

마이크로파 전송선로에 삽입된 주파수 선택 표면을 이용한 광대역 대역저지필터

김진영¹, 정창원^{1*}

¹서울과학기술대학교, NID융합기술대학원

Broad Band Stop Filter Using Frequency Selective Surface Embedded in Microwave Transmission Line

Jinyoung Kim¹ and Changwon Jung^{1*}

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

요약 본 논문은 마이크로스트립 전송선로에 삽입된 주파수 선택 표면(FSSs)을 사용하여 주기적인 구조를 갖는 대역저지필터(BSF)에 관한 것이다. 제안된 대역저지필터는 변형된 크로스 루프 슬롯 (Cross-loop slot)을 단위 셀로 하여 주기적인 구조로 설계하였으며, 설계된 대역 저지 필터는 등가회로 모델과 분산 도표(dispersion diagram)로 해석하였다. 대역 저지 필터의 중심주파수(f_0)는 6.6 GHz이다. 제안된 필터는 단위 셀의 개수가 증가하면 3dB 대역폭은 넓어지고 삽입손실은 줄어드는 특성이 있다. 또한 제안한 대역저지필터는 소형의 평면구조를 가지며, 한 번의 에칭으로 제작이 가능 하여 다양한 분야의 RF 필터로서 사용 가능성이 높다.

Abstract This article presents a band-stop filter (BSF) by using a periodic structure property of frequency selective surfaces (FSSs) embedded in a microstrip transmission line. The proposed BSF is designed with FSS unit cells modifying the cross-loop slots. The BSF is interpreted with an equivalent circuit model and a dispersion diagram. The center frequency (f_0) of the BSF is 6.6GHz. Proposed filter increases the number of unit cell. As a result, 3dB bandwidth is wider and insertion loss is reduced. Also, Fabricated BSF exhibits uniplanar geometry, simple fabrication.

Key Words : Band Stop Filter, Frequency Selective Surfaces, Microwave Transmission Line, Broad Bandwidth

1. 서론

마이크로스트립 전송선로에 주기적인 구조로 설계된 다양한 공진기가 지속적으로 연구 되어 왔다. 이러한 필터는 전송선로에서 전파의 방향을 따라 단위 셀의 주기적인 배열은 등가회로상의 인덕턴스와 커패시턴스를 구성하며, 특정 공진 주파수를 갖도록 설계된다[1]. 현재까지 공진기로 표현된 전송선로는 photonic bandgap (PBG), electromagnetic bandgap (EBG), defected ground structure (DGS), split ring resonator (SRR) 등의 구조로 연구가 진

행 되어 왔다[2-11]. PBG또는 EBG는 접지 면에서 주기적인 패턴 시각에 의해 마이크로파(micro wave) 혹은 밀리미터파(millimeter wave) 대역에서 공진기로 구현 된다 [2-3]. 하지만, 이 방법은 크기가 커지고, 접지면의 차폐 전류가 분포하는 등 몇몇의 단점을 가진다. 이러한 점을 보완하기 위해 DGS와 SRR의 구조의 소형화 [4-5] 및 신호선위에 시각된 패턴을 가진 주기적인 구조에 대한 많은 연구가 진행 되었다 [6-11]. FSS(주파수 선택 표면 : Frequency Selective Surface)는 이러한 주기적인 구조들 중 하나이며, 원하는 주파수 대역의 전자파를 전송하거나

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

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

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

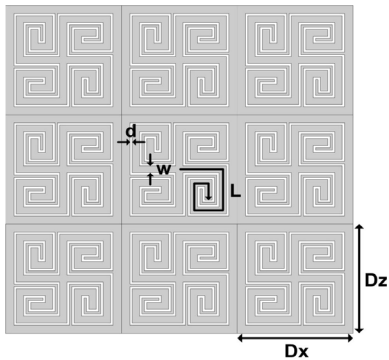
Received July 17, 2012

Revised (1st October 23, 2012, 2nd November 27, 2012)

Accepted December 6, 2012

원하지 않는 대역의 주파수를 차단시키는 역할을 하며, 대부분은 공간필터로 설계 된다[12].

