

## 크로스아이 재머와 레이더 반사 신호 비(JSR)에 따른 모노펄스 레이더 추적 오차 분석

임중수, 채규수\*  
백석대학교 스마트IT공학부 교수

### Analysis of the monopulse radar tracking errors according to the JSR of cross-eye jammer and radar reflection signals

Joong-Soo Lim, Gyo-Soo Chae\*  
Professor, Division of Smart IT Eng., Baekseok University

**요약** 본 논문에서는 재귀형 크로스아이(retrodirective cross-eye) 재머 신호와 레이더 반사 신호 비(Jamming and radar return Signal Ratio: JSR)에 따른 모노펄스 레이더의 추적 오차의 변화를 분석하였다. 레이더 추적 오차를 계산하기 위한 방법으로 크로스아이 재머 이득( $G_j$ )이 사용되었고, 재머 이득과 재머 신호와 레이더 반사 신호의 비(JSR)의 관계를 수식으로 표현하였다. 모노펄스 레이더와 재머 사이의 조우각과 JSR을 동시에 변화 시키면서 레이더 추적 오차를 분석하였다. 그리고 재머 두 신호간의 위상( $\phi$ ) 차이와 JSR의 변화를 분석 한 결과 두 재머 신호 위상 차이가  $180^\circ$ 에 가까워질수록 추적 오차가 커지고 JSR이 20dB이상이 되면 추적 오차가 일정 수준을 유지하게 되는 것을 볼 수 있다. 본 연구는 레이더 반사 신호의 비(JSR)에 따른 모노펄스 레이더의 추적 오차에 대한 결과를 제시하였고 추적 방향, 두 재머 신호 위상차, 두 재머 신호 크기 비율 등에 따른 복합적인 추적오차 분석 결과를 제시하였다.

**주제어** : 모노펄스 레이더, 크로스아이 재밍, 추적 오차, 레이더 반사신호, 재밍신호와 반사신호비(JSR)

**Abstract** In this paper, we analyze the tracking errors of monopulse radar according to the JSR of retrodirective cross-eye and radar skin return signals. The cross-eye jammer gain( $G_j$ ) is used to calculate the radar tracking errors, and the relationship between the jammer gain and the JSR is represented mathematically. We analyze the radar tracking errors by varying the tracking angle and JSR. Analysis results of the phase difference( $\phi$ ) and amplitude ratio(a) between the two jammer signals and the changing JSR show that the closer the phase difference of the two jammer signals is to 180, the greater the tracking error and it shows that if the JSR is above 20dB, the tracking errors no longer increase. This work presents an effective utilization of retrodirective cross-eye jammers through various tracking error analyses based on the JSR, tracking angles, two-jammer phase differences and amplitude ratios of two-jammer signals.

**Key Words** : Monopulse Radar, Cross-eye Jamming, Tracking error, Radar reflection signal, Jamming and radar return Signal Ratio(JSR)

\*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 : Gyo-Soo Chae(gschae@bu.ac.kr)

### 1. 서론

일반적으로 모노펄스 레이더의 수신 신호를 교란하는 방법으로 Blinking, Cross-pol, Cross-eye 등이 주로 사용된다. 최근에는 재머를 항공기나 함정에 탑재하여 레이더 신호를 재밍하는 방법으로 cross-eye 기법이 가장 널리 소개되고 있다[1-4].

Cross-eye 재밍 기법은 송수신 안테나의 구성에 따라서 다양한 방법이 있다. 두 개의 채널로 분리된 송수신기를 사용하는 재귀형 크로스 아이(retrodirective cross-eye), 각 채널의 송신기 위상차를 다양하게 변경할 수 있는 위상 변경 크로스 아이(phase diversity cross-eye), 두 채널의 송신 안테나의 신호의 크기를 다양하게 변경할 수 있는 진폭 변화 크로스 아이(sweep cross-eye) 등이 있다[5-8].

본 논문에서는 재귀형 크로스 아이 재머로부터 송신되는 신호( $J_2$ )와 모노펄스 레이더 송신 신호가 표적의 표면 반사 신호( $S_2$ )의 비(Jammer to Signal Ratio: JSR)에 따른 모노펄스 레이더의 추적 오차에 대한 연구 결과가 제시되었다. 재귀형 크로스 아이 재머에 대한 기본 동작 원리와 표적 반사 신호와 재머 신호를 활용한 모노펄스 레이더의 방향 추정 방법을 기술하였으며, 추적 각도, 재머 신호 간의 크기와 위상차, JSR의 변화에 따른 추적 오차의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 기술하였다.

