

# L-Band 자기간섭 제거를 위한 TTD(True-Time Delay) 기반 시간제어장치의 유효성 검증

## Verification of TTD Based Time Control Device for SI Cancellation in the L-Band

최주호\*\*\* · 김빛찬\*\*\* · 김성민\*\*\* · 김두환\*\*\* · 조상왕\*\*\* · 고재현\*\*\*

Ju-Ho Choi\*\*\* · Bit-Chan Kim\*\*\* · Sung-Min Kim\*\*\* · Doo-Hwan Kim\*\*\* · Sang-Wang Jo\*\*\* · Jae-Heon Ko\*\*\*

### 요 약

본 논문은 위성 항법 시스템(GNSS)에서 주파수 대역인 L밴드(1~2 GHz)에서의 자기 간섭(SI, self-interference) 제거 장치의 성능을 확보하기 위해, TTD(true-time delay) 기반의 시간 지연 제어 장치를 제작하여 그 성능을 실험적으로 검증하였다. 제작된 시간지연 제어 모듈은 TTD 소자를 활용하여 ps(picosecond) 단위의 정밀한 시간 지연 제어 기능 구현을 목표로 L-band에서 시간지연 제어 모듈의 성능을 측정하였다. 실험 결과, 99.99 % 이상의 높은 자기간섭 신호의 상쇄율을 달성하기 위한 ps 단위의 시간지연 정확도와 자기간섭 제거를 성공적으로 입증하였다.

### Abstract

This study experimentally validated the performance of a true-time delay (TTD)-based time control device developed to ensure the high efficiency of a self-interference (SI) cancellation system operating in the L-band (1~2 GHz) frequency range of global navigation satellite systems (GNSS). The fabricated time-delay control module utilizes TTD elements to implement precise time-delay control functionality with picosecond resolution. The performance of the module, specifically its time delay control capability, was thoroughly evaluated in the L-band. The experimental results successfully verified the picosecond-level time delay accuracy, which is essential for achieving a high SI signal cancellation rate. Furthermore, the effectiveness of the module in achieving successful self-interference cancellation with a high signal cancellation rate exceeding 99.99 %, was empirically demonstrated.

Key words: True-Time Delay, Self-Interference Cancellation, L-Band

### I. 서 론

현대 사회에서 위성 항법 시스템(GNSS, global navi-

gation satellite system)은 위치 결정, 시간 동기화, 정밀 유도 등 국방 및 민간 분야 전반에 걸쳐 핵심적인 인프라로

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

\*온폼(Onpoom Co., Ltd)

\*\*상명대학교 스포츠ICT융합학과 석사과정

\*\*\*LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received October 2, 2025 ; Revised October 16, 2025 ; Accepted November 5, 2025. (ID No. 20251002-118)

· Corresponding Author: Ju-Ho Choi (e-mail: kchoi612@gmail.com)

서 기능하고 있다. GNSS 서비스는 주로 L-band(1~2 GHz) 주파수 대역을 활용하며, 미약한 세기의 위성 신호를 높은 신뢰도로 수신하는 것이 시스템의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소이다<sup>[1]</sup>.

최근 고성능 및 다기능 GNSS 시스템에 대한 요구가 증대됨에 따라, 특히 송신기와 수신기가 근접하게 배치되거나 동일 주파수 대역에서 동시 전이중(full-duplex) 통신을 수행해야 하는 환경에서 심각한 문제가 발생한다. 이는 송신단에서 방출된 신호가 직접 수신단으로 유입되는 자기 간섭(SI, self-interference)으로, 위성으로부터 오는 극히 미약한 신호의 수신을 방해하고 수신기의 감도 및 동적 범위를 심각하게 저해한다. 따라서 안정적이고 고성능의 GNSS 운용을 위해서는 이 강력한 SI 신호를 효과적으로 제거하는 것이 필수적인 선행 조건이다<sup>[2~4]</sup>.

