

전이중 기반 전자공격/데이터링크 동시 수행이 가능한 새로운 전자전 시스템에 관한 연구

Research on a New EW System for Simultaneous Execution of EA/Data-link based on Full-Duplex

김빛찬 · 김성민 · 김두환 · 조상왕 · 고재현

Bit-Chan Kim · Sung-Min Kim · Doo-hwan Kim · Sang-Wang Jo · Jae-Heon Ko

요 약

본 논문에서는 아군과의 수신 임무를 위한 데이터링크와 고출력 전자공격의 동시 수행을 위해 전이중 기반의 새로운 전자전 시스템을 연구하고, 전이중 방식 적용 시 필연적으로 발생하는 자체 재밍간섭을 최소화하기 위하여 피드백 구조 기반의 적응형 광대역 간섭제거 장치를 설계 및 검증하였다. 제안한 장치는 다양한 주파수 및 대역폭을 갖는 재밍 신호원에 대한 효과적인 간섭제거를 위해 피드백 구조를 적용하였으며, 측정 결과 200~2,200 MHz 범위의 CW 신호와 4 MHz 대역폭의 FM 재밍 신호에 대해 각각 최소 40 dB 그리고 30 dB 이상 수준의 간섭 제거 성능을 확인하였다. 이를 통해 전이중 기반 전자전 시스템의 실현 가능성과 데이터링크·EW 융합 운용에 대한 적용 가능성을 입증하였다.

Abstract

This paper presents a new electronic warfare (EW) system based on a full-duplex structure for simultaneous execution of data-link for receiving missions with allies and high-power electronic attack (EA). An adaptive wide-band jamming-interference cancellation board based on a feedback structure was designed and verified to minimize the self-jamming-interference signal that inevitably occurs due to the application of a full-duplex communication structure. The proposed self-jamming interference cancellation board employs a feedback structure to effectively cancel the interference from jamming signals with various frequencies and bandwidths. Measurement results confirm that the implemented Self Jamming-Interference Cancellation Board established that the CW signal within the frequency range of 200~2,200 MHz and the FM jamming signal with a bandwidth of 4 MHz could be suppressed and that it had signal cancellation characteristics of at least 40 dB and 30 dB compared with the jamming interference signal, respectively.

Key words: Electronic Warfare, Full-Duplex, Jamming-Interference Cancellation, Adaptive, Wide-Band

I. 서 론

전자기 스펙트럼은 현대전에 있어 핵심적 자원으로로서,

정보기술의 발전과 더불어 그 활용 환경이 점차 복잡하고 혼잡해지고 있다. 데이터링크(data-link) 시스템은 아군 및 플랫폼 간 실시간 정보 교환과 전술적 상황 인식

「이 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-048).」
LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received October 1, 2025 ; Revised October 7, 2025 ; Accepted November 11, 2025. (ID No. 20251001-114)

· Corresponding Author: Bit-Chan Kim (e-mail: bitchan.kim@lignex1.com)

을 지원하는 주요 수단이며, 전자전(EW, electronic warfare) 체계는 해당 스펙트럼을 효과적으로 활용하여 작전적 우위를 확보하는 것을 목적으로 한다. 기존 전자전 시스템은 반이중(half-duplex) 기반의 시간 분할(TDD, time-division duplex) 방식을 통해 송·수신 간섭을 최소화하였으나, 동일 주파수 대역에서의 동시 송·수신이 불가능하다는 구조적 한계를 지니고 있다. 이에 따라 스펙트럼 효율을 저하, 임무통신 지연, 그리고 신속한 전자공격 대응의 제약과 같은 문제점이 발생하며, 이러한 한계는 향후 복잡성이 증대될 전자전 환경에서 더욱 심화될 것으로 전망된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 국외에서는 전이중(full-duplex) 통신 기술을 전자전 체계에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 데이터링크와 EW 시스템의 융합을 통한 스펙트럼 활용 극대화 및 작전 효율성 제고가 중요한 연구 방향으로 제시되고 있으며^{[1][2]}, 주로 수백 MHz의 협대역 환경 혹은 저출력 통신 중심 구조를 대상으로 하였으며, 정적 보상 기반의 RF 간섭 제거 방식을 적용하여 실시간 적응성과 광대역 운용 측면에서 한계가 존재한다^{[3]-[10]}.

