

십자형으로 배치된 크로스아이 재머 안테나를 이용한 모노펄스 레이더 재밍 오차 분석

임중수*, 채규수
백석대학교 ICT학부 교수

Analysis of the Monopulse Radar Tracking Errors using Orthogonally Deployed Antenna Sets for Cross-eye Jamming

Joong-Soo Lim*, Gyoo-Soo Chae

Professor, Division of Information Communication Technology, Baekseok University

요약 본 논문은 2세트의 크로스 아이 재머 안테나가 십자형으로 배치되어 모노펄스 레이더를 재밍하는 경우 재머의 위상차와 진폭 비 및 레이더 조우각도에 따른 재밍 효과를 분석하였다. 크로스 아이 재머의 위상차와 진폭 비는 재머에서 조정이 가능하지만 조우각도는 레이더에 의해서 상대적으로 결정되기 때문에 조우각도 변화에 따른 재머의 대응이 매우 중요하다. 수직 교차된 2세트의 크로스 아이 재머 안테나는 하드웨어 구성을 최소로 하면서 재밍 효과를 높일 수 있는 좋은 방법으로 판단되며, 조우각도를 $0^\circ \sim 360^\circ$ 변화시키면서 재밍 효과를 분석하였다. 본 재머는 단일 재머와 비교하여 조우각도 $45^\circ \sim 135^\circ$ 와 $225^\circ \sim 315^\circ$ 에서 재밍 효과가 크게 향상되며, 항공기 및 함정의 크로스 아이 재머 설계에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

주제어 : 모노펄스 레이더, 재머, 크로스 아이, 재밍 오차, 안테나 배치

Abstract In this paper, when two sets of cross-eye jammer antennas are installed vertically to jam a monopulse radar, the jamming effects according to the jammer's phase difference, amplitude ratio, and radar angle of engagement are analyzed. The phase difference and amplitude ratio of the cross-eye jammer can be adjusted in the jammer, but since the angle of engagement is relatively determined by the radar, it is very important to respond to changes in the angle of engagement. The orthogonally deployed jammer antennas can be considered as a good way to increase the jamming effect while minimizing the hardware configuration, and the jamming effect is analyzed while changing the angle of inclination from 0° to 360° . This jammer greatly improves the jamming effects at the angles of incidence $45^\circ \sim 135^\circ$ and $225^\circ \sim 315^\circ$, compared to a single jammer. And it is expected to be useful in the design of cross-eye jammers for military aircraft and ships.

Key Words : Monopulse Radar, Jammer, Cross-eye, Jamming error, Antenna deployment

1. 서론

모노펄스 레이더는 표적 반사 단일 펄스에서 표적의 위치와 이동방향을 측정할 수 있다. 이것은 기존의

대부분 재밍 기법을 비효율적으로 만들기 때문에 중요한 전자보호(EP) 기법으로 분류되고 있다.

모노펄스 레이더를 방해하는 주요 재밍 방법으로는 블링킹 재밍(blinking jamming), 크로스 폴 재밍

*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)

(cross polarization jamming), 크로스 아이 재밍 (cross-eye jamming) 등이 있으나 단일 플랫폼에 재머를 탑재하여 재밍하는 방법으로 크로스아이 재밍이 가장 많이 연구되고 있다[1-5].

크로스아이 재머는 수신기와 송신기의 구성에 따라서 위상이 180° 상이한 2 채널로 분리된 송수신기를 사용하는 재귀형(retrodirective) 크로스 아이 재머와 2 채널의 송신기 위상차를 다양하게 변경할 수 있는 위상 변경(phase diversity) 크로스 아이 재머, 2 채널의 송신기 진폭차를 다양하게 변경할 수 있는 진폭 스위프(sweep) 크로스 아이 재머 등이 있다[6-9]. 또한 여러 개의 재머로 구성된 배열(array) 재머도 연구되고 있다[10].

