

Chebyshev 다항식을 이용한 70GHz 대역 근거리 레이다 센서용 배열안테나의 최적설계

김규철* · 김주석*

Optimal Design of 70GHz Band Array Antenna for Short-Range Radar Sensor using
The Chebyshev Polynomials

Gue-Chol Kim* · Joo-Suk Kim*

요 약

본 논문에서는 Chebyshev 다항식을 이용해서 차량용 근거리 레이다에서 사용하는 70GHz 대역 배열안테나를 최적 설계하였다. SRR(: Short Range Radar)에서는 근거리 내에 물표를 검출하면서 높은 FoV(: Field of View)를 확보하기 위한 빔폭과 낮은 SLL(: Side lobe level)을 가져야 한다. 최적 설계된 안테나는 76~81GHz에서 동작하며 안테나의 크기를 소형으로 하기 위해 12개의 패치를 직렬로 배열하여 구성하였고, 78GHz에서 SLL - 10dB이하, 안테나의 이득 15.4dB를 만족하고 빔폭 112.5o, 입력반사계수 - 10dB이하의 성능을 갖는다. 본 논문에서는 Chebyshev 다항식을 이용해서 SRR을 위한 안테나의 설계를 진행하고 이를 기반으로 MRR과 LRR에 사용될 안테나 구조 설계를 위한 최적 설계법을 제시한다.

ABSTRACT

This paper presents a procedure to optimize the design of 70GHz band array antenna for automotive short range radar sensor applications using Chebyshev polynomials. SRR(: Short Range Radar) systems require a wide angle width and low Side lobe level to detect targets within close proximity while ensuring a high Field of View(FoV). The optimized antenna operates in the 76 to 81GHz frequency range, and to reduce the antenna size, we arranged 12 patches in series, achieving an SLL of 10dB, angle with of 112.5o, gain of 15.4dB and an input return loss of less than - 10dB at 78GHz. In this paper, we proceed with antenna design for SRR using Chebyshev polynomials, and present an optimal design for antenna structures to be used in MRR(: Medium-Range Radar) and LRR(: Long Range Radar) applications based on this paper

키워드

Radar System, Microstrip Patch Antenna, Radar Sensor, Vehicles, Feed Type
레이다 시스템, 마이크로스트립 패치 안테나, 레이다 센서, 차량용, 급전 방식

* 목포해양대학교 해양전자통신컴퓨터공학과
(gckim@mmu.ac.kr)

** 교신저자 : 목포해양대학교 해양전자통신컴퓨터
공학과

• 접수일 : 2023. 11. 04
• 수정완료일 : 2023. 12. 24
• 게재확정일 : 2024. 02. 17

• Received : Nov. 04, 2023, Revised : Dec. 24, 2023, Accepted : Feb. 17, 2024

• Corresponding Author : Gue-Chol Kim

Dept. of Marine Electronics, Communication, Computer Engineering, Mokp
National Maritime University,
Email : gckim@mmu.ac.kr

I. 서론

차량용 레이더는 이동체에 탑재되어 밀리미터파를 이용해 전방 및 후방의 주변 환경에 관한 정보를 운전자에게 제공하고 필요시에 차량을 제어하여 운전자의 주행을 돕는 핵심 기술 중 하나이다. 차량용 레이더는 LRR(Long Range Radar), MRR(Middle Range Radar) 및 SRR(Short Range Radar)을 지원하기 위해 다양한 안테나가 필요하다[1-5]. LRR의 경우는 250m에 떨어진 먼 거리에 있는 물표를 검출해야 하기 때문에 빔 폭이 좁으면서 안테나 이득이 높은 안테나를 요구하게 된다. 반면 SRR의 경우는 근거리를 검출하면서 높은 FoV(Field of View)를 가지는 것을 목표로 하고 있기 때문에 이에 적합한 이득과 azimuth angle이 넓은 안테나를 필요로 하게 된다[6-9]. Chebyshev 다항식은 안테나 설계에 있어서 특정 주파수대의 안테나의 반사손실을 최소화하고 안테나의 효율을 향상시킨다. 다만 원하는 특성을 정확하게 제어하고 최적화하는데 도움을 주는 반면 설계의 복잡성이 증가하게 된다[10-11]. 본 논문에서는 Chebyshev 다항식을 이용해서 주파수대역, 임피던스, 이득, 방사패턴 등의 요구사항을 고려하여 설계자가 안테나를 최적으로 설계할 수 있는 방식을 제안하고 이를 통해 SRR을 위한 안테나를 설계·제작 및 측정·분석하여 MRR과 LRR에 사용될 안테나 구조를 기초 연구한다.

