

분산 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기 설계

Dual-Wideband Bandpass Filter Using Distributed Composite Right/Left-Handed Transmission Line Quad-Mode Resonators

성규제^{1*} · 김영²

¹한경대학교 전기전자제어공학과

²금오공과대학교 전자공학과

Gyuje Sung^{1*} · Young Kim²

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi-do 17579, Korea

²School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

[요 약]

본 논문은 CRLH (composite right/left handed) 전송선로 구조의 4중 모드 공진기를 이용하여 높은 대역간 격리도를 갖는 이중-광대역 대역통과 여파기를 설계하는 방법을 제안한다. CRLH 전송선로 구조를 해석하여 4중 모드 공진기의 s-패러미터와 공진 주파수를 유도하였다. 유도된 s-패러미터를 이용하여 새로운 구조의 이중-광대역 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. 측정 결과는 2.8–5.52 GHz, 9.68–12.26 GHz의 이중 통과대역에서 각각 1.08 dB, 2.01 dB의 삽입손실을 갖고, 6.34–8.42 GHz의 중간대역에서 38dB의 대역 격리도를 가져 설계 결과와 잘 일치하는 특성을 보여 주었다.

[Abstract]

This paper presents a dual-wideband bandpass filter (BPF) with high band-to-band isolation and skirt selectivity using distributed composite right/left-handed (CRLH) transmission line (TL) quad-mode resonators (QMRs). The results of the proposed distributed CRLH TL unit cell analysis are used to establish the scattering parameters and the resonance frequencies of the QMR constituting the dual-wideband BPF. A novel dual-wideband bandpass filter is designed and fabricated, using the derived scattering characteristics. The measured results show that the fabricated dual-wideband bandpass filter has an insertion loss of less than 1.08dB in the lower band, and of 2.01dB in the upper band, a bandwidth of 2.8–5.52GHz and 9.68–12.26GHz, and a band-to-band isolation of more than 38dB, from 6.34–8.42GHz.

Key word : Bandpass filter, Composite right/left-handed transmission line, Dual-wideband, Quad-mode resonator.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.1.84>



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.

Received 24 January 2017; Revised 2 February 2017

Accepted (Publication) 24 February 2017 (28 February 2017)

*Corresponding Author; Gyuje Sung

Tel: +82-31-670-5195

E-mail: gjsung@hknu.ac.kr

1. 서론

다양한 통신 시스템의 발전에 따라 마이크로파 대역통과 여파기의 중요성이 강조되고 있다. 다중 대역 통신 시스템에 사용하는 부품의 하나인 이중대역 대역통과 여파기에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 마이크로스트립 이중대역 대역통과 여파기는 크기와 저지대역 특성, 제작비용 등에서 장점을 갖고 있어 다중 모드 공진기나 계단형 임피던스 공진기의 형태로 초고속 통신 시스템에 적용되고 있다.

이중 모드와 3중 모드 공진기를 이용한 이중 대역통과 여파기 [1], 4중 모드 공진기를 이용한 이중 대역통과 여파기 [2], 3중 모드, 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기가 제안되었다 [3], [4]. 5중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기 [5], [6], 3중모드와 4중모드 공진기를 결합한 이중-광대역 대역통과 여파기 [7], 계단형 임피던스 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기가 마이크로스트립 구조로 제안되었다 [8]-[10]. 평행결합선로와 계단형 임피던스 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기 [11], [12], 스테브가 연결된 계단형 임피던스 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기가 소개되었다 [13]. T형 구조, 평행결합 구조, 비대칭 공진기를 이용한 이중-광대역 대역통과 여파기가 소개되었다 [14]-[16].

본 논문에서는 CRLH (composite right/left handed) 전송선로 구조의 4중 모드 공진기를 이용하여 높은 대역간 격리도와 날카로운(sharp) 저지대역 특성을 갖는 이중-광대역 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. 대칭적인 구조를 갖고 있어 우모드/기모드 해석을 통하여 CRLH 전송선로의 분산특성과 s-파라미터를 유도하였고 새로운 구조의 이중-광대역 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. 측정 결과는 설계 결과와 잘 일치하는 특성을 보여주었다.

II. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기

그림 1은 제안된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기이다. 2개의 단락 스테브와 2개의 개방 스테브, 하나의 전송선로, 캡 커패시터로 구성된 4중 모드 공진기의 특성을 기모드/우모드 방법으로 해석하기 위해 그림 2와 같이 대칭면을 기준으로 반쪽 회로만을 고려하였다. 기모드의 경우, 대칭면을 전계벽으로 고려하여 등가 모델을 그림 2(a)와 같이 구성하고, 우모드의 경우, 대칭면을 자계벽으로 고려하여 등가 모델을 그림 2(b)와 같이 구성할 수 있다. 각 경우의 입력 어드미턴스를 구하면,

$$Y_{even} = j \left(Y_3 \tan \theta_3 - Y_1 \cot \theta_1 + Y_2 \tan \frac{\theta_2}{2} \right) \quad (1)$$

$$Y_{odd} = j \left(Y_3 \frac{2\omega C_g + Y_3 \tan \theta_3}{Y_3 - 2\omega C_g \tan \theta_3} - Y_1 \cot \theta_1 - Y_2 \cot \frac{\theta_2}{2} \right) \quad (2)$$

이다. Y_{odd} 는 기모드 입력 어드미턴스이고, Y_{even} 은 우모드 입력 어드미턴스이다. 따라서 4중 모드 공진기의 s-파라미터는

$$S_{21} = \frac{(Y_{odd} - Y_{even})Y_0}{(Y_{even} + Y_0)(Y_{odd} + Y_0)} \quad (3)$$

와 같다. Y_0 는 입출력 포트의 특성 어드미턴스이다. 기모드와 우모드의 공진 주파수에서 각 모드의 입력 어드미턴스는 0이 된다.

$$Y_{odd} = 0, \text{ 기모드의 경우} \quad (4)$$

$$Y_{even} = 0, \text{ 우모드의 경우} \quad (5)$$

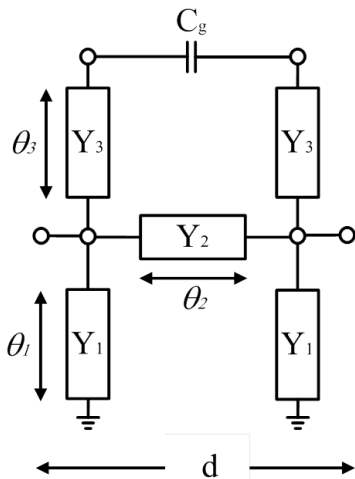


그림 1. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기
Fig. 1. A distributed CRLH TL quad-mode resonator.

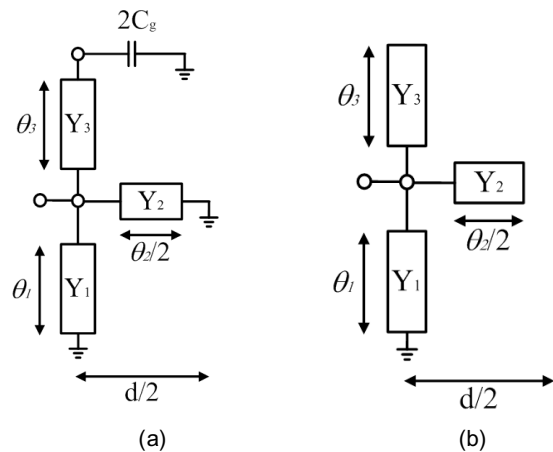


그림 2. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기 (a)기모드, (b)우모드
Fig. 2. Distributed CRLH TL quad-mode resonator equivalent circuits for (a) odd-mode, (b) even-mode.

그림 1에서 각 전송선로의 전기적 길이를 설계 주파수, ω_0 에 서 90° 로 놓으면, 즉, $2\theta = \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 90^\circ$ 이면, 제안된 4중 모드 공진기의 우모드 공진 주파수는 아래 식에서 구할 수 있다.

$$\tan^4 \theta \left(1 + 2 \frac{Y_2}{Y_1} \right) - 2 \tan^2 \theta \left(1 + \frac{Y_2}{Y_1} + 2 \frac{Y_3}{Y_1} \right) + 1 = 0 \quad (6)$$

