

CRLH 전송선로를 이용한 초광대역 대역통과 필터의 설계 및 구현

김기래*

Ultra Wideband Bandpass Filter Design using the CRLH Transmission Line

Gi-Rae Kim*

Department of Electronic Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

요 약

본 논문에서는 복합 좌/우향 (CRLH) 전송 선로를 이용하여 초광대역 필터의 새로운 설계 방법에 대해 나타내었다. CRLH 전송선로의 특성을 구현하기 위해 접지면에는 결함 접지면 구조(DGS)와 윗면에는 마이크로스트립 인터 디지털 결합기를 이용하였다. 본 논문에서 제안하는 CRLH 전송선로는 저역통과 필터와 고역통과 필터의 특성을 결합한 특성을 나타내며 삽입손실이 적고 광대역 필터 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 몇 개의 셀 구조에 대해 연구 하였으며, 본 논문에서는 3-셀 구조의 UWB 필터를 설계하고 구현하였다. 실험결과와 시뮬레이션 결과가 일치하며 중심주파수 5 GHz에서 105 %의 대역폭을 나타내며 삽입손실은 중심주파수에서 0.7 dB를 나타내었다.

ABSTRACT

A novel design method of ultra wideband based on the composite right-/left handed (CRLH) transmission line is presented in this paper. Defected ground structure and microstrip interdigital coupler are used to implement the CRLH transmission line. The proposed CRLH transmission line in this paper have composite characteristics of low pass filter and high pass filter, also it has good advantages of low insertion loss and ultra wide passband characteristics. The structure with different cell number are studied, and the UWB filter using 3-cell CRLH transmission line is fabricated and measured, which shows a good agreement between simulated and measured results. It has center frequency of 5 GHz, fractional bandwidth of 105 %, and insertion loss of 0.7 dB at center frequency.

키워드 : 결합접지면구조, 초광대역 필터, 메타물질, CRLH 전송선로

Key word : DGS(Defect Ground Structure), Ultra Wideband Filter(UWB), Metamaterial, CRLH-TL

접수일자 : 2013. 06. 03 심사완료일자 : 2013. 07. 02 게재확정일자 : 2013. 07. 22

* **Corresponding Author** Gi-Rae Kim (E-mail : grkim@silla.ac.kr, Tel : +82-51-999-5697)

Department of Electronic Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.10.2233>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

현재까지 전통적인 마이크로웨이브 필터 이론들은 협대역과 중심주파수에서 50% 이하의 대역폭을 갖는 필터 설계에 대해서는 잘 확립되어 있다. 그러나 전통적인 필터 이론은 광대역 필터를 설계하는 데 있어서는 여러 가지 한계점이 존재한다. 최근 초광대역(UWB) 대역통과 필터 설계를 위해 새로운 구조와 물질을 개발하는데 많은 연구를 해왔다[1,2]. 본 논문에서는 좌향 전송 선로(LH-TL)[3]과 우향 전송 선로(RH-TL)의 혼합 구조인 좌향/우향 복합 전송선로(CRLH-TL)[4]를 이용하여 5 GHz 중심주파수에서 105% 대역폭을 갖는 광대역 대역통과 필터를 설계하였다. 저주파에서 높은 통과 특성을 가지는 전송선로와 고주파에서 낮은 통과 특성을 가지는 전송선로의 특성을 조합한 새로운 종류의 UWB대역통과 필터가 CRLH-TL을 기반으로 설계되었다. 본 논문에서 CRLH-TL을 구현하기 위해 제안하는 구조는 밑면에는 덤벨형의 결합 접지면 구조(DGS)를 만들고 윗면에는 인터디지털(interdigital) 결합기를 만들었다. 이것은 저역통과 필터와 고역통과 필터의 혼합적 특성을 나타내며 삽입손실이 적고 광대역 필터 특성을 갖는 장점이 있다. 여러 개의 셀을 결합하여 UWB 대역통과 필터를 설계하였다. 본 논문에서는 이론을 검증하기 위해 3-셀 구조의 CRLH-TL을 이용하여 5GHz 중심 주파수에서 105%의 대역폭을 갖고 중심주파수에서 0.7dB의 삽입손실을 갖는 UWB 필터를 설계하였다. 시뮬레이션 결과와 측정결과가 일치함을 보였다.

