

LPI 레이더에 대한 원격지원 재머의 주엽 재밍 효과

임중수*, 채규수
백석대학교 ICT학부 교수

Jamming Effect of Stand-Off Jammer to Main Lobe of LPI Radar

Joong-Soo Lim*, Gyoosoo Chae
Professor, Division of ICT, Baekseok University

요약 본 논문은 저 측엽 안테나를 사용하는 LPI(Low Probability Interceptor)레이더를 재밍하는 원격지원 재머의 특성에 대하여 기술한다. LPI 레이더는 재밍 영향을 줄이기 위해서 송수신 안테나의 측엽을 감소시킨다. 레이더는 재머가 표적과 같은 위치에 있는 자체보호 재머에 대해서는 재밍 효과를 쉽게 예측할 수 있으나, 표적과 다른 위치에서 재밍하는 원격지원 재머에 대해서는 재밍 효과를 예측하기가 어렵다. 본 논문에서는 LPI 레이더의 측엽을 재밍하는 원격지원 재머의 재밍 효과를 신호재밍비(SJR)와 재밍 유효 한계거리를 사용하여 분석하였다. 또한 안테나의 측엽이 -30dB 이하인 경우에는 재밍 효과가 미약하여, 안테나 주엽에 대한 원격지원 재밍 방법을 제안하고 재밍 효과를 분석하였다. 본 연구는 항공기용 원격지원 재머 설계 및 운용에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

주제어 : 저 피탐, 레이더, 원격지원재밍, 측엽, 재밍 유효 한계거리

Abstract This paper describes the jamming characteristics of a stand-off jammer jamming the LPI radar. The LPI radar reduces the side lobes of the receiving antenna to reduce the effect of jamming. It is easy a radar to predict the effect of jamming on a self-protection jammer where the jammer is in the same position as the target. However, for stand-off jammer jamming at different locations from the target, the prediction of jamming effect is complex. In this paper, the jamming effect of LPI radar is analyzed using signal to jamming ratio and burn-through range. Also, when the antenna's side lobe decreases below -30 dB , the stand-off jamming effect in the side lobe direction is weak. So we proposed a new jamming method for the main lobe and analyzed the jamming effect. This study is expected to be useful for the design and operation of aircraft jammers.

Key Words : LPI(Low Probability Interceptor), Radar, Stand-off Jamming, Side-lobe, Burn-through range

1. 서론

저 피탐(Low Probability Interceptor: LPI) 레이더는 재밍 영향을 줄이기 위해서 펄스압축 신호를 사용하고 안테나의 측엽을 감소시킨다[1-4]. 재머가 표적과 같은 위치에 있는 자체보호(self protection) 재머에 의한 레이더의 재밍 효과는 일반적으로 분석하기가 쉽다.

그러나 원격지원(stand-off) 재머는 표적과 다른 위치에 있고 레이더까지 거리와 방향이 표적과 달라서 재밍 효과를 계산하기가 복잡하다. 본 논문에서는 원격지원 재머의 재밍효과를 신호재밍비(signal to jamming ratio: SJR)와 재밍 유효 한계거리(burn-through range)를 사용하여 분석하였다[5,6].

지금까지 자체보호 재밍에 대한 연구는 많이 수행되

*This study was supported by 2020 Baekseok University Research Fund.

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

였으며 이를 근거로 많은 국가에서 자체보호 재머를 만들어서 사용하고 있다. 그러나 원격지원 재머에 대해서는 미국이나 프랑스 등 일부 국가에서 만 사용하고 있어서 이에 대한 연구가 부족하다.

특히 안테나 기술의 발달로 LPI 레이더 안테나의 성능이 매우 향상되고 측엽이 매우 작아졌다. 따라서 레이더의 측엽을 재밍하는 원격지원 재머는 레이더의 사정거리 후방에 배치해야하므로 재밍 방법과 방향탐지 기술을 더욱 발전시켜야 한다[7-10].