## 2. Cross-eye 재밍 기법

### 2.1 Retrodirective cross-eye

Fig. 1에서는 retrodirective cross-eye 재밍 안테나의 기본 구성이 나타나 있다. 레이더 신호 수신을 위한 2개의 안테나와 재밍 신호를 내보내기 위한 2개 안테나가 배치된다.

안테나  $R_1$ 으로 수신된 레이더 신호가 증폭기( $G_1$ )를 거쳐  $J_1$  안테나에서 재송신 된다. 마찬가지로  $R_2$  안테나로 수신된 레이더 신호는 증폭기( $G_2$ )를 거쳐  $J_2$  안테나로 재송신되고 이 과정에 신호의 위상을  $180^\circ$  이동시킨다. 이처럼 이렇게 2개의 안테나 세트를 사용하는 것은 전파 전달 환경에 다양한 변수가 생겨도 두 채널의 위상차를  $180^\circ$ 로 유지하여 전자파 교란의 효과를 안정되게 유지하기 위한 것이다. 레이더 신호가 안테나  $R_1$ 에서 수신되어 안테나  $J_1$ 을 거쳐 레이더 수신기로 다

시 돌아오는 경로는 안테나  $R_2$ 에서 수신되어 안테나  $J_2$ 를 통해 송신되어 레이더 수신기로 돌아오는 경로와 정확히 동일하다. 이것은 재머 안테나 기준선이 재머로부터 레이더까지의 경로에 대해 수직이 아니어도 두 경로의 위상차가 항상  $180^\circ$ 로 유지된다.

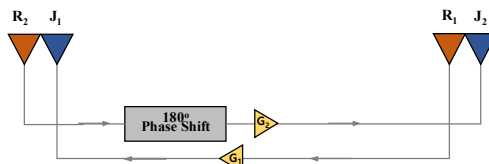


Fig. 1. Antenna connection geometry of a retrodirective cross-eye jammer[2]

### 2.2 표적 반사 신호

모노펄스 레이더의 방향 탐지 원리는 Fig. 2에 제시된 것과 같이 레이더의 수신 안테나의 각 영역(4개 부분)으로 수신된 합-차 신호를 사용하여 목표물의 방향을 예측한다[2]. 그리고 목표물의 방향을 좀 더 정확하게 예측하기 위해서 안테나 주빔(main-lobe) 지향방향(boresight)을 조정하여 예측된 목표물의 방향으로 다시 지향하고 합-차 신호 분석을 한다. 이러한 모노펄스 레이더의 방향 탐지 원리 때문에 다른 재밍 기법으로 재밍이 매우 어려워서 cross-eye가 모노펄스 레이더에 효과적인 기법으로 활용된다.

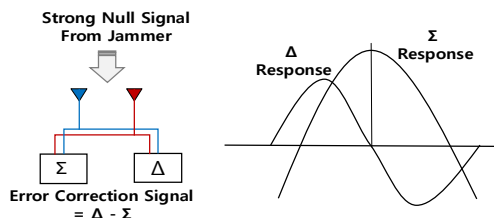


Fig. 2. Tracking response of a Monopulse radar

Fig. 3에서 레이더와 재머의 기본적인 배치 구성도가 제시되었다. 레이더 송신신호가 함정에 도달하면 신호는 자유공간 전파 손실과 다중 경로 등으로 인한 위상과 주파수의 변화가 생긴다. 함정에서 수신되는 신호의 위상은 기본적으로 전파의 이동거리( $R$ )에 따라 변하고 주파수 편이는 함정의 이동이나 레이더의 이동으로 생기는 도플러 효과에 의한 것이다. 도플러 신호가 작은 경우 표적에서 반사되어 모노펄스 레이더 안테나로 수신되는 합-차 신호는 식 (1), (2)와 같이 표현된다[9-11].

