

## 크로스아이 재머의 조우각에 따른 모노펄스 레이더의 거리 오차

임중수\*, 채규수  
백석대학교 ICT학부 교수

### Range Error of Monopulse Radar according to the Engagement Angle of Cross-Eye Jammer

Joong-Soo Lim\*, Gyoo-Soo Chae  
Professor, Division of Information Communication Technology, Baekseok University

**요약** 본 논문에서는 크로스아이 재머의 위상차와 진폭비 및 조우각을 제어하여 모노펄스 레이더의 추적 거리오차를 분석하였다. 크로스아이 재밍은 모노펄스 레이더의 중요한 재밍 방법으로 레이더 수신안테나의 입력에 변위를 유발하여 레이더의 추적 각도를 오도시킨다. 모노펄스 레이더와 재머 사이의 조우각을 변화시키면서 레이더의 추적 거리오차를 분석한 결과 조우각이 0°이고 위상차가 180° 일 때 최대 거리오차가 발생하며 조우각이 45°~135°가 되면 거리오차가 최대 거리오차의 70% 이하로 감소하는 것을 확인하였다. 재머의 효율을 높이기 위해서는 회전 재머나 다수 채널 재머에 대한 연구가 필요하며, 본 연구는 항공기 및 함정의 크로스아이 재머 설계에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

**주제어** : 레이더, 위상 변조, 크로스아이, 재밍, 거리 오차

**Abstract** In this paper, we analyzed the tracking error for the monopulse radar by controlling the phase difference, amplitude ratio and engagement angle of the cross-eye jammer. Cross-eye jamming is an important jamming method for monopulse radars, which causes a displacement in the radar receiving antenna input and misleads the radar's tracking angle. As a result of analyzing the tracking distance error of the radar while changing the engagement angle between the monopulse radar and jammer, the maximum distance error occurs when the engagement angle is 0° and the phase difference is 180°. It was confirmed that the error decreased to 70% or less of the maximum distance error into 45°~135°. In order to increase the efficiency of jammers, it is necessary to study rotary jammers or multi-channel jammers. This study will be very useful for the design of cross-eye jammers for aircraft and ships.

**Key Words** : Radar, Phase modulation, Cross-eye, Jamming, Range error

### 1. 서론

모노펄스 추적 레이더는 재래식 재밍 기술에 대한 강력한 전자보호 능력을 가지고 있어 재밍 연구에 큰 도전이 되고 있다. 모노펄스 추적 레이더를 방해하는

재밍 방법으로 지금까지 연구한 주요방식은 크로스아이 재밍(cross-eye jamming), 크로스 폴 재밍(cross polarization jamming), 블링킹 재밍(blinking jamming) 등이 있다[1-5]. 그러나 단일 플랫폼에 재머를 탑재하여 안정적인 재밍을 할 수 있는 방법으로 크

\*This study is supported from Electronic Warfare Research Center(EWRC) at Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration(DAPA) and Agency for Defense Development(ADD).

\*Corresponding Author : Joong-Soo Lim(jslim@bu.ac.kr)

로스아이 재밍이 많이 연구되고 있다.

크로스아이 재밍은 재머의 위상과 레이더 신호의 위상 동기화에 따라서 동기식(coherent)과 비동기식(non-coherent)으로 구분한다. 비동기식은 재머 신호의 위상이 레이더 신호의 위상과 무관하여 재밍신호가 쉽게 제거되거나 추적될 수 있다. 그러나 동기식 재밍은 재머 신호들의 위상이 레이더 신호의 위상과 동기되어 있어서 레이더에서 쉽게 제거가 되지 않고 모노펄스 추적 레이더를 효과적으로 재밍 할 수 있다[6-9].