II. SRR용 안테나의 설계

2.1 Chebyshev다항식을 이용한 안테나 설계

Chebyshev 다항식을 사용하면 주엽에 대해 HPBW를 좁게하여 지향성을 높일 수 있으며 일정한 SLL을 얻을 수 있는 장점이 있다. 다음 식은 등방성 점원 안테나를 P개 배열시켰을 때 표준화된 배열인자(array factor)를 나타낸다. 여기서 P가 짝수(2N)일 때

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n \cos[(2n-1)u] \quad \dots (1)$$

P가 홀수(2N+1)일 때

$$AF = \sum_{n=1}^{N+1} a_n \cos[2(n-1)u] \quad \dots (2)$$

여기서 $u = k_0 d \cos \theta$ 이며, d 는 각 안테나 요소 사이의 거리이고, θ 는 원점에서 필드점사이의 기울기를 나타낸다[12-13]. 여기서 요소수가 12개인 배열안테나를 설계할 경우 배열인자의 급수를 전개하여 $\cos u$ 에 대한 식으로 변환하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} AF_{12} &= \sum_{n=0}^6 a_n \cos[(2n-1)u] \\ &= a_1 \cos(u) + a_2 \cos(3u) + a_3 \cos(5u) \quad \dots (3) \\ &\quad + a_4 \cos(7u) + a_5 \cos(9u) + a_6 \cos(11u) \end{aligned}$$

여기서 $u = \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta$, $x = \cos(u)$ 와 같으면 Chebyshev 다항식은 순환함수에 의해 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{n+1} = 2x T_n(x) - T_{n-1}(x) \quad \dots (4)$$

이때

$$T_n(x) = \begin{cases} (1-n)^2 \cosh n \cosh^{-1}(x), & x = 1 \\ \cosh(n \cos^{-1}x), & -1 < x < 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1}x), & x > 1 \end{cases} \quad \dots (5)$$

와 같다. 여기서 식 (1)~(5)를 변환하면 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$AF(\theta) = T_{p-1}(x_0), \quad \dots (6)$$

여기서 $x = x_0 \cos(\frac{\theta}{2})$ 이며 x_0 는 AF가 최대일 때의 값을 나타낸다. Chebyshev 다항식에서 부엽준위는 일정하므로 주엽대 부엽의 비를 R_l 이라 할 때

$$R_l = T_{p-1}(x_0) = \cosh[(p-1) \cosh^{-1}x_0] \quad \dots (7)$$

이다. 여기서 $SLL = -20 \log R_l$ 로 나타낼 수 있으며 이때 AF가 최대가 되는

$$x_0 = \cosh\left(\frac{1}{p-1}\right)\cosh^{-1}R_l \quad \dots (8)$$

로 나타낼 수 있다. 낮은 SLL을 갖고 원하는 빔폭을 갖기 위해서는 먼저 원하는 SLL을 갖기 위한 R_l 을 계산하고 식 (8)에 의하여 x_0 를 계산하면 식(6)에 의해 배열안테나의 진류분포 값을 알 수 있다. 좁은 빔폭에 낮은 부엽을 갖기 위해서는 $x > 1$ 영역에서 주빔이 형성되고 $x < 1$ 영역에서 부빔이 형성되도록 각 요소값을 결정해야 하며, 이때 안테나의 지향성은 -식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{2R^2}{1 + (R^2 - 1)F/(Nd)} \quad \dots (9)$$

여기서

$$F = 1 + 0.636 \frac{2}{R_l} \cosh[\sqrt{(\cosh^{-1}R_l^2) - \pi^2}] \quad \dots (10)$$

로 나타낼 수 있다.

