

교차편파 SRR을 이용한 재구성 공진기 설계

김진영¹, 정창원^{1*}

¹서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

Design of Reconfigurable Resonator with Cross Polarized SRR

Jinyoung Kim¹ and Changwon Jung^{1*}

¹Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology

요약 본 논문에서는 마이크로 스트립 선로로 구성된 Split Ring Resonator (SRR) 구조를 이용하여 대역통과 필터를 설계하였다. 설계된 필터는 metamaterial 구조이며, 두 개의 공진주파수를 갖는다. SRR은 마이크로 스트립 선로에 삽입된 4개의 SRR 구조로 설계 되었다. 각각의 SRR은 가상 스위치 동작에 의해 4개의 state를 가지며, Switch의 ON/OFF동작에 따라 주파수 재구성 특성을 보이는 대역 통과 공진기를 설계하였다. 공진기의 전자기적 특성을 설명하기 위해 Ziolkowski 방법으로 유전율과 투자율을 계산하였다.

Abstract We implemented double-negative metamaterials using cross-polarized split-ring resonators in a microstripline. The split-ring resonators comprised quad ring structures and were connected with the microstripline in series. Four different structures, with the shorted rings in varying locations, were fabricated to demonstrate reconfigurable band-pass characteristics. The effective permittivities and permeabilities were extracted using the Ziolkowski method. Excellent agreement between the developed circuit model and the measurement was observed up to 10 GHz.

Key Words : Band Pass Filter, Split Ring Resonator, Reconfigurable Filter, Microwave Transmission Line.

1. 서론

Victor Veselago가 1968년 음의 유전율과 투자율을 동시에 지닌 물질의 존재의 가능성을 이론적으로 고찰한 후, 이를 실현하기 위해 많은 연구가 이루어 졌다[1]. 음의 유전율을 구현하는 구조로는 Thin wire가 대표적이며, 이는 1996년 Pendry가 Plasmon 이론을 통해 유효 유전율과 thin wire 구조 사이의 관계를 증명하였다[2]. 1999년에는 SRR(Split Ring Resonator)구조를 이용하여 음의 투자율이 가능함을 검증 되었고, 지속적인 연구가 수행되어 왔다[3]. 대부분의 연구에서, 평면파 특성을 응용하기 위해서 SRR구조는 전송전로의 접지면에 삽입하여 Defected Ground Structure (DGS)의 구조로 사용되거나 자기 커플링을 높이기 위해서 주로 신호선(Signal Line)

주변에 위치되지만, 2005년 Baena J.D의 논문에서 SRR이 가지는 Cross Polarization 효과로 인한 E-field의 여기(excited)효과를 실험적으로 증명되었다[4,5].

본 논문에서는 Cross-Polarized SRR을 사용하여 Frequency Reconfigurable Double-Negative Metamaterial 대역 통과 공진기를 구현하였다. 설계된 필터는 4개 SRR의 결합구조이다. 또한 설계된 SRR(Split Ring Resonators)은 마이크로 스트립의 신호선에 삽입되었으며, SRR의 각각의 링 구조에 인공적인 스위치(artificial switch)를 삽입하고, 스위치의 ON/OFF 특성을 이용하여 주파수 재구성 대역통과 공진기를 구현하였다. 구현된 필터는 통과대역에서 음의 유전율과 음의 투자율을 가진다.

이 연구는 2013년 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Changwon Jung(Seoul National Univ. of Science and Technology)

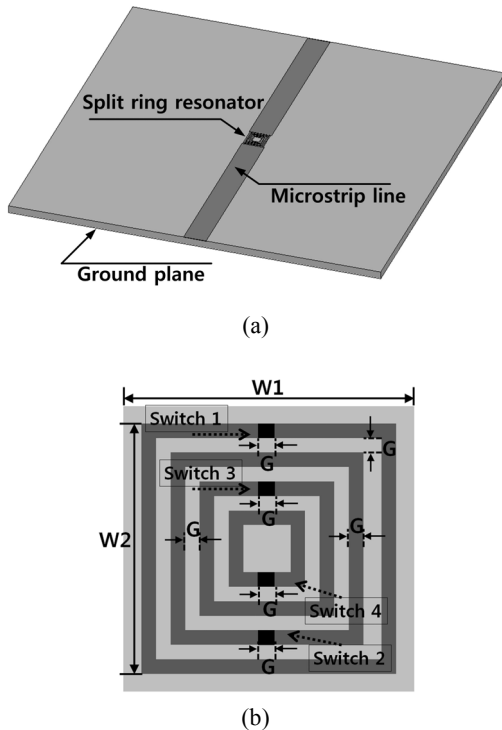
Tel: +82-10-9969-4078 email: changwoj@snut.ac.kr