II. CRLH 전송선로

CRLH 전송선로는 메타물질의 일종으로 이것은 순수한 물질적 합성을 통해 만들어진 구조로부터 특성들을 얻을 수 있는 인위적인 구조이다[5,6]. 메타물질 분야는 10년 전부터 과학계에서 많은 관심을 받아왔다. 메타물질은 실질적인 응용을 위한 지속적인 개발과 진보를 통해 차세대 소자 개발에 관심이 집중되었다. 메타물질은 자연에서 얻을 수 없는 ϵ 과 μ 의 값들을 구현할 수 있다. 메타물질에 대한 목적은 원자나 연속 매질의 분자들과 같은 방식으로 반응을 보이는 전기, 자기 쌍극자로 작용하는 파장 이하의 구조들을 제작하는 것

이다. 특정한 직선 도선이나 공진 물체들과 같은 입자 구조들이 메타물질을 형성하는 데에 이용될 때, 그 매질의 유효 ϵ 과 μ 는 특정한 주파수 대역에서 양과 음의 값 모두 얻을 수 있다는 것을 나타낸다. 비록 음의 ϵ 의 개념은 오랜 시간동안 받아들여지고 이해되어 왔지만, 음의 투자율은 전형적으로 자연 물질에서 찾을 수 없는 덜 익숙한 현상이다.

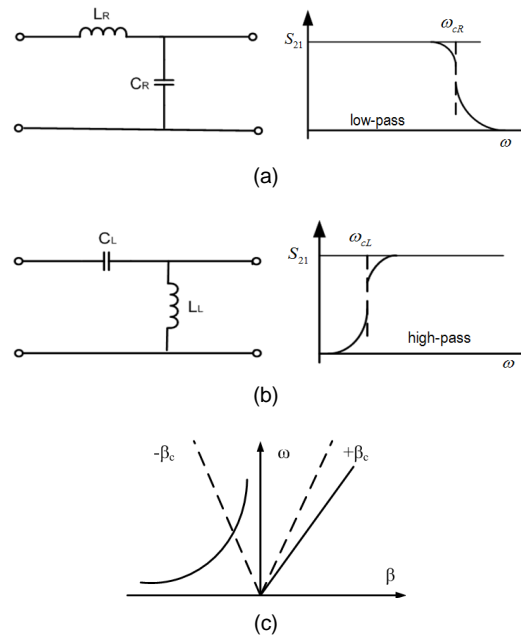


그림 1. RH와 LH 전송선로 (a) 순수 RH-TL의 등가 모델 (b) 순수 LH-TL의 등가 모델 (c) 분산 관계도
Fig. 1 RH and LH Transmission Line (a) Equivalent model of pure RH-TL (b) Equivalent model of pure LH-TL (c) Dispersion Diagram

그림 1(a)에 보인 바와 같이 순수한 우향 (RH; Right-Handed) 전송선로는 직렬 인덕턴스와 병렬 커패시턴스로 이루어져 있으며, 저역통과 응답을 나타낸다. 반대로, 그림 1(b)에 보인 바와 같이 좌향 (LH; Left-Handed) 전송선로는 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스 이루어져 있으며 고역통과 응답을 보인다. 그림 1의 등가 회로에서 무손실 전송선로라고 가정하면 RH-TL과 LH-TL의 차단주파수는 각각 식(1), (2)와 같이 된다.

$$\omega_{cR} = 1 / \sqrt{L_R C_R} \tag{1}$$

$$\omega_{cL} = 1/\sqrt{L_L C_L} \quad (2)$$

RH 전송선과 LH 전송선의 위상정수는 각각 식(3), (4)와 같이 된다.

$$\beta_{RH} = \omega \sqrt{L_R C_R} \quad (3)$$

$$\beta_{LH} = \omega \sqrt{L_L C_L} \quad (4)$$

식(3)과 (4)로부터 분산 계수를 그림 1(c)에 나타내었다. 순수 RH-TL에서 위상정수는 주파수에 비례하며, 순수 RH전송선과 함께 위상의 지연이 있음을 암시하는 양(+)의 값을 가진다. 그러나 순수 LH-TL의 위상정수는 음(-)의 값을 가지며, 주파수가 낮아질 때 증가한다. 그러므로, 순수 LH-TL의 위상 속도는 음(-)이 된다. 그러나, 위상 속도의 기울기인 군속도는 양(+)이다.