본 논문에서는 칩(chirp)이라 불리는 선형주파수 변조(linear frequency modulation: LFM) 신호를 사용하는 모노펄스 레이더를 재귀형(retrodirective) 크로스아이 재머로 동기 재밍하는 조우 특성을 분석하였으며, 특히 레이더 추적 각도와 재머 기준선과의 조우각이 재밍에 미치는 영향이 매우 크므로 조우각과 재머의 위상차 및 진폭차를 변화시키면서 3차원으로 재밍 효과를 분석하였다.

본 논문은 2장에서는 재귀형 위상변위 크로스아이 재머, 3장에서는 레이더 신호와 크로스아이 재밍 신호, 4장에서는 크로스아이 재밍 오차를 기술하였다.

## 2. 재귀형 위상변위 크로스아이 재머

Fig. 1은 두 개의 수신 안테나와 두 개의 송신 안테나로 구성되어 독립적으로 두 채널 재밍을 할 수 있는 재귀형 위상다이버시티 크로스아이 재머 구성도이다. 디지털 고주파 기억장치(digital radio frequency memory: DRFM)를 사용하여 레이더 신호를 복제하여 재밍 신호로 사용하며 위상변위기를 이용하여 재밍 신호의 위상을 임의로 제어할 수 있도록 설계되었다.

크로스아이 재밍은 각도 추적 레이더 시스템의 전면파형(front wave) 왜곡 효과를 기반으로 레이더의 추적 방향 오차를 유도하는 방식이다. 따라서 두 재밍 신호원의 위상이 180° 일 때 효과가 크다. 그러나 재머를 탑재한 항공기나 함정은 RPY(roll-pitch-yaw) 등 운용환경에서 전면 파형 위상변위가 발생하므로 이러한 문제를 극복하고 원하는 위상을 정확하게 대칭적으로 유지하기 위해서 송수신 경로가 동일한 두 채널 재귀형 크로스아이 재머를 사용한다[10].

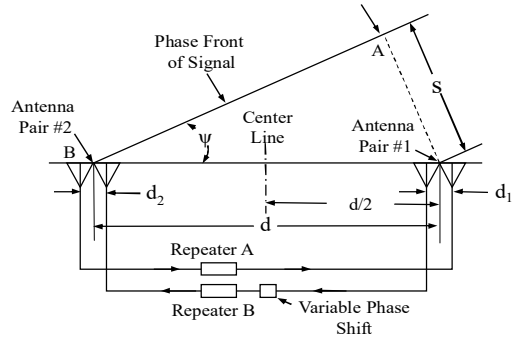


Fig. 1. Schematic of Retrodirective cross-eye Jammer with variable Phase shifter

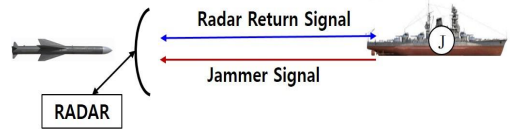
## 3. 레이더 신호와 크로스아이 재밍 신호

Fig. 2는 모노펄스 레이더와 크로스아이 재머의 일반적인 조우 상황이다. 모노펄스 레이더는 선형주파수 변조를 하는 LFM 신호를 많이 사용하며, 펄스코드변조(pulse code modulation: PCM)를 사용하기도 한다. 크로스아이 재머는 레이더 신호를 수신하여 DRFM을 이용하여 레이더 신호를 복제한 후에 위상 및 진폭 크기를 조정하여 재밍 신호로 사용한다.

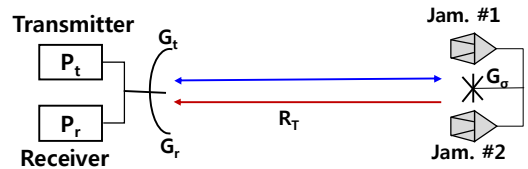
### 3.1 모노펄스 레이더 송신 신호

레이더의 송수신 신호와 재밍 신호를 레이더 운용에 따라 수식으로 정리하면 다음과 같다.

반송파 주파수가  $f_0$ 인 펄스 레이더의 송신 신호  $s_o(t)$ 는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.



