

주파수 대역 중첩 수신구조 기반의 프리셋 재밍 기법

박병구*¹, 이정훈*², 한진우*³, 최승호*⁴, 조제일*⁵, 김준오*⁶

A Preset Jamming Technique based on Frequency Band Folding Structure

Byungkoo Park*¹, Jung-Hoon Lee*², Jin-Woo Han*³, Seungho Choi*⁴, Jeil Jo*⁵, and Jun-O Kim*⁶

이 논문은 정부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임

요약

최근 디지털 기술의 발전으로 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더와 같은 최신 다기능 레이더들이 지속적으로 개발되고 있다. 그러나 주파수 스위프(Sweep) 기반의 신호 탐색 방식과 신호분석 기반의 재밍발생 방식을 가지는 기존 전자전 재머는 이러한 최신 레이더에 대한 대응이 제한적이다. 본 논문은 주파수 스위프 방식으로 인한 신호탐지율 저하, 신호분석 소요시간에 따른 위협 대응 시간 증가 등의 제한점을 해결하기 위해 주파수 대역 중첩(Folding) 수신구조 기반의 프리셋(Preset) 재밍 기법을 제안한다. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink 기반의 모의실험을 수행하였다. 그 결과 주파수 대역 중첩 구조를 통해 대역 스위프 없이 여러 대역의 신호를 동시에 수신하게 되고 프리셋 재밍 기법을 통해 기존 방식보다 빠르게 재밍 신호가 발생됨을 확인하였다.

Abstract

Modern multi-function radars, such as Active Electronically Scanned Array(AESA) radar, are continually being developed due to advances in digital technology. However, the conventional Electronic Warfare(EW) jammer based on frequency-sweep scanning and signal analysis-based jamming is limited in their effectiveness against such radars. To solve limitations such as a low signal detection probability due to frequency-sweep scanning and a response time increasing due to signal analysis-based jamming, this paper proposes a preset jamming technique based on a frequency band folding receiver structure. To evaluate the performance of the proposed method, the Matlab/Simulink-based simulations were conducted. These simulation results showed that when signals within the frequency band of interest were simultaneously received and matched with predefined threat information, the preset jamming signals were more quickly generated than the signal analysis-based jamming method.

Keywords

electronic warfare jammer, radar, preset jamming technique, frequency band folding structure

* 국방과학연구소 레이더전자전센터(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-6308-5406>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-9006-1947>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0003-1208-2325>
- ORCID⁴: <https://orcid.org/0000-0002-5038-1871>
- ORCID⁵: <https://orcid.org/0000-0002-3437-2916>
- ORCID⁶: <https://orcid.org/0000-0002-9519-0542>

• Received: Apr. 09, 2024, Revised: May 02, 2024, Accepted: May 05, 2024
• Corresponding Author: Byungkoo Park
Radar & EW Technology Center, Agency for Defense Development,
Deajeon, Korea
Tel.: +82-42-821-4790, Email: elcapbk@naver.com

1. 서 론

디지털 기술의 발전으로 실시간으로 다수의 표적을 탐지하고 추적하는 최신의 다기능 레이더(MFR, Multi-Function Radar)가 개발되고 있으며, 특히 능동 위상 배열(AESA, Active Electronically Scanned Array) 레이더는 전자적으로 빔을 조향하여 다기능 처리 능력이 크게 향상되었다[1][2]. 이러한 AESA 레이더와 같은 다기능 레이더는 한정된 자원을 효율적으로 사용하기 위해 표적의 추적 주기를 스케줄링하고 표적의 위협 정도에 따라 주기 또는 비주기적으로 추적한다[1][2].

전자전(EW, Electronic Warfare)은 전자기 스펙트럼(EMS, Electro-Magnetic Spectrum)을 사용하는 적군의 활동을 방해하기 위해 수행되어지는 다양한 군사적 활동으로 정의할 수 있다[3][4]. 이러한 군사적 활동은 전자전지원(ES, Electronic Support), 전자공격(EA, Electronic Attack) 그리고 전자보호(EP, Electronic Protection) 등의 3가지 카테고리로 분류된다[3][4]. 여기서 EA는 전자기 에너지를 활용하여 레이더, 무선 통신시스템 등과 같은 적군의 무기체계의 성능을 저하시키거나 파괴하는 활동을 의미한다[3][4]. EA 활동과 관련된 장비로는 SPJ(Self Protection Jammer), EJ(Escort Jammer) 및 SOJ(Stand Off Jammer) 등이 있다.

재머(Jammer)에서 위협 신호를 탐지하는 주요 기능은 디지털수신기가 담당하며 1~2 GHz의 순시 수신대역폭(Receiver instantaneous bandwidth)을 가진다[5]. 따라서 위협도가 가장 높은 추적 레이더의 신호는 일반적으로 C~K 밴드에 분포하므로 재머는 관심 주파수 대역을 C~K 밴드로 설정하고 수신기의 순시 수신대역폭만큼 스위프(Sweep)하면서 신호를 탐색한다[5][6].

재머는 추적 레이더가 표적을 주기 또는 비주기적으로 추적하는 신호 환경에서 주파수 대역을 스위핑하면서 신호를 탐색하므로 관심 신호(SOI, Signal Of Interest)의 탐지율이 낮아진다.

그림 1은 기존 재머의 일반적인 운용 개념을 나타낸 것으로 재머는 운용자에 의해 작성된 임무과일을 기반으로 동작하게 된다[7][8]. 임무과일은 탐

색대역, 위협정보, 그리고 해당 위협에 대한 재밍(Jamming)기법 등의 내용을 포함하고 있으며 탐색대역과 위협정보는 수신분석장치(Analysis device)로, 위협정보(Threat information)와 재밍기법은 재밍발생장치(Jamming device)로 전송된다[7][8].

