

대칭형 지연 선로 기반 사다리 구조의 RF-FIR 필터를 이용한 자기 간섭 신호 제거 기술

Self-Interference Cancellation Technology Using Symmetrical Delay Line-Based Ladder Structure RF-FIR Filter

이다주 · 배창식* · 송종화* · 김성태* · 오준택

Daju Lee · Chang-Sik Bae* · Jong-Wha Song* · Sung-Tai Kim* · Juntaek Oh

요 약

본 논문에서는 대칭형 지연 선로 기반 사다리 구조의 RF-FIR 필터를 활용한 자기 간섭 제거기의 설계 결과를 제시한다. 제안된 자기 간섭 제거기는 mono-static 레이다 front-end에 적용되는 circulator의 낮은 격리도와 안테나의 임피던스 부정합에 따라서 발생하여 전달되는 수신부의 자기 간섭 신호를 효과적으로 제거함으로써 송·수신부 간 격리도의 향상이 가능하다. 제안된 필터는 크기 및 위상 조정되는 총 6-tap의 필터로 구성되어 있으며, 각 필터 탭에 대한 위상 지연 값이 3.1 GHz를 기준으로 구현되었다. 제안하는 자기 간섭 제거기는 측정 결과, 3.05~3.22 GHz의 주파수 범위에서 25 dB 이상의 자기 간섭 신호 제거 효과를 보이며, 이를 송수신부에 적용 시 3.04~3.22 GHz의 주파수 범위에서 50 dB 이상의 높은 송·수신부 격리도 특성을 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper presents the design results for a self-interference canceller (SIC) based on a symmetric delay-line radio frequency finite impulse response (RF-FIR) filter with a ladder structure. The proposed SIC effectively removes self-interference signals in the receiver caused by the low isolation of the circulator applied to the monostatic radar front end and the impedance mismatch of the antenna. Consequently, it enhances the isolation between the transmitter and receiver. The proposed filter consists of six taps with adjustable sizes and phases. The phase-delay values for each filter tap are implemented at a reference frequency of 3.1 GHz. The measurement results demonstrate that the proposed SIC achieves over 25 dB suppression of self-interference signals in the frequency range of 3.05 to 3.22 GHz. When applied to a monostatic radar transceiver with an RF circulator, it exhibits isolation strength of over 50 dB in the frequency range of 3.04 to 3.22 GHz.

Key words: Self-Interference Cancellation, Tx Leakage Signal, Radar Front-End, Finite Impulse Response, Isolation

I. 서 론

레이다 기술은 전자기파의 반사를 이용하여 대상체의

위치, 속도, 방향 등을 파악하는 탐지 기술로, 기존 적용 분야인 군사적 목적 이외에도 위성 통신, IoT 및 차량 충돌 방지 등 실생활의 다양한 영역에 적용되고 있다.

「이 논문은 한화시스템(Hanwha Systems)의 지원을 받아 수행된 연구임.」

송실대학교 지능형반도체학과 (Department of Intelligent Semiconductors, Soongsil University)

*한화시스템 레이더연구소(Radar Research Institute, Hanwha Systems)

· Manuscript received April 1, 2024 ; Revised April 29, 2024 ; Accepted May 29, 2024. (ID No. 20240401-033)

· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

이에 따라 최근 인공위성, 미사일, 운송수단 등과 같은 이동식 플랫폼에 적용하기 위해 시스템의 경량화 및 소형화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며^{[1][2]}, 그중 모노스태틱(monostatic) 레이더 시스템 구조를 기반으로 단일 안테나를 통해 송신 및 수신이 가능한 다양한 레이더 시스템에 관한 연구가 발표되었다^{[3]~[6]}. 이러한 레이더 시스템은 동일 주파수 대역에서 송신과 수신을 수행하는 특성으로 인해 송신기에서 수신기로 누설되는 자기 간섭(SI, self-interference)에 취약하다는 문제가 있다.