본 논문에서는 전이중 통신 기반의 새로운 전자전 체계를 대상으로, 고출력 전자공격으로 인해 발생하는 자체 간섭을 최소화하기 위한 피드백 구조 기반의 실시간 적응형 광대역 재밍 간섭 제거 장치를 제안한다. 제안된 장치는 200~2,200 MHz의 광대역 주파수 범위와 고출력 환경에서도 동적 환경 변화에 실시간으로 대응하며 안정적으로 동작하고, 하드웨어 통합 구조를 통해 전자전 시스템 수준의 간섭 제거 성능을 구현하였다. 이를 통해 전이중 기반 EW 시스템의 적용 가능성을 검증하고, 향후 데이터링크-EW 통합 운용을 위한 기술적 발전 방향을 제시한다.

II. 시스템 및 장치 설계

그림 1은 제안하는 재밍간섭 제거 장치를 적용한 전이중 기반 전자전 송/수신 시스템의 개념도로, 재밍송신을 위한 전자공격 송신부(Tx), 아군과의 임무 수신을 위한 데이터링크 수신부(Rx) 및 전자공격으로 인한 재밍간섭

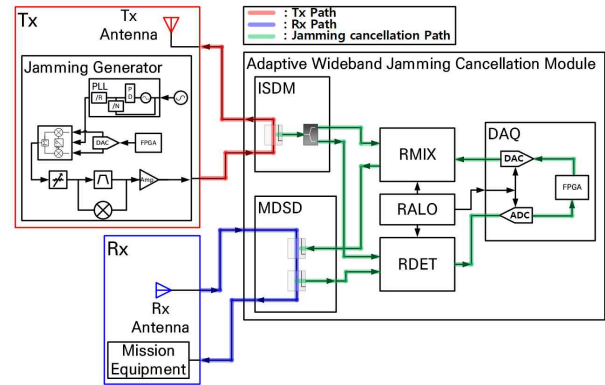


그림 1. 새로운 전자전 송/수신 시스템 개념도

Fig. 1. Concept diagram of new EW transmit/receive system.

제거를 위한 적응형 광대역 재밍간섭 제거 장치로 구성된다.

송신부는 발진기(oscillator), 위상 고정 루프(PLL, phased locked loop), 디지털 회로 및 벡터 변조기(vector modulator)로 구성된 재밍신호 발생기를 통해 단일 신호, 잡음 또는 기만 재밍 신호를 생성한다. 생성된 재밍 신호는 간섭신호 검출부로 입력되며, 30 dB 방향성 결합기(directional coupler)를 통해 재밍송신 안테나와 재밍간섭 제거 장치로 신호가 분기된다. 분기된 재밍 신호는 재밍송신 안테나를 통해 전송되어 전자공격 임무를 수행함과 동시에, 재밍간섭 제거 장치에 입력되어 재밍간섭 신호 제거를 위한 동기 신호 검출에 활용된다. 해당 시스템에서 수신부는 아군 임무 수행을 위해 통신 신호를 수신하지만, 수신 신호에는 목표 신호와 함께 전자공격으로 인해 발생하는 재밍간섭 신호가 포함된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 수신된 모든 신호는 재밍간섭 제거 장치 내의 혼합검출신호 분배부로 입력되며, 혼합검출신호 분배부 내 10 dB 방향성 결합기를 통해 제거신호 혼합부에서 생성된 간섭제거 신호가 결합되어 1차 간섭 제거가 수행된다. 이어서 30 dB 방향성 결합기를 통해 잔여 간섭 신호가 추가적으로 제거되며, 최종적으로 정제된 수신 신호가 아군 수신 장비로 전달된다.

그림 2는 제안하는 적응형 광대역 재밍 간섭 제거 장치의 기능 블록도로, 간섭 신호 검출부(ISDM), LO 발생부(RALO), 제거 신호 검출부(RDET), 제거 신호 제어부

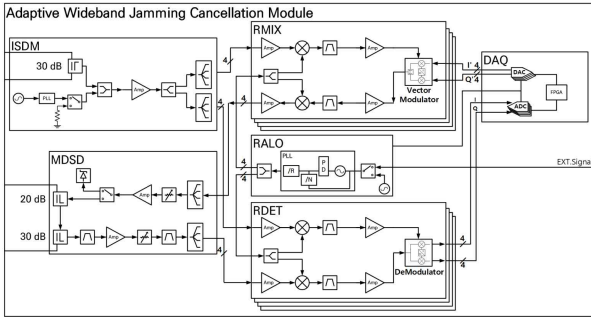


그림 2. 제안하는 재밍간섭 제거 장치 기능 블록도
 Fig. 2. Block diagram of proposed jamming-interference cancellation board.