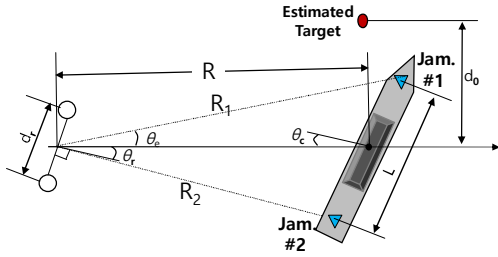


Fig. 3. Geometry of monopulse radar and retrodirective Cross-eye jammer[11]

$$S_g(\theta_r) = P_r(\theta_r) \cos\left[\beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_r)\right] \quad (1)$$

$$D_g(\theta_r) = jP_r(\theta_r) \sin\left[\beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_r)\right] \quad (2)$$

여기서  $P_r(\theta_r)$ 은 레이더 안테나의 정규화 이득,  $\beta = 2\pi/\lambda_o$ ,  $d_r$ 은 레이더 안테나 이격거리,  $\theta_r$ 은 레이더 안테나 boresight와 표적 중심 사이각도이다.  $\theta_r = 0$ 인 경우 모노펄스 레이더의 합-차 신호 비는 다음과 같이 표현된다[9-11].

$$M_r = Re\left\{\frac{D_g}{S_g}\right\} = \tan\left[\beta \frac{d_r}{2} \sin(\theta_r)\right] \quad (3)$$

### 2.3 크로스아이 재밍 신호

Fig. 3에서 cross-eye 재머 안테나를 통해 송신되는 두 재밍 신호는 레이더 송신 신호를 그대로 증폭하고 위상을 변화시켜 송신한다. 첫째 재밍신호  $J_{s1}(t)$ 와 둘째 재밍신호  $J_{s2}(t)$ 는 신호 크기가 같고 위상은 약  $180^\circ$  차이가 난다[11].

$$J_{s1}(t) = A_{jr1} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_1)} \quad (4)$$

$$J_{s2}(t) = A_{jr2} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_2)} \quad (5)$$

여기서,  $A_{jr1}$ ,  $A_{jr2}$ 는 두 재머 안테나에서 송신되는 신호의 크기,  $t_1$ 은 거리 R에 의한 전파지연 시간,  $\mu_r$ 은 레이더 신호 chirp rate이다. 두 재머 신호가 각각  $R_1$ ,  $R_2$ 만큼 떨어진 레이더 안테나로 수신되고 그 합-차 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$S_j = P_r(\theta_r - \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) P_r(\theta_r + \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) \quad (6)$$

$$\times \frac{1}{2} (1 + ae^{j\phi}) [\cos(2k + \cos(2k_c))]$$

$$D_j = P_r(\theta_r - \theta_e) P_c(\theta_c - \theta_e) P_r(\theta_r + \theta_e) P_c(\theta_c + \theta_e) \quad (7)$$

$$\times j \frac{1}{2} (1 + ae^{j\phi}) [\sin(2k + (1 - ae^{j\phi}) \sin(2k_c))]$$

여기서  $P_c(\theta)$ 는 재머 안테나 broadside의 정규화 이득,  $d_c \ll R$ 인 경우  $\theta_e \approx (d_c/2r) \cos(\theta_c)$ ,  $k \approx \beta(d_r/2) \sin(\theta_r)$ ,  $k_c \approx \beta(d_r/2) \cos(\theta_r) \theta_e$ 이다. 이 경우 레이더 합-차 신호 비는 다음과 같이 표현된다.

$$M_j = \frac{\sin(2k) + \sin(2k_c) G_c}{\cos(2k) + \cos(2k_c)} \quad (8)$$

여기서 크로스아이 재머 이득( $G_c$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$G_c = \frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi)} \quad (9)$$

여기서  $a$ 와  $\phi$ 는 두 재머 안테나 신호의 크기 비와 위상차이다.

