

전투기 레이더를 위한 기만적 전파방해 대응의 설계 및 시험분석

Design and Test Analysis of Countermeasures Against Deceptive Jamming for Fighter Radar

김태형 · 백승열 · 전형원 · 박준현 · 이성원 · 강명일 · 이형수

Tae-Hyung Kim · Seung-Yeol Beak · Hyeong-Won Jeon · June-Hyune Park ·

Sung-Won Lee · Myoung-Il Kang · Hang-Soo Lee

요 약

전투기 레이더가 적 전투기 표적을 추적하는 상황에서 적 전투기가 기만적 전파방해를 수행할 때 기만적 전파방해를 탐지하고 대응하는 방법을 제안한다. 제안한 대응 방법은 비행사가 지정한 추적 표적에 대해 기만적 전파방해 유무 및 기만적 전파방해의 종류를 판단하고 기만적 전파방해를 회피하여 표적 추적을 유지한다. SILS(software-in-the-loop simulation) 기반의 다양한 시험 시나리오 상황에서 시험 및 분석을 통해 제안한 방법의 성능 및 효용성을 확인하였다.

Abstract

We propose a method to detect and counter deceptive jamming when an enemy fighter uses deceptive jamming against radar tracking the enemy fighter target. Our proposed countering method assesses the presence and type of deceptive jamming for the tracking target designated by the pilot, maintaining tracking of the target and preventing deceptive jamming. The performances and effectiveness of our proposed method were verified through testing and analysis in different scenarios based on software-in-the-loop simulation (SILS).

Key words: ECCM, Deceptive Jamming, RGPO/VGPO, Fighter Radar, SILS, FA-50

I. 서 론

적 전투기가 레이더 빔으로 추적당하고 있을 때 적 전투기는 유도탄 등으로부터 자신을 방어하기 위해 기만적 전파방해로 레이더의 추적 빔을 교란하여 표적 추적을 놓치게 한다. 이런 기만적 전파방해에 대응하여 전투기 레이더의 기만재밍대응 모드를 설계하였다. 본 논문에서는 적 전투기의 기만적 전파방해 중에서 거리기만(RGPO, range gate pull-off)과 속도기만(VGPO, velocity gate pull-

off)에 대응하는 방법을 제안하였다. 전투기 레이더가 추적 중인 여러 표적 중에서 비행사가 지정한 표적에 대해 기만적 전파방해 유무 및 기만적 전파방해의 종류를 판단하고 그 결과를 비행사에게 전시, 그리고 기만적 전파방해를 회피하여 지정한 표적의 추적을 유지하도록 기만재밍대응 모드를 설계한다. 추적 중인 모든 표적에 대해 기만재밍대응을 활성화하기 보다는 비행사가(유도탄 유도 등의 목적으로) 특히 중요시하는 관심 표적에만 대응로직을 활성화하여 처리 부하를 줄이고 표적 추적 필터

LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received October 4, 2023 ; Revised October 19, 2023 ; Accepted December 16, 2023. (ID No. 20231004-081)

· Corresponding Author: Tae-Hyung Kim (e-mail: thkim07@gmail.com)

의 기능적 최적화(상황인식을 위한 탐지/추적 및 유도탄 유도를 위한 표적 추적 등의 용도 및 기능별로 최적화)를 용이하게 하였다.

II 장에서는 기만적 전파방해인 RGPO와 VGPO에 대하여 설명한다. III 장에서는 RGPO와 VGPO에 대응하는 기만재밍대응 운용모드 설계 내용을 설명한다. IV 장에서는 제안하는 기만재밍대응 방법을 상세 설명한다. V 장에서는 SILS(software-in-the-loop simulation) 기반의 다양한 시험 시나리오 상황에서 기만재밍대응 시험을 수행하고 그 결과의 분석 및 제안한 방법의 성능 및 효용성을 확인한다.

II. RGPO와 VGPO 등의 기만재밍 동작 특성

기만재밍의 동작은 레이더 빔으로 추적을 당하고 있는 적 전투기가 상대 레이더의 자신에 대한 추적을 놓치도록 기만하는 신호를 발생시켜 상대 레이더가 기만 신호를 추적하게 하여 결국 적 전투기에 대한 추적을 놓치도록 한다. 적 전투기의 기만재밍은 자신에게 지속적으로 방사되는 레이더 추적 빔에 반응하여 DRFM(digital radio frequency memory)과 같은 장비로 기만적 전파방해(재밍) 신호를 발생시킨다^{[1],[2]}. 본 장은 기만재밍 중에서 RGPO, VGPO/I(velocity gate pull-off/in)의 동작 특성에 대해서 기술한다^{[1]~[3]}. 먼저 RGPO는 거리기만 신호를 발생시켜 거리기만을 통해 상대 레이더가 실제 표적을 놓치도록 하는 것으로 상대 레이더가 표적의 측정된 거리 값을 이용하여 표적 추적을 유지할 때 유용하게 동작한다. 그림 1은 레이더 측면에서 표적에 대한 반사파 신호(청색)와 거리 기만신호(적색)의 시간 흐름에 따른(위에서 아래로) 신호의 상대적 크기 및 위치를 나타내었다. 기만 신호가

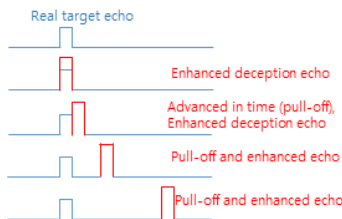
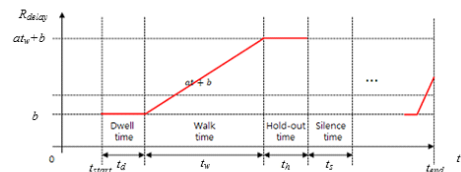
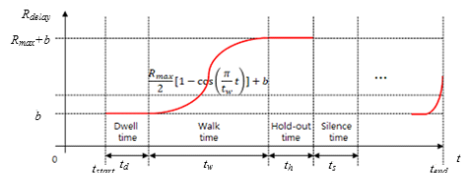


그림 1. RGPO 기만신호의 크기와 행동 특성의 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram of magnitude's and behavioral characteristics of RGPO deceptive signals.