순수 LH 전송선로는 불가피하게 나타나는 RH 특성의 기생효과 때문에 자연 물질로는 그것의 특성을 나타내는 구조를 구현할 수 없다. 그러므로 혼합 좌향-/우향 (CRLH: Composite Right-/Left Handed) 전송선로는 LH-TL의 특성들을 근사적으로 구현하기 위해 개발되었다. 그림 2는 CRLH-TL의 미소부분에 대한 등가회로 모델을 나타낸다. 전송선로는 $\Delta\phi$ 주기를 가진 연속적인 N개의 단위 셀(unit cell)을 이용하여 실현될 수 있다.

전송선로의 전체 길이는 $\Delta\phi$ 의 N배이다. 이 주기적 구조에서 각 단위 셀은 이 모델에서의 직렬 인덕턴스 (L_R), 직렬 커패시턴스(C_L), 병렬 커패시턴스(C_R), 병렬 인덕턴스(L_L)를 포함한다. CRLH 전송선로의 전송특성은 그림 2(b)와 같이 대역통과 특성을 나타낸다. 각각 순수 LH-TL의 고역 통과 특성과 순수 RH-TL의 저역 통과 특성이 혼합된 대역통과 특성을 나타내며 통과대역의 중심 주파수는 식 (5)와 같다.

$$\omega_o = \sqrt{\omega_{cR} \omega_{cL}} = \frac{1}{4\sqrt{L_R C_R L_L C_L}} \quad (5)$$

주어진 L_R, C_R, L_L, C_L 의 값들에서, CRLH-TL의 구조는 $\omega_{cL} < \omega_{cR}$ 일 때, 대역통과 특징을 가진다. 이것을 이용하여 UWB 필터를 설계하기 위해서 $\omega_{cL} < \omega_{cR}$ 조

건을 만족시키기 위해서는 더 큰 L_L, C_L 을 가진 구조와 보다 작은 L_R, C_R 을 갖는 구조를 설계하는 것이 중요하다. 설계에서 중요한 것은 그림 2의 등가모델의 전송특성을 나타내는 CRLH 전송선로의 구조를 고안하는 것이다.

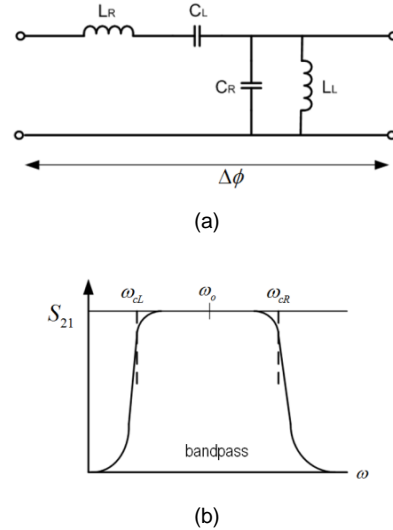


그림 2. CRLH 전송선로 (a) CRLH-TL 등가모델 (b) CRLH-TL 전송특성
Fig. 2 CRLH Transmission Line (a) Equivalent model of CRLH-TL (b) Transmission Characteristics of CRLH-TL

III. 제안된 CRLH 구조

그림 2(a)의 CRLH-TL의 등가회로에서 직렬 탱크 (series tank)와 병렬 탱크(shunt tank)는 그림 3에 표현된 마이크로스트립 인터디지털 구조와 결합 접지면 구조에 의해 구현된다. 그림 3(a)에 나타나 있는 인터디지털 구조는 핑거 갭에 의한 커패시턴스와 핑거의 굽어진 모서리를 따라 발생하는 자계유도에 따라 발생하는 인덕턴스에 의해 등가회로의 직렬 탱크(C_R, C_L)를 형성한다. 전송선로의 밑면에 만들어진 그림 3(b)의 결합 접지면(DGS) 구조는 등가회로에서 병렬 탱크(C_R, L_L)를 형성하게 된다. DGS에 대한 등가회로는 다음 장에서 자세히 나타내었다.

