

바랙터 다이오드를 이용한 주파수 가변 결함 마이크로스트립 구조 공진기

윤원상*, 최진영**

Frequency Variable Defected Microstrip Structure Resonator using Varactor Diode

Won-Sang Yoon*, Jin-Young Choi**

본 연구는 2023년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2023-0482)

요약

본 논문에서는 결함 마이크로스트립 구조 공진기(DMSR, Defected Microstrip Structure Resonator)에 바랙터 다이오드를 적용하여 공진 주파수를 제어하는 방법을 제안하였다. DMSR은 슬롯을 에칭하여 결함 구조를 갖는 마이크로스트립 전송선의 형태를 가지며, 에칭된 슬롯에 의해 마이크로스트립 전송선의 커패시턴스, 인덕턴스가 변화되어 부가적인 회로 소자를 추가하지 않아도 공진하는 특성을 갖는다. DMSR의 공진 주파수는 결함 구조에 의해 형성된 갭 커패시턴스에 의해 결정되므로, 바랙터 다이오드를 이용하여 갭 커패시턴스를 제어함으로써 공진 주파수를 가변할 수 있는 DMSR을 제안하였다. 제안된 DMSR을 제작하여 실험한 결과 바랙터 다이오드의 역방향 바이어스 전압이 0V에서 4V까지 변화함에 따라 공진 주파수가 0.42GHz 변화하는 것을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose a method to control the resonant frequency of a Defected Microstrip Structure Resonator (DMSR) by applying a varactor diode. A DMSR is a microstrip line with a defect structure by etching a slot on microstrip line and the etched slot on the DMSR alters the capacitance and inductance of the microstrip line, resulting in resonance without additional circuit elements. Since the resonant frequency of a DMSR is determined by the gap capacitance formed by the defected structure, we proposes a DMSR that can tune its resonant frequency by controlling the gap capacitance using a varactor diode in this paper. Experimental results shows that the resonant frequency of the proposed DMSR varies by 0.42 GHz as the reverse bias voltage of the varactor diode changes from 0V to 4V.

Keywords

defected microstrip structure, DMS, resonator, frequency variable, varactor diode, RF/Microwave system

* 호서대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>
** 호서대학교 전자공학과 석사과정
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2934-4723>

• Received: Oct. 15, 2024, Revised: Dec. 06, 2024, Accepted: Dec. 09, 2024
• Corresponding Author: Won-Sang Yoon
Division of Electronic Engineering, Hoseo University, 20, Hoseo-ro 79
Beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea
Tel.: +82-41-540-5661, Email: wsoon@hoseo.edu

1. 서 론

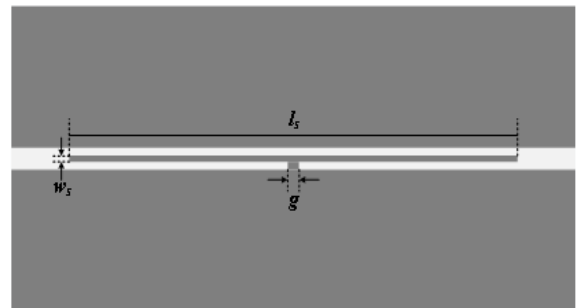
공진기는 특정 주파수를 갖는 신호를 통과시키거나 제거하는 특성이 있다. 이러한 특성을 이용하여 초고주파 회로에서는 불필요한 신호를 제거하거나 특정 신호만의 선택도를 높이기 위해 사용된다. 공진기의 종류 중 마이크로스트립 공진기는 집중 정수 소자를 이용하지 않고 전송선로의 분산 소자를 이용한 공진기로 다양한 형상으로 설계될 수 있으며 평면 구조이기 때문에 인쇄 회로 기판 기술을 이용하여 양산이 가능한 장점이 있지만 분산 소자를 이용하기 때문에 다른 공진기들에 비해 크기가 커지는 점과 Q 값이 낮아 위상 잡음 특성이 나쁘다는 단점이 있다. 이에 따라 마이크로스트립 공진기는 회로의 크기를 줄이기 위한 소형화 연구와 Q 값을 높여 주파수 선택도를 높이는 연구가 진행되어 왔다[1]-[4]. 앞서 연구된 마이크로스트립 공진기의 종류는 분리형 링 공진기(SRR, Split Ring Resonator)와 결함 마이크로스트립 구조(DMS, Defected Microstrip Structure)가 있다[5]-[7]. SRR은 기존의 마이크로스트립 공진기보다 높은 결합 계수로 큰 Q값을 얻을 수 있다. 하지만 마이크로스트립 선로의 옆에 링 공진기를 추가시킨 구조를 가지고 있어 회로의 크기가 커지는 단점이 있다. 이와 다르게 DMS는 마이크로스트립 선로를 결함 구조로 에칭한 형태이다. DMS는 결함 구조로 인해 발생하는 인덕턴스 성분과 커패시턴스 성분을 이용하여 공진을 발생시키는 것으로 공진 주파수를 변경하고 싶으면 결함 구조를 다시 설계해야하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 공진기에 부가적인 요소를 추가하여 공진 주파수를 변경하는 연구가 진행되고 있다[8]-[11].

