

드론 탐지 시스템용 소형 대수주기 다이폴 안테나 설계

채규수
백석대학교 첨단IT학부 교수

A design of compact printed log-periodic dipole array(LPDA) for drone detection system

Gyoo-Soo Chae
Professor, Div. of Advanced IT, Baekseok University

요약 본 논문에서는 드론 탐지 시스템에 사용되는 소형 광대역 대수주기 다이폴 어레이 안테나 설계 방법을 제시하였다. 안테나의 동작 주파수는 드론 운용 시 사용되는 ISM 대역(433MHz, 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz)이며 대부분의 대역폭에서 약 5dBi의 이득을 얻을 수 있도록 설계하였다. 본 논문은 광대역 대수주기 다이폴 어레이 (PLPDA) 안테나의 기본 이론을 기반으로 저대역(433MHz, 915MHz)의 다이폴 길이를 줄이고 각 다이폴의 폭을 달리하는 방법으로 성능을 개선하였다. LPDA 안테나의 기본 구조 설계를 위해 Matlab을 사용하여 다이폴 길이와 간격을 구하였고, 이를 이용하여 PCB의 유전율을 고려하여 각 파라미터를 최적화하였다. 제안된 안테나는 기존 LPDA 안테나에 비해 36%로 줄어들었고 433MHz에서 5.8GHz 대역에서 3.6dBi에서 7.9dBi의 이득을 갖는다. 제안된 LPDA 안테나는 휴대용 방향 탐지 및 스펙트럼 모니터링 애플리케이션에 사용할 수 있다.

주제어 : 드론 탐지, 소형 안테나, 대수주기 다이폴, 시뮬레이션, ISM 대역

Abstract This paper presents a design approach for a compact wideband log-periodic dipole array (LPDA) antenna, intended for use in a drone detection system. The antenna operates across the ISM band (433MHz, 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz), which is commonly used in drone operations, and is designed to provide approximately 5dBi of gain across most of the bandwidth. Building on the fundamental principles of wideband LPDA antennas, the design improves performance by shortening the dipole length for the lower frequency bands (433MHz, 915MHz) and adjusting the width of each dipole. Matlab was utilized to design the antenna's basic structure, determining the dipole length and spacing, with optimization based on the PCB's permittivity. Compared to existing LPDA antennas, the proposed design is 36% smaller and offers a gain range of 3.6dBi to 7.9dBi within the 433MHz to 5.8GHz frequency range. Suggested LPDA antenna is suitable for portable direction-finding and spectrum monitoring applications.

Key Words : Drone detection, Small antenna, Log-periodic dipole array(LPDA), Simulation, ISM band

*This study was supported by Baekseok University research fund.

*Corresponding Author : Gyoo-Soo Chae(gschae@bu.ac.kr)

Received December 15, 2024

Accepted January 20, 2025

Revised January 2, 2025

Published January 30, 2025

1. 서론

최근 소형 드론의 무분별한 운용으로 여러 가지문제가 발생하고 있다. 특히 군용 드론을 식별하기 위한 다양한 기술들이 소개되고 있다. 이중 드론에서 방사되는 RF(radio frequency) 신호를 이용하여 불법 드론을 탐지하는 RF 스캐너 방식의 anti-drone 시스템이 가장 활발하게 연구되고 있다. RF 스캐너 방식의 anti-drone 시스템은 드론에서 방사되는 전파신호를 수신한 후, 전파신호의 시간-주파수 패턴을 분석하여 불법 드론을 탐지하는 기술이다. 특히, 드론은 비면허 ISM대역(433MHz, 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz) 중 하나의 RF 신호를 사용하여 지상 운용자와 통신한다. 드론에서 방사되는 신호는 드론의 제조사와 종류마다 그 특성이 고유하게 존재하므로 이를 분석함으로써 대부분의 불법 드론을 식별하고 추적할 수 있다.

