

Right/Left-Handed 전송 선로를 결합한 가변 대역 저지 필터 Tunable Bandstop Filter with Combined Right/Left-Handed Transmission Lines

성규제 · 김일규* · 김 영* · 윤영철**

Gyu-Je Sung · Ell-Kou Kim* · Young Kim* · Young-Chul Yoon**

요 약

본 연구에서는 Right-handed 전송 선로(RHTL)의 저역 통과 특성과 Left-handed 전송 선로(LHTL)의 고역 통과 특성을 결합한 구조의 가변 대역 저지 필터를 제안하였다. RHTL, LHTL의 분산 특성을 ABCD 행렬을 통해 구하고 차단 주파수를 계산하였다. 바랙터 다이오드와 칩 인덕터를 이용하여 RHTL, LHTL 단위 셀을 구성하고 각각 4개의 단위 셀이 연결된 RHTL, LHTL을 병렬로 연결하여 가변 대역 저지 특성을 구현하였다. 제작된 가변 대역 저지 필터는 저역 차단 주파수 280~395 MHz, 고역 차단 주파수 770~940 MHz의 가변 특성을 갖는다.

Abstract

A novel tunable bandstop filter was proposed. It is composed of a right-handed transmission line, which has lowpass characteristics, and a left-handed transmission line which has highpass characteristics. Dispersion relations for the unit cells of RHTL and LHTL were derived by the method of ABCD parameter analysis. Varactor diodes and chip inductors were used to make the unit cells of RHTL and LHTL. A tunable bandstop filter was designed and fabricated by the parallel connection of RHTL and LHTL. The measured results of the proposed tunable bandstop filter are agreed well with the simulated results.

Key words : Bandstop Filters, Left-Handed Transmission Lines, Right-Handed Transmission Lines, Tunable Filters, Varactors

I. 서 론

다중 모드, 다중 대역 통신에 폭 넓게 사용되고 있는 가변 대역 필터는 기계적, 자기적, 전기적 방법을 적용하고 있다. 기계적, 자기적 방법에 의한 가변 대역 필터는 일반적으로 대전력 시스템에 사용하고 상대적으로 크기가 크다. 전기적 가변 대역 필터는 동작 속도가 빠르고, 넓은 가변 대역을 갖고 소형이다^[1]. 전기적 가변 대역 필터는 능동 인덕터, 바랙터 다이오드, MEMS 커패시터 등으로 구현할 수 있다. 바

랙터 다이오드는 상대적으로 손실이 크고 비선형 특성을 갖고 있으나 동작 속도가 빠르고 낮은 전압으로 구동시킬 수 있다. RF MEMS 커패시터는 다른 스위치나 가변 커패시터 소자에 비해 손실, 기생 성분, 선형성 등에서 우수한 장점이 있고, 동작 속도, 조종 전압, 패키징 등에서는 특성이 떨어진다^[2].

마이크로파 대역에서 대역 통과 필터나 대역 저지 필터는 일반적으로 LC 공진기 혹은 전송 선로 공진기를 이용하고 있다. 따라서 바랙터 다이오드나 MEMS 커패시터를 이용한 가변 대역 통과 필터나

한경대학교 전자공학과(Dept. of EE, Hankyong National University) 겸 전자기술종합연구소

*금오공과대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

**관동대학교 전자정보통신공학부(Electronics and Information Communication Engineering, Kwandong University)

· 논문 번호 : 20080707-084

· 수정완료일자 : 2008년 9월 4일

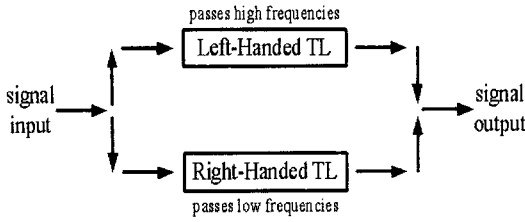


그림 1. Right/left-handed 구조를 결합한 대역 저지 필터

Fig. 1. Bandstop filter with combined right/left-handed structures.

대역 저지 필터는 공진 주파수를 변화시키면 이에 따라 대역폭이 변화하는 특성을 나타낸다^[3].

