

위상 배열 안테나 임피던스 부정합에 따른 실시간 지연회로의 위상 지연 오차 및 영향 분석

Analysis of TTD Phase Delay Error and Its Effect on Phased Array Antenna due to Impedance Mismatch

윤 민 영 · 남 상 욱

Minyoung Yoon · Sangwook Nam

요 약

일반적으로 반사파 및 공진이 위상 왜곡에 영향을 준다고 많이 알려져 있지만, 그 두 가지 이유 이외에 안테나 임피던스 변화에 따라서도 위상 지연을 왜곡시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 상호 결합 영향을 모두 고려한 안테나 임피던스 Z_A 에 따른 위상 지연 오차를 분석하고, 이에 따른 빔조향 특성을 확인하였다. 안테나 임피던스에 대한 반사손실의 최대값(RL_{max})이 -10 dB와 -7 dB일 때 모든 주파수에서 각각 0.051λ 에 해당하는 18.5° 와 0.074λ 에 해당하는 26.5° 의 최대 위상 지연 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 8개의 선형 배열 안테나를 통해 몬테 카를로 시뮬레이션을 진행한 결과, 18.5° 와 26.5° 의 균등 분포 위상 오차를 갖는 상황에서 각각 $0\sim 30^\circ$ 의 빔조향을 했을 때 목표 빔조향각과 해당 위상 오차에 의해 틀어져서 관측되는 조향각 사이의 RMS 오차는 $0.19\sim 0.4^\circ$ 이고, 표준편차는 $0.14\sim 0.33^\circ$ 이다. 이때 사이드 로브 레벨은 -12.8 dB의 이론치로부터 위상 오차에 의해 $0.74\sim 1.21$ dB 만큼 증가하고 사이드 로브 레벨 증가량의 표준 편차는 $0.31\sim 0.51$ dB를 갖는다. 이를 스파이럴 안테나 8개 배열 구조를 설계하여 검증하였다.

Abstract

It is well known that reflected waves and resonance affect phase distortion. In addition, phase delay can be distorted by antenna impedance. In this study, we analyze the phase delay variation caused by the antenna impedance, considering mutual coupling effects. In addition, we confirm the beam steering characteristics. When was -10 dB and -7 dB, the maximum phase delay error was 18.5° and 26.5° , respectively. The Monte Carlo simulation with an eight-element linear array antenna demonstrated that the RMS error of the beam steering angle ranged from 0.19° to 0.4° , and the standard deviation ranged from 0.14° to 0.33° when the beam steering angle was in the range of 0° to 30° , with the uniformly distributed phase error of 18.5° and 26.5° . The side lobe level increased from 0.74 dB to 1.21 dB by the phase error from the theoretical value of -12.8 dB, with a standard deviation of 0.31 dB to 0.51 dB. This is verified by designing an eight-element spiral array antenna.

Key words: Key True-Time Delay Circuit, Phase Delay, Antenna Impedance, Beamforming

「본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University)

· Manuscript received August 14, 2018 ; Revised September 12, 2018 ; Accepted November 16, 2018. (ID No. 20180814-082)

· Corresponding Author: Minyoung Yoon (e-mail: ymy@ael.snu.ac.kr)