본 논문에서는 대역저지필터 (BSF)의 동작을 위해서 전송선로 신호선에 FSS 단위 셀을 삽입하여 1차원의 주기적인 구조로 설계하였다. 제안된 BSF는 평면형으로 구성되어 있으며, Spiral형태의 Cross-loop Slot은 FSS 단위 셀로 사용된다[13]. 제안된 필터의 단위셀 구조는 비교적 간단하며, 전송선로의 신호선에 완벽히 삽입되었다. FSS 단위 셀의 차수들을 조절함으로써, 삽입 손실 및 대역폭을 포함한 필터 성능 조절이 가능하며, 차수가 증가 할수록 삽입손실은 줄어들고 대역폭은 넓어지는 특성을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 FSS를 이용한 필터는 기존의 다양한 FSS 단위셀들을 사용함으로써 설계 자유도를 높일 수 있다.



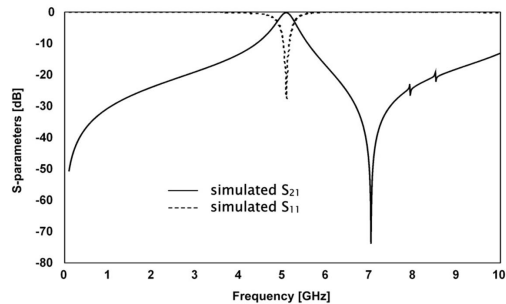
[Fig. 1] Schematic of the FSS unit cell

2. 본론

2.1 FFS 단위 셀의 구조와 시뮬레이션 결과.

Fig. 1은 공간 필터로 사용되는 FSS의 구조를 보여준다. 제시한 FSS의 단위셀은 기본적으로 Cross-loop Slot의 형태를 가지고 있다[13]. 제안한 FSS 단위 셀의 4개의 팔은 크기를 줄이기 위해 Spiral형태로 구성하였다. 사용된 기판은 두께 1.57mm의 비교적 낮은 손실을 가지는 유전체기판(TLY-5: $\epsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$)을 사용하였다. FSS 단위 셀들(FSS unit cells : FUs)은 가로 세로 각각 (Dx, Dz) 4.8mm의 정사각형 기판 상에 배열되었으며, 제안한 Spiral Cross-loop Slot (SCLS)의 치수는 교차길이; $L=7.35\text{mm}$, 교차너비; $w=0.3\text{mm}$, 슬롯간격; $d=0.1\text{mm}$ 이다. Cross-loop Slot는 이러한 파라미터들의 값을 변화하면서 공진 특성을 변화시킬 수 있다. 가장 중요한 것은 십자형태의 슬롯 길이 ($L=$ 대략 $\lambda_g/8$)가 증가하면

RF(radio frequency) 전류 진로 길이가 증가하기 때문에 동작주파수는 낮아진다. 공간상에 무한히 SCLS 구조가 배열되고, 이러한 FSS 상에 전자기파가 수직으로 입사하면 대역을 통과하는 공간 필터로서의 역할을 수행한다. 시뮬레이션 결과는 [Fig. 2]에서와 같이 5.09 GHz에서 공진 하며, 5.09 GHz에서 반사계수 (S11)의 값은 27.5 dB이다. 시뮬레이션은 Ansoft사의 HFSS에서 Floquet 모드를 사용하여 수행 하였다.