본 논문에서는 DMS의 결함 구조에 역방향 바이어스에 따라 커패시턴스 값이 변화되는 바랙터 다이오드를 추가하였을 때 바이어스 전압에 따라 DMSR의 공진 주파수가 변화하는 동작 특성을 등가 회로를 통해 분석하고, 바랙터 다이오드를 DMSR에 실장하여 공진 주파수를 가변하는 회로에 대한 실험 결과를 기술하였다. II장에서는 기본적인 T형 DMSR의 동작 특성을 기술하였다. 특히 T형 DMSR

의 갭 커패시턴스의 변화에 따른 공진 주파수 시뮬레이션 결과를 기술하였다. 이를 바탕으로 III장에서는 DMSR에 바랙터 다이오드를 실장하여 공진 주파수를 제어하는 방안을 제안하고, 시뮬레이션 결과 및 실제 제작된 DMSR의 실험 결과를 동작 특성을 확인하였으며, IV장에 결론을 기술하였다.

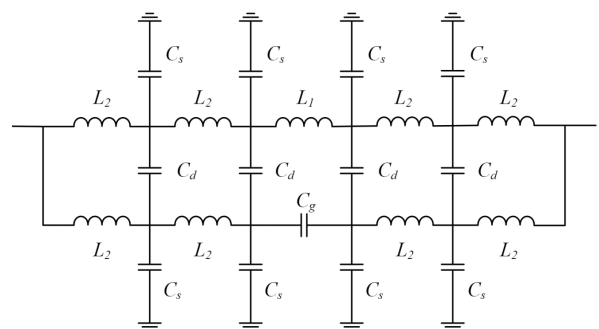
II. T형 DMSR 설계

T형 DMSR의 기본 구조는 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 마이크로스트립 선로에 T형 슬롯을 에칭한 형태를 가지며, 이에 따른 T형 DMSR의 등가 회로를 그림 1(b)에 도식화하였다. 일반적인 마이크로스트립 선로에서 나타나는 인덕턴스, 커패시턴스와 달리 T형 DMSR에서는 에칭된 슬롯에 의해서 2개의 얇은 선폭으로 나타나므로 이를 갭 부분 길이에 나타나는 인덕턴스 L_1 과 나머지 선로 길이에 대한 인덕턴스 L_2 로 나타내었다.