(DAQ), 제거 신호 혼합부(RMIX), 혼합검출신호 분배부(MDSM)로 구성되며, 개발 목표 성능은 표 1에 제시하였다. 재밍 간섭 제거 과정은 다음과 같다. 첫째, 동기 신호(재밍 간섭 신호)와 검출 신호(수신 신호)의 위상차를 이용해 역위상 제거 정보를 산출하고 출력한다. 둘째, 산출된 역위상 제거 정보와 동기 신호를 활용하여 역위상 제거 신호를 생성하고 출력한다. 셋째, 데이터링크 수신 안테나를 통해 입력되는 모든 수신 신호와 제거 신호를 혼합하여 정제된 신호를 출력한다. 마지막으로, 피드백 구조를 적용해 잔여 간섭 신호를 추가적으로 제거한다. 구체적으로, 재밍간섭 제거 장치의 간섭신호 검출부로 재밍간섭 신호가 입력되면 간섭신호 검출부 내의 30 dB 방향성 결합기를 거쳐 재밍간섭 신호 검출을 위한 동기신호로 활용된다. 동시에 혼합검출신호 분배부 내 10 dB 및 30 dB 방향성 결합기를 통해 수신 신호가 검출신호로 활용된다.

표 1. 재밍간섭 제거 장치 목표 성능
 Table 1. Specification of jamming-interference cancellation board.

Parameter	Specification
Operating frequency range (CW)	200~2,200 MHz
Operating frequency (FM)	900, 1,000, 1,100, 1,200 MHz (BW: 4 MHz)
Maximum jamming input power	≤1 W
Interference cancellation ratio	≥30 dB

이 두 신호는 제거신호 검출부로 입력 후, 제거신호 검출부 내의 복조기(demodulator)를 통해 두 신호의 위상차를 IQ 신호로 변환된 뒤 제거신호 제어부로 전송된다.

제거신호 제어부는 송신 전력(P_{tx})를 기반으로 입력된 IQ 신호의 세기와 위상 제어를 통해 간섭제거 신호 생성을 위해 IQ 신호를 최적화하는 역할을 한다. 최적화 과정의 flow-chart는 다음과 같다.

1. Start

알고리즘 초기화: 수신전력 P_{rx} 추정, DAC Scale s 및 위상 ϕ 초기값 설정

2. 수신 전력 추정

3. 초기 제거 신호 생성

MDSM ATT 설정 → 목표 제거 전력 P_{req} 산출

4. DAC scale 및 phase 탐색(루프 시작)

5. 수렴 조건 확인

- 전력 감소(간섭제거)가 더 이상 없는 경우 → 루프 종료
- 아니면 → 루프 반복

6. 최적값 채택

7. End

수신부의 입력 전력은 식 (1)과 같이 모델링된다. 이때, L_k 는 경로 손실을 의미한다.

$$P_{rx} = P_{tx} + L_k \tag{1}$$

혼합검출신호 분배부의 출력 전력($P_{m\text{dsd},out}$)은 주파수 대역에 따라 증폭 경로와 bypass 경로로 구분되며, 이는 식 (2)와 같다. 이때, C 는 coupler loss, $A_{m\text{dsd}}$ 는 가변 감쇄값을 의미한다.

$$P_{m\text{dsd},out} = P_{rx} - C + G_{amp,m\text{dsd}}(k) - A_{m\text{dsd}}, \quad f \leq 100 \text{ MHz}$$

$$P_{m\text{dsd},out} = P_{rx} - C + G_{bypass,m\text{dsd}}(k) - A_{m\text{dsd}}, \quad f \geq 100 \text{ MHz} \tag{2}$$