2.2 SRR용 배열안테나의 최적설계

제안한 70GHz대역 SRR 안테나의 설계목표는 다음 표 1과 같다. 향후 LRR에 사용할 수 있도록 안테나의 동작주파수는 76GHz를 포함하였으며 물표의 정확한 탐지를 위해 SLL을 -10dB이하로 설정하였다. 또한 SRR 거리의 레이더 동작을 위해 15dB의 이득을 목표로 하였으며 동작주파수에서 VSWR 1.5이하로 설정하였다. 그림 1은 제안한 SRR 안테나의 구조를 나타낸다. 12개의 패치안테나를 직렬로 배열하였으며 방사 소자들은 대역폭과 방사패턴이 z축을 향하도록 설계하였다. 배열안테나의 설계는 요구되는 사양 즉 이득 및 대역폭, 부엽레벨등을 고려하여 급전방식을 고려한다. 일반적으로 패치어레이 안테나를 설계할 경우 광대역 특성이 좋고 설계가 쉬운 병렬급전 방식을 사용하지만, 이 방식은 급전선의 길이가 길어져

표 1. 안테나 요구사항
Table 1. Antenna specifications

	Value
Operating Freq	76~81GHz
Antenna Gain	>15dB
VSWR	< 1.5
SLL	< -10dB

손실 및 크기가 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 선로손실이 작고 소형으로 설계할 수 있는 직렬급전 방식을 사용하였다[14]. 또한 안테나의 성능측정을 위하여 wave Guide WR-10을 연결해 설계하여 측정용이하게 하였다. 여기서 WR-10에서 3dB의 손실이 발생함을 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 측정결과에 이 값을 보정하여 사용하였다. 그림 2는 안테나에 도파관을 연결한 경우와 wire bonding을 한 경우를 비교한 시뮬레이션 결과이다. 안테나의 성능을 측정하기 위해서 설계된 안테나에 도파관을 연결하였지만, 실제 상용 radar 시스템에 안테나를 결합하기 위해서는 wire bonding을 사용하여 안테나와 보드를 연결하여야 한다. 밀리미터파 대역에서는 과장이 매우 짧기 때문에 wire bonding에 의한 특성변화가 매우 커서 이 값을 L값으로 환산하여 LCL매칭을 하였고 시뮬레이션을 수행하여 성능열하를 예상하였다. 시뮬레이션 결과 wire bonding을 한 경우 wave guide를 연결한 경우에 비해 대역폭은 줄어들었으나 76~81GHz 대역에서

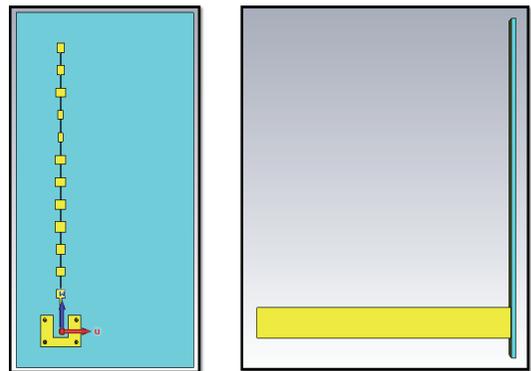


그림 1. SRR용 안테나의 구조
Fig. 1 Structure of the SRR antenna

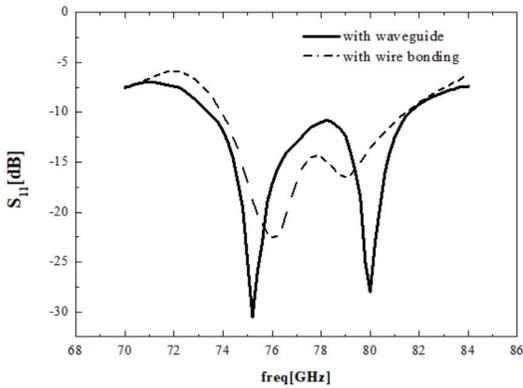


그림 2. SRR용 안테나의 입력반사계수
Fig. 2 Input reflection coefficient of the SRR antenna

입력반사계수가 -10dB 이하인 것을 확인하였다. 그림 3은 CST사의 Microwave Studio를 이용해서 안테나의 방사특성을 시뮬레이션한 결과이다. 도파관의 손실을 고려해서 78GHz 대역내에서 15.75dB 의 이득을 나타냄을 알 수 있다.

그림 4는 SRR용 안테나의 주파수별 이득을 나타낸다. 76GHz 에서 81GHz 의 주파수내에서 도파관을 이용해서 측정된 안테나는 15.29 에서 16.1dB 사이의 이득을 얻을 수 있었지만, wire bonding을 이용해서 연결한 경우 $13.3\sim 14.22\text{dB}$ 로 도파관에 비해서 약 2dB 의 손실이 발생함을 알 수 있다. 이 결과를 통해 wire bonding의 영향을 고려하여 LCL매칭을 하였다고 하더라도 L에 의한 성능 열화가 발생함을 알 수 있다.