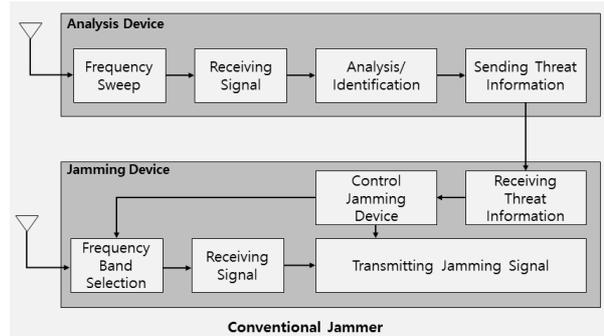


그림 1. 일반적인 재머의 운용 개념도
Fig. 1. Conventional jammer operation concept

특히 탐색대역은 운용자가 관심 주파수 대역을 어떻게 탐색할 것인지를 설정하는 변수로 일반적으로 최소탐지시간, 확장탐지시간, 신호수집개수 등이 포함된다. 여기서 해당 주파수 대역에서 신호 탐지를 위해 머무르는 최소 시간을 최소탐지시간이라 하며 최소탐지시간 내에 신호가 존재하면 수 밀리초(ms) 이상의 확장탐지시간 동안 신호를 수집하게 된다. 그리고 확장탐지시간에 도달하거나 확장탐지시간 내에 수 백 개의 신호수집개수에 도달하면 신호 수집을 종료한다. 수집이 종료되면 디지털수신기에서 생성된 수집 신호의 펄스설명자(PDW, Pulse Description Words)를 이용하여 분석하고 위협정보와 비교하여 해당 신호원을 식별한다[7].

식별된 위협 정보는 재밍발생장치로 전달된다. 재밍발생장치는 식별된 위협정보를 이용하여 해당 위협이 수신될 수 있도록 수신기를 설정한다. 그리고 해당 위협 신호가 탐지되면 재밍신호를 발생하는 방식으로 운용된다[7].

이러한 신호분석 결과 기반의 재밍신호 발생방식은 신호의 밀집도가 증가하거나 위협 신호의 주파수 및 펄스반복주기(PRI, Pulse Repetition Interval) 변조형태가 복잡한 경우 수신분석장치에서의 분석 및 식별시간이 길어지게 되어 재밍발생장치에서의 재밍 대응시간이 증가할 수 있다.

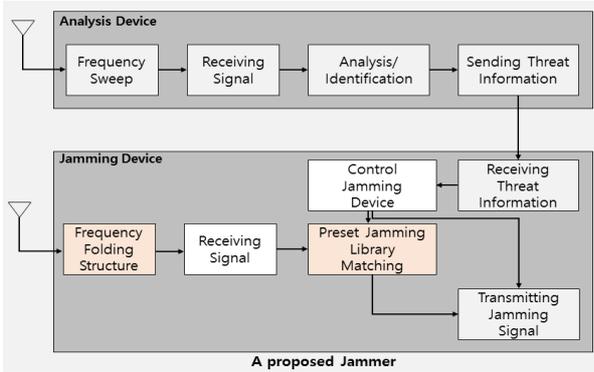


그림 2. 제안된 방법의 재머 운용 개념도
Fig. 2. Proposed jammer operation concept

본 논문에서는 위협 신호의 탐지율 저하, 재밍 대응시간의 증가와 같은 기존 재머의 제한점을 해결하기 위해 그림 2와 같이 주파수 대역 중첩 (Folding) 수신구조 기반의 프리셋(Preset) 재밍 기법을 제안한다.

주파수 대역 중첩 수신구조(Frequency band folding structure)는 관심 주파수 대역(SOI frequency band)을 순시 수신대역폭 크기와 같은 특정 수신대역 크기로 나누고 그 대역폭만큼 중첩되도록 하향 변환 시키는 부분을 추가한 구조이다. 이를 통해 수신분석장치는 기존과 동일하게 스위치하면서 위협 신호를 탐색하는 반면, 재밍발생장치의 수신기는 스위치하지 않고 관심대역의 신호를 동시에 수신할 수 있어 위협신호의 탐지확률을 증가시킬 수 있다.

프리셋 재밍 기법은 사전에 정의된 위협과 재밍 기법을 이용하여 재밍발생장치의 재밍 자원을 미리 선점하여 재밍 신호 발생대기 상태로 둔다. 그리고 중첩 수신구조를 통해 수신된 신호의 PDW를 이용하여 프리셋 재밍의 대상이 되는 위협과 비교하여 일치하면 발생대기 상태를 트리거하여 재밍 신호가 발생되도록 한다.

이러한 프리셋 재밍 기법을 통해 수신분석장치의 분석결과 기반의 재밍 신호 발생 방법보다 빠르게 재밍 신호가 발생되도록 한다[9][10].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본론의 2.1장에서는 위협 신호가 존재하는 관심 주파수 대역을 순시 대역폭의 크기로 중첩하여 수신하는 구조를 설명한다. 2.2장에서는 사전에 정의된 위협과 재밍기법을 이용하는 프리셋 재밍 기법에 대해 설명하고 2.3장

에서는 Matlab/Simulink 기반의 모의실험을 수행하여 제안된 방법의 성능을 검증한다[11]. 그리고 마지막으로 모의실험을 통한 결론을 기술한다.

II. 본 론

2.1 주파수 대역 중첩 수신구조

재머가 운용되는 특정 지역의 위협 레이다 운용 환경을 고려하면 연속적으로 여러 개의 펄스가 주파수 및 시간적으로 중첩될 가능성은 매우 희박하다고 가정할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 위협 신호의 탐지확률을 증가시키기 위해 그림 3과 같이 관심 주파수 대역을 순시 수신대역폭 크기의 특정 대역폭 크기로 중첩시켜 재밍발생장치에서 주파수 대역을 스위치하지 않고 위협 신호를 수신하는 주파수 대역 중첩 수신구조를 제안한다.

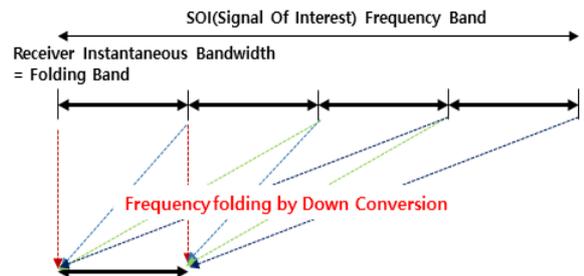


그림 3. 주파수 대역 중첩 개념도
Fig. 3. Frequency band folding concept

그림 4와 같이 재밍발생장치에 주파수 대역 중첩 수신구조를 구현하기 위해 수신 안테나모듈 (Receiver antenna module)과 전단수신모듈(RF front-end module)을 통해 관심 주파수 대역의 전체 신호를 수신하고 주파수합성모듈(Frequency synthesizer module)과 주파수변환모듈(Frequency conversion module)을 통해 중첩 주파수 대역(Folding band)으로 신호를 중첩시킨다. 중첩 주파수 대역으로 변환된 신호는 디지털수신기의 순시 수신대역폭의 크기를 가지는 필터들로 구성된 필터뱅크모듈(Filter bank module)로 전달된다. 그리고 각 필터를 통해 필터링(Filtering)되어 폴리페이즈 채널화 디지털수신기에 전달된다.