본 논문은 2장에서 레이더를 상대하는 표적(항공기, 함정)의 자체보호 재밍에 대해서 기술하고, 3장에서 레이더의 원격지원 재밍 방법, 4장에서 원격지원 재밍의 재밍 유효 한계거리를 분석하고 재밍 효과를 높이기 위해 안테나 주엽을 재밍하는 새로운 재밍 방법을 제안한다.

2. LPI 레이더에 대한 자체보호 재밍

재머가 레이더를 재밍하는 형태는 재머가 설치된 위치에 따라. 자체 보호용 재머와 원격지원용 재머로 구분한다. 자체보호용은 Fig. 1과 같이 재머가 표적에 탑재되어 재밍을 수행하여 표적을 레이더로부터 보호해주는 형태이다. 그리고 원격지원 재머는 Fig. 2와 같이 표적과 재머가 완전히 떨어진 위치에서 표적을 보호하기 위해서 재밍하는 경우이다.

Fig. 1은 레이더에 대한 표적 탐지 개념도이다. 레이더는 표적에 전파를 발사하여 표적에서 반사되는 신호를 수신하여 표적의 거리와 방향을 탐지한다.

이 경우 레이더 수신기에 입력되는 반사신호의 세기에 따라 표적 탐지거리가 정해진다.

[1]에서 레이더 수신기 입력단에서 수신되는 반사신호의 세기(P_r)를 구하면 다음과 같다[11].

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_T^2} \times \frac{\sigma A_e}{4\pi R_T^2} \quad (1)$$

여기서, P_t 는 레이더 송신기 출력, G_t 는 송신안테나 이득, R_T 는 레이더와 표적 거리, σ 는 표적의 레이더 단면적, A_e 는 안테나 유효면적이다. 또한 레이더의 파장이 λ , 안테나 이득이 G_r 인 경우 안테나 유효면적은 안테나 이득으로 다음과 같이 변환되며, 따라서 표적의 반사신호 세기(P_r)는 식 (3)과 같다.

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R_T)^2} \times \frac{G_r 4\pi \lambda^2}{(4\pi R_T)^2} \quad (3)$$

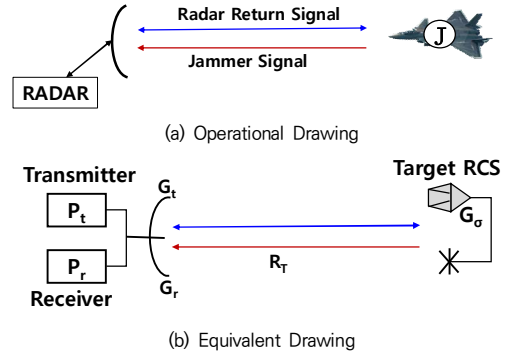


Fig. 1. Operational drawing of LPI radar vs self-protection jammer

Fig. 1에서 레이더에서 R_T 만큼 떨어진 표적에서 자체보호 재밍을 하는 경우 레이더에 수신되는 재밍신호의 크기(P_j)는 식 (3)을 사용하여 구할 수 있다.

$$P_j = \frac{P_j G_j A_e}{4\pi R_T^2} = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2}{(4\pi R_T)^2} \quad (4)$$

여기서, P_j 는 재머 송신기 출력, G_j 는 재머 안테나 이득이다.

레이더에서 수신되는 재밍신호 P_j 와 표적반사신호 P_r 의 크기 비를 jamming to signal(J/S)로 부르며, 레이더의 J/S 비를 식 (3), (4)를 사용하여 구하면 다음과 같다. 일반 레이더에서는 J/S 비가 1보다 작아야 표적 식별이 가능하다.

$$\frac{J}{S} = \frac{P_j}{P_r} = \frac{P_j G_j 4\pi R_T^2}{P_t G_t \sigma} \quad (5)$$

3. LPI 레이더에 대한 원격지원 재밍

원격지원 재밍은 Fig. 2와 같이 재머가 표적과 분리되어서 표적과 다른 거리와 방향에서 레이더를 재밍하는 구조이다. 원격지원 재밍은 재머가 적 레이더로부터

표적(항공기 등)보다 먼 거리 즉, 적 레이더의 유효사정거리 밖에서 재밍하게 된다. 또한 원격지원 재밍은 단일 재머로 다수 레이더를 재밍하기 때문에 일반적으로 레이더의 측엽에 재밍 신호를 송신하게 되므로 재밍 출력이 자체보호용 재밍 출력보다 커야 한다.