(a) Operational Drawing



(b) Equivalent Drawing

Fig. 2. Operational drawing of monopulse radar and cross-eye jammer

$$s_0(t) = A_0 \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

여기서 펄스신호는 크기가 1이고 펄스폭이  $\tau$  이며 식 (2)와 같다[10].

$$\text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1 & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

모노펄스 레이더는 전자보호(electronic protection: EP) 기능을 강화하기 위해서 송신 신호의 펄스폭 내에서 칩(chirp) 변조를 하는 경우가 많다. 이 경우 칩 파형의 모양은 Fig. 3과 같이 up-chirp과 down-chirp 으로 나누어지며 칩 신호  $S_{lfm}(t)$ 의 수식은 식 (3)과 같다.

$$S_{lfm}(t) = \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{j\pi\mu t^2} \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 LFM 상수(constant)이고,  $\tau$ 는 펄스 폭이다. 또한 펄스 내 주파수변조 폭이  $B(\text{Hz})$  이면  $\mu = B/\tau$ 가 된다[11].

송신 신호  $s_0(t)$ 를 LFM 신호로 변조하면, 변조된 송신 신호  $s_t(t)$ 는 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} s_t(t) &= s_0(t) \cdot s_{lfm}(t) \\ &= A_0 \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 송신 신호 전압 크기  $A_0$ 는 송신기 출력  $P_t$ , 안테나 이득  $G_t$ , 임피던스  $X_t$ 의 함수이며  $A_0 = \sqrt{P_t G_t X_t}$ 가 된다. 만약  $X_t$ 가  $100\Omega$ 이면,  $A_0 = 10\sqrt{P_t G_t}$ 가 되며  $s_t(t)$ 는 식 (5)와 같이 된다.

$$s_t(t) = 10\sqrt{P_t G_t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \quad (5)$$

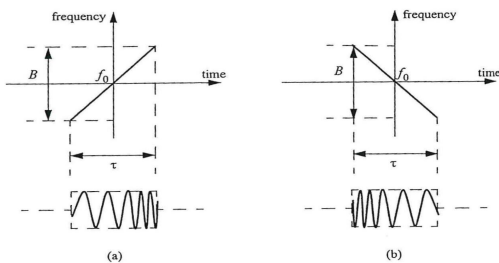


Fig. 3. LFM radar signal (a) up-chirp, (b) down-chirp

### 3.2 표적 반사 신호

Fig. 2에서 레이더 송신 신호가 거리  $R_T$ 인 표적에 도달하면 신호에는 크기 감소와 위상과 주파수 변화가 발생한다. 위상변화는 전파의 이동거리에 따라 변하게 되고, 주파수 변화는 표적이나 레이더의 이동에 의해서 생기는 도플러 주파수가 주된 요소이다. 도플러 신호가 작은 경우 표적 반사되는 신호  $s_{rs}(t)$ 는 식 (6)과 같이 된다[12,13].

$$s_{rs}(t) = A_{rs} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2)} \quad (6)$$

여기서  $A_{rs}$ 는 표적에서 반사되는 신호의 전압 크기이고,  $t_1$ 은 지연시간이다. 표적의 레이더 반사단면적을  $\sigma$ 라고 하면 식 (7), (8)로 표시된다.

$$A_{rs} = 10 \sqrt{\frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R_T^2}} \quad (7)$$

$$t_1 = \frac{R_T}{c} \quad (8)$$

### 3.3 크로스아이 재밍 신호

Fig. 2에서 재머에서 송신하는 두 개 채널의 재밍 신호는 레이더 송신 신호를 복제하여 사용한다. 첫째 채널 재밍신호  $J_{s1}(t)$ 와 둘째 채널 재밍신호  $J_{s2}(t)$ 는 신호 크기가 같고 위상은 약  $180^\circ$  차이가 난다[14].

$$J_{s1}(t) = A_{js1} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_1)} \quad (9)$$

$$J_{s2}(t) = A_{js2} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_2)} \quad (10)$$