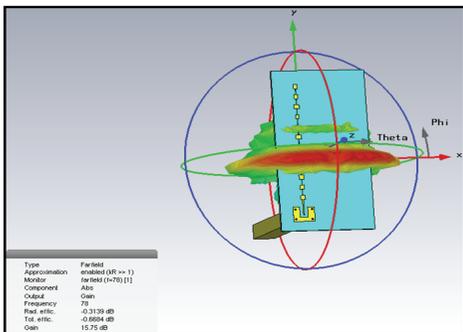


그림 3. SRR용 안테나 방사패턴
Fig. 3 SRR antenna radiation pattern

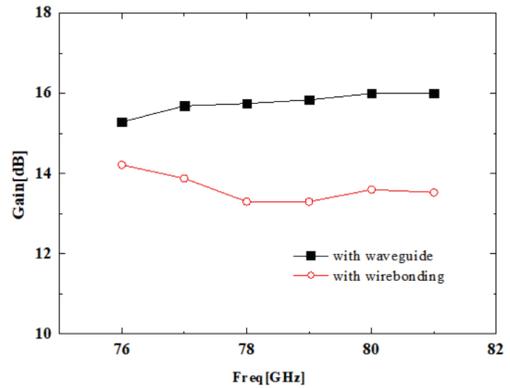
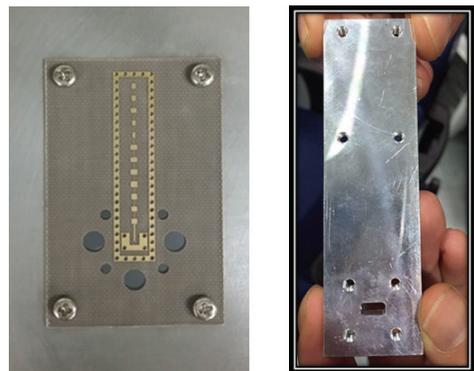


그림 4. SRR용 안테나 이득
Fig. 4 SRR antenna Gain

III. SRR용 안테나의 제작 및 측정

밀리미터파와 같은 높은 주파수에서 패치안테나를 설계할 경우 원하는 특성을 얻기 위해서는 적절한 기판을 선정하여야 한다. 본 논문에서는 유전율 2.5에 두께가 0.5mm 인 Rogers사의 AD-250을 사용하였다. 그림 5 (a)는 제작된 안테나를 나타내고 있으며 (b)는 안테나와 도파관을 연결하기 위해 제작된 측정용 지그를 나타낸다. 제작된 기판의 크기는 $11\times 47\text{mm}^2$ 이며 지그를 이용해 도파관을 연결하여 측정하였다. 그림 6은 제작한 안테나를 네트워크 분석기를 통해 입력반사계수를 측정한 결과이다.



(a) SRR용안테나 (b) 측정용 지그

그림 5. 제작된 안테나의 사진
Fig. 5 Photograph of the fabricated antenna

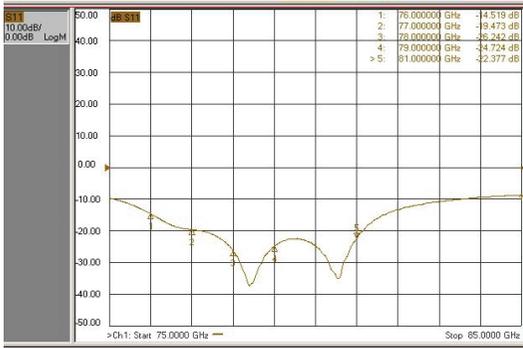


그림 6. 측정된 안테나의 입력반사계수
 Fig. 6 Input reflection coefficient of the fabricated antenna

측정결과 76GHz부터 81GHz내의 동작주파수 내에서 -10dB 이하의 결과를 얻어 정재파비 1.5 이하인 것을 알 수 있으며 그림 2의 시뮬레이션 결과와 비교해도 유사한 결과를 얻었음을 알 수 있다. 그림 7은 전자파 무반사실에서 측정된 SRR용 배열안테나에서 elevation 평면과 azimuth 평면에서의 방사패턴 시뮬레이션 결과 및 측정결과를 비교한 그래프이다. 측정결과 기관에서의 제작오차 및 손실 등으로 인해 시뮬레이션보다 이득이 약 1~2dB정도 줄었으며 주빔의 각도도 틀어짐을 알 수 있었다. 또한 Side lobe level도 시뮬레이션에 비해 높게 나왔지만