최근 left-handed 전송 선로에 대한 연구는 마이크로파 대역의 필터, 안테나 등에서 다양한 응용 회로를 제시하고 있다^{[4]~[7]}. 본 연구에서는 right-handed 전송 선로의 저역 통과 특성과 left-handed 전송 선로의 고역 통과 특성을 결합하여 그림 1과 같이 대역 저지 특성을 만들고 바랙터 다이오드를 이용하여 가변 대역 저지 필터를 구현하였다. 제안된 가변 대역 저지 필터는 차단 주파수를 독립적으로 변화시킬 수 있다. 따라서 임의의 중심 주파수와 대역폭을 구현할 수 있다. 제작된 가변 대역 저지 필터는 저역 차단 주파수 280~395 MHz, 고역 차단 주파수 770~940 MHz의 특성을 갖는다.

II. 설계 이론

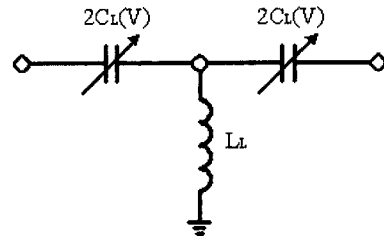
그림 2(a)는 가변 커패시터를 이용한 left-handed 전송 선로 단위 셀의 등가 모델로 그 분산 특성은 ABCD 행렬을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2j\omega C_L(V)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{j\omega L_L} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2j\omega C_L(V)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

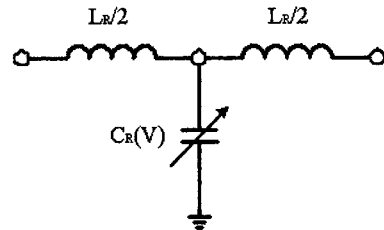
$$\cos \beta_L = 1 - \frac{1}{2\omega^2 L_L C_L(V)} \quad (2)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{2(1 - \cos \beta_L) L_L C_L(V)} \quad (3)$$

이 된다. 여기서 β_L 은 전송 선로 단위 셀의 전달 상수이다. 이 분산 방정식은 고역 통과 특성을 갖는다.



(a) Left-handed 전송 선로 등가 모델
(a) Equivalent circuit of LHTL



(b) Right-handed 전송 선로 등가 모델
(b) Equivalent circuit of RHTL

그림 2. 가변 비선형 전송 선로 등가 모델
Fig. 2. Tunable nonlinear transmission lines.

단위 셀을 주기적으로 연결하면 $\beta_L = \pi$ 일 때의 Bragg 주파수

$$f_{BL} = \frac{1}{4\pi\sqrt{L_L C_L(V)}} \quad (4)$$

는 고역 통과 특성의 차단 주파수가 된다. 이 전송 선로의 특성 임피던스는

$$Z_{oL} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L(V)}} \quad (5)$$

이다.

그림 2(b)는 가변 커패시터를 이용한 right-handed 전송 선로 단위 셀의 등가 모델로 그 분산 특성은 ABCD 행렬을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{j\omega L_R}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_R(V) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{j\omega L_R}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta_R &= \frac{A + D}{2} \\ &= 1 - \frac{\omega^2 L_R C_R(V)}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\omega^2 = \frac{2}{L_R C_R (V)} (1 - \cos \beta_R) \quad (8)$$

이 된다. 여기서 β_R 은 전송 선로 단위 셀의 전달 상수이다. 이 분산 방정식은 저역 통과 특성을 갖는다. 단위 셀을 주기적으로 연결하면 $\beta_R = \pi$ 일 때의 Bragg 주파수

$$f_{BR} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_R C_R (V)}} \quad (9)$$

는 저역 통과 특성의 차단 주파수가 된다. 이 전송 선로의 특성 임피던스는

$$Z_{0R} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R (V)}} \quad (10)$$

이다. 그림 3은 right/left-handed 전송 선로의 분산 특성이다. 그림 2(a)의 left-handed 전송 선로는 $\omega < \omega_{BL}$ 일 때 β 가 허수가 되어 저지 대역이 된다. 그림 2(b)의 right-handed 전송 선로는 $\omega > \omega_{BR}$ 일 때 β 가 허