### 2.4 재밍 신호와 레이더 표적 반사 신호의 합

레이더 안테나로 수신되는 재밍 신호와 표적 반사 신호의 합-차 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$S_t = S_j + a_s e^{j\phi_s} S_g^2 \quad (10)$$

$$\approx \frac{1}{2} [P_r(\theta_r)]^2 \left\{ (1 + ae^{j\phi} + a_s e^{j\phi_s}) [\cos(2k) + 1] \right\}$$

$$D_t = D_j + a_s e^{j\phi_s} S_g D_g \approx j \frac{1}{2} [P_r(\theta_r)]^2 \quad (11)$$

$$\times \left\{ (1 + ae^{j\phi} + a_s e^{j\phi_s}) \sin(2k) + (1 - ae^{j\phi}) \sin(2k_c) \right\}$$

이 경우 위 식의 근사화 과정을 거쳐 구해진 레이더 합-차 신호 비는 다음과 같이 표현된다.

$$M_t \approx \tan(k) + Re\left\{ \frac{1 - ae^{j\phi}}{1 + ae^{j\phi} + a_s e^{j\phi_s}} \right\} \frac{\sin(2k_c)}{\cos(2k) + 1} \quad (12)$$

여기서 합 신호의 크로스아이 재머 이득( $G_a$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$G_{ct} = Re \left\{ \frac{1 - ae^{j\phi}}{(1 + ae^{j\phi})(1 + a_j e^{j\phi_j})} \right\} \quad (13)$$

식 (13)에서  $a$ 와  $\phi$ ,  $\phi_j$ 에 따라 이득의 변화가 크기 때문에 레이다 추적 오차를 일반적으로 해석하기 위한 크로스아이 재머 이득( $G_{ct}$ )의 중간값( $G_{dm}$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$G_{dm} = \frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi) + a_s^2} \quad (14)$$

여기서  $a=0$ (재밍 신호가 없는 경우)인 경우 재밍 신호와 표적 반사 신호비(JSR)는 다음과 같이 정의된다.

$$JSR = \frac{1}{a_s^2} \quad (15)$$

크로스아이 재머 이득의 중간값( $G_{dm}$ )은 다음과 같이 표현된다.

$$G_{dm} = \frac{1 - a^2}{1 + a^2 + 2a \cos(\phi) + (1/JSR)} \quad (16)$$

본 논문에서 살펴볼 JSR의 영향을 분석하기 위하여 식 (16)을 다시 정리하면

$$JSR = \frac{G_{dm}}{1 - a^2 - [1 + a^2 + 2a \cos(\phi)] G_{dm}} \quad (17)$$

의 관계가 성립한다[11].

### 3. Cross-eye jamming 오차 분석

모노펄스 레이다 수신기는 재머로부터 수신된 두 재밍 신호의 합-차 신호 비를 이용하여 레이다의 추적 각도를 계산한다. Fig. 3에서 2 개의 재머 안테나 사이의 거리는  $L$ , 레이다 안테나 중심과 재머 기준선의 중앙의 직각방향과 이루는 각( $\theta_c$ )을 레이다 추적각도라 정의한다. 레이다 추적 오차 각도( $\theta_{err}$ )는 식 (18)과 같이 정의되고 합정의 이동 경로 상에서의 추적 오차 거리( $r_{miss}$ )는 식 (19)와 같이 표현된다[12-14].

$$\theta_{err} = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos\phi + a^2 + a_s^2} \quad (18)$$

$$r_{miss} = \frac{L \cos\theta_c}{2} \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos\phi + a^2 + a_s^2} \quad (19)$$

위 식에서  $a$ 는 두 재머 안테나의 출력신호의 진폭 비,  $a_s$ 는 레이다 반사 신호 비,  $L$ 은 두 재머 안테나 사이 이격거리,  $\phi$ 는 두 재머 안테나 신호의 위상차이다.

Fig. 4에서 레이다 추적각도( $\theta_c$ )의 변화에 대해 두 재머 안테나 신호비( $a$ )가 각각 0.7, 0.9이고 JSR이 각각 0, 13, 16, 17, 19, 20dB인 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다.  $a=0.7$ 인 경우 JSR의 변화에 대해 상대적으로 추적 오차의 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 이것은 두 재머 사이의 신호비( $a$ )가 작아지면 전반적인 재밍 효과가 줄어들기 때문에 JSR이 상대적으로 영향을 덜 주게 된다는 것을 유추 할 수 있다. 반대로  $a=0.9$ 인 경우는 재밍 효과가 크고 JSR의 변화에 따라 추적 오차의 변동이 큰 것을 볼 수 있다.