그림 1은 모노스태틱 레이더 시스템에서의 자기 간섭 신호 경로이며, 시스템 내부 및 외부 환경에 의한 반사 경로로 이루어진다. 시스템 내부 반사 경로에는 낮은 순환기 격리도에 의한 직접적인 경로(1번) 및 안테나 입력 반사 경로(2번)가 있으며, 시스템 외부 환경에 의한 반사 경로에는 클러터(clutter) 및 재밍(jamming)과 같이 목표에서 반사되어 수신되는 경로(3번)가 있다. 이러한 자기 간섭 신호들은 수신 신호와 더해져 수신부에 인가되는데, 일반적으로 수신 신호보다 최대 100 dB 강한 자기 간섭 신호가 수신됨에 따라 레이더 동작 성능이 저하되고, 수신기의 저잡음 증폭기 포화를 초래할 수 있으므로 이를 제거하는 기술이 요구된다^[7]. 일반적인 모노스태틱 레이더 front-end는 안테나 전단부에 순환기를 적용하여 송신 및 수신 신호 경로를 격리하나, 제한적인 순환기 격리도 특성으로 높은 송신 신호의 자기 간섭을 수신 신호 크기 이하로 충분히 억제하기 어렵다는 한계가 존재한다.

최근 탐색기 빔 조향 각도 및 외부 환경에 따라 실시간
으로 변화하는 자기 간섭 신호에 대응하여 디지털 신호
처리 및 소자를 통한 적응형 자기 간섭 신호 제거가 제

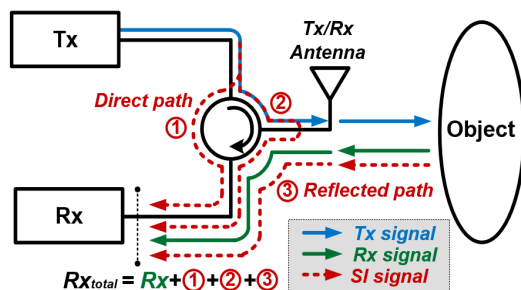


그림 1. 모노스테틱 레이더 시스템의 자기 간섭 신호 경로
Fig. 1. Path of SI signal in monostatic radar system.

안되었으나, 회로 동작을 위한 시스템 환경이 비대하고 구현 난도가 높아 이동식 플랫폼에 적용하기에 제한이 있다^[8].

본 논문에서는 전송 선로 및 RF 수동 소자로 구성된 단순한 회로 구조를 통해 높은 송·수신부 격리도 구현으로 다양한 시스템 적용에 용이한 자기 간섭 신호 제거 기술을 연구하였으며, 이중 앞서 언급한 자기 간섭 신호 경로 중 수신부에 가장 직접적인 영향을 줄 수 있는 1번 경로에 의한 자기 간섭 신호의 억제가 가능하도록 최적화하였다. 제안된 회로는 대칭형 지연 선로를 적용한 사다리 구조의 RF 유한 임펄스응답(FIR, finite impulse response) 필터를 기반으로 구현된 자기 간섭 제거기(SI canceller)로, 이를 통해 송·수신부 간 격리도를 향상시킴으로써, 자기 간섭 신호의 억제 및 제거가 가능한 기술을 제시한다.

II. 회로 설계

그림 2는 제안하는 자기 간섭 신호 제거 시스템이 적용된 모노스테틱 레이다 front-end 블록도로, 10 dB 방향성 결합기, RF 전력 결합기 및 RF-FIR 필터 기반의 자기 간섭 제거기로 구성되어 있으며, 동작 원리는 다음과 같다. 송신부 전력 증폭기(PA, power amplifier) 출력이 연결된