I. 서 론

위상 배열 안테나는 레이더 및 무선 통신 시스템에서 다양하게 사용되고 있다^[1]. 위상 배열 안테나가 다양한 형태로 시스템에 적용되기 위해서는 광대역으로 동작해야 하기 때문에 광대역 빔조향 네트워크에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 위상 변위기를 이용하는 위상 배열 안테나 시스템은 빔 편이 현상으로 인해 협대역으로 동작하는 단점이 있다^[2]. 실시간 지연회로는 이러한 단점을 해결하여 광대역에서 빔조향이 가능하도록 한다. 광대역 빔조향을 위한 실시간 지연회로를 설계할 때는 위상 왜곡의 정도를 나타내는 군 지연 시간(group delay)이나 위상 지연(phase delay)을 살펴보게 된다^[3]. 일반적으로 많이 알려진 전송선로 내에서 위상 왜곡에 영향을 주는 요소는 부정합(mismatch)과 불연속(discontinuity)에 의한 반사파이다^[4]. 실시간 지연회로를 구성할 때 기본적으로 사용하는 switched 라인 구조를 사용하면 회로 내에서 발생하는 다중 반사파들이 출력에서 서로 다른 위상을 가지며 더해지면서 위상 왜곡을 나타내게 된다. 하지만 실시간 지연회로 내에서 존재하는 불연속 부분들인 IC 스위치의 직렬 저항값은 수 옴(ohm) 정도로 출력에서 더해지는 반사파들의 크기가 매우 작아 무시할 수 있다. 두 번째로 고려해 볼 수 있는 요소는 격리도(isolation) 특성이 보통인 스위치를 사용했을 때는 공진이 발생하여 입출력 위상 특성에 영향을 줄 수 있기에 피해서 설계해야 한다^[5]. 이 공진 현상은 격리도 특성이 우수한 스위치를 사용하면 해결할 수 있다. 이를 토대로 반사파를 줄이고 공진 현상을 없애는 방향으로 실시간 지연회로를 우수하게 설계한다고 하더라도 안테나 임피던스에 의해서도 위상이 왜곡될 수 있다. 본 논문에서는 안테나 임피던스에 따른 위상 지연 변화를 분석하고, 이에 따른 빔조향 특성을 확인하였다.

II. 안테나 임피던스에 따른 위상 지연 오차

전자전에서 사용하는 방해 전파 송신기는 일반적으로 광대역 빔조향이 가능하도록 한다. 상대의 위치를 탐색하여 해당 위치로 상대 신호의 주파수에 따라 원하는 주파수를 선택하고, 상대 위치를 탐색하여 해당 방향으로 빔

조향을 해서 큰 전력의 신호를 쏘 주어야 하기 때문이다. 이때 광대역에서 빔조향이 가능하게 하기 위한 실시간 지연회로를 설계할 때 일반적으로 다중 반사파에 의한 영향과 공진이 발생하지 않도록 하여 설계한다. 하지만 이러한 요소들을 고려하여 위상 왜곡이 전혀 없는 실시간 지연회로를 설계한다고 하더라도 안테나 임피던스에 의해 위상 지연 특성이 영향을 받을 수 있는데, 이에 대해 정리해 놓은 연구가 없다. 협대역 안테나의 경우, S_{11} 의 크기를 -20 dB 이상까지 줄일 수 있지만 광대역 안테나를 설계할 때는 광대역에서 매칭을 해야 하기 때문에 안테나를 바라본 반사 계수의 최대값이 커질 수밖에 없다. 더욱이 위상 배열 안테나의 경우, 단일 안테나 임피던스가 상호 결합(mutual coupling) 영향에 의해 변하게 되는데, 이를 포함한 개념을 능동 반사계수라고 한다. 이는 배열 소자의 위상 분포에 따라서 바뀌게 되는 값으로 본 논문에서는 이런 모든 영향을 포함한 임피던스를 그림 1과 같이 Z_A 로 모델링하여 진행하였다.

그림 2와 같이 Z_A 에서의 반사계수가 $\Gamma(\omega)$ 일 때 T_0 의 지연시간을 갖는 전송선로에 $f_i(t)$ 의 입력 전압 신호를 보내게 되면 다음과 같이 $\Gamma(\omega)$ 의 크기와 위상에 따라 출력 전압 신호 $f_o(t)$ 가 영향을 받게 된다.

$$F_o(\omega) = F_i(\omega)e^{-j\omega T_0}[1 + \Gamma(\omega)] \quad (1)$$

$$f_o(t) = f_i(t - T_0) + f_i(t - T_0) * F^{-1}[\Gamma(\omega)] \quad (2)$$

식 (1)의 $F_o(\omega)$ 는 출력 전압 신호 $f_o(t)$ 을 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 표현한 수식이다. 반사파들이 더해져서 생기는 영향뿐 아니라, 부하에서 생기는 반사 자

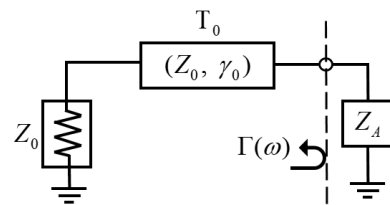


그림 1. Z_A 의 안테나 임피던스를 부하로 갖고 T_0 의 지연 시간을 갖는 전송선로 회로

Fig. 1. Transmission line circuit with delay time of T_0 for antenna load of Z_A .