본 논문에서는 수직으로 교차하는 2 배열 크로스 아이 재머를 사용하여 모노펄스 레이더를 재밍하는 경우 레이더를 향한 재머의 지향각도 (이하 조우각도)에 따른 재밍 효과를 중점적으로 분석한다. 특히 2장에서는 모노펄스 레이더 수신 특성, 3장에서는 재귀형 크로스 아이 재머, 4장에서는 수직교차 2 배열 재머의 재밍 효과를 기술한다.

2. 모노펄스 레이더 수신 특성

모노펄스 레이더는 Fig. 1과 같이 다수의 수신 안테나나 피드에 수신된 전력의 합과 차를 이용하여 표적의 위치와 방향을 측정한다. 또한 표적의 방향을 정확하게 추적하기 위해서 안테나 각도를 조정하여 표적을 지향하게 한다. 이 때 한 개의 펄스 반사 신호에 의해서 표적의 탐지 및 추적이 가능하므로 재머 입장에서는 재밍이 매우 어려워서 중요한 위협으로 분류된다.

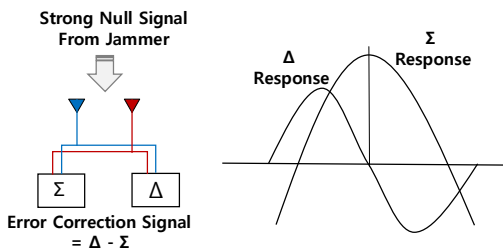


Fig. 1. Tracking response of a monopulse radar[2,11]

3. 재귀형 크로스아이 재머

3.1 재귀형 크로스아이 재머 구성

Fig. 2는 두개의 수신 안테나와 두개의 송신 안테나로 구성된 두 채널로 재밍을 할 수 있는 재귀형 크로스 아이 재머의 구성도이다.

안테나 #2에 수신된 신호는 20dB 이상으로 증폭된 후 #1 안테나에서 재송신 된다. 마찬가지로 #1 안테나로 수신된 신호는 증폭된 후 #2 안테나로 재송신되고 이 과정에 위상을 180° 편이 시킨다. 이처럼 두 채널을 사용하는 것은 환경적 요인이 있어도 두 채널의 위상차를 정확하게 180°로 하여 재밍 효과를 극대화하기 위함이다. 레이더 신호가 안테나 #1에서 수신되어 안테나 #2를 거쳐 레이더 수신기로 다시 돌아오는 경로는 안테나 #2에서 수신되어 안테나 #1을 통해 송신되어 레이더 수신기로 돌아오는 경로와 정확히 동일하다. 이것은 #1, #2 안테나 기준선이 재머로부터 레이더까지의 경로에 대해 수직이 아니어도 두 경로의 위상차가 항상 180°로 유지된다.

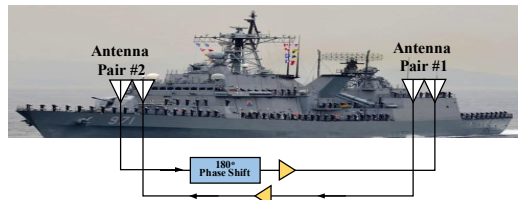


Fig. 2. Block diagram of a retrodirective cross-eye jammer[2]

3.2 재귀형 크로스아이 재머의 재밍 효과

Fig. 3은 모노펄스 레이더와 크로스 아이 재머의 일반적인 조우 상황이다. 모노펄스 레이더는 펄스변조 신호를 많이 사용하며 크로스 아이 재머는 레이더 신호를 수신하여 위상 및 진폭을 변형하여 재밍 신호로 사용한다.