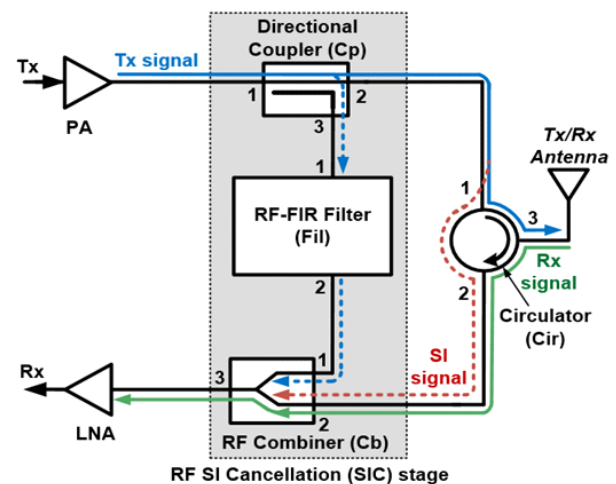


그림 2. 제안하는 자기 간섭 제거 시스템이 적용된 모노스태틱 레이더 front-end 블록도

Fig. 2. Block diagram of monostatic radar front-end with proposed SI canceling system.

10 dB 방향성 결합기를 통해 일부 분기하고, 신호가 순환기에서 누설되는 자기 간섭 신호와 동일한 크기 및 역 위상 응답을 갖도록 신호의 크기 및 위상을 RF-FIR 필터를 통해 조절한다. 이를 RF 전력 결합기를 통해 자기 간섭 신호와 결합 및 상쇄하여 수신부로 누설되는 자기 간섭 신호의 억제가 가능하다.

이를 기반으로, 높은 자기 간섭 신호 제거를 위해 제안된 회로 구조에서의 신호 응답 특성을 분석하였으며 다음과 같다. 송신부의 전력 증폭기에서 출력된 송신 신호인 Tx는 방향성 결합기를 통해 일부 분기되는 신호인 TxS_{31cp} 를 제외하고 순환기를 통해 안테나로 출력되며, 순환기에서 누설된 자기 간섭 신호인 $TxS_{21cp}S_{21cir}$ 가 누설경로를 통해 수신부로 입력된다. TxS_{31cp} 는 필터에 입력되어 크기 및 위상이 조정된 $TxS_{31cp}S_{21Filt}$ 이 출력되며, 수신부 LNA 앞에서 RF 전력 결합기를 통해 자기 간섭 신호와 결합 후 상쇄된다. 이때, N개의 탭을 갖는 RF-FIR 필터를 포함한 회로 구성 요소들의 입출력이 정합되었다고 가정하였으며, 이를 위한 이상적인 필터 출력 응답인 $H_{Fil}(j\omega)$ 을 유도하는 과정은 식 (1)과 같다^[9].

$$\begin{aligned} S_{31_{cp}} S_{21_{Fil}} &= -(S_{21_{cp}} S_{21_{cir}}) \\ S_{31_{cp}} S_{21_{Fil}} &= H_{Fil}(j\omega) \\ (S_{11_{Fil}} = S_{22_{Fil}} = \Gamma_L = \Gamma_S \approx 0) \\ H_{Fil}(j\omega) &= \sum_{k=1}^N b_k e^{-j\omega(TD_k)(\theta_{PIK})} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 3은 제안하는 자기 간섭 제거기에 적용된 RF-FIR 필터의 도식도이며, 필터의 탭 수에 따른 자기 간섭 신호와의 크기 및 위상 오차와 동시에 회로 면적을 고려하여 6개 탭(tap)의 RF-FIR 필터 구조를 선정하였다^[8]. Fil_{in} 및

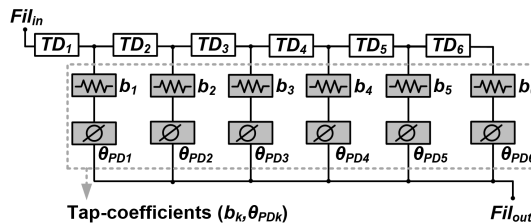


그림 3. 제안하는 6-tap RF-FIR 필터 도식도
Fig. 3. Schematic of proposed 6-tap FIR filter.