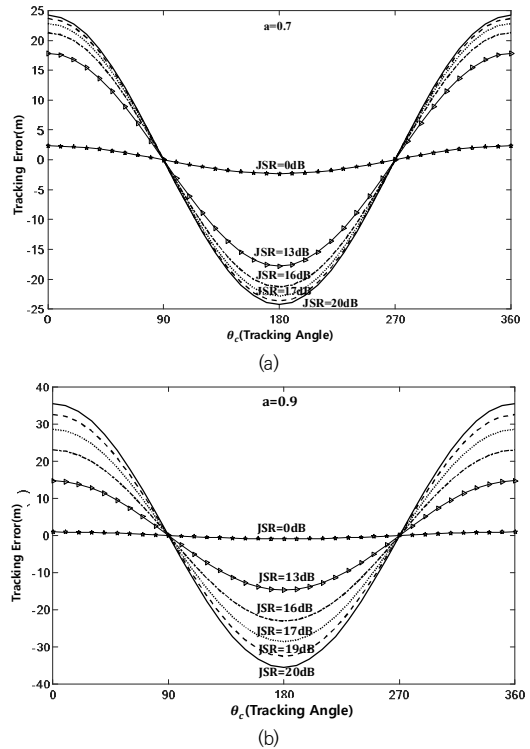


Fig. 4. Tracking error of monopulse radar w.r.t. tracking angle of two jammers @JSR=0, 13, 16 17, 19, 20dB, L=10m

Fig. 5는  $a=0.7, 0.9$ 인 경우에 두 재머 간의 신호 위상차( $\phi$ )가  $165^\circ, 170^\circ, 175^\circ$  경우에 대한 추적오차를 보여주고 있다. 이 경우에도  $a=0.7$ 인 경우 각 위상차에 대한 추적오차의 변화가 크지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 재머 신호 크기 비( $a$ )가  $0.9$ 인 경우에 JSR을 10, 20, 30dB로 변화 시킬 때 추적 방향, 재머 신호 위상차의 변화에 따른 추적 오차를 분석한 결과를 3차원으로 보여주고 있다. JSR이 증가 할수록 추적 오차가 커지는 것을 볼 수 있고 추적 각도와 재머 신호 위상차에 대한 영향을 동시에 볼 수 있다.