주파수 대역 중첩 수신구조에서 신호는 원래의 대역에서 중첩 주파수 대역으로 변환되어 디지털수신기에 전달되기 때문에 디지털수신기에서 생성된 PDW의 주파수 값을 원래의 주파수 값으로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 위해 그림 5와 같이 로그 비디오 증폭기(SDLVA, Successive Detecting Log Video Amplifier)의 비디오신호(Video signal)를 활용한다.

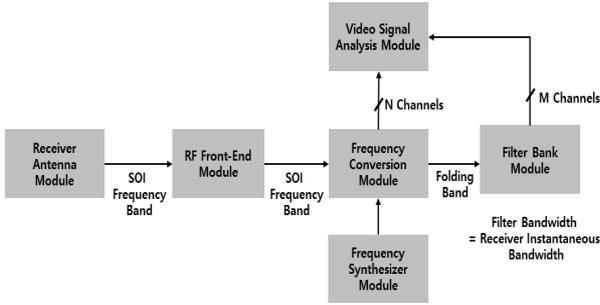


그림 4. 주파수 대역 중첩 구조를 가지는 재머 수신부
Fig. 4. Jammer receiver with frequency band folding

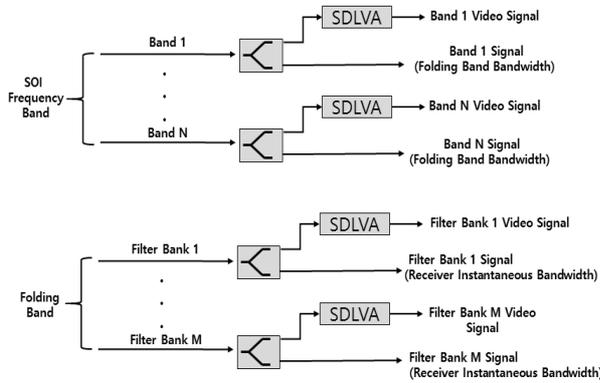


그림 5. SDLVA를 이용한 비디오 신호 생성
Fig. 5. Video signal generation using SDLVA

그림 4 및 그림 5와 같이 주파수변환모듈에 입력되는 신호의 대역폭을 하나의 채널이 중첩주파수 대역 크기를 가지는 N채널로 분배시키고 각 채널에 SDLVA를 두어 비디오 신호는 비디오신호분석모듈 (Video signal analysis module)로 전달하고 고주파 신호는 필터뱅크모듈로 전달한다. 그리고 필터뱅크모듈에 입력되는 신호의 대역폭을 하나의 필터가 순서 수신대역폭 크기를 가지는 M채널로 분배시키고 각 채널에 SDLVA를 두어 비디오 신호는 비디오신호분석모듈로 전달하고 고주파 신호는 디지털수신기로 전달한다. 여기서 주파수변환모듈의 비디오신

호를 대역 비디오 신호로 정의하고 필터뱅크모듈의 비디오 신호를 필터 비디오 신호로 정의한다.

비디오신호분석모듈에서는 수신하는 대역 및 필터 비디오 신호들의 상승 에지(Rising edge)의 타이밍을 확인하고 분석하여 신호의 도착시간을 파악한다. 그리고 디지털수신기에서 생성된 PDW의 신호 도착시간(TOA, Time Of Arrival)과 비교하여 주파수 대역이 중첩되기 전 해당 신호의 원래 주파수를 계산할 수 있도록 한다.

2.2 프리셋 재밍 기법

본 논문에서는 수신분석장치의 신호 분석결과 기반의 재밍 신호 발생 방법보다 빠르게 재밍 신호를 발생하기 위해 그림 6과 같은 프리셋 재밍 기법을 제안한다. 이를 위해 우선 임무파일 작성 시 프리셋 관련 재밍 정보(Preset Jamming information)를 추가적으로 작성하여야 한다. 프리셋 재밍 정보에는 프리셋 재밍의 대상이 되는 위협의 정보(Threat information)와 해당 위협의 재밍기법(Jamming method) 등이 포함되어 있다. 재밍발생장치를 제어하는 프로세서는 그림 6과 같이 프리셋 재밍 정보를 수신하면 해당 재밍기법을 확인하고 필요한 재밍자원(Jamming resources)을 미리 할당(Allocation)하고 해당 재밍 신호를 발생 대기 상태로 둔다.

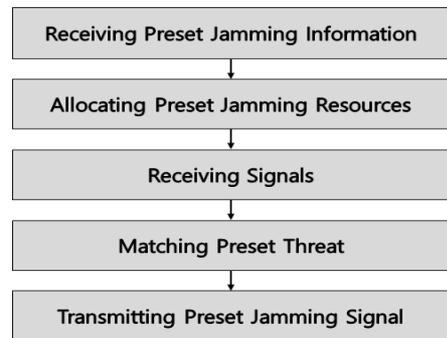


그림 6. 프리셋 재밍 흐름도
Fig. 6. Preset Jamming flowchart

그리고 수신분석장치와 재밍발생장치를 통해 신호를 수신한다. 다만, 수신분석장치는 기존과 동일하게 주파수를 스윕하면서 수신하고 재밍발생장치는 주파수 대역을 중첩하여 수신한다.

재밍발생장치는 비디오신호분석모듈을 통해 대역 및 필터 비디오 신호를 분석된 신호의 도착순서와 폴리페이즈 채널화 디지털수신기에서 생성된 PDW의 TOA 순서를 비교하여 PDW의 주파수를 원래의 주파수로 변경함으로써 최종적인 위협 PDW를 생성한다.