처음에는 표적 거리 위치에 존재하도록 하다가 표적신호보다 기만 신호를 점점 먼 거리에 있게 이동시켜, 표적신호에서 상대적으로 큰 신호인 기만 신호를 쫓아 추적하도록 한다. 결국 추적 필터의 추적 거리 연관을 넘어서 만큼 표적과 기만 신호의 거리를 멀리 떨어뜨려 놓고 유지하다가 기만 신호 발생을 멈추거나 표적이 추적 빔 조향을 벗어나게 하여 표적과 기만 신호에 대한 추적을 모두 놓치게 한다. RGPO의 거리 끌어내기 속도(pull-off rate)가 레이더 추적 필터의 속도 추정치 내에 있도록 해야 한다. 그림 2는 시간에 따른 RGPO의 거리기만 프로파일(profile)의 예들을 나타낸다. 그림 2에서 a 와 b , R_{max} , t_d , t_w , t_h , t_s 등은 거리기만 프로파일 형성에 관여하는 파라메타들이다. R_{delay} 는 표적신호의 거리 대비 기만신호가 거리 지연되는 거리를 나타내며, 드웰 시간(t_d , Dwell time)은 기만재밍이 레이더의 추적 빔의 신호를 확인하고 분석하여 재밍을 준비하는 기간이며, 끌어내기 시간(t_w , walk time)은 기만재밍이 기만신호의 거리를 표적에서부터 바깥으로 점점 끌어내어 기만하는 기간이고, 유지 기간(t_h , hold time)은 거리기만의 끌어내는 거리를 유지하여 레이더가 기만신호에 추적을 유지하도록 하는 기간이다. 유지 기간 이후 기만재밍을 중지하고 기간(t_s , silence time)을 가진 후, 다시 같은 기만재밍 프로파일을 반복한



(a) 선 형태
(a) Linear type



(b) 코사인 형태
(b) Cosine type

그림 2. RGPO 거리기만 프로파일들
Fig. 2. RGPO range deception profiles.

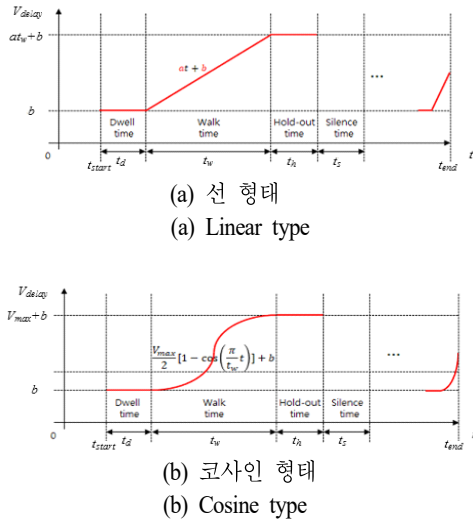


그림 3. VGPO 속도기만 프로파일들
Fig. 3. VGPO velocity deception profiles.

다. VGPO는 속도기만 신호를 발생시켜 속도기만을 통해 상대 레이다가 실제 표적을 놓치도록 하는 것으로 상대 레이다가 표적의 측정된 도플러 속도 값을 이용하여 표적 추적을 유지할 때 유용하게 동작한다. VGPO/I는 기본적으로 추적 필터의 표적 측정 속도 기반의 연관에 대해 기만한다는 것을 제외하고는 RGPO와 동일한 방식으로 동작하며, 기만신호의 속도를 표적 대비 끌어내거나 (pull-off) 끌어당겨서(pull-in) 기만한다. 그림 3은 시간에 따른 VGPO의 속도기만 프로파일(profile)의 예를 나타낸다. 그림 3에는 그림 2에서처럼 속도기만 프로파일 형성에 관여하는 파라메타들이 나타나 있으며, V_{delay} 는 표적신호의 도플러 속도 대비 기만신호의 도플러 속도가 지연되는(pull-off) 속도의 양을 나타낸다. 기만신호는 실제 표적의 반사와 신호와 같은 방향에서 수신되기 때문에, 기만신호의 측정치를 활용하여 표적의 방위각/고각 측정치의 정확도를 증가시키는 데 사용할 수도 있다.

III. 기만재밍대응 운용모드 설계

이 장에서는 기만재밍대응을 위한 모드 설계 내용을 제시한다. 기만재밍대응의 동작은 공대공 추적 표적에 대해 이루어지며, 모든 공대공 추적 표적에 대해서 동작하는 것은 아니라 비행사가 지정한 표적 또는 특정 표적에

대해서만 동작하도록 한다. 이것은 중요 표적에만 기만재밍대응 로직을 활성화하여 처리 부하를 줄이고 모드별로 최적화된 추적 필터를 구성하여 추적 성능 최적화를 이루기 위함이다. 기만재밍대응 모드로의 진입은 MFD (multi-function display)에 전시된 표적들 중에서 비행사가 중요표적 또는 관심표적으로 지정하면 자동 진입한다. 또는 단일 표적 추적 모드로 진입하면 자동으로 기만재밍대응 로직이 활성화된다. 지정 표적에 대한 기만재밍대응에 요구하는 기본 기능은 ①기만재밍 존재 및 종류 탐지, ②기만재밍 존재 여부 및 종류를 MFD에 전시, ③기만재밍 추적 관리와 지정 표적 추적 유지이다. 그림 4는 지정 표적에 대해 기만재밍 존재와 종류를 탐지한 결과를 MFD에 전시한 예를 보인다. 그림 4는 기만재밍 RGPO를 탐지한 경우의 예를 보인 것으로 기만재밍으로 탐지된 지정 표적에 대해 적색 표적 심볼(symbol) 및 적색 원을 둘러싼 표적 심볼로 표현하였고 표적 심볼 아래에 적색 표적번호 및 영문자 ‘S’(‘10IS’)와 기만재밍 종류인 RGPO(‘RGPO’)를 표기하였다. 레이다는 지정 표적에 대해 기만재밍이 있더라도 표적 추적을 유지하여야 하며, 지정 표적에 대해 MFD에 기만재밍 존재 유무와 종류를 전시하여야 한다. 지정 표적에 대한 기만재밍대응 모드에서 기

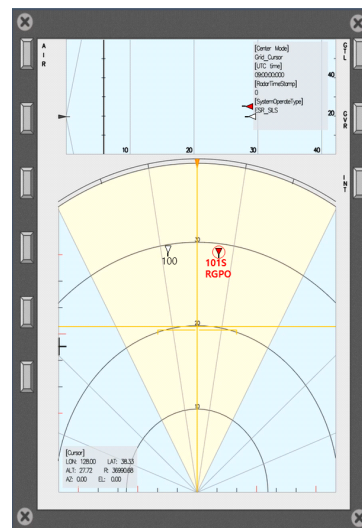


그림 4. 지정 표적에 대한 기만재밍 전시 예
Fig. 4. An examples of deceptive jammer display for a designated target.