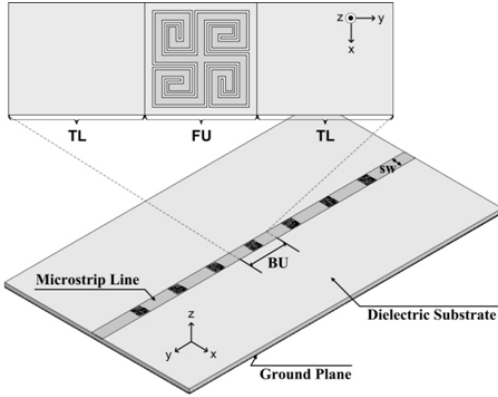


[Fig. 2] Simulation Result of FSS unit cell

2.2 BSF의 구조와 시뮬레이션 결과.

Fig. 3은 위에서 언급한 FSS 단위셀 (SCLS)을 마이크로파 대역의 필터로 사용하기 위해 전송선로에 삽입한 BSF의 도식도이다. 전송선로 전체 기판의 크기는 $135.7 \times 80 \text{ mm}^2$ 이며, 50 Ω 정합을 위한 신호선의 폭은 4.8mm이다. FSS 단위 셀이 신호선에 삽입되어 BSF의 특성을 나타내기 때문에 필터 구성 시에 추가적인 공간이 필요하지 않다. FSS 단위 셀들은 동일 길이의 전송선로로 구성되며, FSS 단위 셀(FSS unit cell;FU)의 길이는 4.8mm이고, FU의 앞 뒤 전송선로 길이(Transmission Line Length : TL)는 5.8mm이다. BSF의 단위 셀(Band-stop Filter Unit Cell : BU)의 길이는 16.4mm($\lambda_g/2$)이다. 이 값은 Bragg법칙에 의해서 얻어진 결과이다($d = n\lambda/2\sin\theta$) [14]. 이러한 이유로, BSF는 특정 유도 파장에서 일정한 간격으로 반사되는 파의 최대에너지를 생성할 수 있다. 시뮬레이션은 2차원 상용 소프트웨어인 Ansoft사의 Designer를 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 Table 1에 나타내었다. 1 ~ 7개의 단위셀을 삽입하여 시뮬레이션한 결과, 첫 번째 공진 주파수는 단위셀 수와 비교적 무관하게 6 GHz 대역에서 대역저지 특성을 보이며, 직렬 연결된 단위셀의 수가 증가 할수록 첫 번째 공진의 주파수 대역폭은 넓어지고, Q 값은 줄어들며, 리턴로스가 줄어들어 필터특성이 향상됨을 볼 수 있다. 또한, 본 논문에서 설계된 BSF는 기생공진에 의한 두 번째 공진을 가지고 있으

며, 이 또한 1 ~ 7개의 직렬 단위 셀 수의 증가와 비교적 무관하게 9 GHz 대역에서 두 번째 공진 주파수를 갖는다.



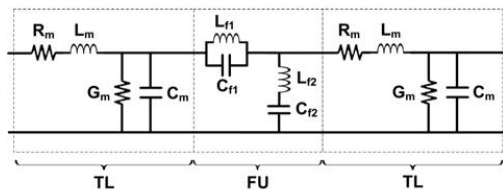
[Fig. 3] Geometry of the BSF loading the FUs.

[Table 1] Full-wave simulation results of BSF with a FSS unit cell from one to seven.

	1st 공진 주파수 [GHz]	1st 차단 주파수 [GHz]	1st 공진 대역폭 [GHz]	1st 공진의 Q-값	1st 리턴 로스 [dB]	2nd 공진 주파수 [GHz]	2nd 차단 주파수 [GHz]
FSS1	6.64	6.13	0.83	8	-1.3	9.51	9.46
FSS3	6.63	4.95	2.33	2.85	-0.8	9.51	9.43
FSS5	6.58	4.9	2.49	2.64	-0.7	9.52	9.4
FSS7	6.58	4.97	2.44	2.7	-0.7	9.48	9.38

2.3 등가회로와 분산도표(Dispersion Diagram)

Fig. 4는 제안된 BSF 단위 셀의 등가회로이다. BSF에 대한 단위 셀의 대역저지 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통하여 S-parameter 값을 확인하였다. BSF 단위 셀(BU)의 등가회로를 비교적 간단하게 제시하였다.



[Fig. 4] The equivalent circuit of the proposed BU. The extracted parameters are $L_{f1}=0.385\text{nH}$, $C_{f1}=1.498\text{pF}$, $L_{f2}=39.684\text{nH}$ and $C_{f2}=0.007\text{pF}$.

제안된 등가회로의 병렬 L과 C (L_{f1} , C_{f1})는 직렬 L과 C (L_{f2} , C_{f2})로 구성 된다. 또한, 등가회로의 소자 값들은 시뮬레이션 결과로부터 얻을 수 있으며, 각 소자 값들은 다음과 같은 식과 시뮬레이션으로부터 구한 각 소자 값을 아래에 정리 하였다. C_{f1} 은 다음 식으로 표현 된다.

$$C_{f1} = \frac{\omega_{c1}}{2Z_0(\omega_{o1}^2 - \omega_{c1}^2)} \quad (1)$$

여기서, $\omega_{o1}, \omega_{c1}, Z_0$ 각각 첫 번째 공진 주파수, 첫 번째 낮은 차단주파수, 그리고 특성 임피던스 이며, L_{f1} 은 다음과 같다.

$$L_{f1} = \frac{1}{\omega_{o1}^2 C_{f1}} = \frac{2Z_0(\omega_{o1}^2 - \omega_{c1}^2)}{\omega_{o1}^2 \omega_{c1}} \quad (2)$$