목표 제거 전력(P_{req})는 수신부 입력 전력 대비 5 dB 높은 값으로 정의한다. 이를 기반으로 테이블 보상법을 통해 초기 DAC scale과 위상의 초기값을 설정 후, IQ 신호($I[n]$, $Q[n]$)로부터 복조 전력(P_{demod})을 식 (3) 혹은 FFT peak 기반 정의인 식 (4)를 통해 산출한다.

$$P_{demod} = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{I[n]^2 + Q[n]^2} \right) \quad (3)$$

$$P_{demod} = 20 \log_{10} (\max_k |X[k]|),$$

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} (I[n] + jQ[n]) e^{-j2\pi k n / N} \quad (4)$$

또한, 제거 신호 최적화 과정은 feed-back 기반 탐색을 통해 DAC scale(s)과 위상(Φ)을 일정 간격 변화시키며 식 (5)의 조건에 수렴하도록 반복 수행하며, 최종적으로 전력 감소가 수렴하는 지점에서 DAC scale(s)과 위상(Φ)의 최적값으로 선정한다.

$$P_{demod}(s + \Delta s) < P_{demod}(s) \Rightarrow s \leftarrow s + \Delta s$$

$$P_{demod}(\Phi + \Delta \Phi) < P_{demod}(\Phi) \Rightarrow \Phi \leftarrow \Phi + \Delta \Phi \quad (5)$$

제거신호 제어부에서 이러한 과정을 거쳐 선정된 DAC의 I/Q 신호는 제거신호 혼합부의 변조기(modulator)로 입력되며, 변조기를 통해 동기 신호와 혼합하여 제거 신호로 변환된다. 변환된 제거 신호는 혼합검출신호 분배부의 coupler를 통해 재밍간섭 신호와 혼합되어 재밍간섭 신호를 제거한다.

III. 제작 및 측정 결과

그림 3은 제작된 재밍간섭 제거 장치의 형상을 나타내는 그림으로, 제작된 장치의 전체 크기는 $42.7 \times 19 \times 27 \text{ cm}^3$ (가로×세로×높이), 무게는 15 kg이다. 그림 4는 제작된 재밍간섭 제거 장치의 성능 검증을 위한 측정 셋업을 나타내



그림 3. 재밍간섭 제거 장치 제작 형상
Fig. 3. Photograph of manufactured jamming-interference cancellation board.

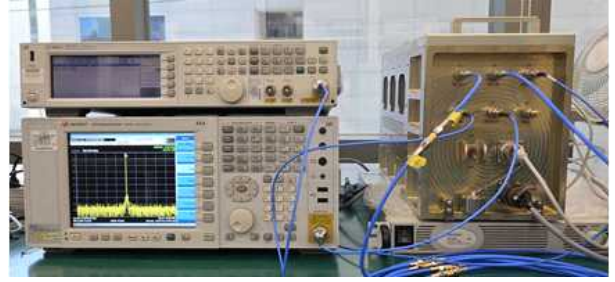
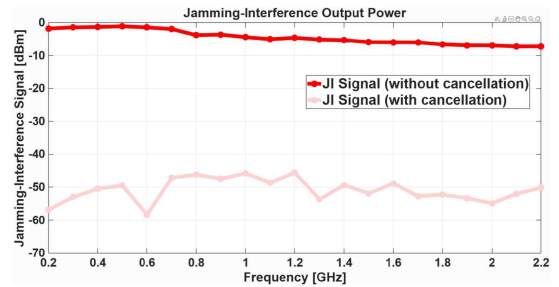


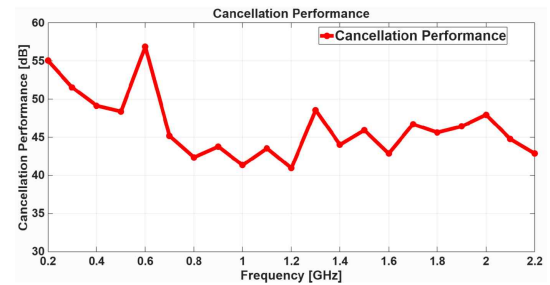
그림 4. 재밍간섭 제거 장치 측정 셋업
Fig. 4. Measurement setup of jamming-interference cancellation board.