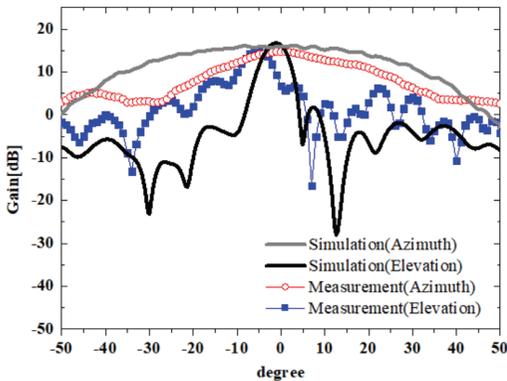
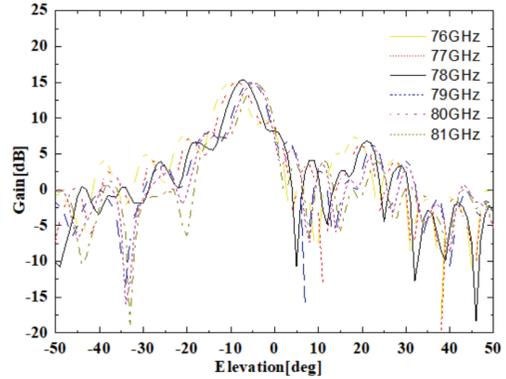


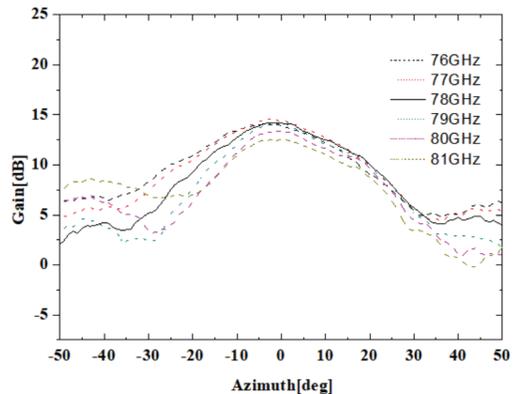
그림 7. SRR용 안테나의 방사패턴 시뮬레이션 및 측정결과 (78GHz)
 Fig. 7 Measured and simulated radiation patterns of SRR antenna (78GHz)

약 10dB의 결과를 얻을 수 있어 SRR용 안테나로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 SRR용 안테나의 (a) elevation 평면과 (b) azimuth 평면에서의 방사패턴 측정결과를 76GHz~81GHz의 주파수로 분류해서 나타낸 그래프이며 표 2는 측정결과를 주파수별로 정리한 표를 나타낸다. 동작주파수내에서 이득은 도파관의 손실을 포함하여 14.63~15.4dB의 이득을 얻을 수 있었고 SLL은 9.1~11.1dB의 결과를 얻을 수 있었다. 또한 빔폭은 Elevation 평면에서 22.2~25.5°사이의 값을, Azimuth 평면에서 93.1~112.5°사이의 값을 얻을 수 있었다. 일부 주파수를 제외하고 목표로 했던 안테나의 성능은 달성하였으나 제작상의 오차 및 기생성분들의 영향에 의해 시뮬레이션 결과에 비해 이득 및 SLL이 다소 낮아지는 결과가 나타났으며 빔폭



(a) Elevation



(b) Azimuth

그림 8. SRR용 안테나의 방사패턴 측정결과
 Fig. 8 Measured radiation patterns of SRR antenna

도 주파수에 따른 편차가 발생하였다. 향후 도체의 두께를 최적화 하고 유전율 편차 및 손실이 적은 기판을 적용한 설계를 통해 성능개선이 가능할 것으로 판단된다.