만재밍대응 동작(표적 추적을 위한 데이터처리기의 동작)에 대한 설계는 다음과 같다. ①지정 표적에 대한 추적 빔에서 다수의 표적 플롯(plot)이 탐지되면 표적 예상 거리/속도 위치를 기준으로 게이트(gate)를 설정하여 게이트 내의 플롯만 표적에 대한 유효 플롯으로 간주한다. ② n 번 이상의 추적 빔 운용을 통해 획득한 유효 플롯들을 이용하여 기만재머 존재 유무를 판단한다. ③기만재머 상황으로 판단되지 않으면 일반적인 플롯에 대한 추적 연관 및 다음 추적 빔 요구를 하면서 ① 및 ②, ③의 과정을 반복한다. ④기만재머 상황으로 판단되면 n 번 이상의 추적 빔 운용을 통해 획득한 유효 플롯들을 표적 플롯과 재머 플롯으로 분류하고, 표적 플롯은 표적 추적을 위한 추적 필터 갱신에 사용하고 재머 플롯은 재머 추적 관리를 위한 재머 필터 생성 및 갱신에 사용한다. ⑤ 기만재머 상황에서 재머 필터가 생성되었으면 재머 플롯 및 재머 필터, 추적 필터 등의 정보를 이용하여 기만재머의 종류를 판단한다. 기만재머의 종류 판단이 완료되면 MFD에 기만재머와 기만재머 종류를 표기 하도록 요구한다. ⑥ 표적 플롯에 대한 표적 추적 필터의 예측 결과를 기반하여 다음 추적 빔의 요구를 생성한다. ⑦, ① 및 ④, ⑤, ⑥의 과정을 반복하면서 표적 추적을 유지하고 재머 플롯을 추적 관리한다. 재머가 사라지면 재머 플롯 추적 관리는 사라지고 실제 표적 추적은 유지되게 된다.

IV. 데이터처리기 기반 기만재밍대응법 설계

기만재머 존재 유무 판단과 기만재머 종류의 분류 그리고 표적과 기만재머의 플롯을 분리하여 추적 관리하는 본 논문의 기만재머 대응법의 기본 흐름은 참고문서 [3]과 참고문헌 [4]의 기존 연구에도 유사하게 나타난다. 기존 연구와 다르게 구별되는 것은 첫째로 기만재머 존재 유무 판단에서 기존 연구^{[3],[4]}에서와 같이 표적의 전력 정보를 이용하는 것 외에 표적 플롯의 거리 및 도플러 정보를 이용하는 것이 추가되어 보다 안정적인 판단을 할 수 있도록 한 것이다. 또한 표적 전력 정보를 이용하는 세부적인 방법에서도 안정적 판단을 위해 연속적으로 기만재머 신호 전력이 존재하는 지를 검사한다는 점 등이 구별된다. 둘째로 기존 연구처럼 플롯의 거리 변화율과 도플

러 측정치를 이용하여 기만재머 종류 분류와 표적 및 재머 플롯을 분리 추적 관리를 한다는 개념은 같지만 실제 구체적인 방법은 새로운 것이며, 전투기 레이더에 적용성을 고려하여 설계 내용을 기술하였고 기만신호에 관련한 오탐지 및 오판단 확률 분석 등을 포함한다.

이 장에서는 기만적 전파방해 유무 및 기만적 전파방해의 종류를 판단하고 기만적 전파방해를 회피하여 지정된 표적의 추적을 유지하는 기만재밍대응의 제안 방법을 표적 탐지 플롯들을 처리하는 데이터처리기 관점에서 상세 설명한다. 지정 표적에 대해 데이터처리기는 먼저 기만재머 존재 유무 및 종류를 판단하는 작업을 한다. 기만재머 존재 유무의 판단은 다음의 2가지 방법을 이용하여 2가지 방법 중에서 하나에서만 기만재머로 판단되어도 기만재머가 존재하는 것으로 판단한다. 첫 번째 방법은 표적 SNR(signal to noise ratio)의 변화를 이용하는 방법이며 식 (1)의 조건식으로 판단한다.

$$\left((P_+ - P_-) > S_{th} \right) \text{ and } \left(\left(\prod_{i=1}^n (p_i < P) \right) \left(\prod_{i=n+1}^{2n} (p_i > P) \right) \right),$$

here $p_i = 10 \log_{10}(SNR_i)$,

$$P_+ = \frac{1}{n} \sum_{i=n+1}^{2n} p_i, P_- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i, P = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} p_i. \quad (1)$$

식 (1)에서 S_{th} 는 표적 SNR 변화량 판단을 위한 문턱값, n 은 지정 표적에 대한 n 번의 추적 빔 운용에서 n 개의 추적 표적 플롯(추적 필터의 예측치와 연관되어 획득한 플롯)들의 획득을 의미하며, SNR_i 는 n 번의 추적 표적 플롯 획득에서 i 번째 획득한 플롯의 표적 SNR을 나타낸다. 식 (1)의 조건이 참을 만족하면 기만재머가 존재하는 것으로 판단한다. 식 (1)의 판단은 기만신호를 발생할 때 원래 표적 신호보다 큰 전력의 기만신호를 발생시킨다는 사실을 이용한 것이며, 슬라이딩 윈도우의 평균 및 윈도우의 좌/우 평균값으로 표적 SNR의 변화를 안정적으로 판단한다. 또한 표적 신호 크기 대비 일정한 문턱 값(S_{th}) 이상의 크기의 기만신호가 지속적으로 들어오느냐로 판단한다. 표적 요동에 의한 표적 반사파 신호 크기 요동이 유발하는 기만신호 오탐지의 확률과 S_{th} 의 설정 값과의 관계를 분석하기 위하여, 식 (1)에서 $S_{th}=10\log(A_{th})$ 로 표현하고 $n=1$ 로 가정하면 $((P_+ - P_-) > S_{th})$ 를 $10\log_{10}(SNR_{jam}) >$