는 그림으로 고출력(1 W) 재밍 신호원(CW 및 FM) 모의를 위한 신호발생기(Agilent N5182A), 신호증폭기(OPHIR 5264RE) 및 재밍간섭 신호 출력과 제거 성능 확인을 위한 신호분석기(Keysight N9040B)를 활용하여 측정하였다.

그림 5는 200~2,200 MHz 범위에서 CW 신호(송신부

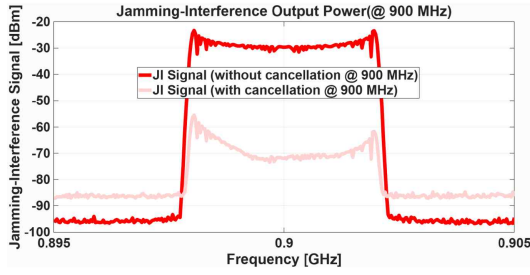


(a) 재밍간섭 신호(CW) 출력 전력 측정 결과
(a) Measurement result of jamming-interference signal (CW)

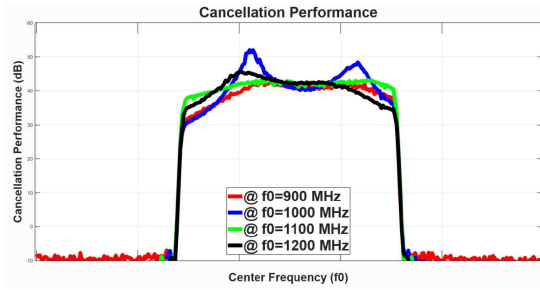


(b) 재밍간섭 제거 성능 측정 결과
(b) Measurement result of jamming-interference cancellation performance

그림 5. 재밍간섭 신호(CW) 출력 및 제거 성능 측정 결과
Fig. 5. Measurement result of jamming-interference signal output power and cancellation performance.



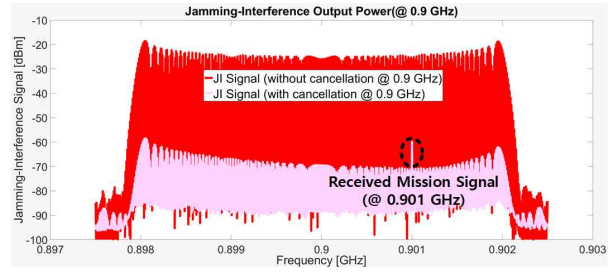
(a) 재밍간섭 신호(FM) 출력 전력 측정 결과
(a) Measurement result of jamming-interference signal (FM)



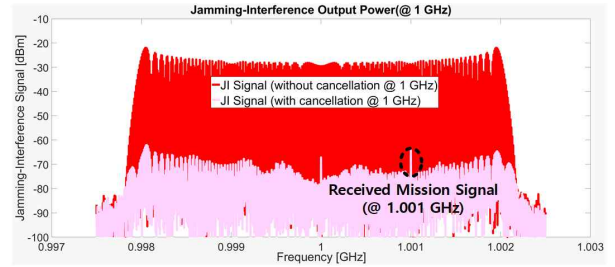
(b) 재밍간섭 제거 성능 측정 결과
(b) Measurement result of jamming-interference cancellation performance

그림 6. 재밍간섭 신호(FM) 출력 및 제거 성능 측정 결과
Fig. 6. Measurement result of jamming-interference signal (FM) output power and cancellation performance.

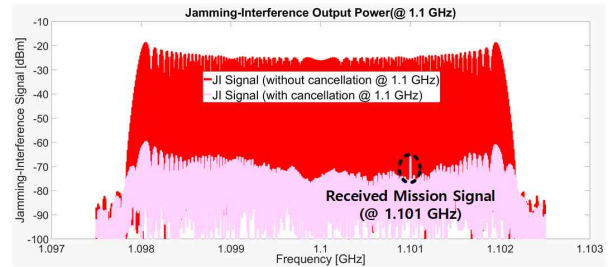
입력: 30 dBm 기준)에 대한 재밍간섭 제거 성능 측정결과를 나타내는 그림으로, 측정 결과 최소 40.95 dB, 최대 56.88 dB의 재밍간섭 제거 성능을 확인하였으며, 목표 성능인 30 dB 이상을 달성하였다. 그림 6은 900, 1,000, 1,100, 1,200 MHz의 중심 주파수 그리고 4 MHz 대역폭의 FM 대역 재밍 신호원(송신부 입력: 30 dBm 기준)에 대한 재밍간섭 제거 성능 측정 결과를 나타낸 그림으로, 측정 결과 각각의 주파수 대역에 해당하는 FM 재밍 신호에 대해 목표 성능인 30 dB 이상의 재밍간섭 제거 성능을 달성하였다. 또한, 추가적으로 SNR에 따른 재밍간섭 제거 성능 분석을 위해 그림 7과 같이 1 MHz 오프셋 CW 신호(수신 신호 모의)가 포함된 FM 재밍간섭 신호에 대한 제거 성능 또한 검증하였다. 측정 결과, 간섭 제거 전에는 재밍간섭 신호의 중심 주파수에서 1 MHz 오프셋인 CW 신호는 재밍간섭 신호 대비 신호가 현저히 약하기 때문