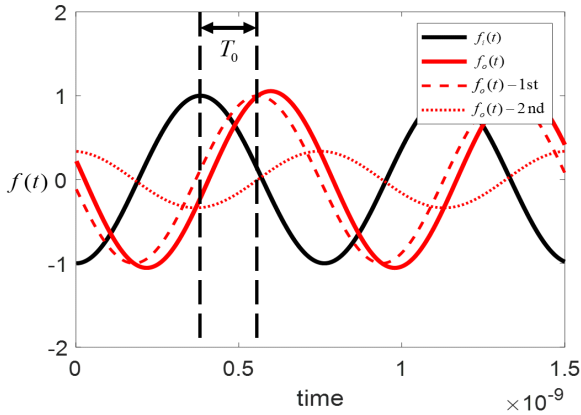


그림 2. 식 (2)에 있는 출력에서의 신호 수식의 첫 번째 항과 두 번째 항
 Fig. 2. First term and second term of equation (2).

체만으로 출력 신호에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 실시간 지연회로 설계 및 측정을 진행할 때 입력과 출력을 Z_0 로 놓고 진행할 때 간과할 수 있는 요소이다. 광대역 안테나 시스템에서 방해 전파 수신기의 경우, 연속파(CW)를 발생시키게 되는데, 이때 반사 계수의 크기와 위상에 따라 식을 정리하면 다음과 같다.

$$f_o(t) = \sin[\omega(t - T_0)] + |\Gamma| \sin[\omega(t - T_0) + \angle \Gamma] \quad (3)$$

$$f_o(t) = \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos \angle \Gamma} \sin[\omega(t - T_0) + \epsilon] \quad (4)$$

$$\epsilon = \tan^{-1} \left(\frac{|\Gamma| \sin \angle \Gamma}{1 + |\Gamma| \cos \angle \Gamma} \right) \quad (5)$$

$$RL = -20 \log |\Gamma| \text{ (dB)} \quad (6)$$

반사계수의 크기와 위상에 따라 위상 지연에 ϵ 만큼 오차가 발생한다. 반사 계수는 식 (6)과 같이 반사 손실로 표현할 수 있다. 안테나 임피던스에 따라 반사손실의 최대값이 값이 결정되게 되는데 RL_{max} 가 -10 dB일 때 모든 주파수에서 0.051λ 에 해당하는 18.5° 의 최대 위상 지연 오차가 발생하고, RL_{max} 가 -7 dB일 때 0.074λ 에 해당하는 26.5° 의 최대 위상 지연 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

III. 위상 지연 오차에 따른 빔조향 시뮬레이션

앞에서 구한 안테나 임피던스에 따른 위상 지연 오차를 이용하여 빔조향 시뮬레이션을 진행하여 위상각과 사이드 로브(side lobe)에 주는 영향을 확인하였다. 그림 3에서와 같이 8개의 안테나가 반 파장의 간격을 가지고 배열을 가정하였다. 원하는 빔조향각 θ 에 따라 필요한 위상값을 앞에서 구한 최대 위상 지연 오차를 균등 분포의 형태로 추가하여 몬테 카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션 진행하여 빔조향각과 사이드 로브 레벨을 얼마나 열화시킬 수 있는지 확인하였다. 8개 소자에 인가되는 신호의 크기가 동일한 균일 배열일 때 -12.8 dB의 이론적인 사이드 로브 레벨(side lobe level) 값을 가지므로 해당 값에서 얼마나 사이드 로브가 증가하는지 확인하였다. 그림 4는 $RL_{max} = -7$ dB, $\epsilon_{max} = 26.5^\circ$ 일 때 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 30° 빔조향한 결과이다. Z_A 에 의해 생기는 위상의 오차로 인해 그림 4와 같이 빔조향각이 흔들리고 사이드 로브 레벨 값이 올라오게 된다. 각 RL_{max} , ϵ_{max} , θ 에 따른 빔조향각의 RMS 오차와 사이드 로브 레벨의 증가량을 표 1과 표 2를 통해 정리하였다. 신호의 크기를 조절하는 테일러 테이퍼(Taylor taper)를 사용하게 되면 -20 dB까지 사이드 로브 레벨을 낮출 수 있는데, 이때 $\epsilon_{max} = 26.5^\circ$ 의 위상 오차를 가진 상태에서 30° 로 빔조향하였을 때의 사이드 로브 증가량은 4.32 dB이고, 표준 편차는 0.85 dB이다. 이와 같이 Z_A 에 의한 반사 Γ 에 의해 빔조향이 영향을 받을 수 있기 때문에 광대역으로 안테나를 설계할 때 능동 반사 계수 값의 최대값이 너무 크지 않게