Fig. 2에서 레이더 수신기 입력단에서 수신되는 표적의 반사신호 세기(P_r)는 자체보호 재밍과 동일하므로 식 (3)과 같다. 그러나 재밍 신호세기는 재밍거리와 레이더 안테나 이득이 변경되어 식 (4)와 다르다. Fig. 2에서 레이더 안테나 측엽에 수신되는 원격지원 재밍 신호 크기(P_{jst})를 구하면 다음과 같다[11].

$$P_{jst} = \frac{P_j G_j A_{side}}{4\pi R_j^2} = \frac{P_j G_j G_{side} \lambda^2}{(4\pi R_j)^2} \quad (6)$$

여기서, P_j 는 재머 송신기 출력, G_j 는 재머 안테나 이득, R_j 는 원격지원 재머와 레이더 거리, G_{side} 는 레이더의 안테나 측엽이득이다.

따라서 원격지원 재밍의 경우 식 (1)과 (6)을 이용하여 레이더의 측엽안테나로 수신되는 재밍신호와 표적 반사신호의 크기비를 구하면 식 (7)과 같이 유도 된다.

$$\frac{P_{jst}}{P_r} = \frac{4\pi P_j G_j G_{side}}{P_t G_t G_r \sigma} \times \frac{R_T^4}{R_j^2} \quad (7)$$

식 (7)에서와 같이 원격지원 재밍신호 대 반사신호비(J/S)은 레이더에서 표적까지 거리(R_T)의 네제곱에 비례하고, 레이더에서 재머까지 거리(R_j)의 제곱에 반비례한다.

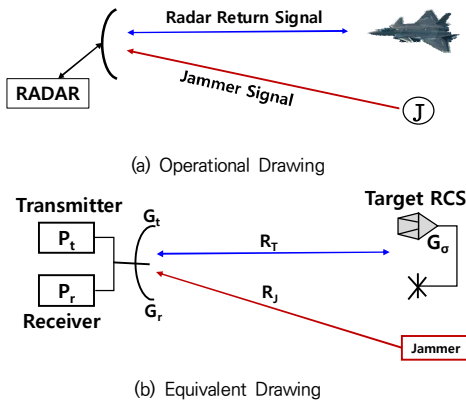


Fig. 2. Operational drawing of LPI radar vs stand-off jammer

Fig. 3은 LPI 레이더의 안테나 빔 패턴이다. 안테나의 보어사이트 이득(G_{main})은 매우 높지만 측엽이득(G_{side})은 매우 낮다. 따라서 동일한 재밍 조건에서 측엽 이득을 10dB 줄이면 수신되는 재밍 출력이 10배 줄어들고 J/S 비도 1/10로 감소된다.

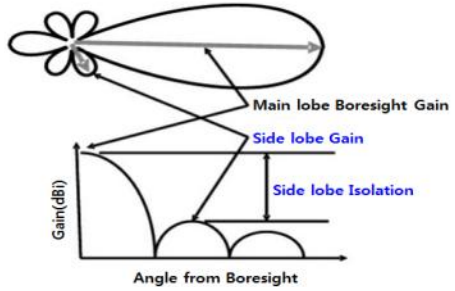


Fig. 3. Mainlobe gain vs. sidelobe Gain of Low Sidelobe Antenna

4. 원격지원 재밍의 재밍 유효 한계거리

레이더가 표적을 획득할 수 있는 거리는 식 (1)의 양방향레이더 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 이 식에서 수신신호(P_r)의 크기가 레이더 수신기의 잡음신호 세기보다 크면 표적을 식별할 수 있다고 판단하며, 수신신호가 수신기 잡음 신호세기와 같을 때의 레이더에서 표적까지 거리(R_T)를 최대 탐지 거리로 계산한다[12,13].