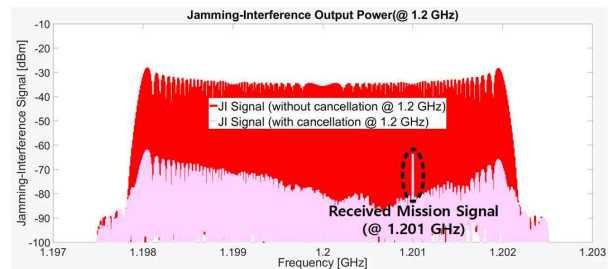
(a) 900 MHz



(b) 1,000 MHz



(c) 1,100 MHz



(d) 1,200 MHz

그림 7. 1 MHz 오프셋 CW 신호가 포함된 FM 재밍간섭 신호의 출력 전력 및 제거 성능 측정 결과

Fig. 7. Measurement result of output power and cancellation performance of FM jamming-interference mixed with 1 MHz-offset CW signals.

표 2. 해외 선진 기술 사례와의 성능 비교
Table 2. Comparison with overseas advanced equipment.

Specification	ICE 7201 (UK)	Rescue 21 ICU (USA)	This paper
Frequency (MHz)	30~512	150~172	220~2,200 (CW)900, 1,000, 1,100, 1,200 (FM)
SIC (dB)	40	40	Minimum 40/ Minimum 30

에 간섭 신호로 인해 수신 신호가 보이지 않지만, 간섭 제거 후, 최소 30 dB 이상의 간섭 제거로 인해 1 MHz 오프셋 CW 신호가 수신되는 것을 확인할 수 있다(표 2).

IV. 결 론

본 논문에서는 전자전 시스템에 있어 전이중 통신 방식의 적용 가능성에 관한 연구와 그 중, 전이중 통신 방식 적용에 따른 자체 간섭의 최소화를 위한 적응형 광대역 제밍간섭 제거 장치를 설계 및 제작 후 측정 결과를 확인하였다. 제작한 제밍간섭 제거 장치는 200~2,200 MHz 주파수 범위 내의 CW 신호(1 W)에 대해 최소 40 dB 이상의 간섭 제거 성능 달성 및 기만 제밍(FM) 신호(1 W)에 대해 최소 30 dB 이상의 간섭제거 성능을 달성하였으며, 목표 성능을 충족한 것을 확인하였다. 연구 결과를 기반으로, 본 기술은 전술 환경에서 전자공격(EA) 수행 중에도 야근 데이터링크 수신을 동시에 유지할 수 있어 작전 통신 효율 향상 및 응답 지연 최소화에 기여할 수 있으며, 제안된 실시간 피드백 기반 간섭 제거 구조는 동적 전장 환경에서도 안정적인 링크 품질 유지와 상황 인식(SSA) 확보에 유리하며, 향후 제밍, 정찰 및 통신 기능이 통합된 다기능 전자전 체계의 핵심 기술로 확장할 수 있다. 추가적으로 향후 연구에서는 FM 신호 외 PSK, FSK 등 다양한 변조 기법의 제밍 신호원에 대한 간섭 제거 최적화 그리고, 송/수신 안테나 간의 공간적 결합 및 반사파 요소를 포함한 무선 채널 기반 실험 환경 구축 및 사전 시험 진행 및 실제 전자전 운용 상황 모의를 통한 간섭 제거 성능 측정 및 비교를 진행할 예정이다.