SI 신호를 제거하는 기술은 일반적으로 아날로그 영역에서의 제거와 디지털 영역에서의 제거로 나뉜다<sup>[5]</sup>. 이 중 아날로그 제거 기술은 수신단의 전단(front-end)에서 SI 신호를 감쇄시켜 아날로그-디지털 변환기(ADC)의 포화(saturation)를 방지하는 역할을 수행하며, 시스템의 전체 성능 확보에 결정적인 영향을 미친다<sup>[6]</sup>.

기존의 협대역 시스템을 위한 SI 제거 장치는 주로 협대역 통신 환경을 목표로 개발되었으며, 위상 고정 루프(PLL, phase-locked loop)와 같은 위상 천이(phase shifting) 기반의 보상 방식을 활용해 왔다. 이 방식은 특정 중심 주파수에서 신호의 위상  $\Delta\phi$ 를  $180^\circ$  역위상으로 정밀하게 맞추는 데는 효율적이다. 그러나 위상 천이 방식은 신호의 지연 시간( $\Delta t$ )이 주파수( $f$ )에 의존적( $\Delta t = \Delta\phi/2\pi f$ )이므로, L-band(1~2 GHz)와 같이 대역폭이 넓은 신호가 들어오면 중심 주파수 외의 성분에서 위상 오차가 발생한다. 이로 인해 광대역 신호 전반에 걸쳐 정확한 상쇄 복사본의 SI 제거 성능이 급격히 저하되는 근본적인 한계가 존재한다<sup>[7][8]</sup>.

본 논문에서 제안하는 TTD(true-time delay) 기반의 시간 지연 제어 방식은 위상 천이 방식의 한계를 극복하기 위한 최적의 대안이다. TTD는 신호의 주파수 변화에 관계없이 일정한 시간 지연( $\Delta t$ )을 모든 주파수 성분에 동일하게 적용한다. 이는 푸리에 변환 관점에서 광대역 신호의 모든 주파수 성분에 선형적으로 비례하는 위상 변

화( $\Delta\phi = 2\pi f \times \Delta t$ )를 제공하며, 결과적으로 신호 파형의 왜곡 없이 원하는 시간 지연 보상을 가능하게 한다. 따라서 TTD 기반의 시간 제어 장치는 광대역 시스템, 특히 L-band GNSS 신호 환경에서 높은 자기 간섭 상쇄율 달성이 기대된다<sup>[9]</sup>.

본 논문은 상기 문제점을 해결하고 L-band GNSS 환경에서 광대역 자기 간섭 제거 장치의 성능을 확보하기 위해 TTD(true-time delay) 기반의 시간 지연 제어 장치를 핵심 구성 요소로 제안하고 그 유효성을 검증한다<sup>[10]~[12]</sup>. TTD 기술은 신호의 위상 변화가 주파수에 독립적인 진정한 의미의 시간 지연을 제공하므로, 광대역 SI 신호에 대한 정밀한 시간 보상을 통해 효과적인 상쇄 간섭(destructive interference)을 유도할 수 있다.

구체적으로, 본 연구에서는 L-band 대역폭 내에서 SI 신호의 미세한 시간 지연차를 보상하여 제거 효율을 극대화할 수 있도록, ps(picosecond) 단위의 정밀한 제어 기능을 목표로 하는 TTD 기반의 시간 지연 제어 모듈을 설계 및 제작하였다. 본 논문은 제작된 시간 지연 제어 모듈의 핵심 성능 지표인 시간 지연 정밀도 및 제어 유효성을 L-band 환경에서 실험적으로 측정하고 검증하는 데 주요 목적을 둔다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 TTD(true-time delay) 기술의 이론적 배경과 L-band 환경에서의 시간 지연 제어 모듈의 상세 설계 및 제작 과정에 대해 소개한다. III장에서는 제작된 모듈의 시간 지연 정밀도와 제어 범위를 검증하기 위한 실험 환경 구성을 제시하고, IV장에서는 장치의 성능을 검증한다. 그리고 마지막으로 V장에서는 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하고 결론을 제시한다.