L_{f1} 과 C_{f1} 값들은 각각 0.385 nH 와 1.498 pF이며, 또한 C_{f2} 은 다음과 같이 표현 된다.

$$C_{f2} = \frac{2(\omega_{o2}^2 - \omega_{c2}^2)}{Z_0 \omega_{o2}^2 \omega_{c2}} \quad (3)$$

여기서, ω_{o2}, ω_{c2} 는 각각 두 번째 공진 주파수, 두 번째 낮은 차단주파수 이며, L_{f2} 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_{f2} = \frac{1}{\omega_{o2}^2 C_{f2}} = \frac{Z_0 \omega_{c2}}{2(\omega_{o2}^2 - \omega_{c2}^2)} \quad (4)$$

L_{f2} 와 C_{f2} 의 값은 각각 39.684 nH 와 0.007 pF이다. 추출된 값들의 결과는 Agilent ADS에서 회로 시뮬레이션으로 확인 되었다. BSF의 Full-wave 시뮬레이션과 등가회로의 회로 시뮬레이션의 결과가 일치함을 확인 하였다.

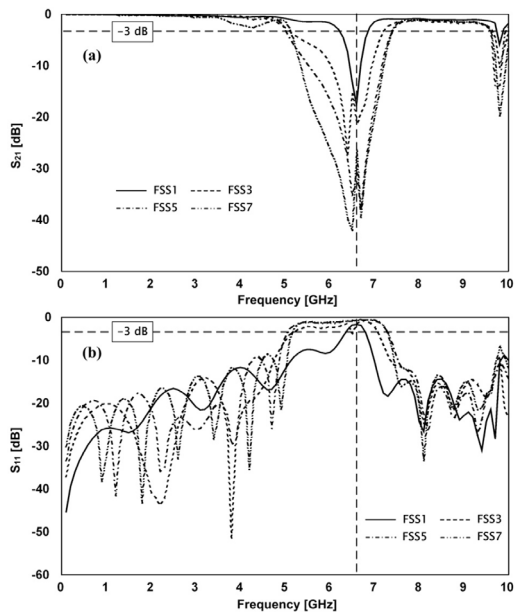
3. 측정결과 및 논의

제안된 필터는 한 번의 에칭을 통해 기판 상에 제작 된다. 본 논문에서는 위에서 언급한 시뮬레이션 결과를 확인하기 위해 FSS 단위셀을 BU(Band-stop Unit)로 구성 하였고, 이들을 1, 3, 5, 7 개의 직렬 연결하여 제작 및 측정 하였다. [Fig. 5]의 (a)는 제안된 필터에 대한 투과계수 (S21)의 측정 결과이다. 이는 하나의 BSF 단위 셀의 측정된 공진주파수는 6.6 GHz 근처에서 대역저지 동작특성

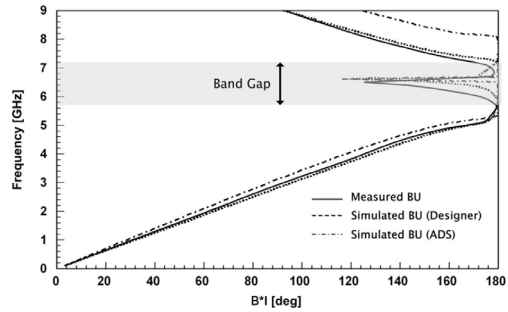
을 갖는 것을 보여준다. 3-dB 차단주파수의 대역저지 범위는 6.2 GHz에서 6.9 GHz이다. [Fig. 5]의(b)에서 처럼, BSF의 단위 셀은 전송선로에 완벽히 삽입된 상태에서도 반사 손실은 매우 낮음을 알 수 있다. 또한 측정결과는 위에서 언급한 시뮬레이션 결과와 유사함을 보인다. 측정 결과로 부터 BSF의 단위 셀 수가 증가하면, 차단 주파수의 기울기가 가파른(Sharp) 특성을 보이며 결과적으로 필터 성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한, 분산도표(dispersion diagram)으로 부터 설계된 필터가 대역저지(stop-band) 특성을 갖는다는 것을 확인하기 위하여 [Fig. 6]에서와 같이 제안된 BSF에 대한 시뮬레이션 그리고 측정된 분산도표를 도시하였으며, 위상상수 β 는 아래 식(5)로 부터 계산하였다.

$$\beta l = \cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \right) \quad (5)$$

분산도표는 시뮬레이션 그리고 측정된 BSF의 S-parameter 값으로부터 위상상수 β 값을 추출하여 작성하였으며, 분산도표로부터, 중심 주파수 6.6 GHz 으로 하는 5.7 - 7.2 GHz 대역에서 저지대역 (stop-band)이 형성됨을 알 333333수 있다



[Fig. 5] Full-wave simulation results of BSF with a BU of one to seven. (a) Transmission spectra (S₂₁) and (b) Reflection spectra (S₁₁)



[Fig. 6] The dispersion diagram of the simulated and measured BU. The band gap shows the band-stop of the corresponding BU predicted with dispersion diagram.