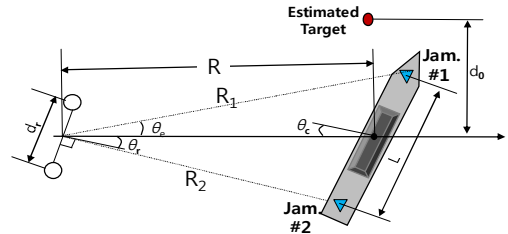


Fig. 3. Operational drawing of monopulse radar and Cross-eye jammer[9]

Fig. 3에서 모노펄스 레이더의 송신 신호로 반송파 주파수가 f_0 , 크기가 A_0 인 펄스변조 신호를 사용하면 이는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

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

여기서, 펄스신호는 크기가 1이고 펄스폭이 τ 이다[12].

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

또한 레이더 수신기에 수신되는 크로스아이 재머의 2 채널 재밍신호는 식 (3), (4)와 같다.

$$J_{r1}(t) = A_{jr1} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_1)} \quad (3)$$

$$J_{r2}(t) = A_{jr2} \text{Rect}\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) \cdot e^{j2\pi(f_0(t-t_1) + \frac{\mu}{2}(t-t_1)^2 + \phi_2)} \quad (4)$$

여기서, A_{jr1} , A_{jr2} 는 각 채널의 재밍 신호의 크기, t_1 는 거리 r 에 의한 전파지연 시간, μ_r 은 레이더 신호 chirp rate이다.

모노펄스 수신기는 재밍신호가 표적 반사신호보다 20dB 이상 큰 경우 재머에 도착한 두 개의 재밍 신호를 신호처리하여 레이더의 추적 각도를 계산한다. 크로스아이 재밍에 의한 모노펄스 레이더의 추적 각도 및 추적 각도 오차, 추적 거리 오차는 참고문헌 [3]에서 잘 설명되어 있어서 본 논문에서는 그 결과를 이용한다.

Fig. 3와 같이 두 개의 재밍 송신기의 거리를 L , 레이더 추적방향과 재머 기준선의 직각방향과 이루는 조우각도를 ψ 라 하면 $\psi = \theta_c + \theta_r$ 가 되고, 추적 오차 각도 (θ_{err})는 식 (5)과 같이 주어지고 목표물 이동 경로 상에서의 추적 오차 거리(r_{miss})는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\theta_{err} = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \quad (5)$$

$$r_{miss} = \frac{L\cos\psi}{2} \frac{1-a^2}{1+2a\cos\phi+a^2} \quad (6)$$

여기서, a 는 두 개 재밍원의 진폭비 A_{j2}/A_{j1} 이고 ϕ 는 위상차 $\phi_1 - \phi_2$ 이다.

Fig. 4는 식 (6)에서 $\phi = 180^\circ$, $L=10m$, $a=0.95$ 인 경우 조우각도를 변경하면서 거리오차를 시뮬레이션한 결과이다. 조우각도 $\psi = 0^\circ$ 일 때 최대 오차가 약 200m 발생하는 것을 볼 수 있으며 조우각도가 $45^\circ \sim 135^\circ$ 와 $225^\circ \sim 315^\circ$ 에서는 거리오차 절대값이 최대 오차의 70% 이하가 되는 것을 알 수 있다.