## II. 연구 설계

### 2-1 아날로그 자기 간섭 제거 원리

본 연구는 중앙에 수신 안테나(Rx)를 배치하고 좌우에 비대칭으로 송신 안테나(Tx)를 배치한 구조를 적용하여 실제 무선 통신 환경의 불완전성을 모사한다. 이 비대칭 구조는 각 송신 안테나에서 수신 안테나로 도달하는 SI

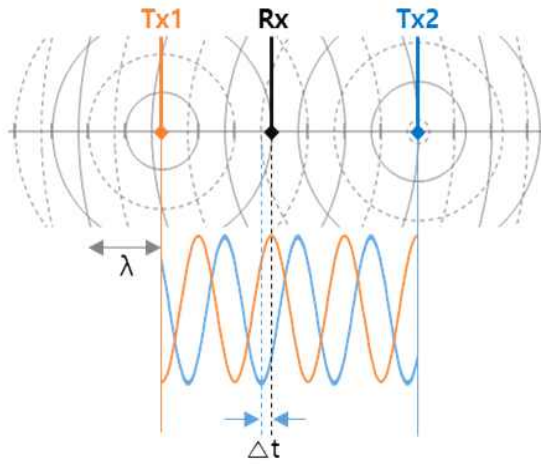


그림 1. 비대칭 송신 안테나에 의한 SI 위상차  
Fig. 1. Phase difference of SI by asymmetric antenna arrangement.

신호 경로의 길이 차이를 발생시키고, 그림 1과 같이 SI 신호들 사이에 고유의 시간 지연차가 발생한다.

TTD 기반 SIC는 이 경로 차이로 인해 발생하는 위상차를 TTD 소자를 이용하여 시간적으로 보상함으로써, 수신 안테나 지점에서 SI 신호와 SI 복사본 신호가 시간적으로 완벽하게 정렬되도록 유도한다. 이후  $180^\circ(N/2)$  반전된 역위상 상쇄 신호를 주입하여 상쇄 간섭(destructive interference)을 최대화하고 아날로그 영역에서 SI 신호를 크게 상쇄시킨다.

아날로그 SIC의 성능은 식 (1) 상쇄율로 정량화되며, L-band에서의 주파수별 상쇄율을 적용하여 식 (2)를 통해 위상차( $\Delta\phi$ )와 식 (3)으로 지연 시간차( $\Delta t$ )를 계산한다.

$$\text{상쇄율 } (C) = \sin^2(\Delta\phi/2) \tag{1}$$

$$\Delta\phi = 2\arcsin(\sqrt{C}) \tag{2}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{2\pi f} = \frac{\Delta\phi}{360^\circ \times f} \tag{3}$$

SI 상쇄율을 99.99%(40 dB) 이상 달성하기 위해서는 수 ps 단위의 정밀한 시간지연 제어 능력이 필수적이다. 표 1은 요구되는 SIC 성능에 따른 L-band에서의 최대 허용 지연 시간 간격( $\Delta t$ )을 보여준다.

표 1. SI 상쇄율에 대한 지연 시간 간격  
Table 1. Delay-time interval for SI cancellation rate.

SIC (%)	L-band delay time (ps)		
	1 GHz	1.5 GHz	2 GHz
99.99	6	4	3
99.9	20	13	10
99	64	43	32
95	144	96	72
90 or more	205	137	102

### 2-2 TTD 소자

상쇄 간섭의 위상차를 시간으로 보정하기 위한 소자로 아날로그 디바이스(Analog Devices)사에서 제공하는 ADAR4002-CSL은 단일 채널, 양방향 시간 지연 장치(TDU, true-time delay unit) 및 디지털 스텝 감쇠기(DSA, digital step attenuator)이다. 이 소자는 표 2에서 확인 가능한, 0.5 GHz에서 19 GHz에 이르는 넓은 주파수 대역폭을 지원하며, 50 Ω의 임피던스를 갖춘 두 개의 RF 포트를 통해 신호의 시간지연을 정밀하게 제어한다.

내부 신호 경로와 제어 메커니즘은 그림 2의 기능 블록

표 2. ADAR4002-CSL 주요 사양  
Table 2. ADAR4002-CSL key specifications.