(a) T형 DMSR 구조

(a) Configuration of the conventional T-shape DMSR



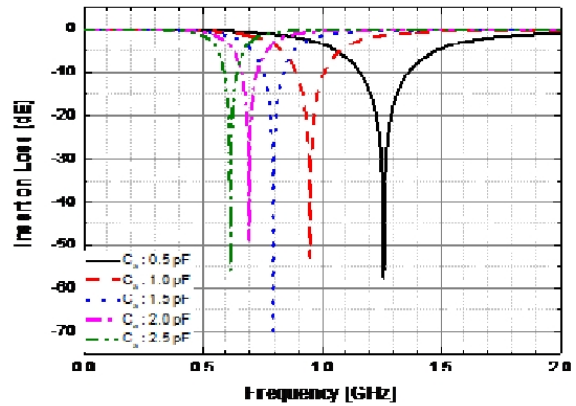
(b) T형 DMSR의 등가 회로

(b) Equivalent circuit of the conventional T-shape DMSR

그림 1. 일반적인 T형 DMSR의 구조 및 등가 회로

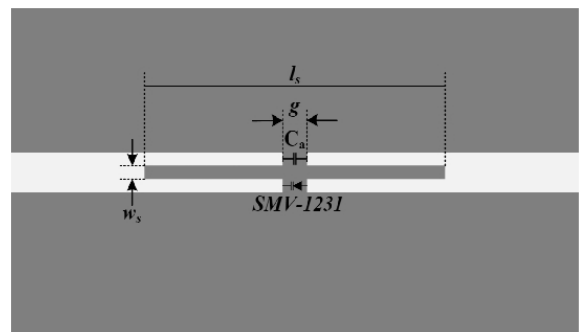
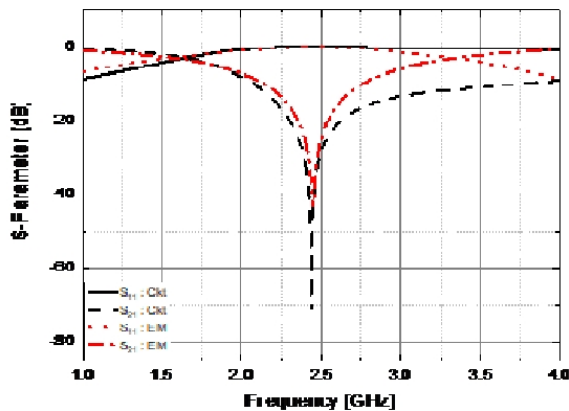
Fig. 1. Configuration and equivalent circuit of the conventional T-shape DMSR

C_d 와 C_g 는 결합 구조에 의해 분리된 마이크로스트립 선로 간에 생성된 커패시턴스이며, C_s 는 마이크로스트립 라인과 접지면 사이에 발생하는 커패시턴스를 나타낸다. 등가 회로의 정확도를 높이기 위해 갭 양쪽의 슬롯 길이를 절반으로 나누고, 그 길이에 대한 인덕턴스, 커패시턴스로 L_2 , C_d , C_s 를 나타내었다. 제안된 등가 회로 분석을 위하여 공진 주파수가 2.45GHz인 T-자형 DMSR를 설계하였으며, ANSYS사의 ANSYS Electronics Desktop을 이용하여 EM 시뮬레이션 결과를 확인하였다. 이때 사용한 기판은 Taconic 사의 상대유전율 3.5이며 기판 두께가 0.762mm인 RF-35 기판을 사용하였다. 마이크로스트립 선로의 선폭은 50Ω 인 1.684mm를 사용하였으며, 결합 구조의 주 결합 길이 l_s 는 39.75mm, 주 결합의 폭 w_s 는 0.5613mm, 결합 구조의 갭 g 는 1mm로 설정하였다. 등가 회로 파라미터는 Circuit 시뮬레이션을 통해 최적화하여 진행하였으며 시뮬레이션 결과는 그림 2에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 공진 주파수는 EM 시뮬레이션에서 2.45GHz, Circuit 시뮬레이션에서 2.44GHz로 거의 일치하여 등가 회로가 적절하게 제시된 것을 확인할 수 있다. 기본적인 T-자형 DMSR의 공진 주파수는 결합 구조의 커패시턴스 C_g 에 의해 결정된다. C_g 의 값이 커질수록 공진 주파수가 작아지게 되며, 이에 의한 영향을 확인하기 위하여 C_g 값을 변화시키며, 공진주파수 변화에 대한 시뮬레이션을 진행하여 그림 3에 나타내었다. C_g 값을 0.5pF~2.5pF까지 변화시켰을 때 공진 주파수는 1.26GHz ~ 0.62GHz로 변하며 커패시터의 크기가 커질수록 공진 주파수가 낮아지는 특성을 확인하였다.