이러한 드론 식별 장치에 활용되는 광대역 안테나의 수요가 증가하고 있다. 부피가 크지만 LPDA(Log Periodic Dipole Array) 안테나는 넓은 대역폭과 높은 이득을 제공한다. 원통형 와이어 다이폴의 로그 주기 다이폴 어레이(LPDA)는 1950년대부터 소개되었으며, 그 설계 규칙은 Rumsey가 처음 제안하였다[1]. Carrel과 Isbel은 lpda 안테나 연구에 대한 보다 세부적인 내용을 제시하였다[2,3]. LPDA 안테나는 가장 긴 다이폴이 반사판으로 작동하고 연속적인 다이폴이 디렉터로 작동하는 다이폴 어레이 안테나이다. 다이폴의 개수를 추가하면 대역폭이 넓어지며 이득이 높아진다. 최근에는 소형 안테나의 수요가 증가하면서 유전체에 인쇄된 마이크로스트립 안테나가 일반적으로 사용되고 있고 무게와 크기가 작고, 비용이 저렴하며, 제작이 용이하기 때문이다. 주요 단점은 낮은 효율성, 좁은 주파수 대역폭, 복사장의 비교적 높은 교차 극성 구성 요소, 유전체 기판에서의 표면파 전파 등이다. 인쇄형 안테나의 높은 품질 계수로 인한 좁은 대역폭은 광대역 인쇄 안테나 설계를 위한 대수 주기 배열 개념을 사용하여 극복할 수 있다. 대수주기 안테나는 기본적으로 다이폴을 사용하기 때문에 낮은 주파수 대역의 길이가 긴 것이 단점이다. 이를 극복하기 위해 기존 연구들에서 LPDA 소형화를 위한 다양한 방법들이 제시되었다. T자형, 이중 T자형, 모자형, 호형, C자형 또는 기타 모양의 로딩 방식과 tapered patch 다이폴 등이 사용되었다[4-15].

이 논문에서는 소형화를 위해 저대역 3개 요소에 평면 굴곡(meander line)이 적용된 LPDA가 소개되었다.

2. 안테나 설계 및 제작

본 연구에서 제안하는 평면형 LPDA 안테나는 기존 연구에서 소개된 전형적인 LPDA 파라미터를 구하고 본 연구 목적에 맞게 최적화하였다. CST Microwave Studio를 사용하여 시뮬레이션 되었으며, 설계된 안테나는 FR-4($\epsilon_r=4.3$, $h=1.6\text{mm}$) 기판에 제작되었다.

2.1 LPDA 설계 이론

Fig. 1에서 LPDA 안테나의 기본 구조가 제시되었다. 안테나의 기본 구조는 배열 다이폴이며 유전체의 양면에 인쇄된 두 개의 마이크로스트립 라인으로 구성된다.

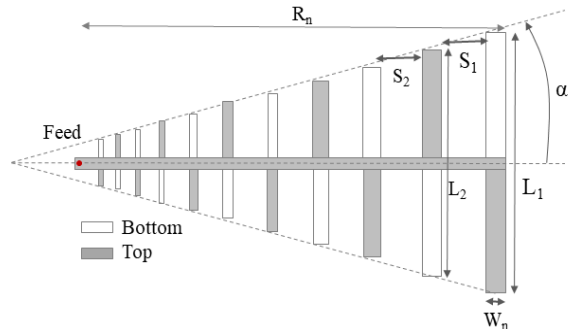


Fig. 1. Log-Periodic Dipole Array(LPDA) structure

안테나의 기본 파라미터는 다음과 같다.

- L_n : Length of n^{th} dipole
- S_n : Spacing between n^{th} and $(n+1)^{\text{th}}$ dipole
- W_n : Width of n^{th} dipole
- R_n : Length of the antenna

본 연구에서 제안하는 400MHz~6GHz 대역 안테나의 각 다이폴의 길이는 다음 식으로 표시된다.

$$L_{1,15} = \frac{\lambda_{400\text{MHz}, 6\text{GHz}}}{2} \quad (1)$$

LPDA 안테나 설계 시 사용되는 간격 계수(σ)와 배율 계수(τ), 안테나 이득은 Fig. 2를 참조하여 Table 1과 같이 결정하였으며 다이폴의 개수(N)는 15개로 설계되었다. 안테나의 소형화를 위해 Fig. 2의 그래프에 표시된 것과 같이 안테나 이득을(5dBi)로 설정하고 다이폴 개수를 결정하였다.