Fil_{out} 은 필터의 입력과 출력을 나타내며, 각 탭은 시간 지연 선로(time delay line)로 연결된 구조를 가지고 b_n 및 θ_{pdn} 는 N번째 탭의 필터 계수와 위상 지연 값을 나타낸다.

제안된 회로 구조를 기반으로 자기 간섭 신호 제거 성능을 극대화하기 위해서는 순환기에서 누설된 신호 대비 자기 간섭 제거기를 통과한 신호와의 오차가 최소화되어야 한다. 본 연구에서는 최적의 RF-FIR 필터 설계를 위해 최소 자승 추정법(LSE, least square estimation) 알고리즘을 적용한 필터 설계 최적화 과정을 적용하였으며, 시간 지연 및 필터 탭의 응답 계수인 가중치를 MATLAB 시뮬레이션을 통해 수식적으로 계산하여 자기 간섭 신호의 크기 및 역 위상 응답과의 오차를 최소화하였다.

LSE 알고리즘은 선형 연립 방정식인 $Ax=b$ 를 기반으로 상대 잔차 오차인 $\|b-Ax\|/\|b\|$ 을 최소화하는 예측 벡터 x를 계산하며, 지정된 초기 추측 값에서부터 오차값이 허용 오차 범위 이내로 수렴되기까지 계산 과정을 반복 수행한다. 제안된 회로는 높은 정확도 및 고성능 회로 구현을 위해 방향성 결합기와 순환기 및 FIR-Filter 사이의 연결을 고려하였으며, 회로 최적화 설계 시 방향성 결합기 회로와 RF 순환기 모듈을 통합한 시스템에서 필터에 입사되는 신호인 방향성 결합기의 커플링 응답과 추정 목표 신호인 RF 순환기의 출력 응답에 대한 측정 데이터를 반영하였다. RF-FIR 필터 설계 최적화 시뮬레이션을 통해 추출된 시간 지연 값인 $TD=446^\circ$ 및 $b_n=(9, 6.4, 16.7, 15.7, 21.6, 19.9)$ [dB], $\theta_{pdn}=(101, 310, 1, 345, 49, 340)^\circ$ 를 회로 설계에 적용하여 RF-FIR 필터를 구현하였다.

그림 4는 시뮬레이션을 통해 추출된 필터 계수 및 지연

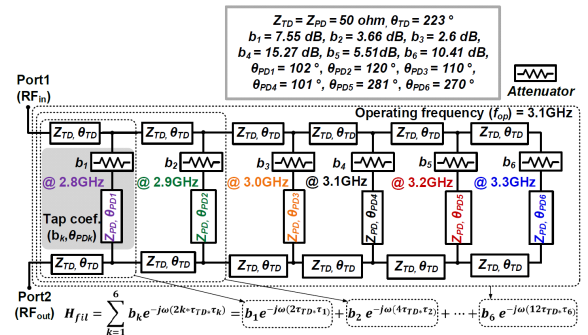


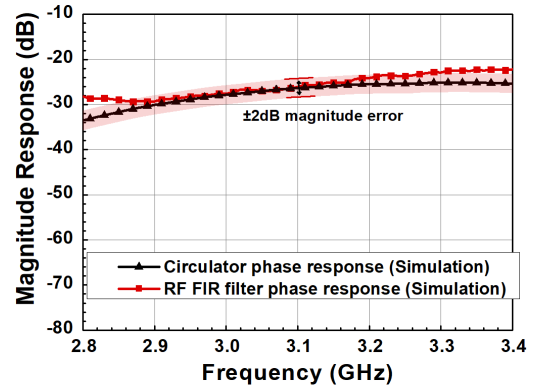
그림 4. 제안하는 자기 간섭 제거기 도식도
Fig. 4. Schematic of proposed SI canceller.