또한, 마이크로스트립 갭 결합 캐패시턴스, C_g 는 매우 작은 값 이므로 이를 무시하면, 즉, $C_g \approx 0$ 이라고 가정하면, 기모드 공진 주파수는 아래 식에서 구할 수 있다.

$$\tan^4 \theta - 2 \tan^2 \theta \left(1 + \frac{Y_2}{Y_1} + 2 \frac{Y_3}{Y_1} \right) + 1 + 2 \frac{Y_2}{Y_1} = 0 \quad (7)$$

위 두 식에서 구한 공진 주파수는 다음과 같다.

$$\omega_{pe} = \frac{4\omega_0}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{1 + Y_2/Y_1 + 2Y_3/Y_1 \pm \sqrt{(Y_2/Y_1 + 2Y_3/Y_1)^2 + 4Y_3/Y_1}}{1 + 2Y_2/Y_1} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\omega_{po} = \frac{4\omega_0}{\pi} \tan^{-1} \left(1 + Y_2/Y_1 + 2Y_3/Y_1 \pm \sqrt{(Y_2/Y_1 + 2Y_3/Y_1)^2 + 4Y_3/Y_1} \right)^{1/2} \quad (9)$$

제안된 4중 모드 공진기의 전송영점은 식 (3) $S_{21} = 0$ 일 때, 즉,

$$Y_{even} = Y_{odd} \quad (10)$$

일 때 발생한다. 따라서

$$\omega_z = \omega_0 \quad (11)$$

이다.

각 전송선로의 특성 임피던스가 정해지면, 식 (6), (7)에 의해 공진 주파수를 결정할 수 있다. 거꾸로 공진 주파수가 정해지면 각 전송선로의 특성 임피던스를 결정할 수 있다. 그림 3은 입출력 포트와 1ff의 약한 결합으로 연결될 때, 제안된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기의 주파수 특성을 보여 준다. 첫 째와 셋 째 공진 폴(pole)은 우모드 공진 주파수이고 둘 째와 넷 째 공진 폴은 기모드 공진 주파수이다. 둘 째와 셋 째 공진 폴, 사이에서 전송 영점이 나타난다. 각 전송선로의 특성 임피던스 $Z_1 = 80 \Omega$, $Z_2 = 50 \Omega$, $Z_3 = 80 \Omega$, 설계 주파수 $f_0 = 7.5 \text{ GHz}$ 일 때, 4중 모드 공진기의 공진 주파수, $f_{pe1} = 3.11 \text{ GHz}$, $f_{pe2} = 9.2 \text{ GHz}$, $f_{po1} = 5.8 \text{ GHz}$, $f_{po2} = 11.89 \text{ GHz}$ 이고, 전송 영점은 $f_z = 7.5 \text{ GHz}$ 이다. 공진 주파수는 f_0 에 대해 대칭이고, $f_{po1} - f_{pe1} = f_{po2} - f_{pe2}$ 이다. 따라서, 제안된 구조의 전송선로 특성 임피던스비에 의해 여파기의 대역폭과 대역 간격이 결정된다.

제안된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기의 분산 특성

(dispersion relation)은

$$\gamma(\omega) = \frac{1}{d} \cosh^{-1}(A) \quad (12)$$

와 같다. 여기서

$$A = 1 + \frac{2Y_{even}}{Y_{odd} - Y_{even}} \quad (13)$$

이다. 그림 3과 동일한 특성 임피던스를 갖는 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기의 분산특성을 그림 4에서 보여 주고 있다. 3.11-5.8 GHz와 9.2-11.89 GHz에서는 우수(right-handed) 전송선로로 동작하고, 18.11-20.8 GHz와 24.2-26.89 GHz에서는 좌수(left-handed) 전송선로로 동작한다.

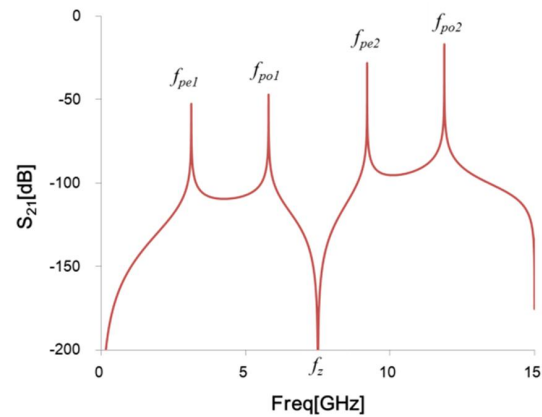


그림 3. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기의 공진 특성
Fig. 3. Resonance response of the distributed CRLH TL QMR.

