

접힌 권선 링 공진 구조를 이용한 소형 대역통과 필터

Compact Bandpass Filter Using a Folded Ring Resonator

권찬중 · 오경수* · 하진혁* · 고민호* · 이문규

Chan-Joong Kwon · KyoungSoo Oh* · JinHyuk Ha* · MinHo Go* · Moon-Que Lee

요 약

본 논문은 기존의 이중 모드 링 공진기를 접은 권선 구조로 구현하여 1/4 면적의 소형 공진기와 이를 이용한 소형 링 대역통과 필터를 제안한다. 설계를 위해 공진기에 결합 스티브를 갖는 구조의 even 모드와 odd 모드간의 결합계수를 추출하고, 이를 이용하여 중심 주파수 2.45 GHz에서 100 MHz 대역폭을 갖는 2단 대역통과 필터를 설계하였다.

Abstract

This paper proposes a compact bandpass filter using a folded ring resonator, which occupies an area, one-quarter the size of a conventional ring resonator. For the filter design, circuit modeling is used to derive the coupling coefficients between the even- and odd-mode resonances of the proposed resonator with the perturbation stub. The validity of the proposed filter is demonstrated by designing and fabricating a two-pole bandpass filter with a 100 MHz bandwidth at the central frequency of 2.45 GHz.

Key words: Dual-Mode Resonator, Ring Resonator, Compact Band Pass Filter

I. 서 론

반(1/2) 파장 혹은 사분(1/4) 파장 길이의 다른 상용 공진기와 비교하면 링 공진기는 한 파장 길이로 구현되어 적은 방사손실과 한 공진기 내에 2개의 독립적인 모드를 갖는다. 이러한 특징을 활용하여 고주파 주파수 혼합기, 발진기, 필터 등 다양한 회로에 사용된다^[1]. 특히, 필터 분야는 Wolff에 의해 이중 모드 대역통과 필터가 처음 제안되었고, 이후로 한 파장의 링 공진기의 크기를 줄이기 위한 연구가 진행되었다^[2]. 이러한 예로 SIR(Step Impedance Resonator), 미앤더(meander) 루프, 삼각 루프, 오각형 루

프, PGS(Patterned Ground Structure)를 이용함으로써 필터의 크기를 줄이기 위한 시도가 있었다^{[3]~[7]}. 본 논문은 기존의 한 파장의 전기적 길이를 갖는 이중 모드 대역통과 필터의 공진기를 접은 권선 구조로 구현하여 소형화함으로써 이중모드 대역통과 필터를 소형화할 수 있는 방법을 제시하고 검증한다.

II. 설계 이론

2-1 접힌 권선형 링 공진기

한 파장 길이의 공진기를 이용하여 필터를 설계할 때

「이 논문은 2019년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 연구되었음.」

서울시립대학교 전기전자컴퓨터공학과(School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

*한화시스템(주)(Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received September 3, 2019 ; Revised October 16, 2019 ; Accepted December 23, 2019. (ID No. 20190903-080)

· Corresponding Author: Moon-Que Lee (e-mail: mqlee@uos.ac.kr)

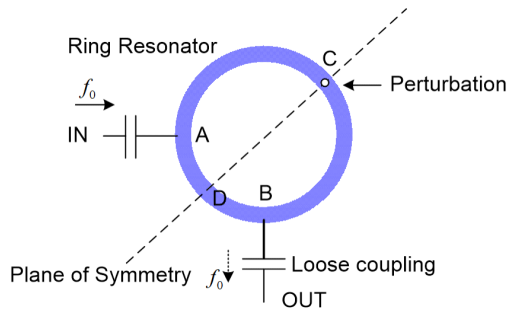


그림 1. 이중 모드 링 공진기를 이용한 대역통과 필터의 기본 구조

Fig. 1. The conventional schematic of BPF using a dual-mode ring resonator.

그림 1과 같이 공진기 내에 존재하는 두 개의 직교 모드를 섭동(perturbation)을 통해 결합하여 구현한다.