Fig. 1과 Fig. 2와 같이 재밍이 있는 경우에는 레이더의 탐지거리가 매우 줄어든다. 이 경우에는 레이더 수신기의 잡음보다 재밍신호가 훨씬 크기 때문에 표적 반사 신호와 재밍 신호의 크기를 가지고 최대 탐지 거리를 예측한다.

Fig. 4의 상단 그림은 레이더를 향해 비행하는 항공기(표적)와 항공기로부터 떨어진 고정된 위치에서 레이더를 재밍하는 원격지원 재밍의 운용도이며, 하단 그림은 이 때 레이더에 수신되는 표적 반사 신호의 크기와 재밍신호의 크기를 표적까지 거리로 나타내고 있다. 원격지원 재밍에서 R_j 는 일정하고 R_T 만 변하므로 재밍신호의 크기는 표는 표적이 레이더에 가까워지면 급격히 증가하는 +것을 볼 수 있다.

Fig 4. 하단 그림에서 두 신호의 교차점은 두 신호의 크기가 같은 점, 즉 J/S가 1인 점을 나타낸다. 레이더에서 이 교차점까지 영역을 재밍유효 한계거리 (burn-through range)라 부르며 이 영역에서는 J/S

가 1이하가 되어 재밍효과가 없다고 판단한다. 레이다는 재밍 유효 한계거리에서는 표적을 식별할 수 있으므로 재밍 유효 한계거리를 확장하기 위해서 유효복사 출력을 높이고 안테나 축엽을 최소화하는데 많은 노력을 하고 있다. 반대로 재머에서는 재밍 유효 한계거리를 축소하기 위해서 재머의 유효복사출력을 높이고 레이다-재머 거리 R_j 를 줄이는 방법을 모색하고 있다.

최근에 개발되는 LPI 레이다들은 원격지원 재머에 대응하기 위하여 축엽제거(side-lobe cancellation)기능을 구비하거나 저축엽 안테나를 사용하고 있어서 원격지원 재밍의 새로운 운용 방법이 필요하여 본 논문에서는 레이다의 축엽 재밍을 대신하여 주엽에 재밍을 하는 원격지원-주엽재밍 방법을 제시한다[3,14].

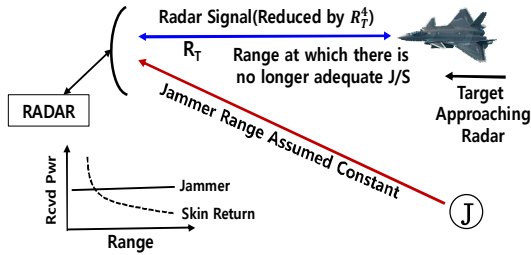


Fig. 4. A radar's burn through range is the range at which it can reacquire a target in the presence of jamming

원격지원-주엽재밍 방법은 Fig. 5와 같이 원격재머가 표적 뒤쪽으로 이동하여 재밍하는 방법이다. 이 경우 레이다가 표적을 추적할 때, 표적과 동일한 방향에 재머가 있어서, 레이다가 주엽으로 표적신호를 수신할 때 원격지원 재밍신호도 동시에 수신되어 재밍신호가 매우 커지게 된다. 이 방법은 여러 대의 레이다를 동시에 재밍하지 못하지만 표적을 추적하는 LPI 레이다를 강력하게 방해할 수 있는 장점이 있다.