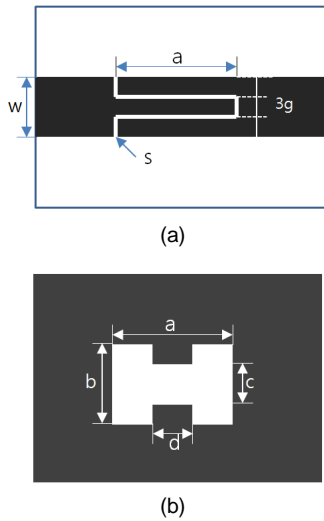


그림 3. CRLH의 기본 구조 (one-cell) (a) 윗면 (b) 밑면
 Fig. 3 Basic Structure of CRLH (a) Top side (b) Bottom side

IV. DGS의 등가회로

마이크로파 전송선로에 일정한 구조의 주기구조나 결합구조를 넣으면 기존의 전송선로에서 볼 수 없는 새로운 전송특성을 나타낸다. 주기구조나 결합구조는 등가적으로 인덕턴스나 캐패시턴스를 전송선로에 부가하기 때문에 이들 L-C에 의한 주파수 특성이 발생한다. 이러한 주기구조에는 포토닉 밴드갭 (photonic band gap, PBG) 형태의 주기구조와 결합 접지구조 (DGS) 형태의 결합 구조가 대표적으로 제시되고 있다. PBG는 다수의 주기 구조가 연속적으로 존재해야 한다는 문제가 제기 되어 회로적 응용이 매우 제한적이라는 단점이 있다. 그러나 DGS는 등가적인 L-C가 매우 선명하게 분석되고 구조와 구현 방법이 간단하여 회로 응용에 매우 폭 넓은 장점을 가지고 있다. 그림 4는 마이크로스트립 선로의 접지면에 아령형태로 식각된 패턴을 갖는 DGS의 모양을 나타낸다. 그림 5는 이와 같은 구조의 DGS 전송 특성을 3D EM 시뮬레이션 도구인 HFSS를 이용하여 나타내었다. 시뮬레이션은 유전율 2.3, 유전체 두께가 0.7874mm인 기판을 사용하였다. DGS 셀의 각 파라미터는 a=b=5mm, g=0.5mm이다. 그림 6은 제시된 DGS의 전송특성으로부터 등가회로를 나타내었다.