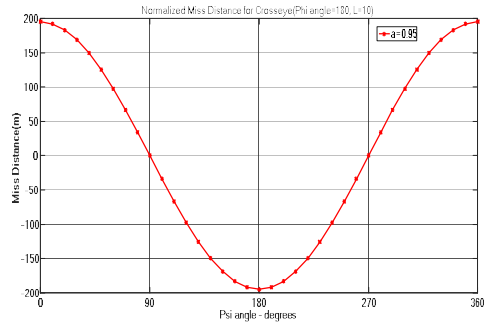


Fig. 4. Miss distance of monopulse radar vs. engagement angle of a jammer

4. 수직교차 2 배열 재머의 재밍 효과

Fig. 5는 Fig. 3에서 설명한 크로스아이 재머에 수직으로 교차하는 크로스아이 재머를 추가한 2 배열 재머의 운용도이다. 3장에서 1-2번 재귀형 재머만을 사용하는 경우에는 조우각도 $45^\circ \sim 135^\circ$ 와 $225^\circ \sim 315^\circ$ 에서 거리오차가 급격하게 감소하여 재밍효과가 미약하므로 #1, #2 재머 세트와 수직으로 교차하는 위치에 #3, #4번 재머 세트를 추가로 배치하여 조우각도가 $45^\circ \sim 135^\circ$ 와 $225^\circ \sim 315^\circ$ 인 경우에는 #3, #4 재머로 재밍하여 전체적으로 재밍 효과를 높인다. 참고문헌 [13-15]에서 세부적인 재밍신호의 종류와 자체보호 (self-protection) 재밍 등의 재밍 방법에 대해서 기술하고 있다.

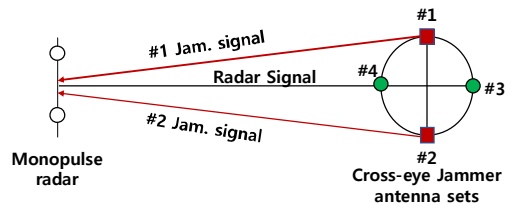


Fig. 5. Operational drawing of monopulse radar and orthogonally deployed jammer antenna sets [10]

Fig. 6은 Fig. 5의 2-배열 재머 운용에서 $\phi = 180^\circ$, $L=10m$, $a=0.95$ 인 경우 조우각도 ψ 를 변경하면서 거리오차를 시뮬레이션 한 결과이다. $\psi = 0^\circ$, 90° 일 때 최대 오차가 약 200m, $\psi = 180^\circ$, 270° 일 때 반대방향으로 최대 오차가 약 200m 발생하는 것을 볼 수 있으며 $0^\circ \sim 360^\circ$ 전방향에서 거리오차 절대값이 130m 이상이 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 3의 재머 운용에서 $L=10m$, $a=0.95$ 인 경우 조우각도 ψ 와 위상차 ϕ 를 변경하면서 거리오차를 3차원으로 시뮬레이션 한 결과이다. $\psi = 0^\circ$ 일 때 최대오차가 $\psi = 180^\circ$ 일 때 반대방향으로 최대오차가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 특히 ϕ 가 $178^\circ \sim 182^\circ$ 를 벗어나면 거리오차가 급격하게 작아지는 것을 볼 수 있다.

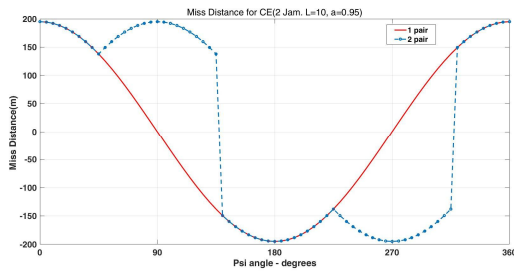


Fig. 6. Miss distance of monopulse radar w.r.t. engagement angle of two jammers

Fig. 8은 $a = 0.95$ 인 경우에 Fig. 5의 직각교차 배열 재머의 거리오차를 3차원으로 시뮬레이션한 결과이다. $\psi = 0^\circ$, 90° 일 때 최대 오차가, $\psi = 180^\circ$, 270° 일 때 반대방향으로 최대 오차가 약 200m 발생하는 것을 볼 수 있으며 Fig. 7과 같이 ϕ 가 $178^\circ \sim 182^\circ$ 를 벗어나면 거리오차가 급격하게 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 $a = 0.5$ 인 경우에 직각교차 배열 재머의 거리오차를 3차원으로 시뮬레이션 한 결과이다. $\psi = 0^\circ$, 90° 일 때 최대 오차가, $\psi = 180^\circ$, 270° 일 때 반대방향으로 최대 오차가 약 15m 발생되어 $a = 0.95$ 인 경우의 7.5% 수준인 것을 알 수 있다. 또한 ϕ 가 $178^\circ \sim 182^\circ$ 를 벗어나도 거리오차가 서서히 작아지는 것을 볼 수 있다.