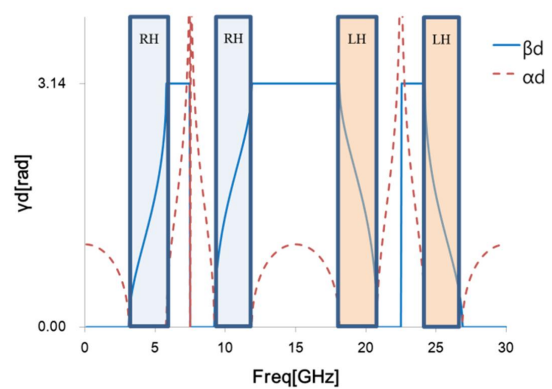


그림 4. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기의 분산 특성
Fig. 4. Dispersion and attenuation diagrams of the distributed CRLH TL QMR.

III. 이중-광대역 여파기 설계 및 제작

제안된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기를 설계하였다. 그림 5(a)는 단일 공진기를 사용한 주파수 특성이고, 그림 5(b)는 대역간 격리 특성을 높이기 위해 4개의 공진기를 사용한 경우의 주파수 특성이다. 설계된 특성을 확인하기 위하여 비유전율 2.5이고 두께 0.787 mm인 타코닉사의 TLX-9 기판을 사용하여 제안된 여파기를 제작하였다. 10 GHz에서 기판의 손실 탄젠트 0.002이다. 그림 6은 제작된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기이다. 설계된 각 공진기의 특성임피던스를 이용하여 마이크로 스트립 구조의 물리적 수치의 초기값을 구하였고 앤시스사의 HFSS를 이용한 전자기 시뮬레이션을 통해 조정하였다. 제작된 여파기의 물리적 수치는 $w_1 = 2.2$ mm, $w_2 = 2.0$ mm, $w_3 = 1.0$ mm, $w_4 = 1.0$ mm, $w_5 = 1.0$ mm, $l_1 = 7.0$ mm, $l_2 = 4.2$ mm, $l_3 = 6.0$ mm, $l_4 = 3.3$ mm, $l_5 = 3.3$ mm 이다. 여파기의 전체 크기는 29 mm × 13.4 mm 이고 $0.64 \lambda_g \times 0.29 \lambda_g$ 가 된다. λ_g 는 첫 번째 통과대역 중심 주파수에서의 관내 파장이다. 안리츠사의 37347C 벡터 회로망 분석기를 이용하여 측정하였고 그림 7은 그 결과

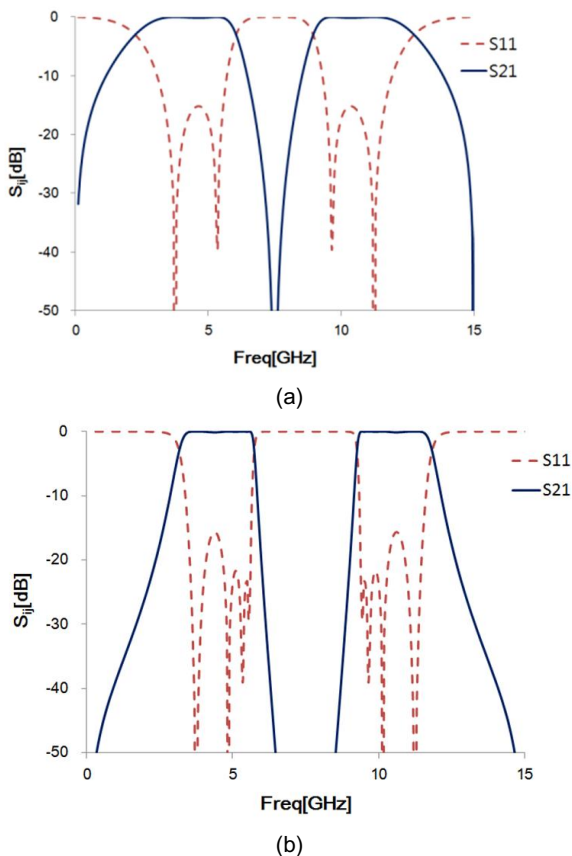


그림 5. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기 설계 결과 (a) 단일 공진기, (b) 4 공진기
Fig. 5. BPF using distributed CRLH TL QMRs. (a) Single unit cell characteristics, (b) four unit cell characteristics.