4. 결론

본 논문에서는 수정된 FSS 단위셀 (SCLS)을 이용하여, 전송선로 평면상에 대역저지필터(BSF)를 설계, 제작 및 측정하였다. FSS셀은 초고주파대역에서 공간상 대역저지 혹은 대역통과 특성을 보이며, 이를 이용하여 전송선로에 FSS 단위 셀을 주기적으로 배열함으로 원하는 주파수에서 BSF를 설계 및 제작 하였다. FSS를 이용한 BSF는 등가회로 모델과 분산도표(dispersion diagram)로 분석 하였으며, 필터특성을 시뮬레이션 및 측정 결과로 확인 하였다. FSS 단위 셀을 전송선로에 완벽히 삽입하여 크기를 줄였고, 반사 손실, 스킨트 특성, 대역폭은 BSF의 단위 셀의 수가 증가 하면서 향상됨을 확인하였다. 제안된 FSS 단위 셀을 사용한 BSF는 주파수 기생과 고조파 모드를 제거하기 위한 다양한 전자회로 기술에 응용될 것으로 예상된다.

References

- [1] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Wiley, 2005, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [2] V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Vol.8, No.2, pp.69-71, 1998.
- [3] Y. Li, H. Jiang, L. He, H. Li, Y. Zhang, and H. Chen, "Multichanneled filter based on a branchy defect in microstrip photonic crystal", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, No.081106, 2006, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [4] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian,

- and T. Itoh, "A Design of the Low-Pass Filter Using the Novel Microstrip Defected Ground Structure", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.49, No.1, pp.86-93, 2001, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [5] F. Falcone, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. D. Baena, J. Bonache, M. Beruete, R. Marqués, F. Martín, and M. Sorolla, "Babinet Principle Applied to the Design of Metasurfaces and Metamaterials", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.93, No.197401, 2004, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [6] J. Sor, Y. Qian, and T. Itoh, "A Novel Low-Loss Slow-Wave CPW Periodic Structure for Filter Applications", 2001 *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Vol.1, pp.307-310, 2001, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [7] M. Kazerooni, G. R. Rad, and A. Cheldavi, "Behavior Study of Simultaneously Defected Microstrip and Ground Structure (DMGS) in Planar Circuits", *PIERS Proceedings* Vol.1, No.1214, pp.895-900, 2009.
- [8] I. A. Ibraheem, and M. Koch, "Coplanar waveguide metamaterials: The role of bandwidth modifying slots", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.91, No.113517, 2007, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [9] C. S. Kee, M. Y. Jang, I. M. Park, H. Lim, J. E. Kim, H. Y. Park, and J. I. Lee, "Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to reduce the size of microstrip photonic band gap structures", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.80, No.1520, 2002, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [10] C. S. Kee, M. Y. Jang, S. I. Kim, I. M. Park, and H. Lim, "Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.86, No.181109, 2005, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [11] D. Chen, S. Wang, L. Li, Z. Liu, and X. Z. Zhao, "Microstrip filter with H-shaped fractal", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, No.253507, 2006, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [12] B. A. Munk, "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", *John Wiley*, 2000, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [13] X. Meng, and A. Chen, "Influence of cross-loop slots FSS structure parameters on frequency response", 2009 *IEEE Int. Symp.*, Vol.1, No.939, 2009, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [14] H. P. Myers, "Introductory Solid State Physics", *CRC Press*, 1997.
- [15] C. Caloz, and T. Itoh, "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications", *Wiley*, 2005, [Article\(CrossRefLink\)](#)

김진영(Jin Young Kim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 청주대학교 나노과학과(이학사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 NID융합기술 대학원 방송통신 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 : 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교, NID 융합기술 대학원, 교수

<관심분야>

안테나, RF, EMI/EMC, RF-MEMS, 센서