본 논문에서는 알고리즘 1과 같이 생성된 위협 PDW를 기반으로 펄스 3개를 이용하여 프리셋 재밍을 트리거하는 매칭(Matching) 알고리즘을 제안한다. 여기서 TOA, FREQ는 생성된 PDW의 TOA 값들과 주파수 값들을 의미하며 배열행태의 자료구조이다. PSETF, PSETP는 프리셋 위협 정보에 포함된 위협의 주파수 및 PRI를 의미한다. σF , σP 는 수신된 PDW 정보와 프리셋 위협 정보의 비교를 위한 주파수 임계값, PRI 임계값을 의미하며 PSETTRIG는 재밍신호의 트리거(Triggering) 상태를 의미하는 변수이다. PSETTRIG의 값이 TRUE가 되면 재밍신호가 발생된다고 가정한다.

알고리즘 1을 보면, PDW의 FREQ와 PSETF의 차이가 σF 이내인 PDW를 먼저 추출하고 해당 PDW의 TOA값으로 해당 펄스의 TOA 값을 가지는 tArray 자료구조를 생성한다. M은 tArray 배열의 크기로 초기화하고 PSETTRIG는 FALSE로 초기화 한다. 그리고 tArray 배열을 이용하여 PSETP와 펄스 간의 DTOA(Difference of Time Of Arrival) tdiff가 σP 이내인 PDW가 누락이 없이 연속으로 3개가 존재하면 PSETTRIG는 'TRUE'가 되어 재밍신호가 발생되게 된다.

프리셋 재밍 기법은 소수의 3개 펄스열을 이용한 매칭 방식으로 매칭에 오류가 있을 수 있으므로 프리셋 재밍 후, 프리셋 재밍이 적절하게 발생되었는지 검증하는 과정이 필요하다. 이를 위해 재밍발생장치는 수신분석장치에서 전달되는 분석/식별 결과를 이용하여 그림 7과 같이 프리셋 재밍의 적절성을 판단한다. 그림 7과 같이 위협 명칭이 일치하면서 해당 재밍기법 또한 일치하면 프리셋 재밍을 유지시키고 위협 명칭은 일치하나 재밍기법이 다르면 프리셋 재밍을 중단하고 수신분석장치의 식별 결과를 기반으로 한 재밍기법을 발생시킨다. 그리고 수신분석장치에서 전달된 식별된 위협정보가 프리셋 재밍위협과 일치하지 않는 경우는 프리셋을 중단하

고 수신분석장치의 식별 결과를 기반으로 한 위협의 재밍기법을 발생시킨다.

알고리즘 1. 매칭 알고리즘
Algorithm 1. Matching algorithm

```

Input :
  TOA, FREQ, Preset-frequency PSETF,
  Preset-PRI PSETP, frequency threshold  $\sigma F$ ,
  PRI threshold  $\sigma P$ 
Output : PSETTRIG

begin
  tArray  $\leftarrow$  for TOA if  $abs(PSETF-FREQ) \leq \sigma F$ 
  M  $\leftarrow$  length(tArray)
  PSETTRIG  $\leftarrow$  FALSE
  for j = 0 to M-3
    for k = j+1 to M-2
      tdiff  $\leftarrow$  tArray(k)-tArray(j)
      if  $abs(tdiff-PSETP) \leq \sigma P$ 
        for l = k+1 to M-1
          tdiff  $\leftarrow$  tArray(l)-tArray(k)
          if  $abs(tdiff-PSETP) \leq \sigma P$ 
            PSETTRIG  $\leftarrow$  TRUE
            return PSETTRIG
          else if  $tdiff > PSETP + \sigma P$ 
            break
          end if
        end for
      else if  $tdiff > PSETP + \sigma P$ 
        break
      end if
    end for
  end for
  return PSETTRIG
end
    
```

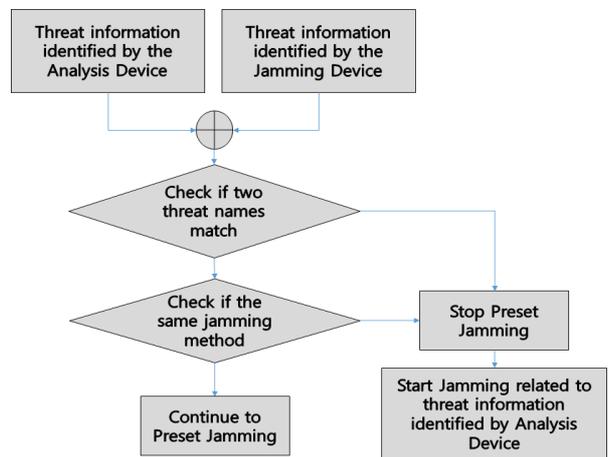


그림 7. 프리셋 재밍 검증 흐름도
Fig. 7. Verification for preset Jamming

2.3 Matlab/Simulink 모델 기반의 모의실험

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 그림 8과 같은 Matlab/Simulink 기반의 실험 모델을 구현하였다. 모의실험 신호의 파라미터는 표 1과 같으며 실험의 편의를 위해 신호의 주파수를 수십 MHz로 선정하였으며 중첩 주파수 대역으로의 변환도 주파수 계획이 간략하도록 모의하였다.

여기서 B_n , f_c , f_{cf} , f_{type} , P_{pri} , P_{type} , P_W , D_p 는 각각 신호의 대역 번호, 중심 주파수, 중첩 후의 중첩 주파수, 주파수 변조 형태, PRI, PRI 변조형태, 펄스 폭, 신호 발생 Delay를 의미한다.

표 1. 모의실험 신호 파라미터
Table 1. Parameters of signals in simulation

Name	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
Value	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
B_n	Band #1	Band #1	Band #2	Band #2
f_c (MHz)	24	22	59	52
f_{cf} (MHz)	24	22	21	28
f_{type}	Fixed			
P_{pri} (μs)	100			
P_{type}	Stable			
P_W (μs)	10			
D_p (μs)	0.33	3.33	5.33	12.33

그림 9와 같이 관심 주파수 대역 F0-F2는 20~60 MHz, 대역1 F0-F1의 주파수는 20~40 MHz, 대역2 F1-F2의 주파수는 40~60 MHz 그리고 중첩 주파수 대역은 F0-F1 대역과 동일하게 20~40 MHz로 선정하였다.

필터뱅크모듈은 중첩 주파수 대역 20~40 MHz를 담당하기 위해 각 채널당 5 MHz 대역의 4개의 필터로 구현하였다. 각 필터 뒤에 폴리페이즈 채널화 디지털수신기 구현하였으며 디지털수신기 1번은 20~25 MHz, 2번은 25~30 MHz, 3번은 30~35 MHz, 4번은 35~40 MHz의 대역을 담당한다.