를 전자기 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여 주고 있다. 2.8–5.52 GHz의 첫 번째 통과대역에서는 1.04 dB의 삽입손실을 얻었고, 9.68–12.26 GHz의 두 번째 통과대역에서는 2.0 dB의 삽입손실을 얻을 수 있었다. 6.34–8.42 GHz의 중간대역에서 38 dB의 대역 격리도를 가져 설계 결과와 잘 일치하는 특성을 보여 주고 있다. 표 1은 제안된 이중-광대역 여파기의 특성을 기존의 이중-광대역 여파기 특성과 비교한 것이다. 본 논문의 여파기는 높은 대역간 격리도를 보여 주고 있고, 참고문헌 [3], [7], [12], [14]에 비해 넓은 대역폭을 갖는다.

IV. 결론

CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용하여 높은 대역간 격리도를 갖는 이중-광대역 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. CRLH 전송선로 구조를 해석하여 분산특성과 s-패러미터를

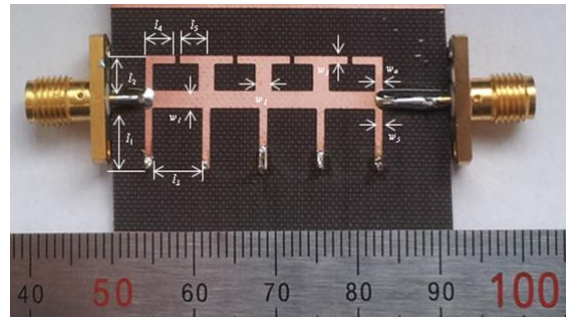


그림 6. 제작된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기
Fig. 6. Fabricated dual-wideband BPF.

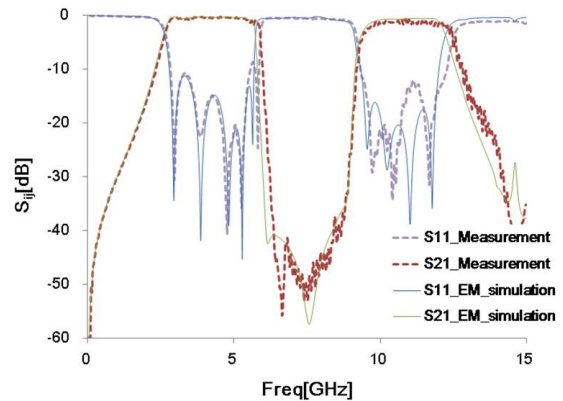


그림 7. CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기의 전자기 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 7. EM simulated and measured frequency responses of the proposed dual-wideband BPF.

표 1. 제안된 CRLH 전송선로 4중 모드 공진기를 이용한 이중-광대역 여파기의 특성 비교

Table 1. Comparison of dual-wideband BPFs.

Ref.	[3]	[7]	[12]	[14]	[16]	본 논문
Center Freq. [GHz]	2.4, 3.5	2.34, 3.46	1.8, 5.82	1.63, 2.42	3.1, 10.2	4.16, 10.97
Fractional BW [%]	17.5, 16	25.6, 21.4	63, 19	28.8, 22.7	96, 21.5	65.4, 23.5
Isolation [dB]	>14	>32	>30	>15	>20	>38
Insertion Loss [dB]	0.87, 1.4	0.84, 1.21	0.45, 1.05	0.86, 0.97	1.5, 2	1.04, 2
Size [λ_g^2]	0.38 x 0.32	0.2 x 0.21	0.25 x 0.02	0.69 x 0.31	0.46 x 0.05	0.64 x 0.29

유도하고 4중 모드 공진기로 동작함을 보였다. 대역간 격리도를 높이기 위하여 4개의 공진기를 연결하여 이중-광대역 대역 통과 여파기를 만들었고 중간대역에서 38 dB이상의 대역간 격리도를 얻었다. 제작된 여파기는 설계 결과와 잘 일치하는 측정 결과를 보여 주었다.