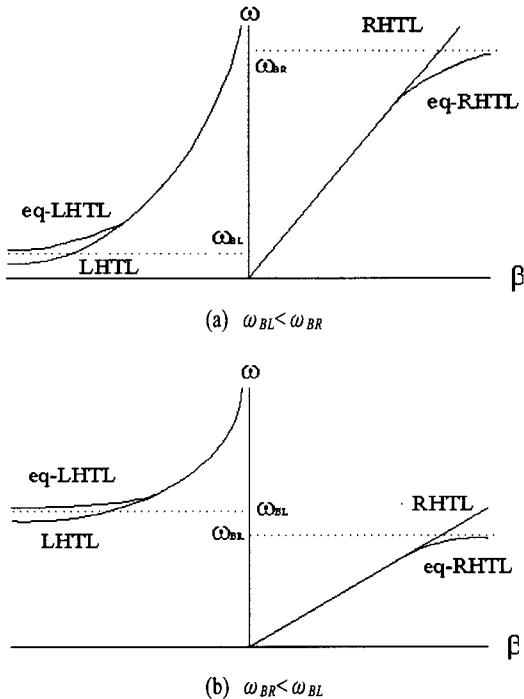


그림 3. Right/left-handed 전송 선로 등가 모델의 분산 특성

Fig. 3. Dispersion diagram of the equivalent model of right/left-handed transmission lines.

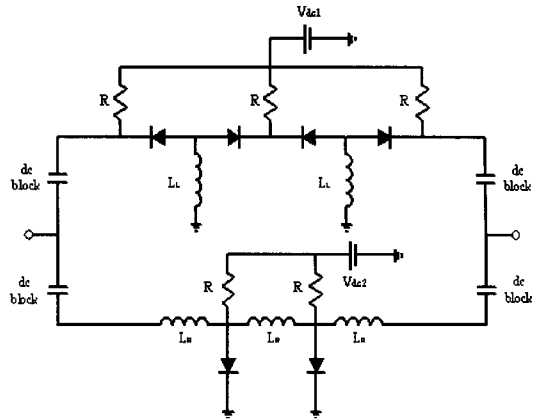


그림 4. Right/left-handed 전송 선로를 이용한 가변 대역 저지 필터 회로

Fig. 4. Tunable BSF with right/left-handed transmission lines.

수가 되어 저지 대역이 된다. 그림 3(a)는 $\omega_{BL} < \omega_{BR}$ 인 경우로 대역 통과 특성을 얻을 수 있다. 그림 3(b)는 $\omega_{BR} < \omega_{BL}$ 인 경우로 대역 저지 특성을 얻을 수 있다.

그림 4는 각각 2개의 단위 셀로 구성된 right/left-handed 전송 선로를 이용한 가변 대역 저지 필터 회로다. 통과 대역의 특성을 독립적으로 조정하기 위해 right-handed 전송 선로와 left-handed 전송 선로를 구성하는 바랙터 다이오드의 바이어스 전원을 분리하여 인가했다. 다이오드의 커패시턴스는

$$C_d (V_{dc}) = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_{dc}}{V_j}\right)^M} + C_p \quad (11)$$

와 같다. 여기서, C_{j0} 는 Zero-bias 다이오드 커패시턴스, V_j 는 접합 전압, M 은 Grading 상수, C_p 는 패키징 커패시턴스이다.

III. 설계 및 제작

앞 절의 설계 이론을 적용하여 각각 4개의 단위

표 1. 설계 파라미터

Table 1. Design parameters.

LHTL	RHTL
$L_L = 6 \text{ nH}$	$L_R = 54 \text{ nH}$
$V_{dc1} = 15 \sim 25 \text{ V}$	$V_{dc2} = 2 \sim 8 \text{ V}$