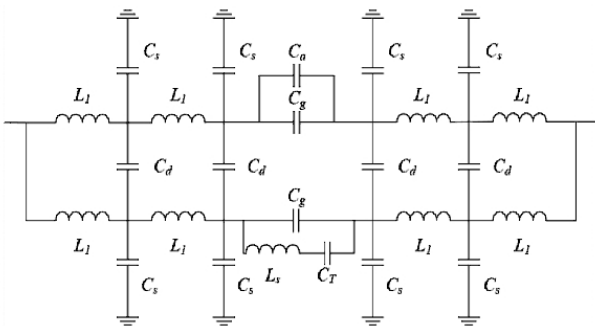


바랙터 다이오드를 적용한 주파수 가변형 설계 및 구현결과

T-자형 DMSR의 갭의 커패시턴스에 따라 공진 주파수가 변하는 특성을 이용하여 주파수 재구성 특성을 갖는 DMSR 구조를 그림 4와 같이 제안하였다. 제안한 구조는 기본적인 T-자형 DMSR의 갭 사이에 가변 커패시턴스를 형성시킬 수 있는 바랙터 다이오드를 실장하는 형태를 갖는다. 바랙터 다이오드는 역방향 바이어스의 크기에 따라 커패시턴스 값이 변화하므로 제안된 DMSR의 공진주파수를 제어할 수 있게 된다. 바랙터 다이오드에 역방향 바이어스를 인가하기 위하여 DC coupling이 필요하므로 T-자형 DMSR에 폭이 g 인 갭을 추가로 삽입하고, 그 위에 커패시터 C_a 를 실장하였다.



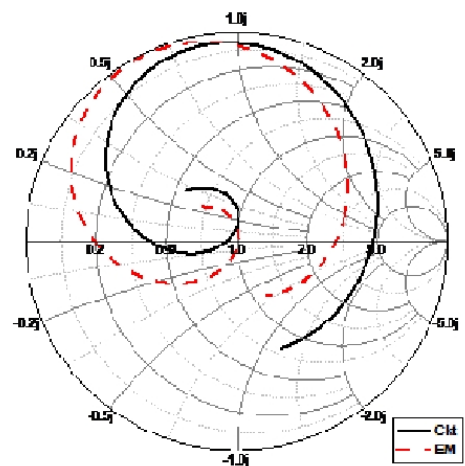
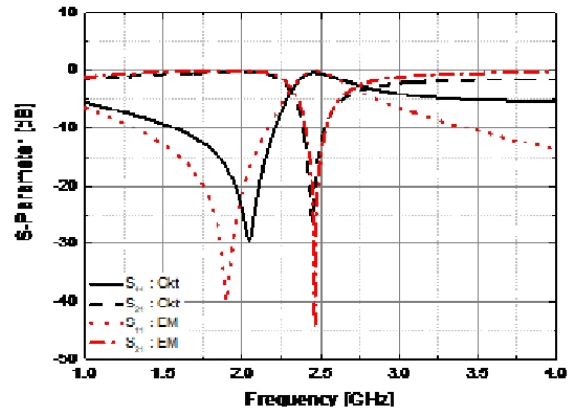
C_a 를 포함하는 주파수 가변형 DMSR의 등가 회로를 그림 5에 나타내었다. DMSR의 갭 위에 실장되는 바랙터 다이오드의 등가 회로는 역방향 커패시턴스 C_T 와 인덕턴스 L_s 로 모델링하였다. 바랙터 다이오드를 포함하여 제안된 DMSR의 주파수 가변 특성을 확인하기 위하여 2.45GHz 대역에서 공진하는 DMSR을 설계하였다. Taconic사의 상대유전율이 3.5이며 두께가 0.762mm인 RF-35 기판을 사용하였으며, 마이크로스트립 선로의 50옴 선폭 W_0 는 1.684mm를 나타낸다. 공진 주파수 제어를 위해 실장되는 바랙터 다이오드로는 역방향 바이어스가 0V-4V 범위에서 변화될 때, 커패시턴스 값이 0.794-2.35pF으로 나타나는 Skyworks사의 SMV1231을 사용하였다. 바랙터 다이오드의 역방향 바이어스를 인가하기 위해 추가한 갭 g 는 1mm, 갭 위의 DC coupling 커패시터 C_a 의 크기는 0.5pF으로 설정하였다. C_a 의 실장에 따른 공진 주파수 변화를 반영하여 DMSR에 에칭된 결함의 길이 l_s 는 11.90mm, 주 결함의 폭 w_s 는 0.5613mm로 설정하였다.