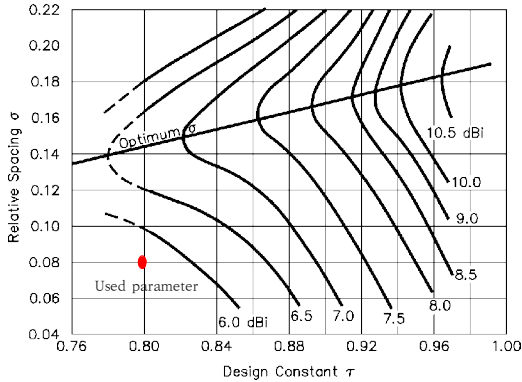


Fig. 2. Directivity of a log-periodic dipole array as a function of its taper and spacing[1]

Table 1. LPDA design parameters

Parameters	Values
Lowest frequency f_L	400MHz
Highest frequency f_h	6GHz
Diameter of the shortest element	0.5mm
Characteristic input impedance(Z_0)	50Ω
Scaling factor(τ)	0.80
Relative spacing σ	0.08
Estimated antenna gain	5dBi

각 다이폴의 길이는 배율 계수(τ)에 의해 결정된다.

$$L_{n+1} = \tau \cdot L_n \quad (2)$$

그리고 간격 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{S_n}{2L_n} \quad (3)$$

각 다이폴간 간격은 다음과 같이 정의된다.

$$S_{n+1} = \tau \cdot S_n \quad (4)$$

평면형 다이폴의 경우 각 다이폴의 폭은 각 다이폴에서의 입력임피던스에 따라 결정된다.

$$Z_n = \frac{377}{\pi} \left[\ln \left(\frac{L_n}{a_n} \right) - 2.25 \right] \quad (5)$$

여기서 a_i 는 원통형 다이폴 구조에서의 반지름이다. 평면형의 경우에는 다음 식으로 다이폴 폭을 구할 수 있다.

$$W_n = \pi \cdot a_n \quad (6)$$

Table 2에서는 Periodic Dipole Array Calculator [16]를 사용하여 유전체를 고려하지 않은 일반적인 LPDA 안테나의 파라미터가 Table 1에 제시된 조건에서 다이폴의 길이와 넓이 그리고 이격거리가 계산되었다. 평면형 설계를 고려한 각 다이폴의 폭을 계산하기 위하여 LPDA 안테나의 각 다이폴의 입력 임피던스(Z_n)는 $100\Omega \sim 250\Omega$ 정도로 설계되는 것을 가정하였다. 본 연구에서는 전체적인 안테나 크기를 줄이기 위해 250Ω 정도를 가정하였다. 이때 식 (5)에서 a_1 을 구하면 4.9mm 정도가 되며 평면구조에서 폭(W_1)은 식 (8)을 이용하여 구하면 15.3mm가 된다.

나머지 다이폴들의 폭은 배율 계수에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{n+1} = \tau \cdot W_n \quad (7)$$

Table 2. Typical LPDA design parameters[3]

Element	L_n (mm)	W_n (mm)	S_n (mm)
1	375	15.3	59
2	300	12.2	47
3	240	9.7	38
4	192	7.8	30
5	153	6.2	24
6	123	5.0	19
7	98	4.0	16
8	79	3.2	12
9	63	2.6	10
10	50	2.0	8
11	40	1.6	6
12	32	1.3	5
13	26	1.0	4
14	21	0.8	3
15	16	0.6	281

2.2 소형 평면형 LPDA 설계

2.1에서 제시된 일반적인 구조의 LPDA 안테나를 PCB에 평면형으로 설계하여 크기를 줄이고 각 다이폴의 구조를 변경하여 크기를 최적화 하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 유전체 기판(FR-4, h=1.6mm, $\epsilon_r=4.3$)으로 인해 Table 2에서 제시된 각 길이들이 $L_n/\sqrt{\epsilon_{eff}}$, $S_n/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 로 줄어드는 것을 가정하였다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-2} \quad (8)$$

안테나 설계에 사용된 유전체의 유효 유전율(ϵ_{eff})은 $W(4mm)/h(1.6mm) > 1$ 을 가정하면 식 (8)에서 2.8정도로 계산된다. 이 경우 Table 1의 파라미터에서 $L_{1,eff}=224mm$, $W_{1,eff}=9.1mm$, $S_{1,eff}= 35mm$ 가 된다. 가장 긴 L_1 의 경우에 계산된 길이(224mm)보다 긴 384mm를 사용하였다. 이 수치들을 활용하여 시뮬레이션을 통해 최적의 파라미터들을 도출하였다. 특히 본 논문에서 제시하는 안테나는 433, 915MHz 대역을 담당하는 L_1, L_2, L_3 다이폴은 소형화를 위해 접힌 구조(meander line)를 사용하였다. 제안된 안테나의 전체 크기는 $300(L) \times 234(W) \times 1.6mm(h)$ 이다.