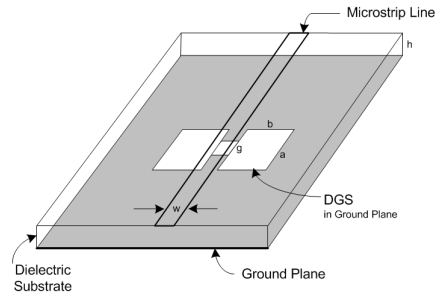


그림 4. DGS를 갖는 전송선로
 Fig. 4 Transmission Line with DGS

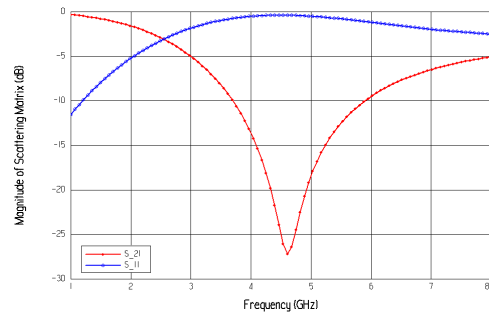


그림 5. DGS의 시뮬레이션 특성
 Fig. 5 Simulation Result of DGS

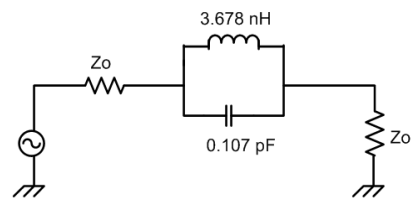


그림 6. DGS의 등가회로
 Fig. 6 Equivalent Circuit of DGS

등가회로는 병렬 LC 회로에 기인한 8GHz에서 감쇄 극을 볼 수 있다. 등가회로의 소자 값은 3dB 차단 주파수를 갖는 1-pole Butterworth 저역통과 여파기와 등가 관계로부터 유도된 식(6)과 (7)로부터 구할 수 있다.

$$C = \frac{\omega_c}{Z_o g_1} \cdot \frac{1}{\omega_o^2 - \omega_c^2} \quad (6)$$

$$L = \frac{1}{\omega_o^2 C} \quad (7)$$

여기서, ω_o 는 LC 공진 각주파수이며, ω_c 는 3dB 차단 주파수이다. <표 1>은 DGS 크기에 따른 주파수 특성과 등가 LC 값을 나타내었다. 크기 변화를 잘 나타내도록 유전율 10, 높이 1.5748mm인 기판을 이용하였으며 DGS의 크기가 커짐에 따라 공진 주파수가 감소하고 <표 1>과 같이 전송 선로의 유효 인덕턴스가 증가함을 알 수 있다.

표 1. DGS 크기에 대한 등가 LC 값
Table. 1 LC Values for DGS

파라미터	DGS Dimension (mm)		
	a=b=1.3	a=b=2.5	a=b=4.6
L (nH)	0.3675	0.866	1.9773
C (pF)	0.5122	0.5285	0.5380
f_c (GHz)	10.15	6.085	3.62
감쇠극(GHz)	11.6	7.44	4.88

V. UWB 필터의 설계

본 논문에서 제안하는 필터의 구조는 그림 7과 같다. 인터디지털 커패시터는 접지면의 결함이 초광대역 조건 $\omega_{cL} \ll \omega_{cR}$ 을 만족시키는 병렬 커패시터 C_R 를 감소시킬 동안에 연관적으로 더 큰 직렬 커패시터 C_L 값을 가진다. 다른 특성들은 광대역의 통과대역 범위에서의 밴드 갭(bandgap)을 피하는 균형적인 CRLH 요건을 맞추기 위해 신중히 선택된다. 제안된 대역통과 필터는 전파(full-wave) EM 시뮬레이터 IE3D에 의해 가상 실험되었다. 50-Ω 전송선은 $\epsilon_r = 2.65$ 와 1mm 두께의 유전체의 불변성을 가진다. 주기적 구조들과 마찬가지로 단위 구조도 연구되었다. 각 단위 구조는 접지 뒷면의 결함 구멍을 가진 인터디지털 커패시터로 구성된다. 인터디지털 커패시터는 finger width $g=0.7$ mm, 인접한 finger사이의 공간 $s = 0.3$ mm, finger length $a=10$ mm, finger의 수 $N=3$ 으로 설계되었다. 공급선(feed line)은 5mm의 길이를 가진다. 결함 접지면 구조(DGS)는 $a=10$ mm의 길이와 $b = 2.7$ mm 폭을 가진다. 주기적 구조들은 주기적 길이인 $p=19.6$ mm를 가진다.