값을 기반으로 설계된 대칭형 지연 선로 기반 사다리 구조의 RF-FIR 필터 도식도이다. 제안된 회로는 크기 응답 조절을 위한 RF 감쇄기 소자 및 시간 지연을 위한 전송 선로로 구성된 6개의 탭으로 구성되었으며, 각 탭 사이에 연결된 지연 선로를 필터 상·하단에 대칭으로 구성하여 탭 별로 시간 지연이 누적되어 증가하는 구조를 구현함과 동시에 전체 회로의 크기를 축소하였다.

그림 5는 주파수에 따른 RF FIR 필터 및 순환기의 S_{21} 신호 크기 및 위상 응답 시뮬레이션 결과로, 그림 5(a)와 같이 2.91~3.36 GHz의 주파수 대역에서 2 dB 이하의 크기 응답 오차를 가지며, 그림 5(b)와 같이 2.87~3.22 GHz의 주파수 대역에서 위상차 180°를 기준으로 하였을 때 10° 이하의 위상 오차를 갖는다. 또한 그림 5(c)와 같이 입력 및 출력 포트에서의 $|S_{11}|$ 및 $|S_{22}|$ 가 2.6~3.6 GHz의 범위에서 -10 dB 이하인 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

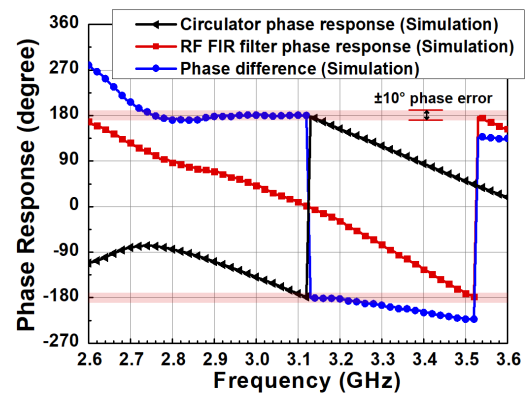
III. 측정 결과

그림 6은 제안된 자기 간섭 신호 제거기의 레이아웃 및 제작된 회로 기판 사진으로, 설계된 회로의 면적은 112.7×74.6 mm²이다. RF 감쇄기 소자는 PAT 시리즈를 사용하였으며, 설계 시 사용된 순환기는 U-G002.004S.1을 적용하였다. 또한 지연 선로를 접어 구현함으로써 회로 면적을 최소화하였다. 그림 7은 제안된 자기 간섭 제거기의 시뮬레이션 및 측정 결과이며, 그림 7(a)와 같이 3.05~3.24 GHz의 주파수 대역에서 2 dB 이하의 크기 오차를 가지며, 위상 응답 오차의 경우, 그림 7(b)와 같이 3.02~3.26 GHz의 주파수 대역에서 10° 이하의 위상 오차가 있음을 측정을 통해 검증하였다. 측정 결과, 회로 제작 시 발생 가능한 공정 오차 및 RF 감쇄기 소자 등 회로 분석 시 반영되지 않은 기생 성분 등에 의해 2.83~2.91 GHz 주파수 대역에서의 시뮬레이션 및 측정 결과 간 다소 오차가 있음을 확인하였다. 이를 분석하기 위해 회로 제작 시 사용된 RF 감쇄기 소자의 단일 검증 회로를 제작 및 측정하였으며, 설계 시 반영되지 못한 소자의 감쇄 및 위상 지연 값을 시뮬레이션 상에서 측정 데이터에 추가함으로써 오차를 보상하였다. 그림 8은 제안된 자기 간섭