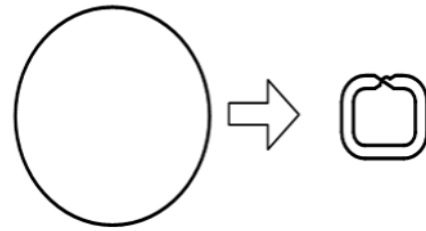
그림 1에서 λ_g 길이의 순수 링 공진기의 A와 B지점에서 급전 포트가 결합되었다. A에서 급전 결합된 경우, 링 공진기는 상하 대칭인 $\lambda_g/2$ 전송선로로 동작한다. 이때 급전위치로부터 $\lambda_g/4$ 지점이 되는 B에서 전기장의 크기는 0이 되어 B에 결합되는 포트에 의한 공진의 영향은 존재하지 않는다. 마찬가지로 B에서 급전을 하는 경우, A지점의 포트 결합은 0이 된다. 따라서 A와 B에 급전되는 포트에서 각각 $\lambda_g/2$ 공진기로 동작하고, 포트 간은 상호 격리(isolation)된다.

직교모드를 형성하는 두 공진 간 결합은 급전 포트로부터 대칭을 이루는 C나 D지점에 불연속(discontinuity)을 통해 구현한다. C나 D지점에서 위치한 불연속은 공진기의 동일하게 영향을 주고, A와 B의 급전 포트에서 공진 간 결합을 형성한다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 기존 링 공진기를 소형화한 접힌 링 공진기의 모양을 표시하고 있다. 기존 공진기는 링의 외형 둘레가 λ_g 가 되는데 반해, 제안한 구조의 외형은 $\lambda_g/2$ 가 되어 산술적으로 면적은 기존 구조의 약 1/4 이 될 수 있다.

2-2 제안한 권선형 링 공진기 이중 공진 모드간 결합

그림 3은 2.45 GHz에서 설계한 제안한 링 공진기의 구조를 보여주고 있다. 제안한 공진기는 권선형 링 공진기



(a) 기존구조
(a) The conventional type

(b) 제안한 접힌 권선형 링 공진기 구조
(b) The proposed folded ring resonator

그림 2. 크기를 줄인 링 공진기

Fig. 2. Concept of miniaturizing ring resonator.

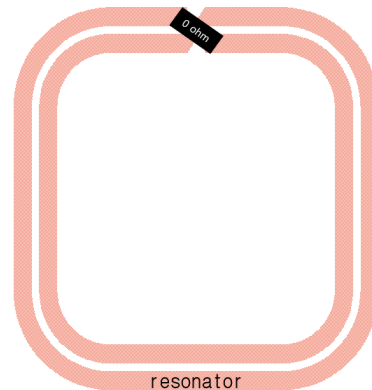


그림 3. 제안한 접힌 링 공진기의 구조

Fig. 3. The proposed folded ring resonator.

로 평면상에서 와이어 본딩, 0-ohm 저항 등으로 구현이 가능한 크로스오버(crossover)가 필요하다. 설계에 적용한 ROGERS 社の RO4003C는 비유전율 3.38, 두께 0.5 mm, 손실탄젠트 0.0021의 특성을 갖는다. 두 직교 공진기간의 결합은 공진기 중앙 개방 스테브를 통해 구현된다.

제안한 접힌 링 공진기의 전기적 등가모델을 추출하기 위해 회로/EM 설계 시뮬레이션 툴인 ADS(Advanced Design System)를 이용하였다. EM 해석한 결과, 식 (1)로 표현되는 단일 공진의 어드미턴스 슬롭 파라미터(slope parameter) b_0 는 4.895×10^{-4} , 병렬 공진기의 등가모델 C와 L은 각각 3.18 pF, 1.33 nH 값을 얻었다.

$$b_0 = \frac{\omega_0}{2} \cdot \frac{dB(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

여기서 ω_0 는 중심 각 주파수, $B(\omega)$ 는 공진기의 서셉턴스(susceptance)이다.

그림 4는 직교 모드간 결합을 위해 중앙에 개방 스테르브를 연결한 후 길이를 조정하여 구한 결합 계수 k 를 보여주고 있다. 결합계수 k 는 우수모드(even mode)와 기수모드(odd mode) 공진 주파수를 이용하여 식 (2)와 같이 표현된다.

$$k = \frac{2|f_{\text{even}} - f_{\text{odd}}|}{f_{\text{even}} + f_{\text{odd}}} \quad (2)$$

2-3 2-Pole 대역통과 필터 설계

그림 5는 본 논문에서는 제안한 접는 권선형 링 공진기를 이용한 2-pole 대역통과 필터의 순서 절차를 보여주고 있다. 먼저 필터설계에 앞서 우선 링 공진기의 슬로프 파라미터와 이중모드간 결합계수, 입출력 결합계수를 추출한다. 필터 설계 순서는 먼저 설계 사양의 필터 단수와 리플값을 정의한다. 정의된 단수와 리플로부터 생성되는 g_i 의 프로토타입 계수를 추출하고, 대역통과 필터로 변환을 위해 공진기간 결합계수 k 와 입출력 포트 결합에 의한 Q_e 값을 추출한다. 추출된 k 와 Q_e 에 대응하는 실제 공진기간의 결합 스테르브와 입출력 인버터를 적용한다. 이때 결합량에 의한 공진주파수 변화가 발생하므로 공진기의 길이를 일부 수정한다.