Table 3. Presented LPDA design parameters

Element	$L_n(mm)$	$W_n(mm)$	$S_n(mm)$
1	384	11.0	45
2	264	10.0	35
3	200	8.0	29
4	116	7.0	23
5	92	6.0	17
6	80	5.0	14.5
7	60	4.0	11.5
8	48	3.0	8.5
9	40	2.5	7
10	31	2.0	6
11	24	2.0	5
12	20	1.5	3.5
13	16	1.5	2.5
14	12	1.5	1.5
15	10	1	

3. 안테나 시뮬레이션 결과

CST MWS 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 평면형 LPDA 안테나를 설계하고 시뮬레이션하였다.

a) 안테나 시뮬레이션 구조

Fig. 3에서 시뮬레이션을 위해 설계된 안테나의 구조이다. 각 안테나의 치수는 Table 3에 제시되었고 가운데 급전 라인의 폭은 4mm, 길이는 295mm이다. 급전은 가장 짧은 다이폴 왼쪽 끝에서 앞면과 뒷면의 급전 라인 끝에서 이루어졌다.

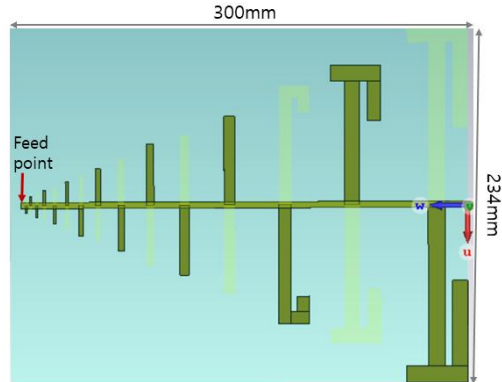


Fig. 3. Suggested simulation model using CST

b) 반사 손실(S11)

Fig. 4에서 시뮬레이션된 LPDA 안테나의 반사손실이 제시되었다. 각 동작 주파수 대역(433MHz, 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz)에서 반사 손실이 각각 -18.0, 8.0, -15.0, -8.3dBi로 매우 양호한 결과를 얻었다.

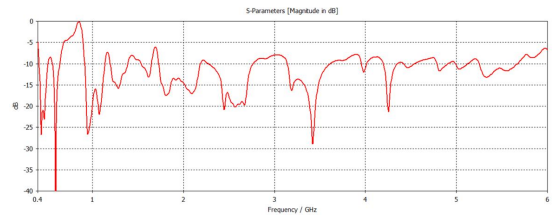


Fig. 4. Simulated S11 for the Planar LPDA

c) 방사 패턴 및 이득

Fig. 5에서 LPDA의 2D($\phi=90^\circ$, w-u plane) 방사 패턴을 4개 대역(433MHz, 915MHz, 2.4GHz, 5.8GHz)에서 각각 보여주고 있다. 각 대역에서의 최대 이득은 3.64, 6.65, 7.13, 7.9dBi이다. Fig. 6에서는 4개 대역에서 LPDA의 3D-방사 패턴을 보여주고 있다.

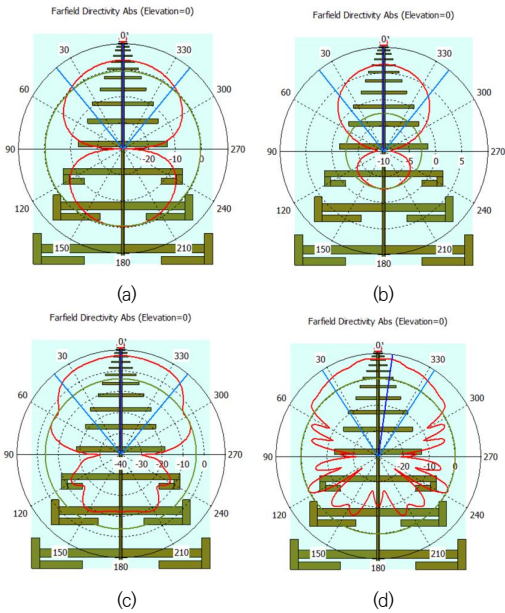


Fig. 5. 2D radiation pattern for the LPDA(@w-u plane, $\phi=90^\circ$)
 (a) 433MHz, (b) 915MHz, (c) 2.4GHz, (d) 5.8GHz