$10\log_{10}(A_{th} SNR_{Jam})$ 로 표현할 수 있다. 여기서 SNR_{Jam} 은 기만신호의 SNR이며 SNR_{Tgt} 는 표적 신호의 SNR이다. 그러면 $n=1$ 일 때 기만신호 오탐지 확률 P_{fa} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다^[5].

$$P_{fa} = \int_{\sqrt{2A_{th}SNR_{Tgt}\nu_n}}^{\infty} f(r)dr \quad (2)$$

여기서 ν_n 은 잡음 전력, $f(r)$ 는 표적신호의 확률밀도함수이며 r 은 표적 신호 크기 샘플을 나타낸다. 표적의 요동 상황 모델 1과 3(swerling case 1 and 3)을 사용하면 식 (2)의 P_{fa} 는 다음 식과 같이 계산된다^[5].

$$\begin{aligned} P_{fa_{swerling1}} &= \exp\left[\frac{-A_{th}SNR_{Tgt}}{1+SNR_{Tgt}}\right], \\ P_{fa_{swerling3}} &= \exp\left[\frac{-A_{th}SNR_{Tgt}}{1+SNR_{Tgt}/2}\right] \left(1 + \frac{2}{SNR_{Tgt}}\right)^{-1} \times \\ &\quad \left(1 + \frac{A_{th}SNR_{Tgt}}{1+SNR_{Tgt}/2} + \frac{2}{SNR_{Tgt}}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $P_{fa_{swerling1}}$ 과 $P_{fa_{swerling3}}$ 은 각각 표적이 요동 상황 모델 1 및 2를 따르는 경우에 기만신호 오탐지 확률이다. 연속한 n 번의 SNR 값 변화가 서로 독립이라고 가정하면 기만신호 연속성을 위한 $\left(\left(\prod_{i=1}^n (p_i < P)\right)\left(\prod_{i=n+1}^{2n} (p_i > P)\right)\right)$ 의 조건을 포함하는 식 (1)에 의해 $n \neq 1$ 일 때 기만신호 오탐지 확률 $P_{fa}(n) = (P_{fa}(1))^n$ 이다. 여기서 $P_{fa}(1)$ 은 $n=1$ 일 때 기만신호 오탐지 확률이다. 표적 SNR이 15dB이고 S_{th} 가 10 dB인 경우에 식 (3)에 의해 $P_{fa_{swerling1}}(1)$ 은 6.17×10^{-5} 의 값을 가지며 $P_{fa_{swerling3}}(1)$ 은 1.27×10^{-7} 의 값을 가진다. 표적 SNR과 n 의 값이 커질수록 $P_{fa}(n)$ 이 값은 작아진다. 기만재머 존재 유무 판단의 두 번째 방법은 표적 플롯의 거리 변화율과 도플러 추정치를 이용하는 방법이며, 추적 빔을 운용하면서 획득한 추적 표적 플롯들에 대해 식 (4)의 조건식이 참이 되는 플롯이 나타나는 횟수를 세어서(count) 3번 이상 나타나면 기만재머가 존재하는 것으로 판단한다.

$$|V_r - V_d| > V_{th} \quad (4)$$

여기서 V_r 은 연속 추적 표적 플롯들의 거리 측정치의 시간에 따른 변화율(range rate), V_d 는 추적 표적 플롯의

도플러 측정치, V_{th} 는 기만재머 판단을 위한 미리 정한 문턱 값이다. 식 (4)와 관련하여 오탐지 확률을 분석하기 위하여 거리 측정 오차의 표준편차를 σ_r , 도플러 측정 오차의 표준편차를 σ_d 라 정의하자. 이제 $|V_r - V_d|$ 의 표준편차는 $\sigma_{VT} = \sqrt{2\sigma_r^2/T^2 + \sigma_d^2}$ 가 된다. 여기서 T 는 연속 추적 표적 플롯 사이의 시간으로서 추적주기를 나타낸다. 그러면 V_{th} 를 $3\sigma_{VT} + |V_{offset1}|$ 로 설정하게 되면 0.003의 오탐지 확률을 가지게 되고 $6\sigma_{VT} + |V_{offset1}|$ 로 설정하면 2×10^{-9} 의 오탐지 확률을 가지게 된다. 여기서 $V_{offset1}$ 은 도플러 측정 오차의 평균을 나타낸다(본 논문에서는 거리 및 도플러 측정 오차와 추정 오차는 가우시안 분포를 가진다고 가정한다). 지속적인 추적 빔을 운용하면서 식 (4)를 만족하는 추적 표적 플롯이 나타나는 횟수를 계산할 때 식 (4)를 만족하지 않는 횟수가 연속 3번 나오면, 식 (4)를 만족하는 플롯이 나타난 횟수를 0으로 재설정하고 다시 식 (4)를 만족하는 추적 표적 플롯이 나타나는 횟수 계산을 수행하여 기만재머 존재 여부를 판단한다. 참고로 식 (4)를 만족하는 플롯은 추적 필터를 갱신하는 데에 사용하지 않고 재머 플롯으로 가정하여 저장해 두며 (식 (4)를 만족하는 플롯이 나타난 횟수를 0으로 재설정하게 되면 재머 플롯으로 가정한 플롯 저장 개수도 0으로 재설정), 유효 플롯(추적 필터의 표적 예상 거리/속도 위치 기준의 게이트 내의 플롯) 내에서 식 (4)를 만족하지 않는 표적 예상 거리/속도와 가장 근접한 플롯을 이용하여 추적 필터를 갱신한다. 2가지 방법을 이용한 기만재머 존재 여부 판단은 기만재머가 존재하는 것으로 판단될 때까지 계속하며 기만재머가 존재하는 것으로 판단되면 중지된다. 기만재머 존재 여부 판단의 두 번째 방법은 RGPO나 VGPO는 거리 또는 도플러 중에 한 가지만을 기만하여 기만신호를 발생시키기 때문에 표적의 거리 변화율과 도플러 측정치가 불일치하게 되는 현상을 이용한 것이다. 그리고 첫 번째 방법은 재머신호 발생 전에 표적을 지정하여야 기만재머 존재 유무 판단이 효과적으로 이루어진다. 두 번째 방법은 재머신호 발생 후에 표적을 지정해도 기만재머 존재 유무를 판단할 수 있게 한다.

