

정적 및 시간 변조 공진기를 혼합한 시공간 변조 비자기 서클레이터

Non-Magnetic Circulator Using Spatio-Temporal Modulation of Mixed Static and Time-Modulated Resonators

차우다리 기르다리¹ · 정 용 채^{2*}
Girdhari Chaudhary¹ · Yongchae Jeong^{2*}

요 약

본 논문에서는 정적 공진기와 시간 변조 공진기를 혼합 사용하는 비자기 마이크로파 서클레이터 설계를 제시한다. 제안된 서클레이터는 정적 공진기와 시공간 변조 공진기를 효과적으로 결합함으로써 작은 순방향 전송 삽입 손실과 넓은 역방향 격리 대역폭을 획득할 수 있다. 광대역 역방향 격리는 통과대역 내에 두 개의 격리 널(null)을 생성시킴으로 달성할 수 있다. 실험적 검증을 위해 마이크로스트립 선로 서클레이터를 1.75 GHz의 중심 주파수에서 설계, 시뮬레이션 및 제작하였다. 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하며 80 MHz 대역폭에 걸쳐 18 dB 이상의 역방향 격리 특성을 얻었다.

Abstract

This paper presents the design of a non-magnetic microwave circulator using mixed static and time-modulated resonators. By effectively coupling static resonators with time-modulated resonators, the proposed circulator can achieve a low forward transmission insertion loss and a wide reverse isolation bandwidth. Wideband reverse isolation is achieved by creating two isolation nulls within the passband. For the experimental validation, a microstrip line circulator was designed, simulated, and fabricated at a center frequency of 1.75 GHz. The measurement results agreed closely with the simulations and exhibited a reverse isolation higher than 18 dB over a bandwidth of 80 MHz.

Key words: Circulator, Non-Magnetic, Spatio-Temporal Modulation, Time-Modulated Resonators, Wideband Isolation.

I. 서 론

서클레이터(circulator)와 아이솔레이터(isolator)는 대역 내 전이중(in-band full duplexing) 시스템 및 동시 송수신

(STAR: simultaneous transmit and receive) 레이다와 같은 다양한 애플리케이션에 널리 사용된다^[1]. 기존 서클레이터와 아이솔레이터는 주로 페라이트 자성 물질로 설계되어서 비용이 많이 들고 부피가 크며 집적 회로(IC) 설계

†이 연구는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00209081), (No. 2019R1A6A1A09031717).」

전북대학교 JIANT-IT인력양성사업단 (JIANT-IT Human Resource Development Center, Jeonbuk National University)

*전북대학교 전자공학부(Division of Electronic Engineering, Jeonbuk National University)

1: 연구 교수(<https://orcid.org/0000-0003-2060-9860>), 2: 교수(<https://orcid.org/0000-0001-8778-5776>)

· Manuscript received November 22, 2023 ; Revised December 6, 2023 ; Accepted December 18, 2023. (ID No. 20231122-003S)

· Corresponding Author: Yongchae Jeong (e-mail: ycjeong@jbnu.ac.kr)

와 호환하기 힘들다^[2].

시공간 변조(STM: spatio-temporal modulation)는 자성 물질을 사용하지 않고 비가역성(non-reciprocity)을 얻을 수 있는 효과적인 접근법 중 하나이다. STM은 점진적인 위상 편이 신호(progressive phase shift signal)로 공진기를 변조시킴으로 변조 특성을 얻을 수 있는데 서큘레이터, 비가역 여파기, 비가역 전력 분배기와 같은 비자성체 비가역 회로를 설계하는 데 널리 사용되었다^{[3]~[6]}. 참고문헌 [7] 및 참고문헌 [8]은 Δ 또는 Y-구조로 시간 변조 공진기 3개를 연결하여 비자성체 서큘레이터를 구현하였다. 그러나 이전의 연구들은 협대역 비가역 및 정합 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 혼합 정적 공진기와 시간 변조 공진기를 활용하여 비자성체 서큘레이터를 구현한다. 제안된 서큘레이터는 시간 변조 공진기와 정적 공진기를 효과적으로 통합하여 낮은 순방향 전송 손실과 향상된 역방향 격리 대역폭을 나타낸다.