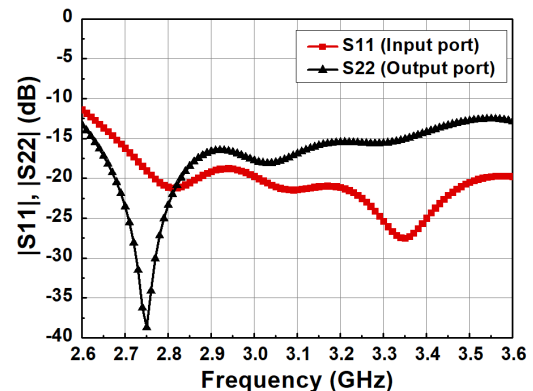
(a) S_{21} 크기 응답

(a) Magnitude response of S_{21}



(b) S_{21} 위상 응답

(b) Phase response of S_{21}



(c) $|S_{11}|$ 및 $|S_{22}|$ 시뮬레이션 결과

(c) Simulated $|S_{11}|$ and $|S_{22}|$

그림 5. 제안된 자기 간섭 제거기의 S-parameter 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulated S-parameter of proposed SI canceller.

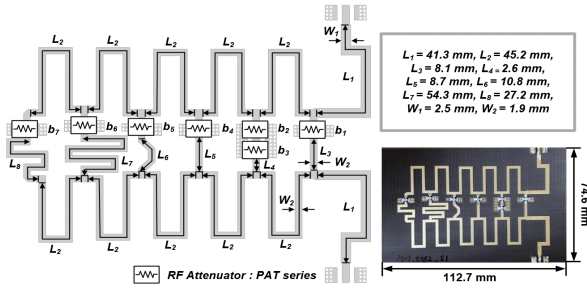
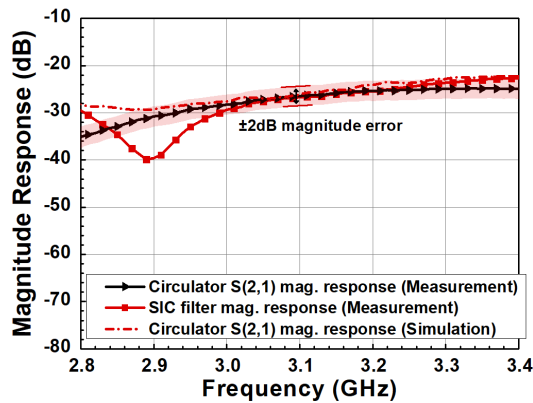
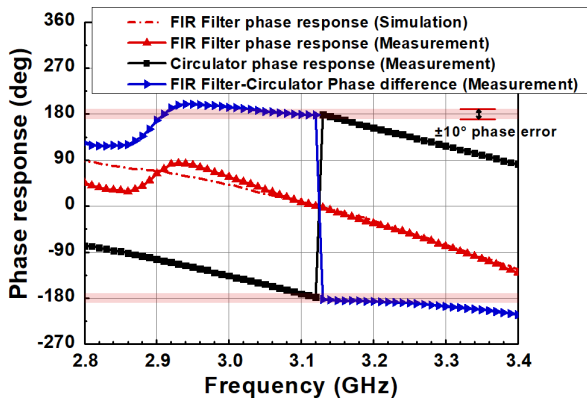


그림 6. 제작된 자기 간섭 제거기의 레이아웃 및 사진
Fig. 6. Layout and photograph of the implemented SI canceller.



(a) 크기 응답
(a) Magnitude response



(b) 위상 응답
(b) Phase response

그림 7. 제안된 자기 간섭 제거기의 S_{21} 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 7. Simulated and measured S_{21} of proposed SI canceller.

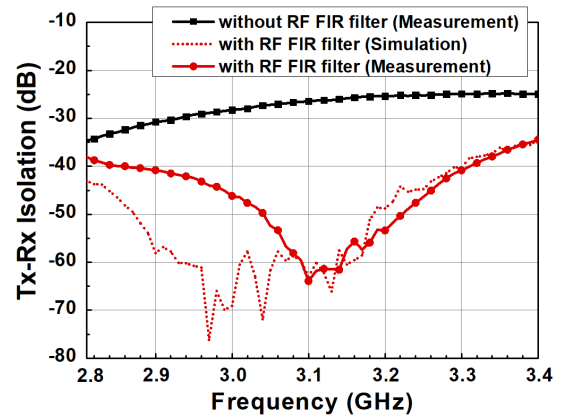


그림 8. 제안된 자기 간섭 제거기가 적용된 레이더 front-end의 주파수에 따른 송·수신부 격리도 측정 결과

Fig. 8. Measured Tx-Rx isolation of the radar front-end with the proposed SI canceller versus frequency.