다음 과정으로 지정 표적에 대해 기만재머가 존재하는 것으로 판단되면 기만재머 존재 유무 판단 과정에서 재머 플롯으로 가정하여 저장해둔 플롯들을 재머 플롯으로

확정한다. 또한 추적 빔 운용을 통해 획득한 유효 플롯(추적 필터의 표적 예상 거리/속도 위치 기준의 게이트 내의 플롯)들에서 표적 플롯과 재머 플롯을 찾아서 구분하고 추적 관리를 시작한다. 표적 플롯은 표적 추적을 위한 추적 필터 갱신에 사용하고 재머 플롯은 재머 추적 관리를 위한 재머 필터 생성 및 갱신에 사용한다. 재머 필터는 재머 플롯의 거리에 대해 등속도 운동 모델을 적용하여 구현한 거리 추적 필터이다^[6]. 표적 플롯과 재머 플롯으로의 구분은 다음과 같이 한다. 만약 표적 추적 필터의 플롯 연관 게이트 내에 1개 이상의 플롯이 존재할 때, 재머 필터의 예측 거리와 연관되고 식 (4)를 만족하는 플롯은 재머 플롯으로 구분하고 추적 필터의 예측치와 연관되고 식 (4)를 만족하지 않는 플롯은 표적 플롯으로 구분한다. 여기의 식 (4)의 적용에 있어서 식 (4)의 V_r 은 재머 또는 표적 플롯들의 거리 측정치의 시간에 따른 변화율, V_d 는 재머 또는 표적 플롯의 도플러 측정치를 나타낸다. 만약 추적 필터의 예측치와도 연관되고 재머 필터의 예측 거리와도 연관되면서 식 (4)를 만족하지 않는 플롯들이 2개 이상 존재하면 표적 신호 크기가 가장 큰 플롯은 재머 플롯으로 두 번째로 큰 신호 크기의 플롯은 표적 플롯으로 구분한다.

다음 과정으로 기만재머 상황에서 재머 필터가 생성되었으면 기만재머의 종류를 판단한다. 먼저 재머 필터에서 구한 재머 거리 값(R_j)과 표적 추적 필터에서 구한 표적 거리 값(R_t)과의 차이 값이 미리 정한 문턱 값(R_{th})을 넘어가는지 식 (5)과 같이 검사한다.

$$|R_j - R_t| > R_{th} \quad (5)$$

만약 식 (5)을 만족하면 RGPO 기만재머로 판단한다. 식 (5)와 관련하여 RGPO로 오판단할 확률을 분석하기 위해 재머 필터의 거리 추정 오차의 표준편차를 σ_j 로, 표적 추적 필터의 거리 추정 오차의 표준편차를 σ_t 로 정의하면, $|R_j - R_t|$ 의 표준편차는 $\sigma_R = \sigma_j + \sigma_t$ 가 된다. 그러면 R_{th} 를 $3\sigma_R + |R_{offset}|$ 로 설정하게 되면 0.003의 오탐지 확률을 가지고 되고 $6\sigma_R + |R_{offset}|$ 로 설정하면 2×10^{-9} 의 오탐지 확률을 가지게 된다. 여기서 $R_{offset} = e_{m_{Rj}} - e_{m_{Rt}}$ 이며 $e_{m_{Rj}}$ 는 재머 필터의 거리 추정 오차의 평균, $e_{m_{Rt}}$ 는 표적 추적 필터의 거리 추정 오차의 평균이다. 그리고 만약 식 (5)

를 만족하지 않으면, 재머 필터에서 구한 재머 거리 변화율(V_j)과 재머 플롯의 도플러 측정치(V_d)와의 차이 값이 미리 정한 문턱 값(V_{th})을 넘어가는 지를 식 (6)과 같이 검사한다.

$$|V_j - V_d| > V_{th} \quad (6)$$

만약 식 (6)을 만족하면 VGPO 기만재머로 판단한다. 식 (6)과 관련하여 VGPO로 오판단할 확률을 분석하기 위해 재머 필터의 거리 변화율 추정 오차의 표준편차를 σ_{jv} 로 정의하면, $|V_j - V_d|$ 의 표준편차는 $\sigma_V = \sigma_{jv} + \sigma_d$ 가 된다. 그러면 V_{th} 를 $3\sigma_V + |V_{offset2}|$ 로 설정하게 되면 0.003의 오탐지 확률을 가지고 되고 $6\sigma_V + |V_{offset2}|$ 로 설정하면 2×10^{-9} 의 오탐지 확률을 가지게 된다. 여기서 재머 필터의 거리 변화율 추정 오차의 평균을 $e_{m_{Vj}}$ 이라고 하면 $V_{offset2} = e_{m_{Vj}} - V_{offset1}$ 이다. 그리고 만약 식 (6)을 만족하지 않으면, 판단을 보류하고 다음 추적 주기에 들어오는 플롯을 이용하여 다시 판단한다. 기만재머종류 판단이 완료되면 MFD에 기만재머와 기만재머 종류를 표기하도록 요구한다. 기만재머 종류 판단은 판단이 완료될 때까지 계속하며 기만재머 종류 판단이 완료되면 기만재머종류 판단 과정은 중지된다.

다음 과정으로 표적 플롯에 대한 표적 추적 필터의 예측 결과를 기반으로 다음 추적 빔의 요구를 생성한다. 그리고 탐지되어 들어오는 플롯들에 대해 기만재머 탐지 및 표적 플롯과 재머 플롯으로의 분류를 행하고 추적 필터와 재머 필터의 갱신 등을 행하는 과정을 반복하면서 표적 추적을 유지하고 재머 플롯을 추적 관리한다.

지속적인 추적 빔을 운용하고 앞에서 설명한 과정들을 반복하면서 기만재머에 대한 재머 필터와 실제 표적에 대한 추적 필터를 통한 동시 관리로 기만재머의 추적 관리와 실제 표적의 추적 유지가 이루어지며, 기만재머가 사라지면 재머 플롯 추적 관리는 사라지고 실제 표적 추적은 유지하게 된다.

V. 시험 및 분석

본 장에서는 제안한 방법의 성능과 효용성을 확인하기 위하여 전투기 레이더의 SILS^[7] 기반으로 기만재머대응

시험을 수행하고 그 결과를 분석한다. 시험에 사용한 SILS 장비는 참고문서 [7]에서 구현한 장비를 이용하였다 (RGPO/VGPO 재밍신호 생성 기능을 보유하고 있다).