원격지원-주엽재밍에서 레이다 수신신호의 크기 (P_{jml})는 식 (6)에서 부엽의 이득(G_{side}) 대신 주엽 이득(G_r)을 대입하여 구할 수 있다.

$$P_{jml} = \frac{P_j G_j A_r}{4\pi R_j^2} = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2}{(4\pi R_j)^2} \quad (8)$$

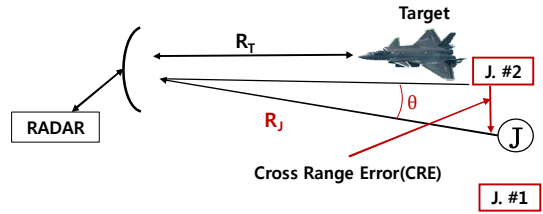


Fig. 5. Operational drawing of modified Stand-off jammer which is located at the same direction to the target[3]

원격지원-주엽 재밍 효과를 분석하기 위하여 레이다의 요소값들이 table 1과 같을 때 원격지원 재머의 축엽 재밍과 주엽 재밍 신호 크기를모의해 보면 Fig 6, 7, 8과 같다[15].

Table 1. The parameters of LPI radar and stand-off jammer for a simulation

Parameters of LPI Radar		Parameters of Stand-off Jammer	
P_t	500kW	P_j	1.0kW
G_t, G_r	30dB	G_j	20dB
G_{sl}	0dB	σ	1m ²
λ	0.1m	R_j	500km
B_r	80kHz	B_j	4MHz
L_r	10dB	L_j	10dB

Fig. 6은 Table 1의 LPI 레이다 축엽 안테나 이득이 0dB인 경우 표적 반사신호와 축엽 재밍 신호를 표시하고 있다. 이 경우 A 점에서부터 표적반사 신호가 재밍 신호 보다 커서 레이다가 표적을 잘 획득하게 된다. 레이다에서 A 점까지 거리를 재밍 유효 한계거리라 부르며 여기에서는 48km 이다.

Fig. 7은 LPI 레이다의 주엽을 재밍하는 경우이다. 안테나 주엽 이득이 30dB이면 재밍 유효 한계거리는 8km가 되고, 재밍 유효 한계거리가 1/6로 축소되는 것을 알 수 있다.

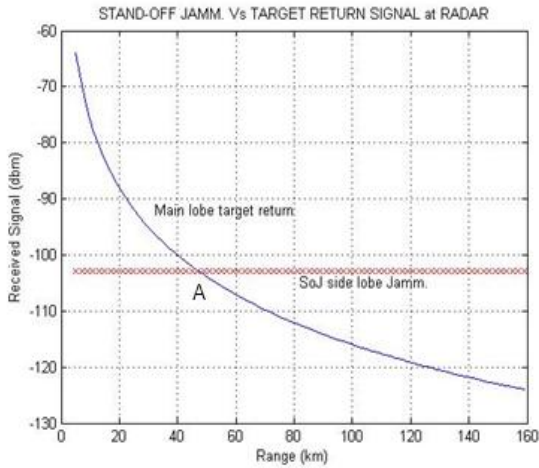


Fig. 6. Received powers of returned radar signal and a Stand-off Jamming signal

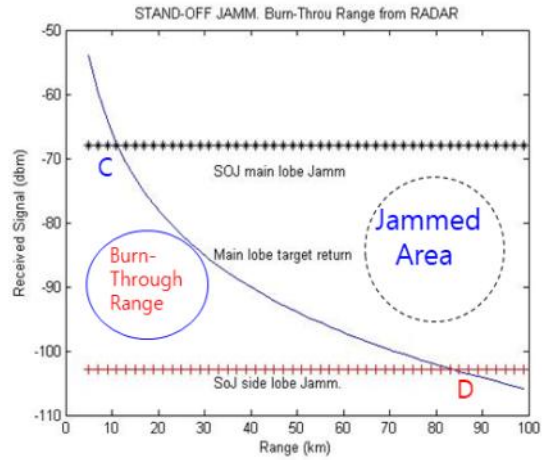


Fig. 8. Burn through range of LPI radar in mainlobe jamming and sidelobe jamming with stand-off jammer[15]