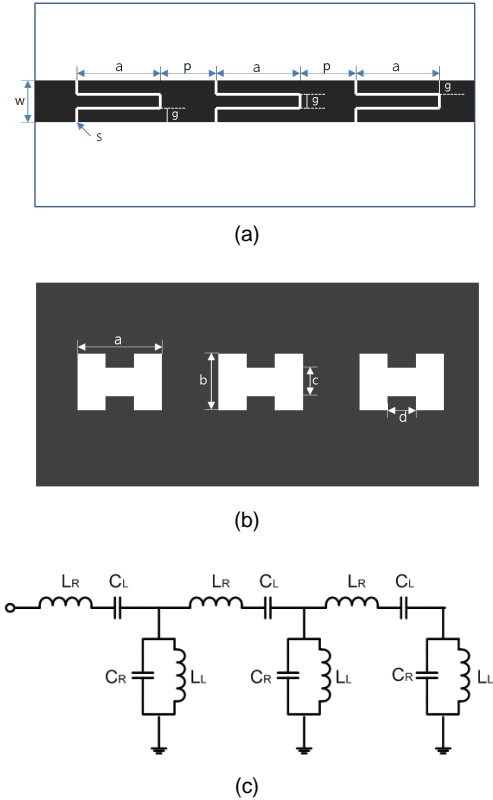


그림 7. 설계된 UWB 필터 (a) 윗면 (b) 밑면 (c) 등가회로
Fig. 7 Designed UWB Filter (a) Top side (b) Bottom side (c) Equivalent circuit

VI. 해석 및 측정 결과

이론을 입증하기 위해, 3-cell CRLH 구조가 제작되었고, Agilent Vector Network Analyzer 8719SES로 측정하였다. 그 시뮬레이션과 측정 결과의 비교는 그림 8에 나타내었다.

이는 이 필터가 낮은 삽입 손실과 넓은 주파수 범위를 가진다는 것을 볼 수 있다. 높은 주파수에서의 더 큰 유전체의 손실 때문에, 측정된 값과 시뮬레이션 값 사이에는 작은 차이점이 존재한다. 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하며 중심주파수 5GHz에서 105%의 대역폭을 나타내며 삽입손실은 중심주파수에서 0.7dB를 나타내었다.

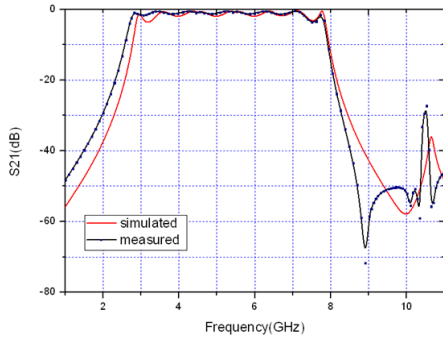


그림 8. UWB 필터의 특성 비교
Fig. 8 Comparison Results of UWB Filter

VII. 결론

복합 좌/우향 전송선을 기반으로 한 UWB 대역통과 필터의 새로운 설계 방법이 소개되었다. 덤벨형 DGS와 인터디지털 커패시터는 CRLH 기본 구조를 구성하기 위해 사용되었다. 제시된 구조는 낮은 삽입 손실과 초광 대역 특성을 가지는 장점을 가졌다. 다른 cell 수를 가지는 구조들이 연구되었으며, 이론을 검증하기 위해 3-cell CRLH UWB 필터를 제작하였다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 비슷한 결과를 나타내었다.



김기래(Gi-Rae Kim)

신라대학교 전자공학과 교수
한국정보통신학회논문지 제17권 제7호 참조

REFERENCES

- [1] H.L. Hu, X.D. Huang, and C.H. Cheng, "Ultra-wideband bandpass filter using CPW-to-microstrip coupling structure," *Electron Lett.* 42, 2006.
- [2] T.N. Kuo, S.C. Lin, and C.H. Chen, "Compact Ultra-wideband band-pass filters using composite microstrip-coplanar-waveguide structure," *IEEE Trans on Microwave Theory Tech.* MTT-54 pp. 3772-3778, 2006.
- [3] C. Caloz, H. Okabe, H. Iwai, and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed metamaterials," in *Proc. USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting*, pp.39, SanAntonio, TX, 2002.
- [4] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol.84, pp.4184 - 187,2000.
- [5] O. F. Siddiqui, M. Mojahedi, and G. V. Eleftheriades, "Periodically loaded transmission line with effective negative refractive index and negative group velocity," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.51, no.10, pp.2619-2625, Oct. 2003.
- [6] A. A. Oliner, "A periodic-structure negative-refractive index medium without resonant elements," in *Proc. USNC/URSI Nat. Radio Sci. Meeting*, pp.41, SanAntonio, TX, 2002.