5-1 시험 구성 및 시험 시나리오

그림 5는 시험 구성도를 나타낸다^[7]. 그림 5에서 항전 장비 모의기가 레이더에게 명령을 내리면 레이더 처리기는 레이더 제어 명령을 생성하고 그 명령에 따라 레이더 환경신호 모의기가 레이더 모의 신호를 출력한다. 레이더 처리기는 레이더 모의 신호를 처리하여 그 결과를(표적 탐지/추적 결과) 항전장비 모의기를 통해 전시한다. 본 시험에서 사용하는 레이더 처리기는 표적 탐색을 위한 탐색 빔 외에도 한 표적에 대해 주기적인 별도의 추적 빔을 능동적으로 조사하여 추적하는 능동 추적 기능을 행하며, 기만재머는 이 능동 추적 빔에 대해 반응하여 기만신호를 생성하게 된다. 본 시험은 이 능동 표적 추적에서 기만 재밍에 대응하여 기만재밍 파악 및 표적 추적을 유지하는 기능의 성능과 효용성을 확인하는 시험이다. 시험을 위해 사용한 플랫폼과 표적의 기동 시나리오는 3가지이며 그림 6과 같다. 그림 6에서 플랫폼과 표적의 진행 궤적과 방향을 점선 화살표로 표시하였고 표적에 대해서는 발생하는 기만신호의 종류를 표적 심벌(symbol) 옆에 표시하였다. 그림 6의 시나리오에서 플랫폼과 표적들의 고도는 9,000 m, 플랫폼과 표적들의 속도는 진행 방향으로 300 m/s로 하였다. 표 1은 시험에 사용한 RGPO 및 VGPO의 기만신호 생성을 기만 프로파일의 파라메타를 나타낸

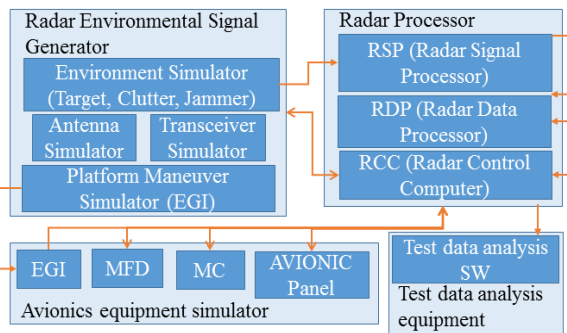


그림 5. 시험 구성도

Fig. 5. Test configuration diagram.

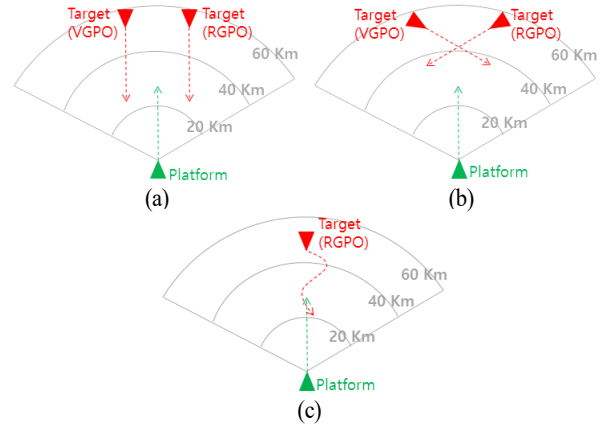


그림 6. 시험 시나리오, (a) 기동 시나리오 1, (b) 기동 시나리오 2, (c) 기동 시나리오 3

Fig. 6. Test scenarios, (a) maneuver scenario 1, (b) maneuver scenario 2, (c) maneuver scenario 3.

표 1. 기만 프로파일의 파라메타

Table 1. Parameters for the deception profile.

Type	JSR	a	R_{\max} or V_{\max}	b	t_d	t_w	t_h	t_s
RGPO linear	10 dB	75	—	0	3s	10s	3s	1s
RGPO cosine	10 dB	—	$R_{\max}=750$ m	0	3s	10s	3s	1s
VGPO linear	10 dB	75	—	0	3s	10s	3s	1s
VGPO cosine	10 dB	—	$V_{\max}=75$ m/s	0	3s	10s	3s	1s

다. 표 1에 파라메타 항목들은 그림 2 및 그림 3에서 보인 기만재머 형태별 기만 프로파일들의 파라메타 항목들이다. 그리고 JSR은 표적 신호 대 기만 신호의 전력비(jamming to signal ratio)이다. 본 시험 구성의 레이더 처리기에서는 표적 지정 기능으로 표적을 지정하면 능동 추적 표적에 대해 재머대응 기능을 활성화하고 표적을 지정하지 않으면 재머대응 기능을 활성화하지 않는다. 그림 6의 시나리오들 각각에 대해 재머대응기능을 활성화한 경우와 활성화하지 않은 경우를 시험하여 비교하였다. 참고로 시험에서 표적 지정 및 재머대응 기능 활성화는 능동 추적이 안정화된 이후에 이루어졌다. 그리고 본 시험 구성의 레이더 처리기는 표적의 탐지 각도와 거리 정보를 이용하여 추적 필터를 운용하기 때문에 VGPO 기만 재머에 의해 기만 당할 위험이 없고 RGPO 기만재머에 대해 기만 당할 위험이 존재한다.