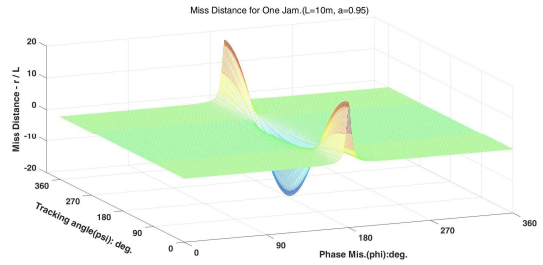


Fig. 7. Miss distance of monopulse radar (1 cross-eye jammer, $a=0.95$)

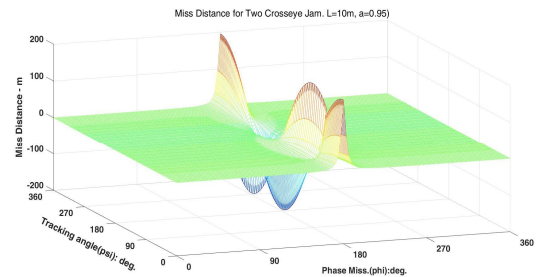


Fig. 8. Miss distance of monopulse radar (orthogonally deployed jammer antenna sets, $a=0.95$)

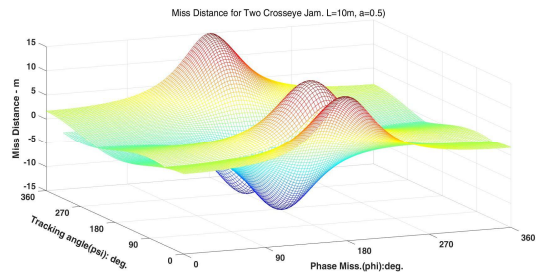


Fig. 9. Miss distance of monopulse radar (orthogonally deployed jammer antenna sets, $a=0.5$)

5. 결론

본 논문에서는 재귀형 크로스 아이 재머 2세트를 십자형으로 교차하는 배열 재머로 구성하여 모노펄스 레이다의 추적 각도 오차 및 거리 오차를 분석하였다. 본 연구에서는 배열 재머가 위상차가 180° , 진폭비가 1일 때 조우각도가 0° , 90° 에서 최대 거리 오차가 약 200m 발생되고, 180° , 270° 에서는 반대 방향으로 최대 거리 오차가 약 200m 발생되는 것을 확인하였다.

또한 조우각이 0°~360° 전 범위에서 거리오차의 절대값이 135m 이상 되는 것을 확인하였다. 이것은 여러 방향에서 공격하는 적의 모노펄스 레이더와 미사일을 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 다수 배열 재머를 사용하는 시스템은 구조가 크고 운용이 복잡하므로 효과적인 재머 안테나의 개수와 운용 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

[1] L. B. van Brunt. (1995). *Applied ECM*, volume 3, EW Engineering. Inc. VA, 762-764.

[2] D. L. Adamy. (2015). *EW 104 EW against a New Generation of Threats*, Artech House, 319-321.

[3] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, 325-334.

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

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

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

[8] 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

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

[10] T. Liu, X. Wei, Z. Liu & Z. Guan. (2019). Continuous and Stable Cross-Eye Jamming via a Circular Retrodirective Array. *Journal of Electronics, 8(7)*, 1-16.

[11] B. R. Mahafaza. (2005). *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab(2nd Edition)*, Chapman and Hall, 297-300.

[12] A. V. Essop. (2016). Electronic Attack of a Dual Band Radar. Dissertation. *Department of Electrical Engineering, University of Cape Town*, 196-240.

[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

[15] 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

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



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

[중신회원]



- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학(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