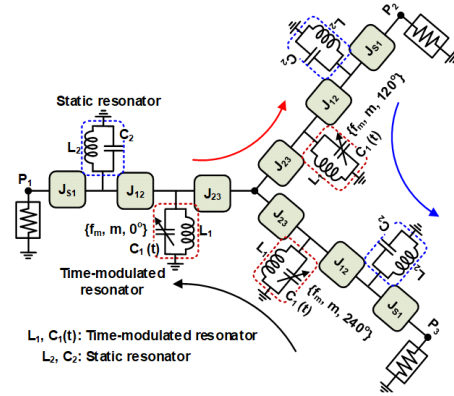
II. 회로해석이론

그림 1(a)는 Y-구조의 세 개의 동일한 분기(branch)로 구성된 제안된 서큘레이터의 회로도를 나타낸다. 각 분기는 정적 공진기(병렬 L_2 및 C_2)와 시간 변조 공진기(병렬 L_1 및 $C_1(t)$)로 구성된다. 변조 신호는 구조의 대칭성을 만족시키기 위해 120° 위상으로 분리시킨다. 시계 방향으로 120° 의 점진적인 위상 변위를 갖는 3개의 공진기를 변조시켜 원하는 RF 신호 전송이 시계 방향으로 발생하고, 반시계 방향으로 RF 신호 전송을 차단시킨다. 비가역 동작을 위해 시간 변조 공진기의 버랙터 다이오드는 식 (1)과 같이 변조시킨다.

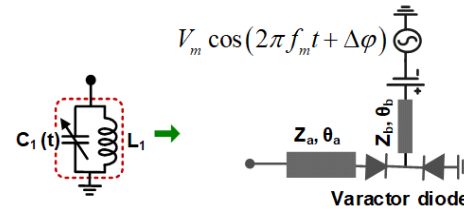
$$C_i(t) = C_0 \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi f_m t + (i-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}, i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서 C_0 , m 및 f_m 은 공정 정전 용량, 변조 지수 및 변조 주파수이다.

시간 변조 공진기는 그림 1(b)과 같이 구현되는데, 점진적 위상 편이 변조 신호로 버랙터 다이오드를 변조시킨다. 변조 매개변수들(m , f_m)을 적절하게 선택하면 혼변조(intermodulation) 성분의 전력들이 RF 캐리어 주파수에



(a) 제안된 서큘레이터의 회로도
(a) Proposed circuitual diagram

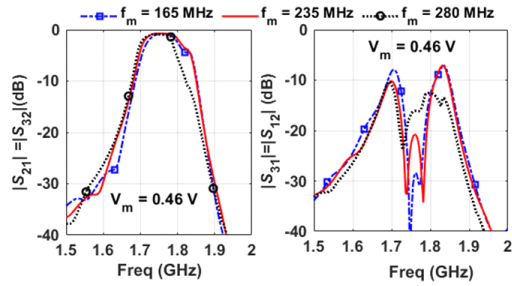


(b) 시간 변조 공진기 구현
(b) Microstrip line implementation of time-modulated resonator

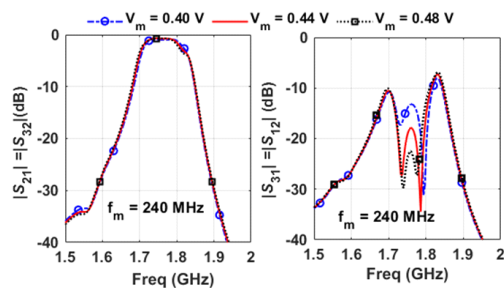
그림 1. 제안하는 혼합 시공간 변조기 이용 서큘레이터
Fig. 1. Proposed circulator using mixed static and time-modulated resonators.

서 동위상 합성되어 작은 순방향 전송 손실을 제공하지만, 역방향으로는 역위상 합성으로 높은 역방향 격리 특성을 제공한다.