Received April 3, 2013

Revised (1st May 6, 2013, 2nd May 23, 2013)

Accepted July 11, 2013

2. 본론



[Fig. 1] Proposed cross-polarized SRR filter structure.
 (a) microstripline with quad rings SRR
 (b) Reconfigurable SRR structures with four artificial switches

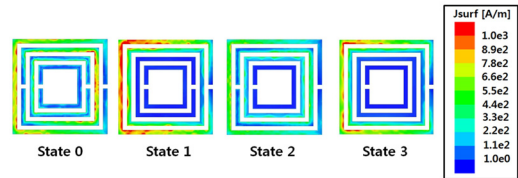
2.1 SRR 재구성 필터의 구조 및 시뮬레이션 결과

Fig. 1은 SRR 구조의 대역 통과 공진기의 전체 구조를 보여준다. 전체적인 공진기의 구조는 Fig. 1(a)와 같이 Microstripline에 삽입된 SRR 구조를 갖는다. 사용된 기판은 두께 1.57 mm의 비교적 손실이 낮은 유전체기판 (TLY-5: $\epsilon_r = 2.2$, $\tan\delta = 0.0009$)을 사용 하였고, 50 Ohm 매칭을 위해 전송선로의 폭을 4.8 mm로 하였다. 제안된 SRR 대역 통과 공진기에 Fig. 1(b)와 같은 4개의 가상 스위치 (artificial switches)를 삽입하여 주파수 재구성 공진기를 구현하였다. 전송선로에 삽입된 SRR 단위 셀 (SRR unit cell)은 정사각형 크기의 4개 SRR들로 결합하였다. Fig. 1(b)에서 line 및 SRR의 넓이는 각각 $W1$ 는 4.8 mm이며, $W2$ 는 4.4 mm이다. SRR 사이의 거리 및 가상 스위치의 간격 G 는 0.2 mm로 설계하였다.

[Table 1] The state configurations according to the shorted split rings

States	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4
0	OFF	OFF	OFF	OFF
1	OFF	ON	OFF	OFF
2	OFF	OFF	ON	OFF
3	OFF	ON	ON	OFF

4개의 SRR에서 전기용량의 갭(capacitive gap)은 교대로 위치해 있다. 이는 마이크로 스트립 라인에 효율적인 E-field Coupling을 위해서 설계되었으며, 4가지의 state는 각 스위치 동작에 따라 4개의 서로다른 동작 주파수를 가진다. 각각의 Switch ON/OFF 상태는 Table 1에 나타내었다.



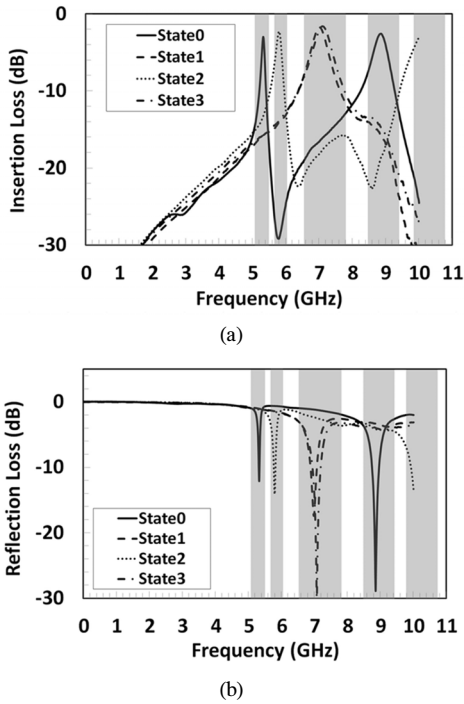
[Fig. 2] Simulated surface current distributions of all the states.