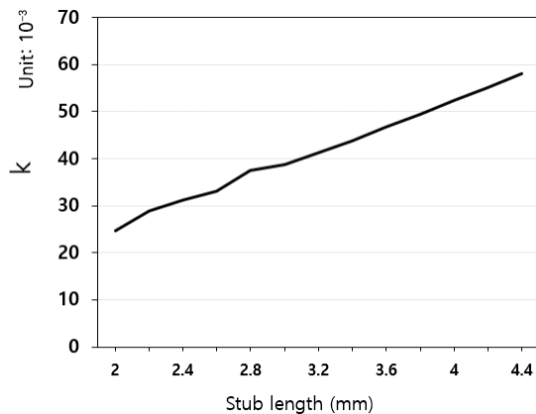
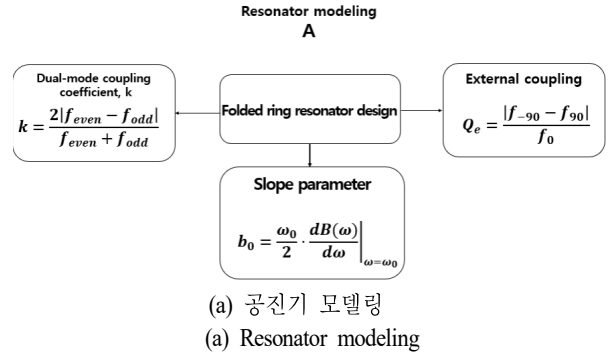


그림 4. 결합 스테르브 길이에 따른 직교 공진기 결합 계수
Fig. 4. The coupling coefficient with respect to the stub length.



BPF Design & Implement B

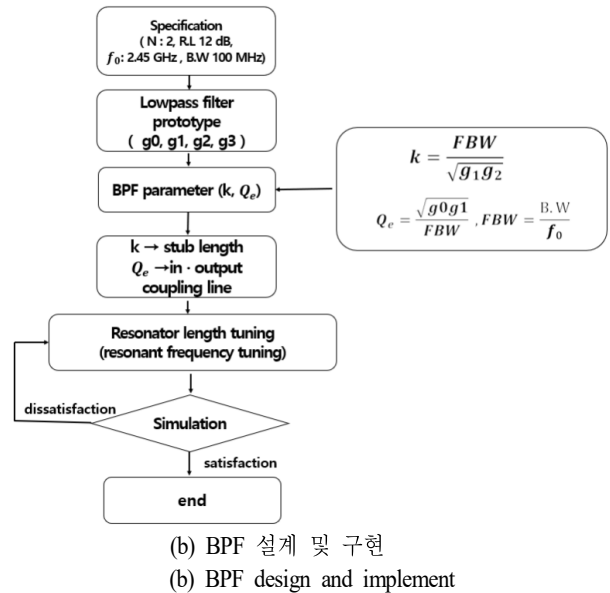


그림 5. 설계 순서도
Fig. 5. The design flowchart.

표 1. 대역통과 필터 설계 사양
Table 1. Specification of the designed band-pass filter.

Filter type	Chebyshev
No. of order	2
Pass band	2,400 ~ 2,500 MHz
BW(band width)	100 MHz
Return loss	12 dB

표 1은 대역통과 필터 설계사양이다. 설계 사양에서 반사 손실(return loss) 12 dB는 무손실 필터인 경우 리플로

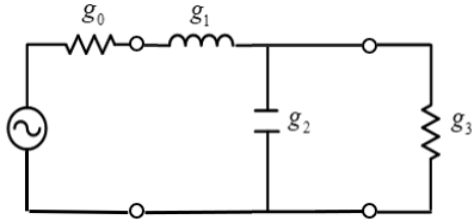


그림 6. 저역 통과 필터 prototype
Fig. 6. Lowpass filter prototype.

환산하면 0.283 dB이 된다. $N=2$, 리플 0.283 dB의 특성을 갖는 그림 6의 저역통과 프로토타입 Chebyshev 계수 값은 $g_0=1$, $g_1=1.1583$, $g_2=0.6932$, $g_3=1.6708$ 이 된다^[8].