L_1	
L_s	
C_d	
C_s	
C_g	
C_a	
C_T	

제안된 DMSR의 등가 회로의 파라미터는 슬롯이 인가된 마이크로스트립 선로의 선폭과 길이에 의해 얻어지는 인덕턴스, 커패시턴스값으로부터 시뮬레이션을 통해 최적화하였으며, 그 결과값은 표 1에 나타내었다.

제안된 DMSR의 구조에 대한 EM 시뮬레이션과 등가 회로에 대한 Circuit 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었으며, 그림 6(a), 6(b)에 나타낸 것과 같이 EM 시뮬레이션 및 Circuit 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 바랙터 다이오드에 의한 커패시턴스 C_T 변화에 따른 공진주파수 변화는 그림 7에 나타낸 것과 같으며, C_T 를 0.794-2.35 pF로 변화시켰을 때, 제안된 DMSR의 공진 주파수는 2.42GHz ~ 2.82GHz까지 변화하는 것을 알 수 있다.



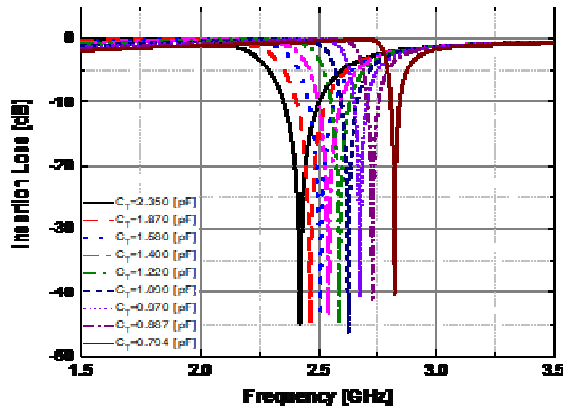


그림 7. 바랙터 다이오드의 커패시턴스 C_7 에 따른 제안된 DMSR의 공진주파수 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. Simulated resonant frequency of the proposed DMSR with respect to the C_7

설계 결과를 바탕으로 그림 8과 같이 DMSR을 제작하였다. 제작된 DMSR에는 공진 주파수 제어를 위한 전압을 인가하기 위하여 에칭된 결함 구조의 양 쪽에 바이어스 회로가 추가되었다.