5-2 시험 결과 및 분석

그림 7은 그림 6(a)의 시나리오와 표 1의 코사인형의 거리기만(RGPO cosine) 및 속도기만(VGPO cosine) 프로파일을 사용하여 시험한 결과를 그림 5의 시험 구성도에서 시험데이터 분석장비의 시험데이터 분석소프트웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 7의 좌측 그림에서 적색 사각 점의 심볼은 표적 추적 필터의 표적의 위치 출력 값을 지도 위에 나타낸 것이다. 그리고 흑색 사각 점의 심볼은 표적 추적 필터의 메모리 추적에^[6] 의한 표적의 위치 출력 값을 지도위에 나타낸 것이다. 그림 7의 우측 그림에서 적색 및 흑색 사각 점을 적색 원으로 둘러싼 심볼은 지정된 표적에 대한 추적 필터의 표적의 위치 출력 값을 지도 위에 나타낸 것이다. 즉, 그림 7의 좌측 그림은 재밍 대응 기능을 활성화하지 않은 상태에서 RGPO 및 VGPO 기만재밍을 하고 있는 표적을 추적한 결과를 보인 것이며, 우측 그림은 표적 지정을 하여 재밍 대응 기능을 활성화하여 RGPO 및 VGPO 기만재밍을 하고 있는 표적을 추적한 결과를 보인 것이다. 그림 7에서 재밍 대응을 활성화하지 않으니 RGPO 기만 재머에 의해 표적 추적을 지속적으로 못하고 표적을 놓치는 것을 확인할 수 있다. 그림 7의 좌측 그림에서 표적 추적을 놓치는 위치를 점선의 원으로 표시하였고 시험에서 4번을 RGPO 기만재밍에 기만당하여 표적을 놓치는 것을 확인할 수 있다(표적 추적을 놓치고 표적을 다시 탐지하여 추적을 시작하기를 반복함). 참고로 그림 5의 시험 구성도에서 사용한 레이더 처리기는 거리 정보를 이용하여 추적 필터를 운용하기 때문에 VGPO 기만 재머에 의해서는 재밍 대응

기능이 활성화되지 않더라도 기만당하지 않는 시험 결과를 볼 수 있다. 그림 7의 우측 그림에서 확인할 수 있듯이 재밍 대응 기능을 활성화하니 기만재밍에 기만당하지 않고 시나리오의 끝까지 표적 추적을 유지하였다. 그림 7의 우측 그림의 결과에서 제안한 방법이 기만재머 존재 유무를 탐지하고 기만재머에 효율적으로 대응하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 7 및 다른 결과 그림들에는 나타내지 못했지만 기만재머의 종류를 판단하는 기능도 기만재머 종류를 표시하는 출력에 대한 시험결과를 통해 기만재머의 존재를 성공적으로 탐지하기만 하면 항상 바른 판단을 함을 확인하여 성능을 확인할 수 있었다. 그림 8은 그림 6(a)의 시나리오와 표 1의 선형의 거리기만(RGPO linear) 및 속도기만(VGPO linear) 프로파일을 사용하여 시험한 결과를 시험데이터 분석소프트웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 8은 그림 7과 동일한 방법으로 심볼 및 결과들을 표기하였고, 그림 7과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 즉 선형의 거리기만 및 속도기만에도 제안한 방법이 효과적으로 동작함을 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 6(b)의 시나리오와 표 1의 코사인형의 거리기만 및 속도기만 프로파일을 사용하여 시험한 결과를 시험데이터 분석소프트웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 9는 그림 7과 동일한 방법으로 심볼 및 결과들을 표기하였고, 그림 7 및 그림 8과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 코사인형의 거리기만 및 속도기만 상황에서 X자형 기동의 두 표적이 교차하는 지점에서도 제안한 방법이 효과적으로 동작하여 표적 추적을 잘 유지함을 확인할 수 있다. 그림 10은 그림 6(b)의 시나리오와 표 1의 선형의 거리기만 및 속도기만 프로파일을 사용하여 시험

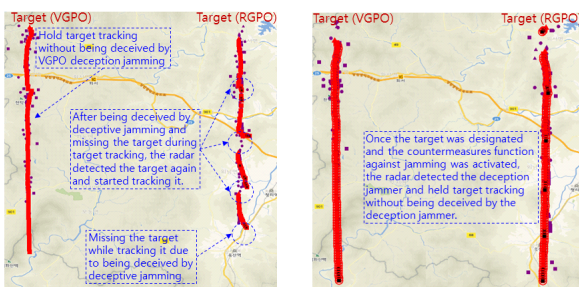


그림 7. 기동 시나리오 1에 대한 시험 결과들 1
Fig. 7. Test results 1 for maneuver scenario 1.

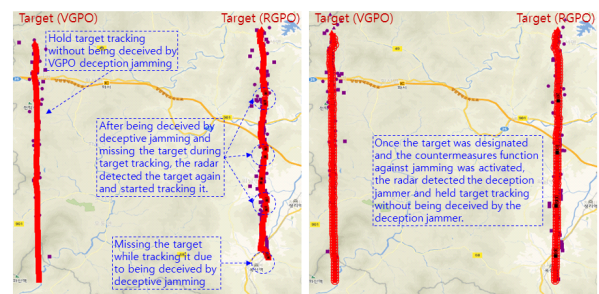


그림 8. 기동 시나리오 1에 대한 시험 결과들 2
Fig. 8. Test results 2 for maneuver scenario 1.

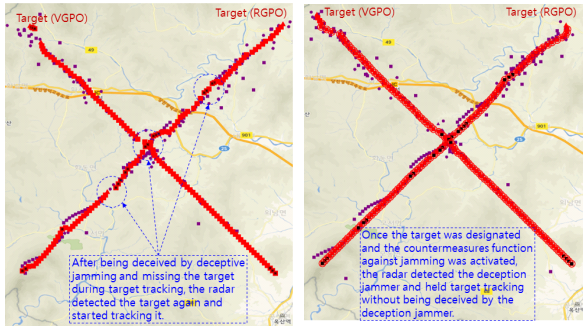


그림 9. 기동 시나리오 2에 대한 시험 결과들 1
Fig. 9. Test results 1 for maneuver scenario 2.

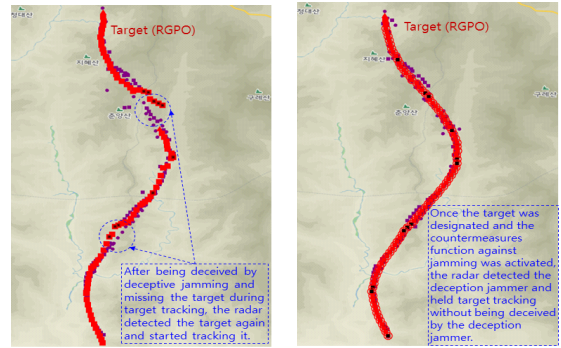


그림 11. 기동 시나리오 3에 대한 시험 결과들 1
Fig. 11. Test results 1 for maneuver scenario 3.