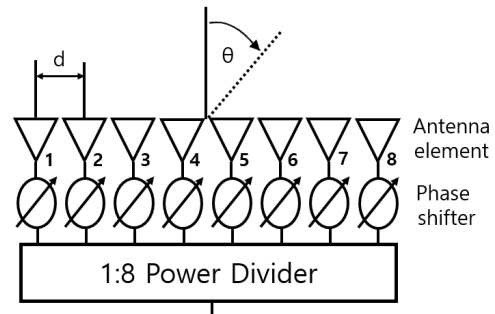


그림 3. 1차원 선형 배열 안테나 시스템
 Fig. 3. 1D linear array antenna system.

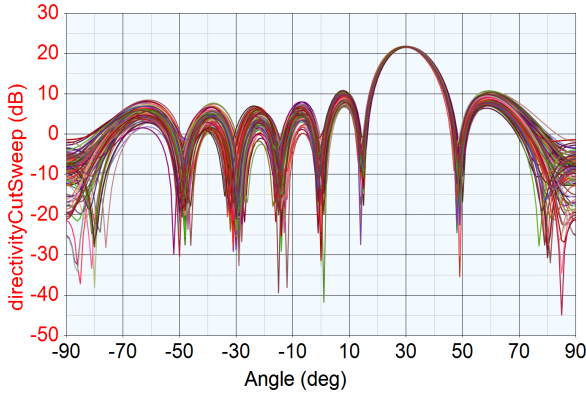


그림 4. 8개 소자의 균일 배열 안테나에서 $RL_{max}=-7$ dB, $\epsilon_{max}=26.5^\circ$ 일 때 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 30° 빔조향한 100개의 샘플링 결과
 Fig. 4. Monte Carlo simulation 100 sampling result with beamsteering angle of 30° at $RL_{max}=-7$ dB, $\epsilon_{max}=26.5^\circ$ of 8 elements uniform array.

표 1. Γ_{max} , ϵ_{max} , θ 에 따른 빔조향각의 RMS 오차 및 표준 편차
 Table 1. RMS error and standard deviation of beam steering angle according to Γ_{max} , ϵ_{max} , θ .

	Steering angle	Steering angle	
		RMS error($^\circ$)	Standard deviation($^\circ$)
$RL_{max}=-10$ dB, $\epsilon_{max}=18.5^\circ$	$\theta=0^\circ$	0.28	0.14
	$\theta=10^\circ$	0.19	0.19
	$\theta=20^\circ$	0.20	0.20
	$\theta=30^\circ$	0.22	0.22
$RL_{max}=-7$ dB, $\epsilon_{max}=26.5^\circ$	$\theta=0^\circ$	0.41	0.21
	$\theta=10^\circ$	0.28	0.28
	$\theta=20^\circ$	0.34	0.33
	$\theta=30^\circ$	0.3	0.3

하도록 주의해야 한다.

IV. 실제 안테나 모델을 통한 검증

앞에서 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 살펴본 안테나 임피던스에 따른 위상 지연 오차의 영향을 검증하기 위해 실제 안테나를 설계하였다. 광대역 안테나를 설계한

표 2. Γ_{max} , ϵ_{max} , θ 에 따른 사이드 로브 레벨의 증가량 및 표준 편차

Table 2. Increase level and standard deviation of sidelobe level according to Γ_{max} , ϵ_{max} , θ .