Category	Specification
Product	ADAR4002-CSL (analog devices)
Function	Single-channel bidirectional TDU (true time delay unit) with DSA (digital step attenuator)
Frequency range	0.5~19 GHz
Time delay	- Range 0: Up to 508 ps (4 ps std. resolution) - Range 1: Up to 254ps (2 ps high resolution)
Attenuation	0~31.5 dB, 0.5 dB steps
Performance (@10 GHz)	Insertion loss: -16 to -20 dB Noise figure: 16~21 dB
Control	SPI, 14-bit shift register, 32 states
Package/power	14-lead LFCSP (3x2 mm), ~1 mW
Applications	Phased arrays, SATCOM, radar, test equipment

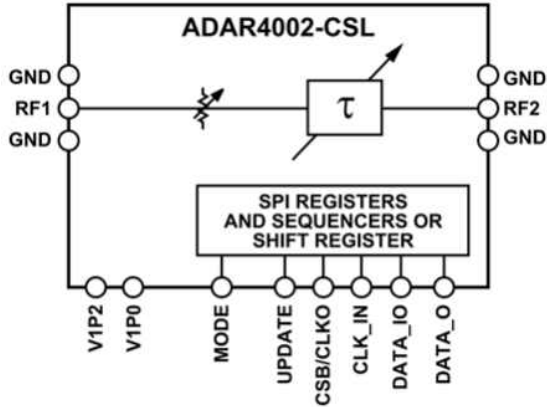


그림 2. ADAR4002-CSL 기능 블록도  
Fig. 2. ADAR4002-CSL functional block diagram.

도와 같이 RF1 포트와 RF2 포트 사이에 직렬로 연결된 가변 감쇠기와 지연 유닛( $\tau$ )이 포함된 구조로 지연 유닛은 7비트 프로그래밍이 가능하며, 4 ps 해상도의 최대 508 ps 지연을 제공하는 range 0과 2 ps 해상도의 최대 254 ps 지연을 제공하는 range 1을 지원한다.

TTD 소자는 SPI와 시프트 레지스터를 통해 제어가 되며, 여러 칩을 데이터 체인 방식으로 연결하여 확장성을 지원한다. 또한, 32개의 TDU 및 DSA 상태를 저장하는 레지스터 메모리가 포함되어 있어, UPDATE 핀을 통해 신속한 상태 전환이 가능한 온칩 시퀀서 기능을 제공한다.

### 2-3 TTD 기반의 자기 간섭 제거 장치

수 미터 이내의 송신 안테나 사이에 수신 안테나가 설치된 무인항공기와 같은 장치에서 TTD를 이용한 아날로그 영역에서의 자기 간섭 신호를 40 dB 이상 감쇄시키거나 완벽한 제거는 어려우므로, 이를 보완하기 위해 그림 3과 같이 아날로그 영역에서 SI 신호를 제거 후 남은 잔여 SI 신호는 디지털 영역으로 전달되며, 적응형 필터(adaptive filter)와 같은 DSP(digital signal processing) 기술을 통해 최종적으로 제거되어 시스템의 전체 SI 제거 성능을 극대화한다<sup>[13]</sup>.

그림 4의 시간지연 제어 모듈(TDCM, time delay control module)은 자기간섭 제거를 위한 핵심 모듈로, 송신 신호의 위상차를 제어하기 위한 TTD 기반의 시간지연 장치이다.