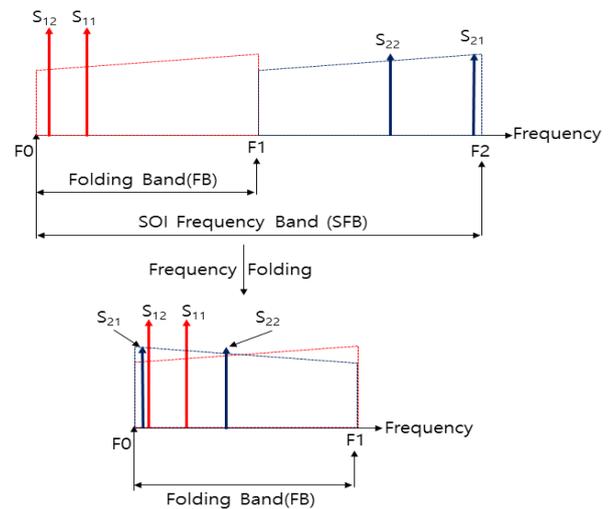


그림 9. 모의실험의 주파수 대역 중첩
Fig. 9. Frequency band folding in simulation

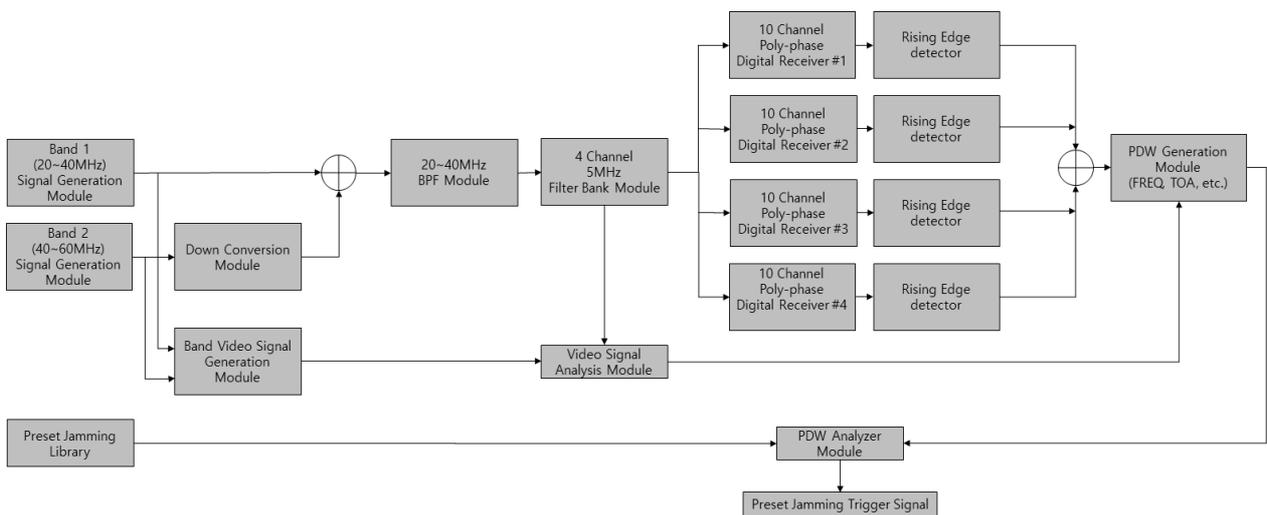


그림 8. 모의실험을 위한 Matlab/Simulink 모델 블록 다이어그램
Fig. 8. Matlab/Simulink block diagram of simulation model

그림 10은 주파수 대역 중첩 후 모의실험 신호들의 주파수 및 타이밍 상태를 표시한 것으로 시간 축으로는 중첩이 있는 반면, 주파수 축으로는 중첩이 없는 것을 알 수 있다.

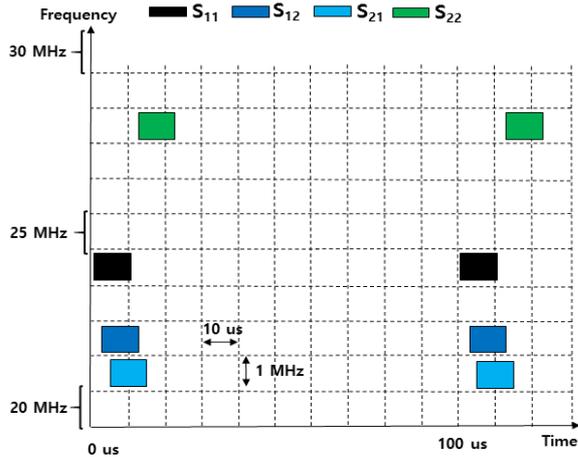


그림 10. 주파수 대역 중첩 후 주파수-타이밍도
Fig. 10. Frequency-time diagram after frequency band folding

그림 11은 20~40 MHz 대역통과필터모듈(BPF module)의 출력 스펙트럼을 20~30 MHz 구간만 확대 전시한 것으로 모의실험 신호의 중첩 주파수 (f_{cf})에 해당하는 신호가 전시됨을 알 수 있다.

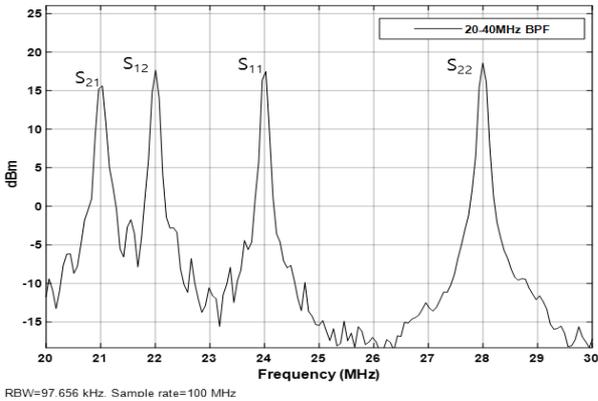


그림 11. 20~40 MHz BPF 모듈 스펙트럼
Fig. 11. Spectrum in 20~40 MHz BPF module

그림 12와 그림 13은 그림 8의 대역 비디오 신호 생성모듈(Band signal generation module) 및 필터뱅크 모듈(Filter bank module)의 비디오 신호를 전시한 것으로 상승 에지(Rising edge) 부분은 더해주고 하강 에지(Falling edge) 부분은 빼주는 형태로 비디오 신호가 모의되도록 구현하였다.