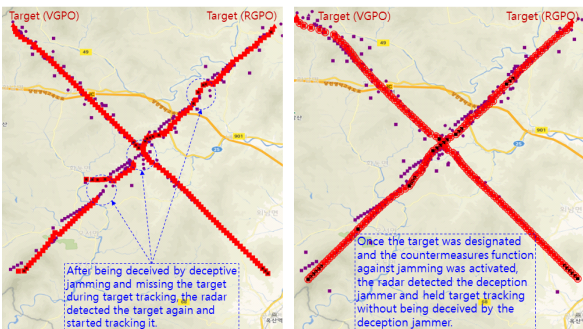


그림 10. 기동 시나리오 2에 대한 시험 결과들 2
Fig. 10. Test results 2 for maneuver scenario 2.

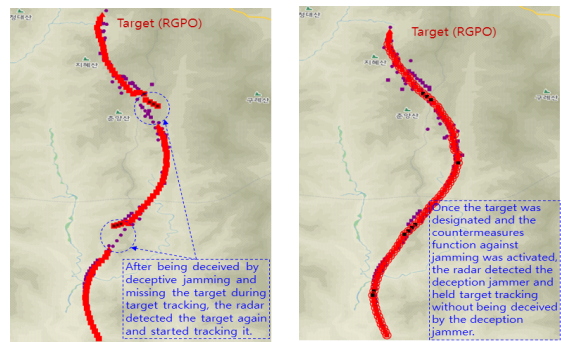


그림 12. 기동 시나리오 3에 대한 시험 결과들 2
Fig. 12. Test results 2 for maneuver scenario 3.

한 결과를 시험데이터 분석소프트웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 10은 그림 7과 동일한 방법으로 심볼 및 결과들을 표기하였고, 그림 7~그림 9와 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 선형의 거리기만 및 속도기만 상황에서 X자형 기동의 두 표적이 교차하는 지점에서도 제안한 방법이 효과적으로 동작하여 표적 추적을 잘 유지함을 확인할 수 있다. 그림 11은 그림 6(c)의 시나리오와 표 1의 코사인형의 거리기만 프로파일을 사용하여 시험한 결과를 시험데이터 분석소프트웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 11은 그림 7과 동일한 방법으로 심볼 및 결과들을 표기하였고, 그림 7~그림 10과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 코사인형의 거리기만 상황에서 S자형 기동을 하는 표적에 대해 제안한 방법이 효과적으로 동작하여 표적 추적을 잘 유지함을 확인할 수 있다. 그림 12는 그림 6(c)의 시나리오와 표 1의 선형의 거리기만 프로파일을 사용하여 시험한 결과를 시험데이터 분석소프트

웨어로 분석한 결과를 보인다. 그림 12는 그림 7과 동일한 방법으로 심볼 및 결과들을 표기하였고, 그림 7~그림 11과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 선형의 거리기만 상황에서 S자형 기동을 하는 표적에 대해 제안한 방법이 효과적으로 동작하여 표적 추적을 잘 유지함을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

RGPO/VGPO의 기만적 전파방해에 대응하는 모드 설계와 데이터처리기반의 기만재밍 대응법을 보였다. SILS 기반의 다양한 시험 시나리오 상황에서 시험 및 분석을 통해 제안한 방법이 효과적으로 기만재밍 존재 및 종류를 탐지하고 기만재밍을 회피하여 표적 추적을 유지함을 확인하였다. 제안한 기만재밍대응 모드 설계 및 기만재밍 대응법은 FA-50용 전투기 레이더 등에 활용할 수 있다.

References

- [1] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems*, 2nd ed. Boston, MA, Artech House, 2001.
- [2] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [3] S. H. Jang, S. J. Kim, "Radar countermeasure and effect analysis for the pull-off deceptive jamming signal," *Journal of the KIMST*, vol. 23, no. 3, pp. 221-228, Jun. 2020.
- [4] T. H. Kim, J. H. Park, J. H. Ahn, and S. H. Jo, "Design of noise and deceptive jammer countermeasures in aircraft radars," in *the KIEES Summer Conference 2020*, Jeju, Aug. 2020, vol. 8, no. 1, p. 397.
- [5] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 2nd ed. Boca Raton, FL, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [6] E. Brookner, *Tracking and Kalman Filtering Made Easy*, New York, NY, Wiley-Interscience, 1998.
- [7] T. H. Kim, H. W. Jeon, S. W. Lee, J. T. Park, M. I. Kang, and J. H. Park, "Software-in-loop simulation system implementation for fighter radar developments," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 9, pp. 730-738, Sep. 2022.

김 태 형 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5296-2389>



2007년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학 박사)
2010년 11월: 국방과학연구소 연구원
2010년 12월~현재: LIG넥스원(주) 레이더 연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템, 패턴인식 등

전 형 원 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3618-3000>



2010년 2월: 한밭대학교 전파공학전공 (공학사)
2012년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)
2015년 3월~현재: LIG넥스원(주) 레이더 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

시스템 등

백 승 열 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4091-6314>



2008년 2월: 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부 (공학학사)
2007년 4월~2016년 8월: LIG넥스원(주) 레이더연구소 연구원
2016년 9월~2018년 4월: 현대 모비스(주) 레이더연구소 책임연구원
2021년 4월~현재: LIG넥스원(주) 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 추적처리, 레이더 시스템 등

박 준 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2750-6688>



1996년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 3월~현재: LIG넥스원(주) 레이더연구소 수석연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더, 항공기 레이더, 레이더 신호처리 등

이 성 원 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9425-6581>



2007년 2월: 아주대학교 정보및컴퓨터공학과 졸업 (공학학사)
2009년 2월: 아주대학교 정보통신공학과 졸업 (공학석사)
2014년 1월: 아주대학교 정보컴퓨터공학 졸업 (공학박사)
2014년 1월~현재: LIG넥스원(주) 레이더

연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 통제/제어, 레이더 자원관리, 소프트웨어 아키텍처, 소프트웨어 신뢰성시험 등

이 행 수 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6323-6294>



2006년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2006년 3월~현재: LIG넥스원 (주) 레이더 연구소 수석연구원
[주 관심분야] 능동위상배열 레이더, 근접 방어무기체계, 레이더시스템 등

강 명 일 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6057-9104>



2004년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 (공학석사)
2006년 2월~2007년 10월: LG전자(주) 주임 연구원
2007년 10월~현재: LIG넥스원(주) 레이더

연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더시스템, 전원 및 레이더송수신