표 2. SRR 안테나의 측정결과
Table 2. Measurement results of SRR antenna

freq [GHz]	76	77	78	79	80	81
Gain [dB]	14.98	15.05	15.4	15.18	14.93	14.63
SLL [dB]	9.1	10.1	11.1	10.7	9.5	9.3
beam width ^[°] (Ele)	25.1	24.1	25.5	25.1	24.5	22.2
beam width ^[°] (Azi)	121	117.2	112.5	98.5	93.5	93.1

IV. 결 론

Chebyshev 다항식을 이용해서 70GHz대역에서 동작하는 SRR용 배열안테나를 설계하였다. 동작주파수 내에서 -10dB이하의 반사계수와 도파관의 손실을 포함해서 약 15dB내외의 이득을 얻었다. SLL은 약 10dB의 결과를 얻었고 빔폭은 Elevation 평면에서 22.2~25.5°사이의 값을, Azimuth 평면에서 93.1~112.5°사이의 값을 얻을 수 있었다. 제작상의 오차 및 기생성분들의 영향에 의해 시뮬레이션 값보다 이득 및 SLL의 성능이 낮아졌지만 측정결과도 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻어 SRR용 안테나로 사용할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] H. L. Bloecher, J. Dickmann, and M. Andres, "Automotive active safety & comfort functions using radar," In *Proc. IEEE Int. Conf. Ultra-Wideband*, Vancouver, BC, Canada, Sept. 2009, pp. 490-494.
- [2] T. Binzer, M. Klar, and V. Gross, "Development of 77GHz radar lens antenna for automotive applications based on given requirements," In *Proc. ITG Conf. Antennas*, Vancouver, Canada, Mar. 2007, pp. 205-209.
- [3] E. Park and I. Jung, "Design of series-fed microstrip patch array antennas for monopulse radar sensor applications," *J. of the Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 11, 2010, pp. 1248-1253.
- [4] K. Lee and Y. Kim, "Design of 24 GHz Patch Array Antenna for Detecting Obstacles," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 6, 2008, pp. 31-38.
- [5] J. Kim and G. Kim, "Design of high gain array antenna for 70GHz band short range radar sensor," In *Proc. of the korean Institute of information and communication Sciences. Conf.*, Jinju, Korea, May 2018, pp. 402-403.
- [6] G. Kim, "Design of slotted waveguide antenna with slot depth variation," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 4, 2013, pp. 535-540.
- [7] J. Yoon, "Design and Fabrication of Dual Linear Polarization Antenna for 28GHz Band," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 1, 2022, pp. 13-21
- [8] T. Kim and S. Hwang "Cascade AOA Estimation Algorithm Based n FMCCA Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 6, 2021, pp. 1081-1088
- [9] J. La and J. Choi "Development of Wideband Frequency Modulated Laser for High Resolution FMCW LiDAR Sensor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 18, no. 6, 2023, pp. 1023-1030
- [10] D. Moon, S. Ahn, M. Park, and C. Jung, "A study on microstrip array antenna for LMDS Receiver with corporate feeding network using chebyshev polynomials," *J. of the Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 13, no. 8, 2002, pp. 827-883.
- [11] R. C. Johnson, *Antenna Engineering Handbook 3rdEd.* New York: McGrawHill, 1993.
- [12] D. M. Pozar, *Microwave Engineering, 3rdEd.* Newyork: Wiley, 1993.
- [13] Milligan, T. A, *Modern antenna Design*, New York: McGrawHil, 1986.

- [14] J. Kim, K. Hwang, and J. Shin, "Series-Fed microstrip array antenna for Milimeter-wave applications," *J. of the Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 12, 2011, pp. 1176-1179.

저자 소개

김규철(Gue-Chol Kim)



2000년 2월: 목포해양대학교 해양전자통신공학과(공학사)

2003년 8월: 목포해양대학교 해양전자통신공학과(공학석사)

2007년 3월: 오사카대학 전자정보에너지공학과(공학박사)

2006년 11월 ~ 2008년 2월: Matsushita Electric Works 중앙연구소 연구원

2008년 3월 ~ 현재: 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부 부교수

※ 관심분야 : 고주파 소자 모델링, 고주파회로설계, 안테나설계



김주석(Joo-Suk Kim)

2008년 2월: 서울과학기술대학교 전기공학과(공학사)

2010년 8월: 서울과학기술대학교 전기공학과(공학석사)

2015년 9월 목포해양대학교 해양전자·통신·컴퓨터공학과 박사과정

2011년 3월 ~ 2012년 2월: 서울과학기술대학교 전기공학과 겸임교수

2012년 3월 ~ 2016년 6월: 명지전문대학교 전기과 겸임교수

2013년 1월 ~ 현재: 화용엔지니어링 대표이사

※ 관심분야 : 안테나설계, 레이더, 위성통신시스템