서큘레이터 성능을 최적화하기 위해 변조 매개변수에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 파라메트릭 연구를 위해 Skywork사의 버랙터 다이오드 SMV 1233-079LF의 SPICE 모델이 사용하였고, 각 버랙터 다이오드에는 3.10 V의 DC 전압을 인가하였다. 그림 2는 변조 주파수 f_m 과 변조 진폭 V_m 에 따른 제안된 서큘레이터의 시뮬레이션 결과들을 나타낸다. 역방향 격리 시뮬레이션 결과는 통과 대역 내에 두 개의 널(null)이 관찰됨을 보여준다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 변조 주파수 $f_m = 160$ MHz 및 변조 진폭 $V_m = 0.46$ V일 때 중심 주파수에서 매우 큰 역방향 격리(> 28 dB)를 달성할 수 있지만 역방향 격리 대역폭은 상대적으로 더 좁다. 반대로, 변조 주파수 $f_m = 280$ MHz일



(a) 변조 주파수
(a) Modulation frequency



(b) 변조 진폭
(b) Modulation amplitude

그림 2. 변조 파라미터에 따른 제안된 서큘레이터의 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation results of proposed circulator according to modulation parameters.

때는 중심 주파수에서 상대적으로 낮은 역방향 격리 특성(> 15 dB)가 관찰된다.

그림 2(b)는 변조 진폭 V_m 이 클수록 순방향 전송 삽입 손실은 증가하고 역방향 격리 주파수 대역폭이 감소하지만, 더 큰 역방향 격리 특성을 얻을 수 있음을 보인다. 이러한 파라메트릭 연구를 바탕으로 변조 주파수 $f_m = 240$ MHz 및 변조 진폭 $V_m = 0.46$ V 조건에서 제안된 서큘레이터의 최적 성능은 통과대역 내에서 0.80 dB 보다 작은 순방향 전송 삽입 손실, 20 dB 이상의 반사 손실과 90 MHz 대역폭에서 20 dB 이상의 역방향 격리 특성을 보인다.

III. 실험 결과

실험적 검증을 위해 제안된 서큘레이터는 유전율 2.2, 두께 0.78 mm의 Taconic사 테프론 기판을 사용하여 중심 주파수 1.75 GHz에서 설계, 시뮬레이션 및 제작되었다.

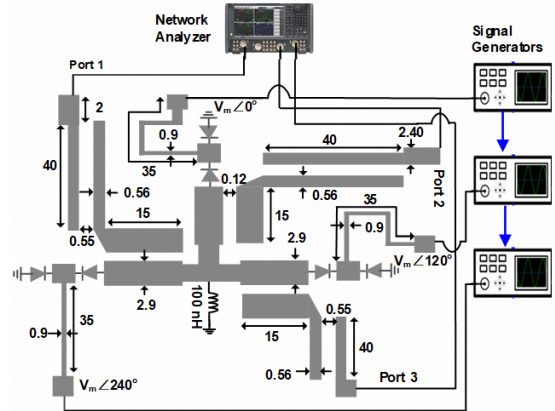


그림 3. 제안된 서큘레이터의 물리적 레이아웃 및 치수 설정 (단위: mm)
Fig. 3. Experimental setup and physical layout of proposed circulator with dimensions (Unit: mm).

그림 3은 제작된 서큘레이터의 물리적 레이아웃과 치수 설정을 나타낸다. 단락 인덕터 L_g 는 Y-구조의 중앙에 배치되어 DC 경로를 제공한다. 전자기 공동 시뮬레이션은 대신호 산란 고조파 균형(HB) 모듈과 함께 ANSYS HFSS 및 Keysight ADS를 사용하여 수행하였다.

그림 4는 제작된 서큘레이터의 측정 결과들을 나타낸다. 버랙터 다이오드에 3.10 V의 역 바이어스 DC 전압을

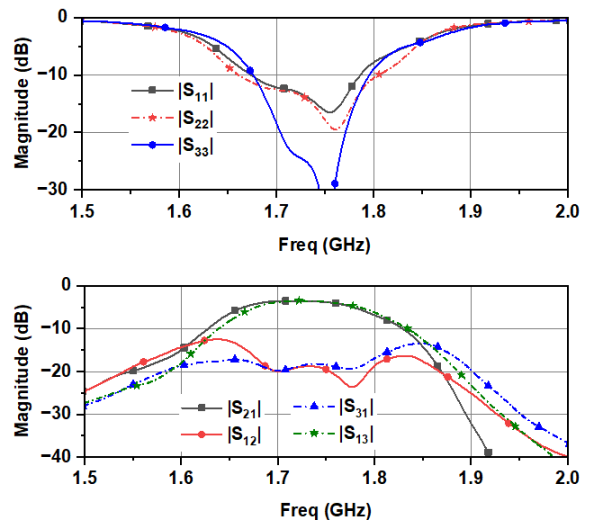


그림 4. 제작된 서큘레이터의 측정 결과
Fig. 4. Measurement results of fabricated circulator.