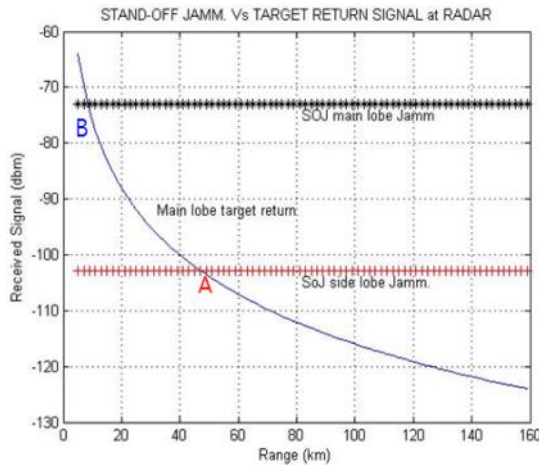


Fig. 7. Received powers of returned radar signal and two Stand-off Jamming signals

Fig. 8은 LPI 레이더의 주엽을 재밍하는 경우 안테나 주엽의 이득 변화에 대한 재밍 유효 한계거리 변화를 분석하였다. 주엽의 이득이 30dB에서 35dB로 변경되면 재밍 유효 한계거리는 측엽 재밍 시에는 85km, 주엽 재밍 시에는 10km로 변경되는 것을 볼 수 있다. 이 경우 주엽 재밍인 경우는 재밍유효 한계거리가 조금 확장된 반면에 측엽재밍인 경우는 매우 크게 확장된 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 저측엽 안테나를 사용하는 LPI 레이더를 재밍하는 원격지원 재머의 재밍 특성에 관한 것으로 안테나의 측엽을 재밍하는 경우와 주엽을 재밍하는 경우에 대해서 재밍신호비(J/S)를 사용한 재밍유효 한계거리를 중점적으로 분석하였다. 특히 이득이 -30dB, -35dB인 저측엽 안테나를 사용하는 레이더는 측엽 재밍시 재밍 유효 한계거리가 48km, 88km로 매우 커져서 레이더에서 48km, 88km 까지는 재밍 효과가 미미하다. 그러나 이 경우 주엽을 재밍 하면 재밍 유효 한계거리가 8 km, 10km로 매우 짧아져서 원격지원재밍 효과가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 경우에는 여러 대의 레이더를 동시에 재밍할 수 없고, 표적 항공기의 방향 경로 변경에 대한 재머의 이동이 동반되어야 하므로 이러한 단점을 보완하는 연구가 필요하다. 본 연구는 원격지원 재머 설계 및 운용에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] D. L. Adamy. (2015). *EW 104 EW against a New Generation of Threats*. Boston : Artech House.
- [2] L. B. van Brunt. (1995). *Applied ECM, volume 3*, EW Engineering, Inc. VA, 762-764.
- [3] D. Adamy. (2019). *Upgrades to Acquisition*

Radars. *The Journal of Electronic Defense*, 42(1), 30-33.

- [4] B. R. Mahafaza. (2005). *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab(2nd Edition)*. Chapman and Hall, 426-456.
- [5] Filippo Neri(2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed.*, Boston : Artech House.
- [6] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*. Boston : Artech House.
- [7] J. S. Lim. (2017). Data Convergence of Circular Array Correlative Interferometer Direction finding with 7 Antennas. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(11), 1-6.
DOI : 10.15207/JKCS.2017.8.1.001
- [8] J. S. Lim & G. S. Chae. (2016). Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude-Phase Comparison and Correlative Interferometer Method. *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, 14(1), 195-201.
DOI : 10.14400/JDC.2016.14.1.195
- [9] 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 : 10.14400/JDC.2016.14.1.195
- [10] 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
- [11] I. K. Lee, D. C. Park, J. S. Lim. (2006). *Radar Engineering and Applications in Electronic Warfare*. Seoul : Daeyoung-Sa.
- [12] D. L. Adamy. (2000). *EW 101 A First Course in Electronic Warfare*. Boston : Artech House.
- [13] D. Curtis Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*. Boston : Artech House.
- [14] D. Adamy. (2019). Escort and Modified Escort Jamming. *The Journal of Electronic Defense*, 42(8), 42-44
- [15] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*. Boston : Artech House.

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 정보통신학부 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 ~ 200년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 ICT학부 교수
- 관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 이론
- E-Mail : gschae@bu.ac.kr