	Steering angle	Sidelobe level	
		Increase level(dB)	Standard deviation(dB)
$RL_{max}=-10$ dB, $\epsilon_{max}=18.5^\circ$	$\theta=0^\circ$	0.74	0.34
	$\theta=10^\circ$	0.74	0.31
	$\theta=20^\circ$	0.80	0.35
	$\theta=30^\circ$	0.82	0.32
$RL_{max}=-7$ dB, $\epsilon_{max}=26.5^\circ$	$\theta=0^\circ$	1.08	0.42
	$\theta=10^\circ$	1.12	0.51
	$\theta=20^\circ$	1.21	0.50
	$\theta=30^\circ$	1.18	0.50

이유는 넓은 대역 내에서 매칭을 하기 위해서는 부분적으로 능동 반사 계수의 크기가 커질 수도 있는 구조이기 때문이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 설계한 안테나는 각각 two-arm 스파이럴 안테나로 소형화를 위해 바깥쪽에 간격을 둔 로딩(gap-loading)을 추가하였다^[6]. 안테나 간격은 4 GHz에서의 반 파장인 37.5 mm이고, 한쪽 아래 반사판을 놓아 한쪽으로 방사할 수 있도록 설계하였다.

안테나 사이의 결합(coupling)이 없다면 모든 안테나의 안테나 임피던스로부터 발생하는 위상 오차가 동일하게 적용되어 빔 조향에 영향을 주지 않는다. 그러나 안테나 사이의 결합(coupling)이 존재하게 되면 동일한 안테나를 배열했다고 하더라도 같은 주파수에서의 능동 반사계수의 크기와 위상은 다르기 때문에 원하는 빔조향각에서 틀어질 수 있고, 사이드 로브 레벨도 커질 수 있다. 30도

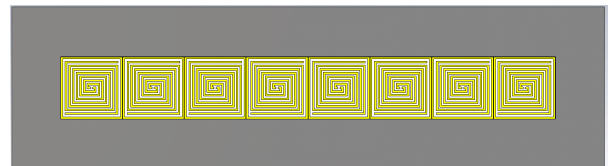


그림 5. 스파이럴 안테나 8개의 선형 배열 모델
 Fig. 5. Linear array model with spiral antenna of 8 elements.

빔조향을 위해 필요한 위상을 각 안테나 별로 인가한 후 그 때의 각 안테나 소자의 능동 반사 계수 크기와 위상을 추출하였다. 예상대로 안테나 간 결합 특성에 의해 안테나 소자 별 크기와 위상이 다르고, 그에 따른 위상 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 해당 위상 오차를 표 3에 정리하였다. 해당 위상 오차를 가지고 빔조향을 하였을 때 특성을 표 4에서 확인할 수 있다. 3, 4 GHz에서는 각각 능동

표 3. 30도 빔조향할 때 주파수별 능동반사계수의 크기와 위상, 그에 따른 위상 지연 오차

Table 3. The magnitude and phase of active reflection coefficient(ARC) and phase delay error according to each frequency.

	Number of element	Active reflection coefficient		Phase delay error(°)	
		Magnitude(°)	Phase(°)		
Beam steering angle : 30°	2 GHz	1	-5.9	-31.8	26.5
		2	-4.3	-32.7	4.9
		3	-5.8	-47.2	-60.4
		4	-10.5	-38.2	34.8
		5	-6.9	-37.9	-51.0
		6	-6.4	-63.0	-24.4
		7	-8.5	-43.7	-13.9
		8	-9.9	-37.4	9.1
	3 GHz	1	-14.5	-94.5	-7.0
		2	-11.5	-85.4	-12.7
		3	-12.6	-80.6	8.1
		4	-12.5	-101.0	13.9
		5	-8.8	-91.3	11.6
		6	-9.7	-65.8	10.4
		7	-14.9	-66.8	-13.9
		8	-12.6	-98.4	13.9
	4 GHz	1	-15.6	114.5	5.8
		2	-16.9	81.0	4.7
		3	-14.6	76.8	-5.8
		4	-14.4	80.8	7.0
		5	-13.9	80.2	7.2
		6	-13.4	90.4	-7.0
		7	-16.7	99.1	5.8
		8	-15.4	55.4	-5.8

표 4. 30도 빔조향할 때 주파수별 능동반사계수의 크기의 최대값에 따른 빔조향 특성

Table 4. Beam steering characteristics according to maximum value of ARC when steering 30 degree beam.

