의 성능을 측정하였다.

그림 9는 측정에 사용된 슬롯 도파관 배열 안테나의 사진을 나타낸 것이다.

4-2 측정 결과

제작된 슬롯 도파관 배열 안테나의 반사 손실은 그림 10과 같다. 제작된 안테나는 슬롯 간의 간격이 $\lambda_g/2$ 보다 작은 비공진형 슬롯 구조를 갖기 때문에 반사 손실 특성이 우수하다.

제안된 슬롯 도파관 안테나의 설계 방법의 유효성을 살펴보기 위해서, 설계 목표인 부엽 크기를 살펴보았다. 그림 11은 제작된 안테나의 원거리 복사 패턴의 계산값과 측정값을 나타낸 것이다. 그림 11의 복사 패턴 결과로부터, 설계 목표인 부엽의 크기는 계산값과 측정값 모두 요구 조건인 -25 dBc를 만족하는 것을 알 수 있다. 그리고 슬롯 도파관 안테나에서 관내 파장과 자유 공간 파장의 차이에 의해

그림 10. 슬롯 도파관 배열 안테나의 반사 손실
Fig. 10. The measured return loss of slotted waveguide array antenna.

야기되는 주파수에 따라 주 빔의 방향이 달라지는 사시각 효과도 나타나는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 슬롯 도파관 안테나의 설계 방법으로 각 슬롯의 개구면 필드로부터 원거리 복사 패턴을 계산하고, 각각의 원거리 복사 패턴의 최대 크기의 분포를 계산하여 원하는 부엽 크기를 만족하는 테일러 분포를 갖도록 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 설계 방법의 유효성을 확인하기 위해서, 구형 도파관의 협벽에 이중 슬롯을 가진 비공진형 슬롯 도파관 안테나에 적용하였으며, 각 슬롯의 각도를 제안된 방법으로 설계하고, 실제 제작하여 복사 패턴의 부엽 크기를 측정하였다. 측정 결과, 설계 요구 규격인 -25 dBc의 부엽 크기를 만족하는 것을 확인하였다.

향후, 다양한 구조의 슬롯 도파관 안테나에 제안된 방법을 적용하고 실험적으로 확인하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Mizutani, K. Sakakibara, N. Kikuma, and H. Hayama, "Grating lobe suppression of narrow-wall slotted hollow waveguide millimeter-wave planar antenna for arbitrarily linear polarization", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 2, pp. 313-

(a) 상대주파수=0.90
(a) Relative frequency=0.90

(b) 상대주파수=0.95
(b) Relative frequency=0.95

(c) 상대주파수=1.00
(c) Relative frequency=1.00

(d) 상대주파수=1.05
(d) Relative frequency=1.05

(e) 상대주파수=1.10
(e) Relative frequency=1.10

그림 11. 슬롯 도파관 배열 안테나의 복사 패턴

Fig. 11. The simulated and measured radiation pattern of slotted waveguide array antenna.

320, Feb. 2007.

[2] D. C. Chang, C. I. Hung, C. C. Lin, J. W. Lin, K.

T. Ho, and T. M. Lee, "Suppression of second order beam for traveling wave slot arrays", *Asia-Pacific*

- Microwave Conference Proc., APMC-1993*, vol. 1, pp. 63-66, May 1993.
- [3] W. H. Watson, "Resonant slots", *Proc. IEE, pt. III-A*, vol. 93, pp. 747-777, 1946.
- [4] B. N. Das, J. Ramakrishna, and B. K. Sarap, "Resonant conductance of inclined slots in the narrow wall of a rectangular waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-32, no. 7, pp. 759-761, Jul. 1984.
- [5] M. G. Chernin, "Slot admittance data at Ka band", *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 4, issue 4, pp. 632-636, Oct. 1956.
- [6] C. G. Jan, P. Hsu, and R. B. Wu, "Moment method analysis of sidewall inclined slots in rectangular waveguides", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, no. 1, pp. 68-73, Jan. 1991.
- [7] C. G. Jan, R. B. Wu, P. Hsu, and D. C. Chang, "Analysis of edge slots in rectangular waveguide with finite waveguide wall thickness", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 8, pp. 1120-1126, Aug. 1996.
- [8] K. W. Brown, "Design of waveguide slotted arrays using commercially available finite element analysis software", *IEEE AP-S International*, vol. 2, pp. 1000-1003, 1996.
- [9] M. Q. Qi, W. Wang, and M. P. Jin, "A method of calculating admittance of waveguide slot", *Asia-Pacific Microwave Conference Proc., APMC-2005*, vol. 4, Dec. 2005.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, Wiley, 2nd Ed., pp. 620-630, 1997.
- [11] C. G. Jan, R. B. Wu, and P. Hsu, "Variational analysis of inclined slots in the narrow wall of a rectangular waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 42, no. 10, pp. 1455-1458, Oct. 1994.
- [12] Dan Slater, *Near-field Antenna Measurements*, Artech House, pp. 7-29, 1991.

허 문 만

1997년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학박사)

2007년 2월~2008년 3월: 한국전자통신연구원 안테나연구팀 Post-Doc.

2008년 4월~현재: 삼성탈레스 레이더연구소 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 안테나 설계, 전자파 수치 해석