앞서 그림 4의 직교 공진 모드간의 결합계수 k 와 프로토타입 계수와 설계 폭과의 관계식은 다음과 같다.

$$k = \frac{\Delta}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (3)$$

여기서 $\Delta = BW/\omega_0$ 로 중심주파수 비 대역폭(fractional bandwidth)이다. 표 1의 설계 사양에 해당하는 결합계수를 계산하면 $k = 45.553 \times 10^{-3}$ 가 된다. 이때 $\Delta = 0.04$ 이다.

앞서 구한 프로토타입 저역통과 필터를 J-inverter를 이용하여 대역통과 필터로 주파수 변환한다. J-inverter 값은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다. 그림 7의 J_n 과 $Y(\omega)$ 는 각각 J-inverter와 LC 병렬 공진기이다. 그림 8은 J-inverter의 등가회로이다.

$$J_{01} = \sqrt{\frac{\Delta \times \omega_0 \times C_{R1} \times G_s}{g_0 g_1}} \quad (4)$$

$$J_{12} = \Delta \times \omega_0 \times \sqrt{\frac{C_{R1} \times C_{R2}}{g_1 g_2}} = k \cdot T b_0 \quad (5)$$

여기서 C_R 은 공진기의 등가 커패시턴스, G_s 는 입출력 컨덕턴스 값, k 는 결합계수이다.

본 논문의 설계 조건에 따른 공진기의 커패시터 값은 C_{R1} 과 C_{R2} 는 3.18 pF로 동일 값을 갖는다. 식 (4)와 식 (5)를 이용해 계산된 J-inverter 값은 $J_{01}=5.87 \text{ m}\Omega^{-1}$, $J_{12}=2.23 \text{ m}\Omega^{-1}$ 이다^[8]. 단일 공진의 어드미턴스 슬롭 파라미터(slope parameter) b_0 는 0.4895×10^{-3} , 2.45 GHz에서 공진하는 병렬 공진기의 등가 C와 L은 각각 3.18 pF, 1.33 nH 값을 얻

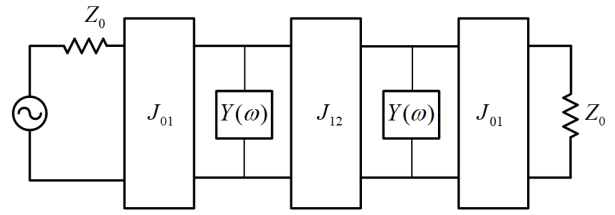


그림 7. J-inverter를 이용한 대역통과 필터 간략도
Fig. 7. Simplified band-pass filter using J-inverters.

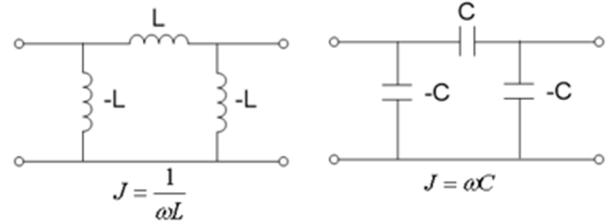


그림 8. J-inverter 등가회로
Fig. 8. J-inverter equivalent circuit.

었다.

통과대역폭은 결합계수에 의해 결정이 된다. 식 (3)과 그림 4로부터 원하는 결합계수 k 값인 45.55×10^{-3} 는 스테르브 길이가 3.52 mm가 되어야 함을 알 수 있다.

그림 9는 본 논문에서 제안한 권선 링 공진기의 등가모델이며, 그림 10은 그림 9의 주파수 응답을 나타내었다. 모의실험 결과, 중심 주파수는 2.43 GHz로 하향했다. 통과대역폭은 100 MHz, 반사손실은 12 dB로 설계한 사양에 근접하였다.

III. 제작 및 측정 결과

3-1 접힌 링 공진기 제작 및 측정 결과

그림 11은 설계한 레이아웃과 제작 사진을 보여주고

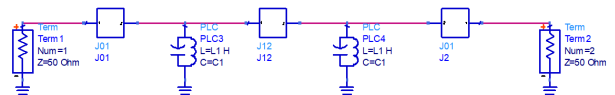


그림 9. 접힌 링 공진기 대역통과 필터의 등가회로
Fig. 9. The equivalent circuit of folded ring resonator band-pass filter.