	Beam steering angle: 30°		
	2 GHz	3 GHz	4 GHz
Maximum of arc magnitude value	-4.3 dB	-8.8 dB	-13.4 dB
Maximum phase delay error	-60.4°	13.9°	7.2°
Beam steering angle error	-2°	1°	0°
Sidelobe level increase	5.03 dB	1.6 dB	0.67 dB

반사 계수의 최대값이 -8.8 dB, -13.4 dB이고, 최대 위상 지연 오차가 13.9°, 7.2°이다. 그 때 빔조향 각 오차는 각각 1°, 0°이고, 사이드로브 레벨 증가량은 1.6 dB, 0.67 dB이다. 이 결과는 앞서 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 예상한 범주 이내에 들어오기 때문에 안테나 임피던스에 따른 위상 지연 특성 변화를 정확히 예측했음을 알 수 있다. 또한 능동반사계수의 크기의 최대값이 -4.3 dB만큼 올라오는 2 GHz의 신호를 사용하였을 때는 최대 -60.4°의 위상지연 오차를 가지고 -2°의 빔조향각 오차와 5.03 dB의 사이드로브 레벨 증가량을 갖는 것을 확인하였다. -7 dB보다 높은 값의 능동 반사계수를 갖게 되면 사이드로브 레벨이 크게 올라오고, 빔조향각이 크게 안 맞는다는 것을 알 수 있다. 전체 시뮬레이션 결과를 통해 실제 안테나 모델에서도 안테나 임피던스에 의한 반사 손실로 생기는 위상 오차가 빔조향각과 빔 패턴의 사이드로브 레벨에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 안테나 임피던스가 위상 지연 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였고, RL_{max} 가 -10 dB와 -7 dB일 때 모든 주파수에서 각각 0.051λ 에 해당하는 18.5° 와 0.074λ 에 해당하는 26.5° 의 최대 위상 지연 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 이 결과를 이용하여 몬테 카를로 시뮬레이션을 통해 8개의 선형 배열 안테나의 $0\sim 30^\circ$ 의 빔조향을 진행했을 때 목표 빔조향각과 해당 위상 오차에 의해 틀어져서 관측되는 조향각 사이의 RMS 오차는 $0.19\sim 0.4^\circ$ 이고, 표준편차는 $0.14\sim 0.33^\circ$ 임을 확인

하였다. 이때 사이드 로브 레벨은 -12.8 dB의 이론치로부터 위상 오차에 의해 $0.74\sim 1.21$ dB만큼 증가하고, 사이드 로브 레벨 증가량의 표준 편차는 $0.31\sim 0.51$ dB를 갖는 것을 확인하였다. 이를 실제 스파이럴 안테나를 설계하여 확인하였고, 해당 검증을 통해 안테나 임피던스에 의한 반사 손실로 생기는 위상 오차가 빔조향각과 빔 패턴의 사이드로브 레벨에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

References

[1] D. Parker, D. C. Zimmermann, "Phased arrays - Part 1: Theory and architectures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 678-687, Mar. 2002.

[2] S. K. Garakoui, E. A. M. Klumperink, B. Nauta, and F. E. V. Vliet, "Phased-array antenna beam squinting related to frequency dependency of delay circuits," in *2011*

8th European Radar Conference, Manchester, 2011, pp. 416-419.

[3] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2005.

[4] A. R. Eskandari, L. Mohammadi, "Group delay variations in wideband transmission lines: Analysis and improvement," *International Journal of Soft Computing Engineering(IJSCE)*, vol. 1, no. 4, pp. 122-128, 2011.

[5] M. Yoon, S. Nam, "Avoidance of off-switch resonance in true time delay line using cascaded switches," in *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference(URSI AP-RASC)*, Seoul, Aug. 2016, pp. 1-2.

[6] Q. Liu, C. L. Ruan, L. Peng, and W. X. Wu, "A novel compact Archimedean spiral antenna with gap-loading," in *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 3, pp. 169-177, 2008.

윤 민 영 [서울대학교/석·박사 통합과정]



2013년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2013년 3월~현재: 서울대학교 전기정보공학부 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] 광대역 안테나 시스템, 빔조향 네트워크

남 상 욱 [서울대학교/교수]



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
 1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)
 1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파전파, 전자파 수치해석 등