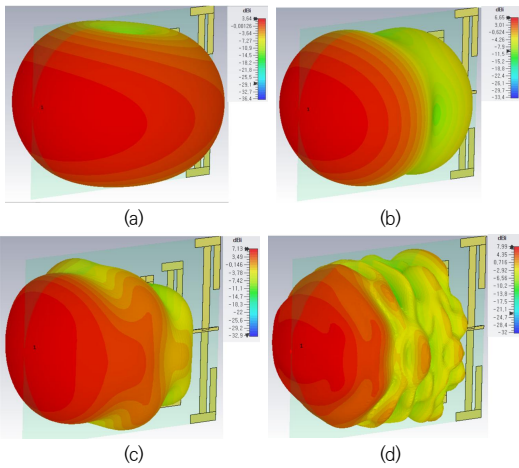


Fig. 6. 3D radiation pattern for the LPDA
 (a) 433MHz, (b) 915MHz, (c) 2.4GHz, (d) 5.8GHz

4. 안테나 제작 및 측정 결과

Fig. 7에서는 안테나 시뮬레이션 파라미터를 사용하여 제작된 LPDA 안테나가 제시되었다. Fig. 8에서는 측정된 S11 파라미터가 제시되었다. 안테나 설계 전 대역 대역에서 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 나타내고 있으며, 특히 다이폴 길이를 줄인 저대역(433MHz) 근처에서도 10dB의 우수한 특성을 보이고있다.

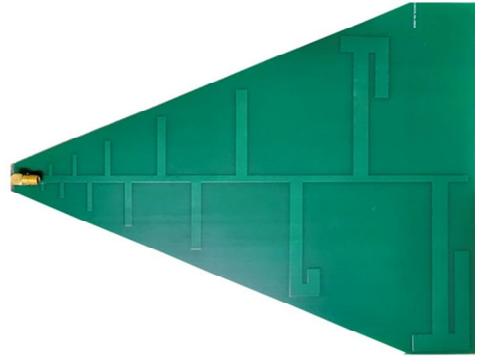


Fig. 7. Manufactured LPDA

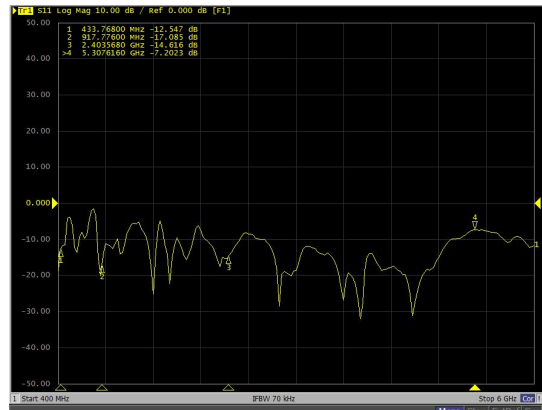


Fig. 8. Measured S11 of the LPDA

5. 결론

본 연구에서는 anti-drone 시스템용 소형 광대역 Log-Periodic Dipole Array 안테나 설계, 제작, 측정 결과를 제시하였다. 안테나 설계 및 제작은 ISM 대역 (433MHz, 900MHz, 2.4GHz, 5.8GHz)이며 각 대역에서 -18.0, 8.0, -15.0, -8.3dBi의 양호한 S11을 얻었으며, 3.64, 6.65, 7.13, 7.9dBi의 이득을 얻는 안테나를 설계하였다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 안테나가 제작되었고 S11 특성이 측정되었다. 모든 대역에서 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 나타내었다. 안테나 크기를 줄이기 위해 433MHz, 915MHz 대역에서 공진하는 3개의 다이폴 요소들을 굽힌 패턴을 사용하였다. 제안된 안테나는 기존 LPDA 안테나에 비해 가장 긴 다이폴 기준 36%로 줄었으며 안테나 이득은 크게 감소되지 않았다. 본 연구를 기반으로 소형이면서 이득이 향상된 새로운 구조의 LPDA 개발이 필요하며, 제안된 안테나