제거기가 적용된 송·수신부의 격리도 시뮬레이션 및 측정 결과로, 3.04~3.22 GHz의 주파수 범위에서 50 dB 이상의 격리도를 달성하였다.

그림 9는 제안된 자기 간섭 제거기의 유무에 따른 송·수신부 격리도 향상 정도(SIC, SI cancellation)로, 3.05~3.22 GHz의 주파수 범위에서 25 dB 이상 격리도가 향상되었음을 확인하였다.

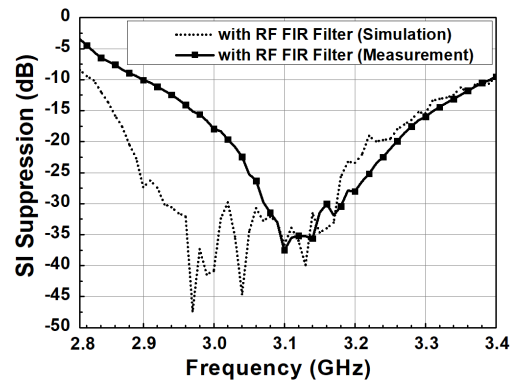


그림 9. 제안된 자기 간섭 제거기가 적용된 레이더 front-end의 주파수에 따른 송·수신부 격리도 향상 정도 측정 결과

Fig. 9. Measured improvement of Tx-Rx isolation of the radar front-end with the proposed SI canceller versus frequency.

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

Ref.	[6]	[9]	[10]	This work
Center freq. (GHz)	2.4	3.15	1.5	3.1
Bandwidth (MHz)	25	500	800	100
SIC**	>25*	>22	>20	>25
Tx-Rx iso. (dB)	>37	N.A	>33	>45
Coupler implement	Ideal	Ideal	Ideal	Real
Methodology	Two circulators and RF-FIR filter	RF-FIR filter	RF-FIR filter	RF-FIR filter
Size (mm)	N/A	N/A	44×37	112.7×74.6

*Graphically estimated.

**SIC(SI canceling): Improving of Tx-Rx isolation.

표 1은 기존 연구 결과와의 성능을 비교한 것으로, 기존의 연구 결과가 수식적인 계산을 통한 개념적인 연구에 그친 반면^{[9],[10]}, 제안된 RF FIR 필터는 회로 설계 시 제작된 10 dB 방향성 결합기 및 순환기 모듈의 측정 결과를 반영하여, 실제 송·수신 시스템에 적용 가능한 구조를 가짐과 동시에 기존 연구 결과 대비 넓은 주파수 영역에서 높은 송·수신부 간 격리도 및 자기 간섭 제거 성능을 갖는 것을 통해 제안한 회로 구조의 우수성을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 모노스테틱 레이더 시스템에 적용 가능한 RF-FIR 필터 기반 자기 간섭 제거기를 제안하였다. 제안된 자기 간섭 제거기는 레이더 front-end에 적용되어 송·수신부 간 격리도를 향상시킴으로써, 송신부에서 수신부로 누설되는 자기 간섭 신호의 억제가 가능하다. 자기 간섭 제거기 구현을 위한 6-tap RF-FIR 필터 설계 시 높은 자기 간섭 신호 억제 특성을 얻기 위해 LSE 알고리즘을 적용하여 최적화되었다. 이를 기반으로 구현된 자기 간섭 제거기 회로는 3.04~3.22 GHz의 주파수 범위에서 -50 dB 이상의 높은 송·수신부 격리도를 달성하였으

며, 제안된 회로가 적용되지 않은 일반적인 회로 대비 3.05~3.22 GHz의 주파수 범위에서 25 dB 이상의 자기 간섭 제거 성능을 가짐을 측정을 통해 검증하였다.