여기서  $\phi_1, \phi_2$ 는 재머 1, 2의 재밍 위상이고,  $A_{js1}, A_{js2}$ 는 재밍신호의 전압 크기이다[15].

$$A_{js1} = 10 \sqrt{P_{j1} G_{j1}} \quad (11)$$

$$A_{js2} = 10 \sqrt{P_{j2} G_{j2}} \quad (12)$$

여기서  $P_{j1}$ 과  $P_{j2}$ 는 재머 송신기 출력이고,  $G_{j1}$ 과  $G_{j2}$ 는 재머의 송신 안테나 이득이다.

### 3.4 모노펄스 레이더 수신 신호

모노펄스 레이더 수신기는 표적 추적 방향을 계산하기 위해 보통 4 개의 좌우상하 대칭 수신기를 사용한다. 각 수신기에는 표적반사 신호와 두 개의 재밍신호가 수신된다. 레이더 신호처리기에서 표적신호는 재밍 신호보다 매우 작아서 무시되며, 재밍신호 1, 2는 크기가 같고 위상이 약 180° 차이가 난다. 레이더 수신기에 수신되는 표적 반사 신호는 식 (13)과 같이 표시된다.

$$s_{rr}(t) = A_{rr} \text{Rect}\left(\frac{t-t_2}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_2) + \frac{\mu}{2}(t-t_2)^2)} \quad (13)$$

여기서,  $A_{rr}$ 는 표적에서 반사되는 신호 크기이고,  $t_2$ 는 지연시간이다.

$$A_{rr} = 10 \sqrt{\frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R_T^2}} * \sqrt{\frac{G_r \lambda^2}{(4\pi R_T)^2}} \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{2R_T}{c} \quad (15)$$

따라서 레이더 수신기에 수신되는 재밍신호는 식 (16), (17)과 같다.

$$J_{r1}(t) = A_{jr1} \text{Rect}\left(\frac{t-t_2}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_2) + \frac{\mu}{2}(t-t_2)^2 + \phi_1)} \quad (16)$$

$$J_{r2}(t) = A_{jr2} \text{Rect}\left(\frac{t-t_2}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_2) + \frac{\mu}{2}(t-t_2)^2 + \phi_2)} \quad (17)$$

여기서  $A_{jr1}$ ,  $A_{jr2}$ 는 각 재밍 신호의 전압 크기이다.

$$A_{jr1} = 10 \sqrt{P_{j1} G_{j1}} * \sqrt{\frac{G_r \lambda^2}{(4\pi R_T)^2}} \quad (18)$$

$$A_{jr2} = 10 \sqrt{P_{j2} G_{j2}} * \sqrt{\frac{G_r \lambda^2}{(4\pi R_T)^2}} \quad (19)$$

### 4. 크로스아이 재밍 오차

모노펄스 수신기는 재머에서 도착한 두 개의 재밍 신호를 처리하여 레이더의 추적 각도를 계산한다. 크로스아이 재밍에 의한 모노펄스 레이더의 추적 각도 및 추적오차 각도, 추적 거리오차에 대한 연구결과들이 소개되었다[2,3].

Fig. 1와 같이 두 재밍 신호원의 거리를  $d$ , 레이더 추적방향과 재머 기준선의 직각방향과 이루는 각도를  $\psi$ 라 하면 추적 오차 각도( $\theta_{err}$ )는 식 (20)과 같이 주어지고 목표물 이동 경로 상에서의 추적 오차 거리( $r_{miss}$ )는 식 (21)과 같이 주어진다[2,3].

$$\theta_{err} = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \quad (20)$$

$$r_{miss} = \frac{d\cos\psi}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \quad (21)$$

위 식에서  $a$ 는 두 개 재머의 출력신호의 진폭비,  $\phi$ 는 두 재머 안테나 신호간의 위상차이다.