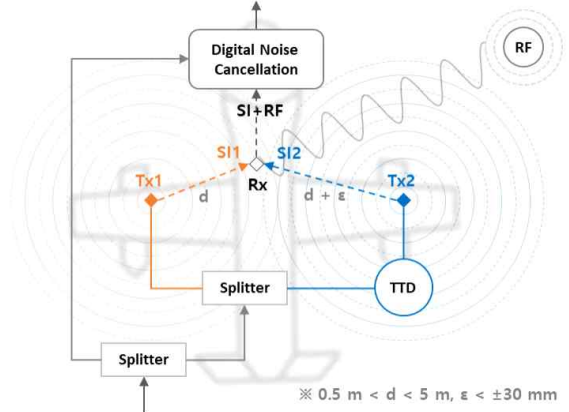
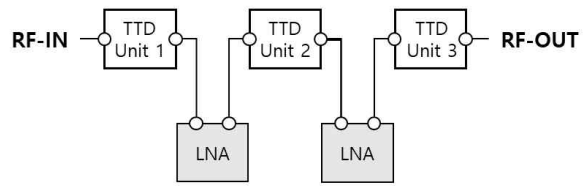


그림 3. 비대칭 안테나 배열의 TTD 자기간섭 제거  
Fig. 3. TTD self-interference cancellation with asymmetric antenna arrangement.



- TTD(True-Time Delay) : ADAR4002-CSL
- LNA(Low-Noise Amplifier) : HMC8410LP2FE

그림 4. 시간지연 제어 모듈 블록도  
Fig. 4. Schematic of time delay control module (TDCM).

## III. 검증

TTD 기반 아날로그 영역에서의 상쇄간섭과 디지털 영역에서의 시간 지연 보정을 구현하기 위해서는 ps 단위의 제어가 가능해야 한다. 이와 같이 TDCM의 성능을 검증하기 위해 그림 5와 같이 실험 환경을 구성하였다.

검증을 위한 시스템은 시간지연 제어장치(time delay controller), network analyzer와 제어PC(control PC)로 구성되어 있다. 자기간섭 신호의 시간차 보정을 위해 시간지연 제어장치의 시간지연 정확도를 측정한다.

지연시간은 10 ps에서 100 ps까지 20 ps 간격, 이후 100 ps ~1,500 ps 구간은 100 ps 간격으로 설정하였다. L-band에서 3개 주파수를 설정하였고, 측정 조건에 따른 주파수별 지연 시간의 오차를 측정하여 설정한 지연 시간과의 오차

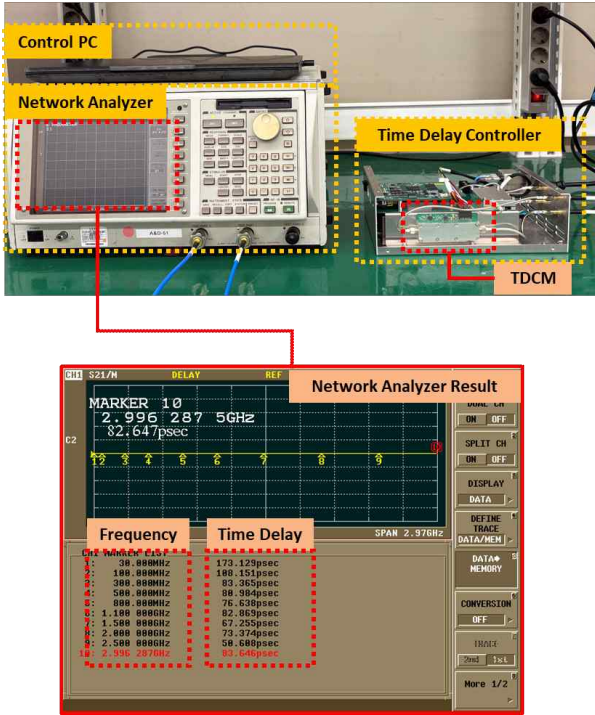


그림 5. 시간지연 제어 모듈(TDCM) 성능 측정  
Fig. 5. TDCM performance measurement environment.

로 성능을 검증한다.

#### IV. 결과 분석

실험 결과, TDCM의 시간지연 정확도는 TTD 소자의 최적 동작 주파수 대역(500 MHz 이상) 이상인 L-band(1~2 GHz)에서 안정적인 시간지연 성능을 제공하는 것으로 확인되었다.

특히, 10~1,000 ps 구간에서 그림 6과 같이 99.9 % 및 99.99 % SIC 달성이 가능한 오차 범위 내에서 안정적인 성능을 유지하였다. 이는 TDCM이 SIC에 필수적인 true-time delay 특성을 효과적으로 구현하고 있음을 입증한다.