그림 12에서 위의 부분은 대역1의 비디오 신호, 아래 부분은 대역2의 비디오 신호를 전시한 것으로 대역1에 2개의 신호(S_{11} , S_{12})가 시간적으로 중첩되고 대역2에 2개의 신호(S_{21} , S_{22})가 시간적으로 중첩됨을 알 수 있다. 그림 13에서 위의 부분은 20~25 MHz를 담당하는 필터뱅크 1번의 비디오 신호, 아래 부분은 25~30 MHz를 담당하는 필터뱅크 2번의 비디오 신호를 전시한 것으로, 필터뱅크 1번에 3개의 신호 (S_{11} , S_{12} , S_{21})가 전시되고 필터뱅크 2번에 1개의 신호(S_{22})가 전시됨을 알 수 있다. 여기서 대역신호의 비디오신호 상승에지 순서와 필터뱅크 비디오 신호의 상승에서 순서를 비교하면 대역이 중첩된 상황에서도 신호를 식별할 수 있다.

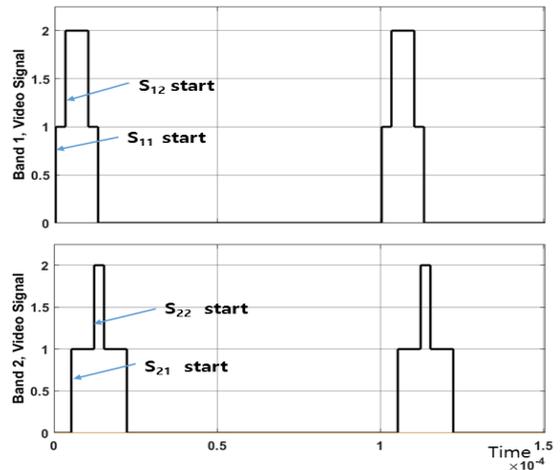


그림 12. 대역 비디오 신호
Fig. 12. Band video signal

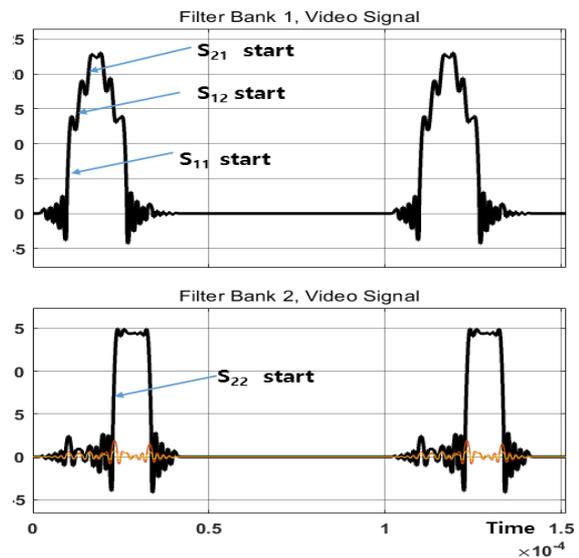


그림 13. 필터뱅크 비디오 신호 출력
Fig. 13. Filter bank video signal

그림 14는 그림 8의 10 채널 폴리페이저 디지털 수신기 1번의 채널 1번부터 채널 5번까지의 포락선을 검출한 것으로 1 MHz, 3 MHz, 4 MHz에 해당하는 CH 2, CH 4, CH 5에 펄스 신호(S_{11} , S_{12} , S_{21})가 생성됨을 알 수 있다. 그림 15는 폴리페이저 디지털 수신기 2번의 채널 1번부터 채널 5번까지의 포락선을 검출한 것으로 2 MHz에 해당하는 CH 3에 펄스 신호(S_{22})가 생성됨을 알 수 있다.

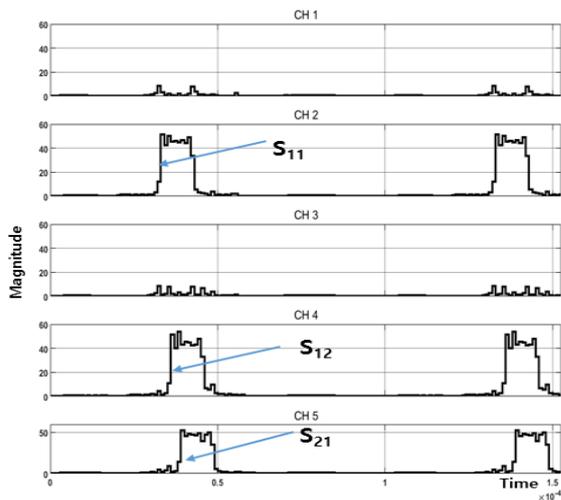


그림 14. 디지털수신기 1번의 포락선
Fig. 14. Envelope of digital receiver #1

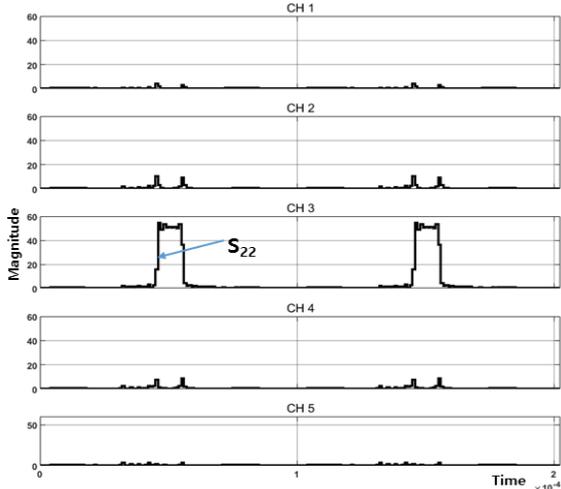


그림 15. 디지털수신기 2번의 포락선
Fig. 15. Envelope of digital receiver #2

그림 16은 대역 비디오신호의 상승 에지의 타이밍 정보를 이용하여 비디오 신호가 생성되는 대역 번호를 시간 순서대로 전시한 것이다. 그림 17은 각 디지털수신기에서 생성된 PDW의 수신기번호와

TOA를 이용하여 시간에 따른 PDW별 생성된 디지털수신기의 번호를 전시한 것이다. 그림 16 및 그림 17에 제시된 바와 같이 비디오신호분석모듈을 통해 대역 및 필터 비디오 신호를 분석하고 신호의 도착 순서를 확인하고 PDW의 생성 순서를 확인함으로써 생성된 PDW가 대역1 신호인지 대역2 신호인지 판단이 가능하다.