Fig. 1에서 조우각  $\psi$ 가 0°인 경우에  $a$ 와  $\phi$ 를 변경하면서 거리오차를 시뮬레이션하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 재머의 출력신호의 진폭비  $a$ 가 클수록 거리오차가 커지는 것을 알 수 있다.  $a=1$ 이고  $\phi=180^\circ$  일 때 최대 거리오차가 발생하는 것을 추측할 수 있다.

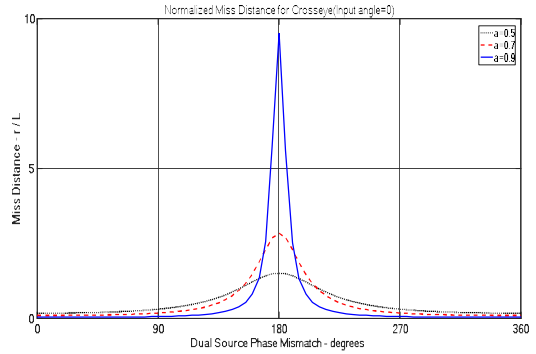


Fig. 4. Dual source phase mismatch vs. Miss distance of monopulse radar

Fig. 5는 Fig. 1의 환경에서  $\phi=180^\circ$ ,  $d=100m$ ,  $a=0.9$ 인 경우 조우각  $\psi$ 를 변경하면서 거리오차를 시뮬레이션 하였다. 조우각  $\psi=0^\circ$  일 때 최대 오차가 약 1km 발생하는 것을 볼 수 있으며 특히 조우각  $45^\circ \sim 135^\circ$ 와  $225^\circ \sim 315^\circ$ 에서 재밍 거리가 최대 거리오차의 70% 이하가 되는 것을 알 수 있다.

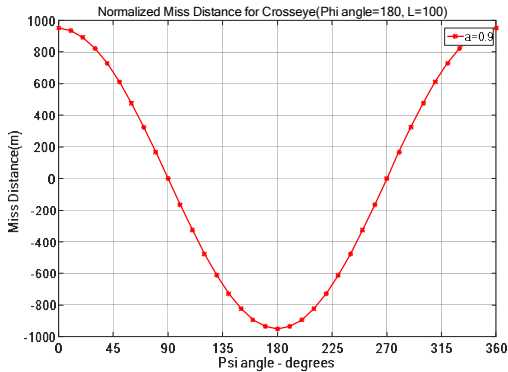


Fig. 5. Engagement angle of jammer vs. Miss distance of monopulse radar

Fig. 6, 7은  $a = 0.9$ ,  $a = 0.5$ 인 경우에 위상차  $\phi$ 와 조우각  $\psi$ 를 변경하면서 거리오차를 3차원으로 시뮬레이션 하였다. 두 경우 모두  $\phi = 180^\circ$ 와  $\psi = 0^\circ$  일 때 최대 오차가 발생하였으며,  $a = 0.9$ 인 경우가 조우각에 따른 오차거리가  $a = 0.5$ 인 경우 보다 훨씬 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

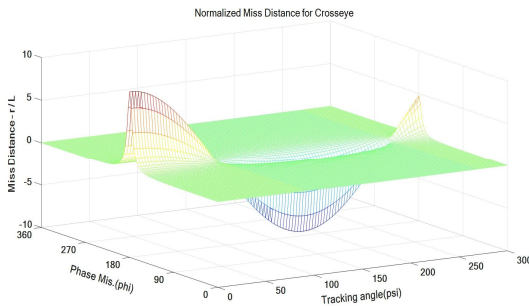


Fig. 6. Engagement angle of jammer vs. Miss distance of monopulse radar ( $a=0.9$ )

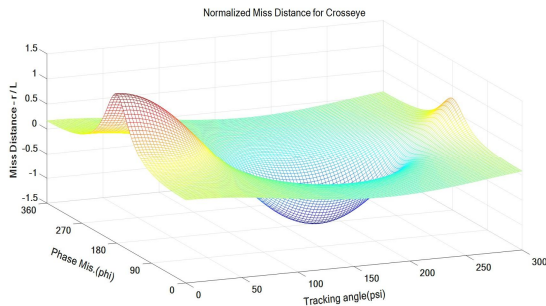


Fig. 7. Engagement angle of jammer vs. Miss distance of monopulse radar ( $a=0.5$ )