#### V. 결론

본 연구는 위성항법시스템(GNSS)의 L-band(1~2 GHz) 대역에서 발생하는 자기 간섭(SI, self-interference) 신호를

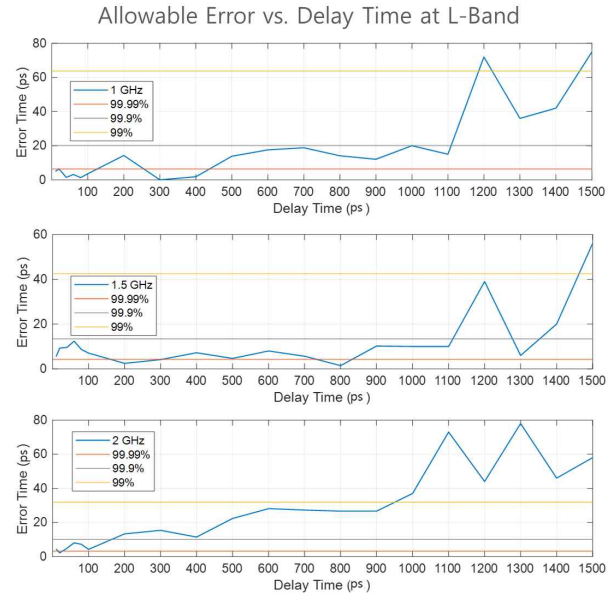


그림 6. L-band TDCM 성능 측정  
Fig. 6. TDCM performance measurement at L-band.

효과적으로 제거하기 위한 TTD(true-time delay) 기반 시간 지연 제어장치(TDCM, time delay control module)의 성능을 실험적으로 검증하였다.

L-band 주파수 대역은 GNSS 수신기, 위성통신 단말기, 전파 재밍(jamming) 장치, 전술용 RF 링크 시스템 등 다양한 장비가 동시 운용되는 구간으로, 동일 주파수 또는 인접 주파수에서 강한 송신 신호가 수신기로 유입되어 자기간섭 현상이 발생하기 쉽다. 이러한 간섭은 미약한 GNSS 신호의 수신 감도를 급격히 저하시켜, 위치결정 및 시간동기화 성능을 저해한다. 따라서 아날로그 및 디지털 영역에서의 정밀한 간섭 상쇄 기술이 필수적이다.

본 연구에서는 송신 신호의 역위상(180° 반전) 신호를 주입하여 아날로그 영역의 상쇄 간섭 효과를 구현하고, 디지털 영역에서는 TTD 기반 시간 지연 제어를 통해 잔여 간섭 신호를 보정하는 방식을 제안하였다. 이러한 상쇄 간섭 구현에는 ps 단위의 정밀한 시간 지연 제어가 가능한 장치가 필수적이다.

실험 결과, 제작된 TTD 기반 TDCM은 L-band(1~2 GHz) 대역에서 10 ps~1 ns 범위의 시간 지연을 안정적으로 제어하였으며, 설정값 대비 오차가 1 % 이내로 유지되

었다. 이를 통해 99.99 % (40 dB) 이상의 자기간섭 상쇄율 달성이 가능한 시간 정밀도를 확보하였다.

본 연구 결과는 TTD 기반 시간 지연 제어가 재밍 시스템 또는 GNSS 송수신기와 같은 L-band 자기간섭 발생 환경에서의 아날로그 상쇄 및 디지털 보정 효율을 동시에 향상시킬 수 있음을 실험적으로 입증한 것이다.

향후 연구에서는 3개 이상의 비대칭 송신 안테나 배치 구조에서의 TTD 기반 아날로그 제거와 디지털 영역의 적응형 DSP를 결합한 하이브리드 SIC 시스템에 대한 추가 성능 검증을 수행하여, 기술 상용화에 기여하고자 한다.