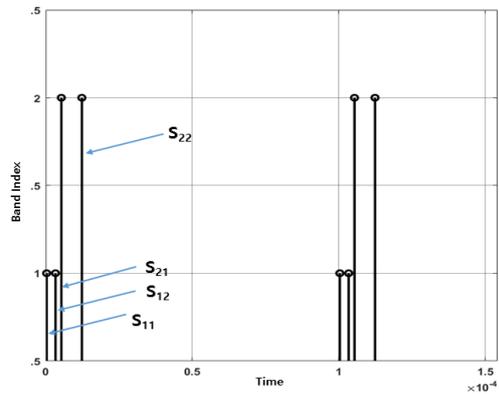


그림 16. 신호별 대역 번호 정보
Fig. 16. Band indices for signals

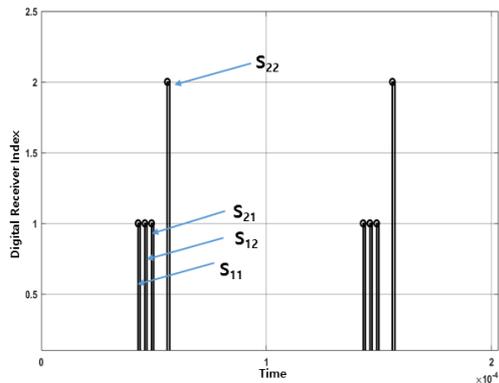


그림 17. PDW별 생성된 디지털수신기 번호
Fig. 17. Digital receiver indices for PDW

PDW에 포함되어 있는 주파수 정보는 중첩대역으로 하향 변환된 주파수 값으로 생성되었으므로 이들 그림의 정보와 주파수 계획에 따른 주파수 변환 수식들을 이용하여 원래의 주파수 값으로 수정하여야 한다.

PDW가 디지털수신기 1번에서 생성되었으며 대역1의 신호인 경우는 식 (1)의 과정을 통해 주파수를 수정할 수 있으며 대역2의 신호인 경우는 수식 (1)과 식 (2)의 과정을 연속적으로 수행하여 주파수를 수정할 수 있다.

여기서 f_{LO} , $f_{PDW_{DR1}}$, $f_{LO_{BF1}}$, f_s 는 신호 중첩을 위해 사용한 국부신호 20 MHz, 디지털수신기 1번에서 생성된 PDW의 주파수, 1번 폴리페이즈 필터 앞단에 사용한 국부신호 25 MHz 그리고 샘플링 주파수 100 MHz를 의미한다.

$$f_{PDW_{DR1}} = -f_{PDW_{DR1}} + f_{LO_{BF1}} \quad (1)$$

$$f_{PDW_{DR1}} = f_s - ((-f_{PDW_{DR1}} + f_{LO_{BF1}}) + f_{LO}) \quad (2)$$

PDW가 디지털수신기 2번에서 생성되었으며 대역1 신호인 경우는 식 (3)의 과정을 통해 주파수를 수정할 수 있으며 대역2 신호인 경우는 식 (3)과 식 (4)의 과정을 연속적으로 수행하여 PDW의 주파수를 수정할 수 있다. 여기서 $f_{PDW_{DR2}}$, $f_{LO_{BF2}}$ 는 디지털수신기 2번에서 생성된 PDW의 주파수, 2번 폴리페이즈 필터 앞단에 사용한 국부신호 30 MHz를 의미한다.

$$f_{PDW_{DR2}} = -f_{PDW_{DR2}} + f_{LO_{BF2}} \quad (3)$$

$$f_{PDW_{DR2}} = f_s - ((-f_{PDW_{DR2}} + f_{LO_{BF2}}) + f_{LO}) \quad (4)$$

표 2. 생성된 PDW 정보

Table 2. PDW information generated by digital receiver

FBN	DRN	PDW information			
		GCN	TOA tick (μs)	GF (MHz)	CF (MHz)
1	1	2	44	1.0	24.0
1	1	4	47	3.0	22.0
2	1	5	50	4.0	59.0
2	2	3	57	2.0	52.0
1	1	2	144	1.0	24.0
1	1	4	147	3.0	22.0
2	1	5	150	4.0	59.0
2	2	3	157	2.0	52.0
1	1	2	244	1.0	24.0
1	1	4	247	3.0	22.0
2	1	5	250	4.0	59.0
2	2	3	257	2.0	52.0

표 2는 그림 16 및 그림 17 정보를 이용하여 각 디지털수신기에 생성된 PDW의 정보를 변환하고

TOA 순서에 따라 나열한 것이다. 여기서 FBN은 주파수 대역 번호, DRN은 디지털수신기 번호, GCN은 생성 채널 번호, GF는 생성 주파수를 의미하며 마지막으로 CF는 수정된 주파수를 의미한다.

모의실험의 샘플링주파수 f_s 는 100 MHz이지만, 폴리페이즈 디지털수신기 구현 과정에서 10 decimation을 거친 후, 10 채널의 폴리페이즈 필터를 구현하였기 때문에 최종적으로 100 decimation이 된 것과 같다. 그러므로 1 tick의 값은 $1\mu s$ 에 해당한다. 그림 18은 최종 생성된 PDW를 기반으로 TOA에 따른 주파수 값을 2차원 그래프를 전시한 것으로 모의신호들이 정상적으로 수신되었음을 알 수 있다.

그림 8의 Preset Jamming Library에 입력되는 프리셋 위협 정보를 $f_c = 24$ MHz, $f_{type} = \text{Fixed}$, $P_{pri} = 100\mu s$, $P_{type} = \text{Stable}$ 에 해당하는 값으로 S_{11} 의 제원과 동일한 값으로 설정하고 표 2의 수정된 PDW를 매칭 알고리즘1에 입력하면 수신된 S_{11} 신호와 매칭 되어 PSETTRIG가 'TRUE'가 되어 채밍신호가 발생됨을 확인하였다. 여기서 THF를 0.1 MHz, THP를 $0.1\mu s$ 로 설정하였다. 그리고 매칭 알고리즘 1에 의해 S_{11} 신호가 매칭이 된 시점은 표 2에서 9번째 PDW가 생성된 시점으로 PDW의 TOA tick 기준으로 244us 정도에 해당된다.