는 휴대용 방향 탐지 및 스펙트럼 모니터링 애플리케이션에 사용할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Rumsey, V. (1966). Frequency independent antennas. In *1958 IRE International Convention Record* (Vol. 5, pp. 114-118). IEEE.
DOI : 10.1109/IRECON.1957.1150565
- [2] Carrel, R. (1966). The design of log-periodic dipole antennas. In *1958 IRE International Convention Record* (Vol. 9, pp. 61-75). IEEE.
DOI : 10.1109/IRECON.1961.1151016
- [3] Isbell, D. (1960). Log periodic dipole arrays. *IRE transactions on antennas and propagation*, 8(3), 260-267.
DOI : 10.1109/TAP.1960.1144848
- [4] Carrel, R. L. (1961). *Analysis and design of the log-periodic dipole antenna*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [5] Gheethan, A. A., & Anagnostou, D. E. (2008, July). Reduced size planar log-periodic dipole arrays (LPDAs) using rectangular meander line elements. In *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (pp. 1-4). IEEE.
DOI : 10.1109/APS.2008.4619145
- [6] Chopade, P., & Gaikwad, S. V. (2019). Design and analysis of log periodic dipole array antenna. *ICTACT J. Microelectron*, 5, 836-844.
DOI: 10.21917/ijme.2019.0144
- [7] Birwal, A., Manker, N. K., & Patel, K. (2020). Compact printed log-periodic dipole antenna (LPDA) with T-shaped arm for wide band applications.
- [8] Yeo, J., & Lee, J. I. (2012). Miniaturized LPDA antenna for portable direction finding applications. *ETRI journal*, 34(1), 118-121.
DOI : 10.4218/etrij.12.0211.0178
- [9] Casula, G. A., Maxia, P., Mazzarella, G., & Montisci, G. (2013). Design of a printed log-periodic dipole array for ultra-wideband applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 38, 15-26.
DOI : 10.2528/PIERC13012704
- [10] Abdulhameed, A. A., & Kubik, Z. (2022, September). Design and Modelling of Printed Log Periodic Dipole Array Antenna with Different Feeding Methods. In *2022 International Conference on Applied Electronics (AE)* (pp. 1-4). IEEE.
DOI: 10.1109/AE54730.2022.9919886
- [11] Shan, L., Xiaofeng, L., & Jinghui, Q. (2010, September). A novel miniaturized ultra wideband log-periodic antenna. In *2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals* (pp. 246-248). IEEE.
DOI : 10.1109/UWBUSIS.2010.5609126
- [12] Hamza, S. M., Ullah, H., & Tahir, F. A. (2020, August). A miniaturized printed UWB LPDA antenna. In *2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)* (pp. 1-3). IEEE.
DOI : 10.1109/UCET51115.2020.9205322
- [13] Zhefei, W., & Jiahui, F. (2015, October). A design of miniaturization LPDA antenna with ultra wideband. In *2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)* (pp. 819-821). IEEE.
DOI : 10.1109/MAPE.2015.7510443
- [14] Mohamadzade, B., Simorangkir, R. B., Hashmi, R. M., & Lalbakhsh, A. (2020). A conformal ultrawideband antenna with monopole-like radiation patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(8), 6383-6388.
DOI : 10.3390/electronics9111830
- [15] Mistry, K. K., Lazaridis, P. I., Zaharis, Z. D., Chochliouros, I. P., Loh, T. H., Gravas, I. P., & Cheadle, D. (2020). Optimization of log-periodic TV reception antenna with UHF mobile communications band rejection. *Electronics*, 9(11), 1830.
DOI : 10.1109/TAP.2020.2969744
- [16] Log-Periodic Dipole Array Calculatorz. (n.d). <https://hamwaves.com/lpda/en/index.html>

채규수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 첨단IT학부 교수

- 관심분야 : Microwave antenna, IoT systems
- E-Mail : gschae@bu.ac.kr