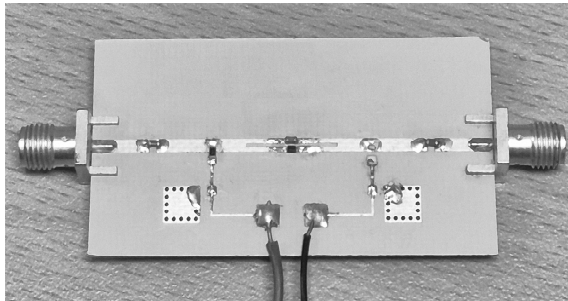


그림 8. 제작된 주파수 가변형 DMSR
 Fig. 8. Photo of the proposed DMSR

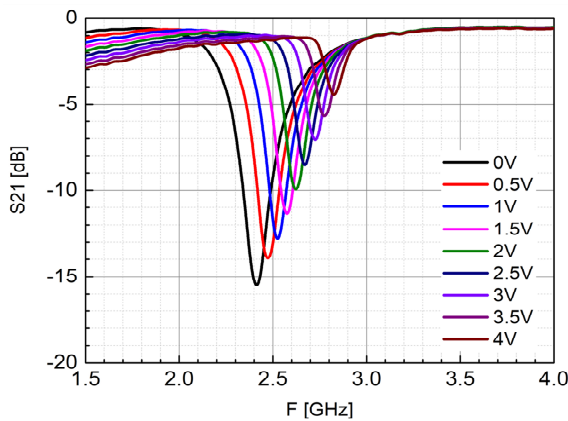


그림 9. 제작된 DMSR의 공진주파수 측정 결과
 Fig. 9. Measurement results of the proposed DMSR

제작된 회로의 측정 결과는 그림 9에 나타내었으며, 바랙터 다이오드에 인가되는 역방향 바이어스의 크기 V_r 을 0V~4V까지 0.5V 단위로 변화시켰을 때, DMSR의 공진 주파수가 2.40GHz~2.82GHz에서 변화하는 것으로 나타났으며, 이는 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 다만, 시뮬레이션 결과와 달리 다이오드에 존재하는 기생저항 성분에 의해 주파수가 올라갈수록 공진기의 특성이 저하되는 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 공진 주파수가 가변되는 특성을 갖는 T형 DMSR의 구조를 제안하였다. 제안된 DMSR은 기본적인 T형 DMSR의 결함 구조 위에 바랙터 다이오드를 실장한 형태를 갖는다. 바랙터 다이오드는 인가된 역방향 바이어스 전압에 의해 커패시턴스가 변화하는 특성을 가진다. T형 DMSR은 결함 구조의 갭 커패시턴스에 의해 공진 주파수가 결정되므로 제안한 DMSR은 결함 구조의 갭 위에 실장된 바랙터 다이오드에 인가된 전압을 제어함으로써 공진 주파수가 변화하는 특성을 갖게 된다. 제안한 주파수 가변형 DMSR을 제작하여 역방향 바이어스의 크기를 0V부터 4V까지 변화시키며 측정한 결과 공진 주파수가 2.42GHz에서 2.82GHz까지 변화하는 것을 확인하였으며, 이러한 특성을 이용하여 광대역 RF/Microwave 시스템의 필터나 발진기 설계에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] C. A. Allen, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Design of microstrip resonators using balanced and unbalanced composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 7, pp. 3104-3112, Jul. 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.877048>.
- [2] C. G. Juan, E. Bronchalo, B. Potelon, C. Quando, E. Ávila-Navarro, and J. M. Sabater-Navarro, "Concentration Measurement of Microliter-Volume

- Water-Glucose Solutions Using Q Factor of Microwave Sensors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, No. 7, pp. 2621-2634, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2866743>.
- [3] C.-F. Chen, T.-Y. Huang, C.-H. Tseng, R.-B. Wu, and T.-W. Chen, "A miniaturized multilayer quasi-elliptic bandpass filter with aperture-coupled microstrip resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, No. 9, pp. 2688-2692, Sep. 2005. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.854204>.
- [4] T.-S. Ha, S.-M. Lee, and W.-S. Yoon. "Miniaturization of Defected Microstrip Structure Resonator using Lumped Element", *Journal of KIIT*, Vol. 19, No.12, pp. 71-77, Dec. 2021. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.12.71>.
- [5] C. Ding, Y. J. Guo, P.-Y. Qin, and Y. Yang, "A Compact Microstrip Phase Shifter Employing Reconfigurable Defected Microstrip Structure (RDMS) for Phased Array Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, No. 5, pp. 1985-1996, May 2015. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2408357>.
- [6] J. D. Baena, et al., "Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, No. 4, pp. 1451-1461, Apr. 2005. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.845211>.
- [7] M. S. Boybay and O. M. Ramahi, "Material Characterization Using Complementary Split-Ring Resonators", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 11, pp. 3039-3046, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2203450>.
- [8] M. A. A. Latip, M. K. M. Salleh, and I. Pasya, "Tuning circuit using varactor diode for tunable bandstop resonator", 2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA), Langkawi, Malaysia. pp. 17-20, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1109/ISWTA.2011.6089543>.
- [9] H. Lim, W.-S. Jeong, S.-H. Lim, D.-H. Shin, and N.-H. Myung, "A Tunable Notch Resonator Based on Varactor-Loaded Complementary Split-Ring Resonators", 2008 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, Chiba, Japan, pp. 426-429, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1109/IWAT.2008.4511370>.
- [10] M. A. A. Latip, M. K. M. Salleh, N. A. Wahab, and M. K. Hamzah, "Varactor-based frequency-tuned microwave open-circuited stub resonator", 2011 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 22-24, Apr. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICEDSA.2011.5959091>.
- [11] J. A. Navarro and K. Chang, "Varactor-tunable uniplanar ring resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 5, pp. 760-766, May 1993. <https://doi.org/10.1109/22.234508>.

저자소개

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과
(공학사)
1999년 2월 : 고려대 대학원
통신시스템공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대 대학원
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :

한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자공학과 교수
관심분야 : RF & Microwave transceivers and sensor
systems, Reconfigurable RF & Microwave system
and antennas

최 진 영 (Jin-Young-Choi)



2024년 2월 : 호서대학교
전자융합공학부(공학사)
2024년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
전자공학과 석사과정
관심분야 : 초고주파 회로,
전력분배/결합기, 발진기