그러므로 기존의 수 밀리초(ms)의 확장탐지시간, 수 백 개 정도의 신호수집개수가 포함된 임무과일의 탐색대역정보를 기반으로 수집하여 신호를 분석하는 구조에 비해서는 빠르게 대응함을 알 수 있다.

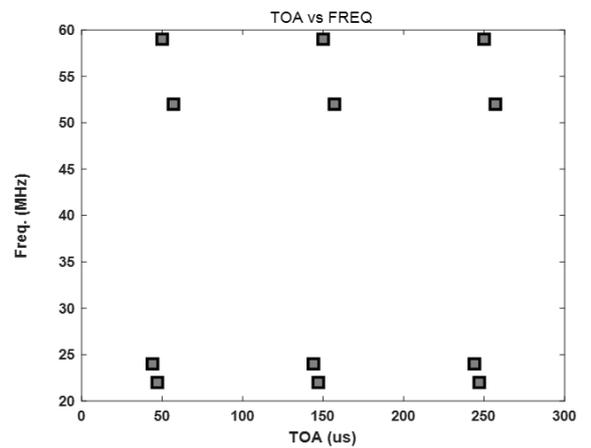


그림 18. 수신된 PDW에 대한 TOA-Freq. 2차원 그래프
Fig. 18. TOA-Freq. 2D graph for PDW

III. 결 론

본 논문에서는 주파수 스위치 기반의 신호 탐지 방식과 신호분석 기반의 재밍발생 방식에서 기인하는 위협 신호의 탐지율 저하, 재밍 대응시간의 증가를 기존 재머의 제한점으로 식별하였다. 그리고 이러한 문제점을 해결하기 위해 주파수 대역 중첩 수신구조 기반의 프리셋 재밍 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 Matlab/Simulink 기반의 실험 모델을 구현하였다. 모의실험을 수행하여 주파수 대역 중첩 수신구조를 통해 주파수 대역을 스위치 하지 않고 위협 신호를 수신할 수 있음을 확인하였으며 프리셋 재밍 기법을 활용하여 기존의 신호분석 결과 기반의 재밍 발생방법 보다 빠르게 재밍 신호를 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 본 논문에 제안한 방법을 활용하여 기존 재머의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J.-E. Roh, C.-S. Ahn, and S.-J. Kim, "Beam Scheduling Algorithm of Multi-Function AESA Radar Based on Dispatching Rules", Journal of JKIEES, Vol. 23, No. 2, pp. 1-13, Jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.1.001>.
- [2] J.-E. Roh, J.-J. Won, and J.-H. Yoon, "Beam Scheduling Algorithm for Interleaved Mode of AESA Radar", Journal of JKIEES, Vol. 32, No. 4, pp. 377-385, Apr. 2021. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.4.377>.
- [3] D. Adamy, "EW 101 : A First Course in Electronic Warfare", Artech House, pp. 1-5, pp. 73-101, 2001.
- [4] Lockheed Martin, <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/electronic-warfare.html> [accessed : Feb. 14, 2024]
- [5] D.-G. Choi, C.-R. Yun, and K.-S. Lee, "Development of an Ultra-Wideband Channelization Receiver for Electronic Support", Journal of JKIEES, Vol. 34, No. 3, pp. 204-217, Mar. 2023.

<http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.3.204>.

- [6] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum [accessed : Jan. 15, 2024]
- [7] J. Jo and J. M. Ahn, "Jamming Selection Method against Unknown Radar Signals based on Deep Learning using Co-occurrence Matrix", Journal of KIIT, Vol. 19, No. 10, pp. 105-113, Oct. 2021. <https://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.10.105>.
- [8] P. Zhang, Y. Huang, and Z. Jin, "An Electronic Jamming Method Based on a Distributed Information Sharing Mechanism", Electronics 2023, Vol. 12, No. 9, pp. 2130, May 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12092130>.
- [9] J. Lee, S. Choi, B. Park and J. Jo, "Electronic Apparatus for Jamming and Operation Method Thereof", Korea patent, 10-2023-0147737, 2023.
- [10] J. Lee, J. Jo, and S. Choi, "Apparatus for generating signals and method thereof", Korea patent, 10-2600105-0000, 2023.
- [11] Mathworks, <https://kr.mathworks.com/help> [accessed : Jan. 15, 2024]

저자소개

박 병 구 (Byungkoo Park)



2000년 2월 : 경북대학교
전자전기공학과(학사)
2002년 2월 : 포항공과대학교
전자공학과(석사)
2019년 8월 : 충남대학교
전자전파정보통신공학과(박사)
2005년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 전자전 신호처리

이 정 훈 (Jung-Hoon Lee)



1998년 2월 : 고려대학교
전파공학과(석사)
2015년 8월 : 충남대학교
전파공학과(박사)
1998년 2월 ~ 현재 :
국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 전자전 시스템,

전자공격, 방향탐지

김 준 오 (Jun-O Kim)



2002년 2월 : 부경대학교
전자공학과 통신시스템(석사)
2019년 8월 : 충남대학교
전자전과정보통신공학과(박사)
2002년 8월 ~ 현재 :
국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 전자전, 항법전,
디지털 통신, 위성항법

한 진 우 (Jin-Woo Han)



2001년 2월 : 경북대학교
컴퓨터공학과(학사)
2004년 2월 : 경북대학교
컴퓨터공학과(석사)
2022년 2월 : 충남대학교
컴퓨터공학과(박사)
2004년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 전자전 신호처리, 패턴인식, 딥러닝

최 승 호 (Seungho Choi)



1996년 2월 : 영남대학교
전자공학과(학사)
1998년 2월 : 포항공과대학교
전기전자공학과(석사)
2008년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과(박사)
1998년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 수석연구원

관심분야 : 전파수치해석, 전파교란, 드론재밍

조 제 일 (Jeil Jo)



2000년 2월 : 경북대학교
전자전기공학과(학사)
2005년 2월 : 경북대학교
전자공학과(석사)
2022년 2월 : 충남대학교
전자전과정보통신공학과(박사)
2005년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 레이더/전자전 시스템, 재밍기법, M&S