## References

- [1] S. Jing, X. Zhan, B. Liu, and Chen M, "Weak and dynamic GNSS signal tracking strategies for flight missions in the space service volume," *Sensors*, vol. 16, no. 9, Sep. 2016.
- [2] E. Ahmed, A. M. Eltawil, "All-digital self-interference cancellation technique for full-duplex systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3519-3532, Feb. 2015.
- [3] J. W. Kwak, M. S. Sim, I. W. Kang, J. Park, K. K. Wong, and C. B. Chae, "Analog self-interference cancellation with practical RF components for full-duplex radios," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 7, pp. 4552-4564, Jul. 2023.
- [4] C. W. Morgenstern, Y. Rong, A. Herschfelt, A. C. Molnar, A. B. Apsel, and D. G. Landon, et al., "Analog-domain self-interference cancellation for practical multi-tap full-duplex system: Theory, modeling, and algorithm," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 9, pp. 2796-2807, Jun. 2023.
- [5] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, and R. Wichman, "In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, Jun. 2014.
- [6] J. Wu, W. Cheng, J. Wang, J. Wang, and W. Zhang, "RIS-based self-interference cancellation for full-duplex broadband transmission," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 7, pp. 7159-7171, Jul. 2024.
- [7] B. Smida, A. Sabharwal, G. Fodor, G. Alexandropoulos, H. A. Suraweera, and C. B. Chae, "Full-duplex wireless for 6G: Progress brings new opportunities and challenges," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 9, pp. 2729-2750, Sep. 2023.
- [8] C. Wang, I. Abdo, C. Liu, C. da Gomez, J. Mayeda, and H. Herdian, et al., "A sub-THz full-duplex phased-array transceiver with self-interference cancellation and LO feedthrough suppression," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 59, no. 4, pp. 978-992, Apr. 2024.
- [9] S. K. Garakoui, "Wideband RF beamforming: Architectures, time-delays and CMOS implementations," Ph.D. dissertation, University of Twente, Enschede, Netherland, 2015.
- [10] R. Rotman, M. Tur, and L. Yaron, "True time delay in phased arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 504-518, Mar. 2016.
- [11] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband beam steering phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, Jun. 2017.
- [12] Y. Jeong, Y. Noh, M. Kim, S. Park, J. Choi, and J. Han, et al., "Design and fabrication of wideband high power transmission board using true time delay," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 10, pp. 802-809, Oct. 2024.
- [13] H. Lee, J. Kim, G. Choi, I. P. Roberts, J. Choi, and N. Lee, "Nonlinear self-interference cancellation with learnable orthonormal polynomials for full-duplex wireless systems," 2024. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.11094>

최 주 호 [온품/과장]

<https://orcid.org/0000-0001-6610-7853>



2004년 2월: 국민대학교 물리학과 (이학사)  
2025년 3월~현재: 상명대학교 스포츠ICT 융합학과 공학석사 과정  
2024년 9월~현재: (주)온품 RMS 사업팀 영업기획파트 과장  
[주 관심분야] EMS, BigData, 디지털트윈,

AR/VR 등

김 두 환 [LIG넥스원/선임연구원]

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



2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학 (공학사)  
2017년 2월: 숭실대학원 전자공학 (공학석사)  
2017년 10월~현재: LIG넥스원 전자기전 연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 디지털 하드웨어, RF 재밍

시스템, 전자전 시스템 등

김 빛 찬 [LIG넥스원/연구원]

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



2016년 3월: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합학과 (공학사)  
2022년 3월: 숭실대학교 지능형반도체학과 (공학석사)  
2024년 1월~현재: LIG넥스원 전자기전 연구소 연구원  
[주 관심분야] RF 수신기, 재밍 시스템,

전자전 시스템 등

조 상 왕 [LIG넥스원/수석연구원]

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



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (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 (공학사)  
2018년 2월: 순천향대학원 전기통신시스템공학 (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 (공학사)  
1997년 1월~현재: LIG넥스원 전자기전 연구소 수석연구원  
[주 관심분야] 전자전 시스템, 전자공격 기법 개발 등