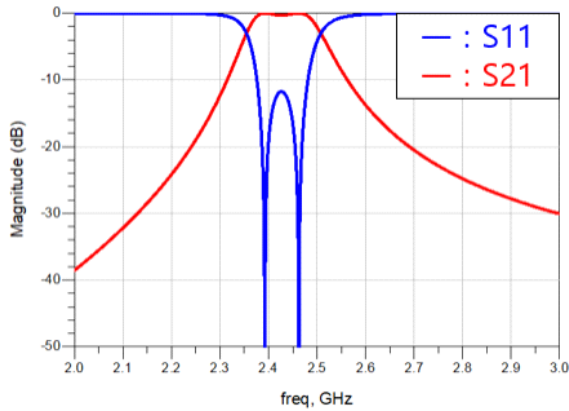
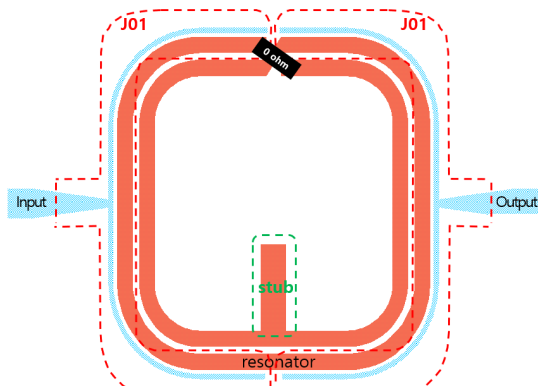
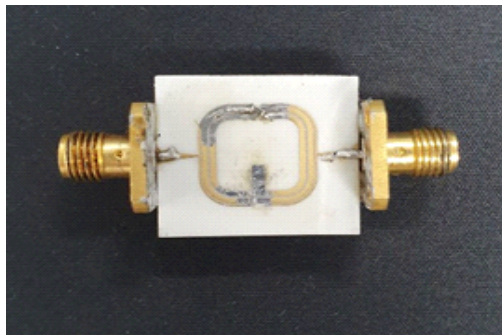


그림 10. BPF 등가회로의 모의실험 주파수 응답
Fig. 10. The simulation result of equivalent BPF.



(a) 대역통과 필터 레이아웃
(a) Layout



(b) 제작한 회로 사진
(b) The photograph of the fabricated circuit

그림 11. 제안한 접힌 권선형 링 공진기 구조
Fig. 11. The designed BPF using the proposed folded 2-turn ring resonator.

있다. 설계 제작에 사용된 기판은 ROGERS社の의 RO4003C로 비유전율 3.38, 두께 0.5 mm이다. 공진기 내의 크로스 오버(crossover)는 TA-I Technology社の의 RM06JTN0 0-ohm을 이용하여 맞은편 선로와 연결하였다. 회로의 크기는 $21.2 \times 18.5 \text{ mm}^2$ 이며, 공진기만의 크기는 $13.1 \times 13.5 \text{ mm}^2$ 이다. 이는 기존 링 공진기의 약 1/4의 크기이다. 표 2는 기존 공진기 대비 제안한 접힌 링 공진기의 크기를 나타낸다. 입출력 J_{01} 은 결합선로로 구현하였고, 입출력 불연속을 줄이기 위해 테이퍼드(tapered) 라인을 이용하였다.

그림 12는 회로의 EM 모의실험과 측정결과의 비교를 보여주고 있다. 실선과 점선은 각각 모의실험과 측정결과이다. 측정결과와 중심주파수가 모의실험 결과보다 약 100 MHz 하향되었고, 삽입손실은 1.3 dB이 증가하였다. 반사 손실은 측정결과가 모의실험보다 0.1 dB 감소하였다. 총 손실은 측정결과가 모의실험보다 약 1.1 dB 증가하였다. 표 3은 제안된 링 공진기의 모의실험과 측정결과 데이터

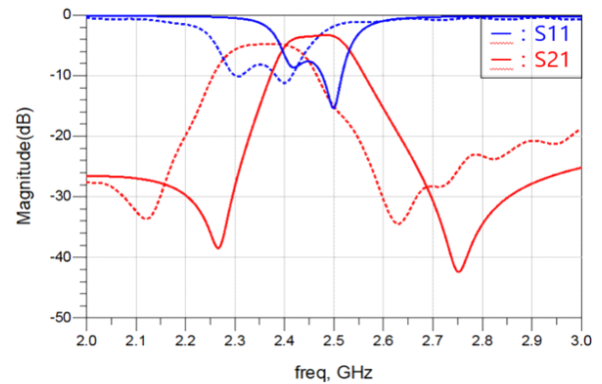


그림 12. 설계한 BPF의 모의실험 및 측정결과(점선: 측정결과, 실선: 모의실험)
Fig. 12. The simulation and measurement results of the designed BPF(dash: measurement result, solid line: simulation result).