Fig. 2는 각각의 State에 따른 전류 분포의 시뮬레이션 결과이며, Switch ON 시켰을 때 SRR의 전류 분포 밀도가 매우 낮다는 것이 확인 된다. 또한 State 0 와 State 3 이 매우 유사한 전류 분포를 가지고 있음이 확인 된다.

2.2 SRR 재구성 필터의 측정 결과

각각의 State에 따른 삽입 손실(S21)과 반사손실(S11)의 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 마이크로 스트립의 신호선에 설계된 SRR 구조를 삽입시키면 대역통과의 특성을 가진다. 공진 주파수에서 삽입손실은 2-3 dB사이이며, 반사손실은 -10 dB보다 작은 값을 가진다.

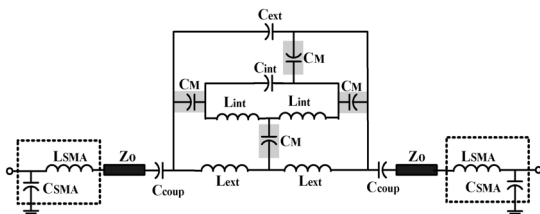
State 0는 5.17 GHz와 8.85 GHz, State 2는 5.8 GHz와 10 GHz에서 공진주파수를 가지는 이중 대역 통과 공진기로 구현된다. State 1과 State 3는 거의 같은 공진주파수(@ 7 GHz)를 가진다. 측정결과로부터, 4개가 결합한 SRR는 Switch의ON/OFF상태에 따라서 주파수 재구성 특성을 가진 필터로 구현이 가능하다는 것을 보인다. 이것은 Fig. 2에서보면 알 수 있으며, State 3에서 Switch 3를 ON상태로 두면 Switch 2가 ON 되어 있기 때문에 전류 분포는 아무런 영향을 보이지 않는다. 그렇기 때문에 State 1과 3의 공진 주파수가 매우 유사하다.



[Fig. 3] Measured insertion and reflection loss.
 (a) Measured insertion loss.
 (b) Measured Reflection loss.

2.3 제작된 SRR 필터의 등가회로 및 전자기적 특성.

Fig. 4는 제안된 필터의 등가회로이다. SRR 구조는 두 개의 LC Tank 회로로 표현되며, 이들 회로 사이의 에너지 커플링은 capacitance(CM) 때문에 생성된 것이다. 마이크로 스트립라인과 SRR 사이의 커플링(Ccoup)은 50fF으로 예상된다. 각각의 Split Resonator는 적당한 Q-factor의 값을 가지고 위해, Lext와 Lint들은 각각 1Ω과 2Ω의 직렬 저항을 가진다. 추출한 소자 값들은 Table 2에 나타나있다. 측정 시 SMA 커넥터들에 의한 기생 성분이 생겨나 양 끝에 LSMA와 CSMA의 성분이 추정되며, 그 값은 각각 0.25 nH와 300 fF이다.



[Fig. 4] Equivalent circuit of reconfigurable SRR filter.

[Table 2] Extracted component values in Fig. 4

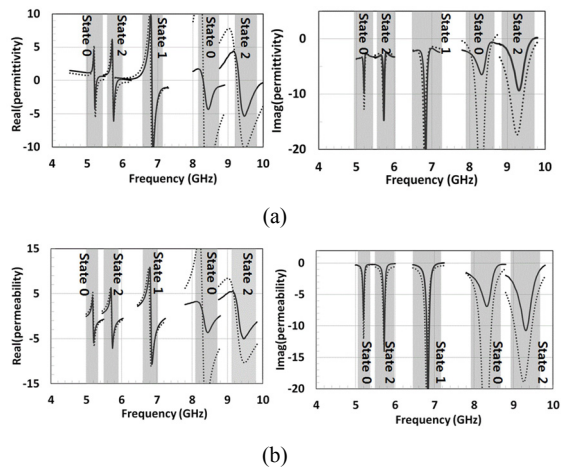
(units: nH, fF)