감사의 글

본 연구는 한경대학교 2015년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

참고문헌

[1] X. G. Huang, Q. Feng, Q. Y. Xiang, and D. H. Jia, "A high selectivity dual-band bandpass filter using dual-mode and triple-mode resonators," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 36, pp. 81-90, 2013.

[2] J. Xu, W. Wu, and C. Miao, "Compact and sharp skirts microstrip dual-mode dual-band bandpass filter using a single quadruple-mode resonator (QMR)," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 61, No.3, pp. 1104-1113, Mar. 2013.

[3] T. Qiang, C. Wang, and N. Y. Kim, "Highly selective dual-wideband bandpass filter using quad-mode resonators for WLAN and WIMAX applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 6, pp. 1417-1423, 2015.

[4] H. Liu, S. Li, X. Guan, B. Ren, J. Lei, and Y. Wang, "Compact dual-wideband bandpass filter with multimode

resonator," *ETRI Journal*, Vol. 36, No. 1, pp. 163-166, 2014.

[5] J. Li, S. S. Huang, and J. Z. Zhao, "Compact Microstrip Dual-Wideband Bandpass Filter Using a Novel Multi-Mode Resonator," *Open Science Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 16-20, 2014.

[6] J. Li, S. S. Huang, and J. Z. Zhao, "Compact dual-wideband bandpass filter using a novel penta-mode resonator (PMR)," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 24, No. 10, pp. 668-670, 2014.

[7] J. Li, S. S. Huang, H. Wang, and J. Z. Zhao, "A novel compact dual-wideband bandpass filter with multi-mode resonators," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 51, pp. 79-85, 2015.

[8] A.-S. Liu, T. Y. Huang, and R. B. Wu, "A dual wideband filter design using frequency mapping and stepped-impedance resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 12, pp. 2921-2929, 2008.

[9] K. S. Chin, and J. H. Yeh, "Dual-wideband bandpass filter using short-circuited stepped-impedance resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 19, No. 3, pp. 155-157, 2009.

[10] Y.-L. Wu, C. Liao, and X. Z. Xiong, "A dual-wideband bandpass filter based on e-shaped microstrip SIR with improved upper-stopband performance," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 108, pp. 141-153, 2010.

[11] J. Marimuthu, A. M. Abbosh, and B. Henin, "Planar microstrip bandpass filter with wide dual bands using parallel-coupled lines and stepped impedance resonators," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 35, pp. 49-61, 2013.

[12] D. Li, Y. Zhang, K. Xu, K. Song, and L. W. Li, "Compact dual-wideband bandpass filter with good selectivity using side-coupled $\lambda/4$ shorted SIR," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 29, No. 1, pp. 69-79, 2015.

[13] J. Xu, Y. X. Ji, C. Miao, and W. Wu, "Compact single-/dual-wideband BPF using stubs loaded SIR (SsLSIR)," *EEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 23, No. 7, pp. 338-340, 2013.

[14] J. G. Zhou, W. J. Feng, and W. Q. Che, "Dual-wideband bandpass filter using T-shaped structure based on transversal signal-interaction concepts," *IET Electronics Letters*, Vol. 48, No. 24, pp. 1539-1540, Nov. 2012.

[15] J. Xu and W. Wu, "Miniaturized dual-wideband bandpass filter using novel dual-band coupled-line sections," *IET Electronics Letters*, Vol. 49, No. 18, pp. 1162-1163, Aug. 2013.

[16] K. W. Hsu, C. H. Chien, and W. H. Tu, "Compact dual-wideband bandpass filter using asymmetrical resonator," *Electronics Letters*, Vol. 49, No. 2, pp. 123-124, 2013.

[17] G. Sung, "Design of Compact UWB Bandpass Filter with Improved Out-of-band Performance Using Distributed

CRLH Transmission Lines," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 338-343, 2015.

[18] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.



성 규 제 (Gyuje Sung)

1986년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사),
 1988년 2월 ~ 1993년 7월 : 국방과학연구소 연구원,
 1998년 3월 ~ 현재 : 한경대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 필드해석 및 회로 설계

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학박사)



김 영 (Young Kim)

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사),
 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원, 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수
 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)