표 2. 기존 링 구조와 제안한 접힌 링 구조의 크기 비교
Table 2. The size comparison of the conventional ring resonator and the proposed folded ring resonator.

	Size(mm ²)	Ratio(%)
Basic ring	29.1×29.1	100
Folded ring	13.1×13.5	21

표 3. 접힌 링 공진기의 모의실험과 측정결과 비교

Table 3. The comparison of simulation and measurement results of folded ring resonator.

	Simulation	Measurement
B.W(MHz)	2,400~2,500	2,390~2,430
Insertion loss(dB)	3.5	4.8
Return loss(dB)	8.2	8.1
Atten. pole(MHz)	2,282, 2,800	2,120, 2,630

를 비교 요약하고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 접힌 구조의 링 공진기를 이용하여 이 중대역 통과 필터를 제안하였다. 제안한 공진기는 전체 라인의 길이는 λ_g 이지만 접는 구조를 이용함으로써 전체 길이는 λ_g 를 유지하지만, 외형 크기는 $\lambda_g/2$ 가 되어 면적은 1/4로 줄일 수 있다. 제작 결과, 중심주파수 이동, 삽입 손실의 증가 등을 보였다. 납땀보다 실버 페이스트(silver paste)를 이용하고, 더 정밀한 식각기술을 이용하여 제작한다면 더욱 모의실험에 가까운 결과를 기대할 수 있을 것이다.

References

[1] M. Makimoto, S. Yamashita, *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication: Theory, Design and Application*, London, Springer, 2001.
 [2] I. Wolff, "Microstrip bandpass filter using degenerate

modes of a microstrip ring resonator," *Electronics Letters*, vol. 8, no. 12, pp. 302-303, Jun. 1972.

- [3] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator," *IEEE Microwave Guided Wave Letters*, vol. 5, no. 11, pp. 371-372, Nov. 1995.
 [4] R. J. Mao, X. H. Tang, and F. Xiao, "Miniaturized dual-mode ring bandpass filters with patterned ground plane," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 7, pp. 1539-1547, Jul. 2007.
 [5] T. W. Lin, J. T. Kuo, and S. J. Chung, "Dual-mode ring resonator bandpass filter with asymmetric inductive coupling and its miniaturization," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 9, pp. 2808-2814, Sep. 2012.
 [6] M. Alqaisy, "A compact dual-mode dual-band BPF based meander square resonator," in *2017 Second-Al-Sadiq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications(AIC-MITCSA)*, Baghdad, Iraq, Dec. 2017, pp. 283-286.
 [7] T. Du, B. Guan, A. Wu, and Z. Zhang, "Dual-band bandpass filter based on quadruple-mode open stub loaded square ring resonator," in *2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC)*, Xiamen, Oct. 2017.
 [8] J. S. G. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/microwave Applications*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 39-45, 54-61, 2001.

권 찬 중 [서울시립대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1857-9052>



2019년 2월: 인천대학교 신소재공학과 (공학사)
2019년 2월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, 필터

고 민 호 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0605-6331>



2009년: 인하대학교 전자공학과 (공학박사)
2010년: 차세대 항공전자통신 인력양성사업단 연구원
2010년 7월~현재: 한화시스템 수석연구원
[주 관심분야] 광대역 송수신 시스템, MMIC/RFIC, 레이더 시스템

오 경 수 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1488-4225>



2006년 2월: 인제대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 6월~현재: 한화시스템 전문연구원
[주 관심분야] 디지털 회로 및 시스템, 레이더 시스템

이 문 규 [서울시립대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2231-8509>



1992년: 한국과학기술원 전기및전자학과 (공학사)
1994년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1999년~2002년: 한국전자통신연구원 위성탑재부품팀 선임연구원
2015년 11월~2018년 2월: 과학기술정보통신부 전파위성PM/CP
2002년~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이더/센싱, 무선통신시스템 등

하 진 혁 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0008-2910>



2006년: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 8월~현재: 한화시스템 전문연구원
[주 관심분야] 광대역 송수신 시스템, 레이더 주파수합성기, 레이더 시스템