인가하였다. 이전 파라메트릭 연구를 기반으로 최적의 서큘레이터 성능을 달성하기 위해 변조 주파수 $f_m = 235$ MHz 및 변조 진폭 $V_m = 0.46$ V의 매개 변수값들이 사용되었다. 사용된 변조 신호는 그림 3과 같이 3개의 신호 발생기를 사용하였는데, 주 신호 발생기의 10 MHz 기준 신호를 다른 신호 발생기에 동기화시킴으로 신호 발생기 간의 주파수 편차를 제거하였다. 동기화된 개별 신호 발생기의 위상 제어를 통해 변조 신호의 점진적 위상 변이가 적용하였다. 측정된 최대 순방향 전송 삽입 손실 (insertion loss)은 130 MHz의 3 dB 전송 대역폭에서 2.70 dB이다. 특히 측정된 1.70 GHz~1.78 GHz의 주파수 대역에서 역방향 격리 특성(reverse isolation =IX)은 18 dB 보다 우수하며, 80 MHz의 18 dB 역방향 격리 대역폭(18 dB IX bandwidth)을 제공한다. 아울러 동작 주파수 대역에서 두 개의 뚜렷한 널(null)을 보인다. 측정 주파수 대역에서 14 dB 이상의 입력 반사 특성을 가져 우수한 정합 특성을 나타낸다. 참고문헌 [7] 및 참고문헌 [8]은 서큘레이터의 단일 널을 사용하여 25 MHz 미만의 협대역에서 18 dB의 역방향 격리 특성을 나타내지만, 제한한 서큘레이터는 훨씬 넓은 80 MHz의 대역폭에 걸쳐 18 dB 이상의 역방향 격리 특성을 얻었다.

IV. 결 론

본 논문은 혼합 정적 공진기와 시간 변조 공진기를 사용하여 순방향 전송 삽입 손실은 작으면서 역방향 격리 주파수 대역폭이 넓은 비자기 서큘레이터를 제시하였다. 정적 공진기와 시간 변조 공진기를 효과적으로 통합함으로써 역방향 격리 대역폭 순환기를 향상시키는 동시에 상대적으로 작은 전송 삽입 손실을 달성할 수 있었다. 이는 대역 내에 두 개의 고유한 널을 생성하여 역방향 격리 대역폭을 향상시킬 수 있었다. 제안된 서큘레이터는 대역 내 전이중 통신 시스템 및 동시 송수신 레이더에서 자기 간섭 신호 제거에 사용될 수 있다.

References

[1] K. E. Kolodziej, B. T. Perry, and J. S. Herd, "In-band

full-duplex technology: Techniques and systems survey," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 3025-3041, Jul. 2019.

[2] B. K. Neil, J. L. Young, "Experimental investigation of a self-biased microstrip circulator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no.7, pp. 1669-1674, Jul. 2009.

[3] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Frequency tunable impedance matching nonreciprocal bandpass filter using time-modulated quarter-wave resonators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 8, pp. 8356-8365, Aug. 2022.

[4] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Nonreciprocal bandpass filter using mixed static and time-modulated resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 4, pp. 297-300, Apr. 2022.

[5] G. Chaudhary, Y. Jeong, "Unequal power division ratio nonreciprocal filtering power divider with arbitrary termination impedance and center frequency tunability," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, no. 1, pp. 242-251, Jan. 2024.

[6] Z. Chen, C. Zhou, and W. Wu, "Magnetless microstrip circulators based on differential spatiotemporal modulation of resonators," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 1-8, Mar. 2022.

[7] A. Kord, D. L. Sounas, and A. Alu, "Pseudo-linear time-invariant magnetless circulators based on differential spatiotemporal modulation of resonant junctions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 6, pp. 2731-2745, Jun. 2018.

[8] A. Kord, D. L. Sounas, and A. Alu, "Magnet-less circulators based on spatiotemporal modulation of bandstop filters in a delta topology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 2, pp. 911-926, Feb. 2018.