States	L_{ext}/C_{ext}	L_{int}/C_{int}	C_M	C_{coup}
0	6/20	4/20	35	50
1	6/18	2.3/6	0	50
2	6/20	4/20	22	50
3	6/18	2.3/6	0	50

유효 유전율과 투자율은 Ziolkowski가 제안한 방법을 사용하여 계산하였다.[6] 유전율과 투자율을 표현하는 식은 다음과 같다.

$$\mu_r = \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - S_{21} + S_{11}}{1 + S_{21} - S_{11}}, \quad \epsilon_r = \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - S_{21} - S_{11}}{1 + S_{21} + S_{11}} \quad (1)$$

여기서, k_0 는 복소 파수(complex wave number)이고, d 는 SRR 필터의 길이이다. 측정 결과로부터 얻은 결과들이 Fig. 5에 나타나있다.



[Fig. 5] Comparisons between the measurements (—) and extracted circuit simulation (····)

- (a) permittivity
- (b) permeability

3. 결론

본 논문에서는 Cross-polarization 특성을 가지는 Double Negative Metamaterial의 SRR구조를 사용하여 주파수 재구성 대역 통과 공진기를 구현하였다. 마이크로 스트립의 신호선에 삽입된 각각의 SRR은 커패시티브적으로 커

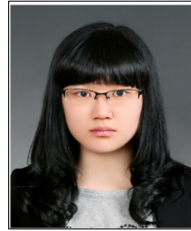
플링되며, 각각의 SRR 구조에 인공적인 스위치를 삽입하였다. 삽입된 가상 스위치는 ON/OFF 로 동작하며 주파수 재구성 공진기로 구현된다. 측정과 시뮬레이션 각각의 유전율과 투자율을 비교 했을 때, 각각 State에서 공진 주파수는 음의 유전율 및 투자율을 가지며, 이는 Lorentzian 특성을 이용해서 분석 하였다. 본 연구에서는 Double Negative metamaterial의 특성을 가지는 SRR을 평면형 마이크로 스트립 라인에 삽입하여 E-filed coupling 된 SRR의 구현 가능성을 보였으며, 다수 개의 SRR을 이용 소형 주파수 재구성 필터를 설계하여 하나의 필터로 여러 다중대역에서 사용되어질 수 있음을 보였다.

References

- [1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Sov. Phys.-Usp., vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan.-Feb., 1968. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Low frequency plasmons in thin-wire structures", Phy. Condens. Matter, pp. 4785-4809, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/10/22/007>
- [3] Smith. D. R., Padilla. W. J., Vier., D. C., Nemat-Nasser S.C., and Schultz, S.: 'Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity', App. Phys. Lett., 2000, 84, pp. 4184 - 4187 DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [4] Baena J. D., et al.: 'Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines', IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2005, 53 (4), pp. 1451 - 1461 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2005.845211>
- [5] Garcia, J., et al.: 'Spurious pass band suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators', IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., 2004, 14 (9), pp. 416 - 418 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LMWC.2004.832066>
- [6] Ziolkowski, R. W.: 'Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials', IEEE Trans. Antennas Propag., 2003, 51 (7), pp. 1516 - 1529 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2003.813622>

김진영(Jin Young Kim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 청주대학교 나노과학과 (이학사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 NID융합기술 대학원 방송 통신 융합프로그램 석사과정

<관심분야>

Frequency Selective Surface(FSS), EM theory.

정창원(Changwon Jung)

[정회원]



- 2001년 12월 : University of Southern California, 전자공학 (석사)
- 2005년 6월 : University of California, Irvine, 전자공학 (박사)
- 1997년 1월 ~ 2000년 6월 : LG 정보통신, 연구원
- 2005년 7월 ~ 2005년 10월 : University of California, Irvine, Post Doctor
- 2005년 11월 ~ 2008년 4월 : 삼성 종합기술원, 전문연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술 대학교, NID 융합기술 대학원, 교수

<관심분야>

안테나, RF, EMI/EMC, RF-MEMS, 센서