## 5. 결론

본 논문에서는 재귀형 위상변위 크로스아이 재밍 시스템을 사용하여 재머 채널의 위상차와 진폭차를 제어 가능하도록 설계하였다. 추적 레이더와 재머 기준선과의 조우각과 재밍 채널의 위상차, 진폭차를 변경하며 재밍 거리를 분석한 결과 조우각  $\psi = 0^\circ$ , 두 재머 안테나간의 위상차  $\phi = 180^\circ$ , 재머 안테나의 진폭비  $a=1$ 일 때 최대 추적 거리오차가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 조우각이  $45^\circ \sim 135^\circ$ 와  $225^\circ \sim 315^\circ$  영역에서 거리오차가 최대치의 70% 이하로 급격하게 감소하므로 미사일이 조우각  $45^\circ$  이상에서 공격하는 것을 방어하기 위하여 회전형 크로스아이 재머 또는 다수 채널 크로스아이 재머에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

## REFERENCES

- [1] D. L. Adamy. (2015). *EW 104 EW against a New Generation of Threats*, Artech House, 319-321.
- [2] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, 325-334.
- [3] D. C. Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 201-214.
- [4] F. Neri. (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed.*, Artech House, Boston, 324-334.
- [5] L. B. van Brunt. (1995). *Applied ECM, volume 3*, EW Engineering, Inc. VA, 762-764.
- [6] W. D. Plessis. (2010). A Comprehensive Investigation of Retrodirective Cross-Eye Jamming. *Ph.D. Thesis, University of Pretoria, Pretoria, South Africa*, 86-95.
- [7] Y. S. Jang & J. T. Park. (2018). Performance Experiment of the Angle Deception of Cross-Eye Jamming against a Monopulse Sensor. *Journal of the Korean Institute of EM Engineering and Science*, 29(2), 146-149.
- [8] W. D. Plessis. (2016). Cross-Eye gain in multi-loop retrodirective cross-eye jamming. *IEEE Trans. Aerosp Electron Systm*, 52(2), 875-882.
- [9] T. Liu, X. Wei, Z. Liu & d Z. Guan. (2019). Continuous and Stable Cross-Eye Jamming via a

Circular Retrodirective Array. *Journal of Electronics*, 8(7), 1-16.

- [10] B. R. Mahafaza. (2005). *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab(2nd Edition)*, Chapman and Hall, 297-300.
- [11] A. V. Essop. (2016). Electronic Attack of a Dual Band Radar. Dissertation. *Department of Electrical Engineering, University of Cape Town*, 196-240.
- [12] Y. H. Kim, J. S. Lim, G. S. Chae & K. C. Kim. (2015). An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding. *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(5), 249-255.
- [13] J. S. Lim, Y. H. Kim & K. C. Kim. (2017). A Simulator for Analyzing of Correlative Interferometer Direction Finder. *Journal of the SMB Convergence Society*, 7(2), 53-58. DOI : 10.22156/CS4SMB.2017.7.2.037
- [14] J. S. Lim. (2019), Multi-Signal Regeneration Effect of Quadrature Digital Radio-Frequency Memory, *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(8), 134-139. DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.8.134
- [15] J. S. Lim & G. S. Chae. (2020). Jamming Effect of Stand-Off Jammer to Main Lobe of LPI Radar. *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(3), 16-21. DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.03.016

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학 연구소

- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 ICT학부 교수
- 관심분야 : 전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이더 및 전자전 장비 설계/분석
- E-mail : jslim@bu.ac.kr

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



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

- 관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 이론, IoT 시스템
- Email : gschae@bu.ac.kr