References

- [1] F. Abushakra, N. Jeong, D. N. Elluru, A. K. Awasthi, S. Kolpuke, and T. Luong, et al., "A miniaturized ultra-wideband radar for UAV remote sensing applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 198-201, Mar. 2022.
- [2] J. H. Kim, C. S. Park, S. T. Kim, and Y. B. Park, "Design and fabrication of a miniaturized Ka-band transceiver module," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 9, pp. 772-781, Sep. 2021.
- [3] J. Lee, K. Chang, and Y. Kim, "Implementation of self-interference signal cancellation system in RF/analog for in-band full duplex," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 3, pp. 277-283, Mar. 2016.
- [4] J. A. Park, S. C. Song, "Leakage signal canceller and adaptive algorithm in millimeter-wave seeker," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 1, pp. 88-94, Jan. 2019.
- [5] T. B. Ngo, Q. H. Do, and S. W. Yoon, "Leakage power canceling module with a negative capacitor for a circulator's isolation," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 2, pp. 129-133, Mar. 2023.
- [6] M. N. A. Tarek, M. R. Guerra, A. Nunez, M. D. N. Uddin, and E. A. Alwan, "Improving isolation in monostatic simultaneous transmit and receive systems using a quasi-symmetrical self-interference cancellation architecture," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 2, pp. 655-664, Dec. 2022.
- [7] M. N. A. Tarek, R. Hokayem, S. R. Govindarajulu, M. H. Novak, and E. A. Alwan, "A two-stage wideband RF cancellation of coupled transmit signal for bi-static

simultaneous transmit and receive system," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 2, no. 3, pp. 429-441, Jun. 2022.

- [8] I. S. Ahn, J. S. Kim, and H. J. Song, "Adaptive analog self-interference cancellation for in-band full-duplex wireless communication," in *Proceedings of the 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, Singapore, Dec. 2019, pp. 429-441.

- [9] S. B. Venkatakrishnan, E. A. Alwan, and J. L. Volakis,

"Wideband RF self-interference cancellation circuit for phased array simultaneous transmit and receive systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3425-3432, Jan. 2018.

- [10] M. N. A. Tarek, E. A. Alwan, "Wideband, low profile coupling suppression circuit for simultaneous transmit and receive system based on hybrid finite impulse response and resonator topology," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 126508-126515, Dec. 2022.

이 다 주 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4614-4248>



2017년 3월~2021년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 (공학사)

2021년 3월~현재: 숭실대학교 지능형반도체학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] 레이더 송·수신 하드웨어, RF 무선전력 전송 기술 등

김 성 태 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9354-1807>



1996년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)

1998년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이더 연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템

배 창 식 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9354-1807>



2015년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)

2017년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

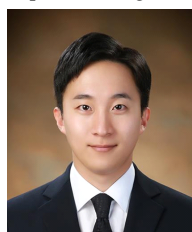
2017년 7월~현재: 한화시스템(주) 레이더 연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

시스템

오 준 택 [숭실대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>



2010년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2012년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2016년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)

2018년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기기연구본부 선임연구원

2018년 9월~2020년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 조교수
2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 및 지능형반도체학과 부교수

[주 관심분야] 레이더 송·수신 하드웨어, RF 무선전력전송 기술, 양자컴퓨터용 cryo-CMOS 집적회로, 밀리미터파 집적회로 등

송 중 화 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9774-4043>



2005년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)

2007년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

2016년 2월: 건국대학교 전자공학과학부 (공학박사)

2016년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이더

연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템