References

- [1] K. Pärilin, T. Riihonen, V. L. Nir, M. Bowyer, T. Ranstrom, and E. Axell, "Full-duplex tactical information and electronic warfare systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 8, pp. 73-79, Aug. 2021.
- [2] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, H. Rantanen, T. Saarelainen, and M. Valkama, "Inband full-duplex radio transceivers: A paradigm shift in tactical communications and electronic warfare?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 30-36, Oct. 2017.
- [3] T. Huusari, Y. S. Choi, P. Liikkanen, D. Korpi, S. Talwar, and M. Valkama, "Wideband self-adaptive RF cancellation circuit for full-duplex radio: Operating principle and measurements," in *Proceedings of the 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference(VTC Spring)*, Glasgow, May 2015.
- [4] M. G. Kim, C. An, and H. G. Ryu, "Effective self-interference cancellation for IBFD(in-band full duplex) communication system," in *Proceedings of the 2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks(ICUFN)*, Zagreb, Jul. 2019, pp. 490-493.
- [5] J. Zhang, F. He, W. Li, Y. Li, Q. Wang, and S. Ge, et al., "Self-interference cancellation: A comprehensive review from circuits and fields perspectives," *Electronics*, vol. 11, no. 2, p. 172, Jan. 2022.
- [6] W. S. Liao, O. Zhao, K. Li, H. Kawasaki, and T. Matsumura, "Implementation of in-band full-duplex using software defined radio with adaptive filter-based self-interference cancellation," *Future Internet*, vol. 15, no. 11, p. 360, Nov. 2023.
- [7] A. Vihelä, M. Turunen, M. Heino, and T. Riihonen, "Adaptive RF self-interference canceller control and spectrum sensing in full-duplex EW radio," in *Proceedings of the 2024 International Conference on Military Communication and Information Systems(ICMCIS)*, Koblenz, Apr. 2024.
- [8] J. Marin, M. Turunen, M. Bernhardt, and T. Riihonen, "Self-interference cancelation performance in full-duplex jamming and spectrum monitoring," in *Proceedings of the*

2021 International Conference on Military Communication and Information Systems(ICMCIS), Hague, May 2021.

- [9] M. Heino, M. Turunen, M. Vuorenmaa, and T. Riihonen, "Design of RF self-interference cancellation circuit for 100-W full-duplex radio at 225~400 MHz," in *Proceedings of the 2021 International Conference on Military Communi-*

- cation and Information Systems(ICMCIS)*, Hague, May 2021.
[10] D. Lee, C. S. Bae, J. W. Song, S. T. Kim, and J. Oh, "Self-interference cancellation technology using symmetrical delay line-based ladder structure RF-FIR filter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 7, pp. 528-534, Jul. 2024.

김 빛 찬 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7127-4234>



2016년 3월: 숭실대학교 전자정보공학부
IT융합학과 (공학사)
2022년 3월: 숭실대학교 지능형반도체학
과 (공학석사)
2024년 1월~현재: LIG넥스원 전자기전연
구소 연구원
[주 관심분야] RF 송수신기, 재밍 시스템,
전자전 시스템 등

조 상 왕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8799-1684>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학
부 (공학사)
2007년 12월~현재: LIG넥스원 전자기전
연구소 수석연구원
[주 관심분야] RF 수신기, 재밍 시스템,
전자전 시스템 등

김 성 민 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-0183-9738>



2016년 2월: 순천향대학교 전기공학 (공학
사)
2018년 2월: 순천향대학원 전기통신시스
템공학 (공학석사)
2023년 10월~현재: LIG넥스원 전자기전
연구소 선임연구원
[주 관심분야] RF 송수신기, 마이크로파
수동소자 해석 및 설계, 전자전 시스템 등

고 재 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0692-2220>



1997년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학
사)
1997년 1월~현재: LIG넥스원 전자기전연
구소 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 전자공격
기법 개발 등

김 두 환 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1066-2468>



2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공
학 (공학사)
2017년 2월: 숭실대학원 전자공학 (공학석
사)
2017년 10월~현재: LIG 넥스원 전자기전
연구소 선임연구원
[주 관심분야] 디지털 하드웨어, RF 재밍
시스템, 전자전 시스템 등