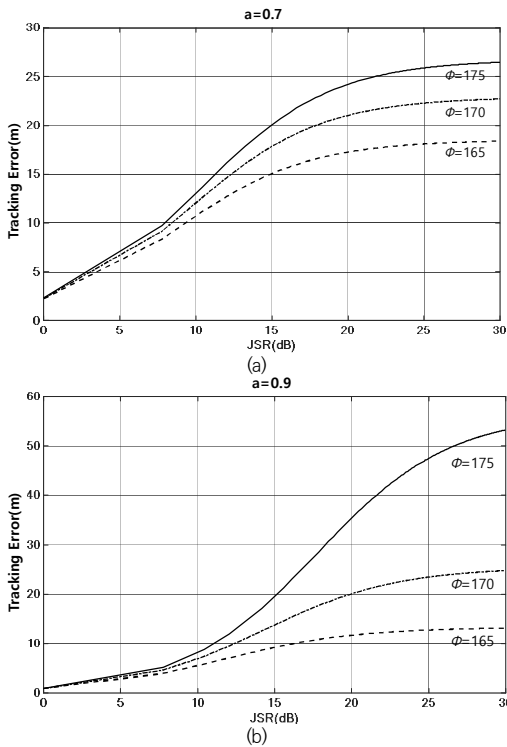


Fig. 5. Tracking error of monopulse radar w.r.t. JSR (a)@ $a=0.7$ , (b)@ $a=0.9$

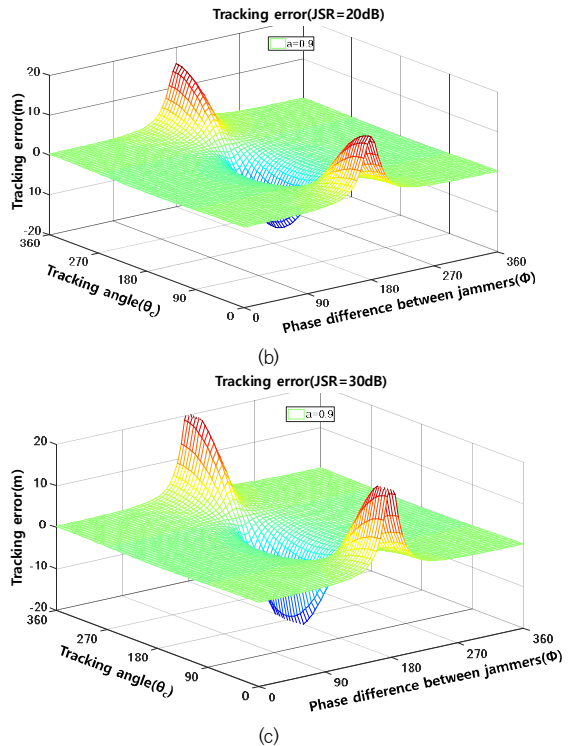
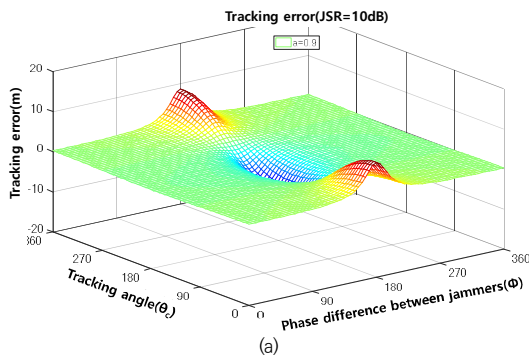


Fig. 6. Tracking error of monopulse radar (a)@ JSR=10dB, (b)@JSR=20dB, (c)@JSR=30dB

#### 4. 결론

본 논문에서는 retrodirective cross-eye 재머 신호와 레이더 반사 신호의 비(JSR)에 따른 모노펄스 레이더의 추적 오차를 분석하였다. 레이더 추적 오차를 예측하기 위하여 크로스아이 재머 이득이 사용되었고, 재머 이득과 JSR 사이의 관계가 수식으로 제시되었다. 모노펄스 레이더와 두 재머 안테나 기준선의 수직 방향이 이루는 각(추적각,  $\theta$ )과 JSR을 동시에 변화 시키면서 레이더 추적 오차를 분석하였다. 그리고 재머 두 신호간의 위상( $\phi$ ) 차이와 JSR의 변화를 분석 한 결과 두 재머 신호 위상 차이가  $180^\circ$ 에 가까워질수록 추적 오차가 커지고 JSR이 20dB 이상이 되면 추적 오차가 더 이상 증가하지 않음을 볼 수 있었다. 본 연구에서 제시된 결과들은 향후 retrodirective cross-eye 재머 설계에 활용되어 효과적인 모노펄스 레이더 신호 교란 시스템 개발을 위한 중요한 데이터들로 활용될 수 있을 것이다.

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. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 201-214.

[4] Filippo Neri. (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed.*, Artech House, Boston, 324-334.

[5] W. D. Plessis. (2010). *A Comprehensive Investigation of Retrodirective Cross-Eye Jamming*. Ph.D. Thesis, University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 86-95.

[6] T. W. Tucker & B. Vidger. (2009). *Cross-Eye Jamming Effectiveness*. Technical report, Tactical Technologies Inc. Ottawa, 1-10.

[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.  
DOI : 10.5515/KJKIEES.2018.29.2.146

[8] W. D. Plessis. (2016). Cross-Eye gain in multi-loop retrodirective cross-eye jamming. *IEEE Trans. Aerosp Electron System, 52(2)*, 875-882.  
DOI : 10.1109/TAES.2016.140112

[9] S. M. Sherman & D. K. Barton. (2011). *Monopulse principles and techniques*. Artech House.

[10] W. Jianlu, Z. Yang, D. Huanyao & C. Jianling. (2016, October). Response analysis of monopulse radar under retrodirective and non-retrodirective cross-eye jamming. *In 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)* (pp. 1-5). IEEE.

[11] W. P. Du Plessis. (2012). Platform skin return and retrodirective cross-eye jamming. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 48(1)*, 490-501.

[12] J. S. Lim & G. S. Chae. (2020). Range Error of Monopulse Radar according to the Engagement Angle of Cross-Eye Jammer. *Journal of Convergence for Information Technology, 10(5)*, 30-35.

[13] 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

[14] 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.  
DOI : 10.15207/JKCS.2015.6.5.249

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



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

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

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



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

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