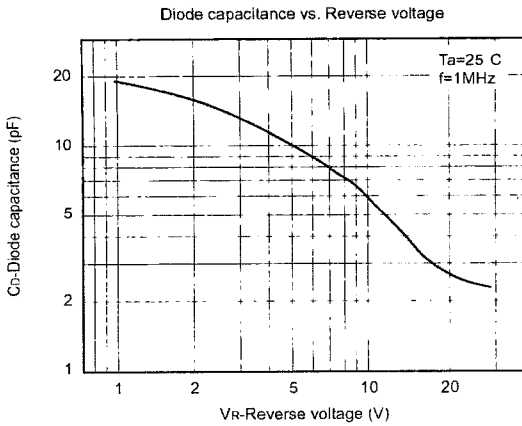
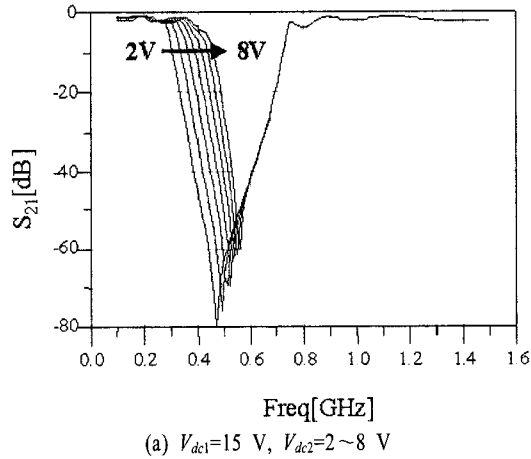
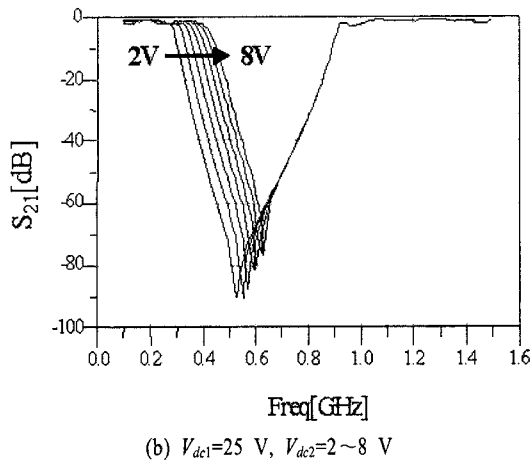


그림 5. 바랙터 다이오드 소니 1T362 특성
Fig. 5. Characteristics of Sony 1T362.

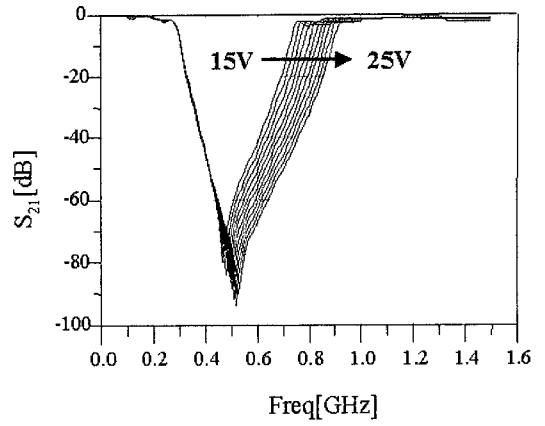


(a) $V_{dc1}=15$ V, $V_{dc2}=2\sim 8$ V

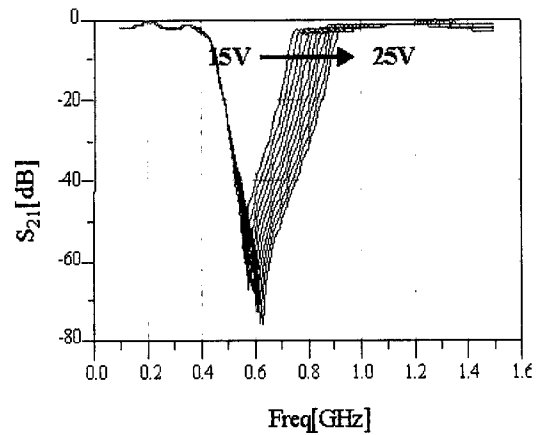


(b) $V_{dc1}=25$ V, $V_{dc2}=2\sim 8$ V

그림 6. Right-handed 전송 선로의 특성 변화에 따른 가변 대역 저지 특성
Fig. 6. Tunable bandstop characteristics with the variation of RHTL.



(a) $V_{dc2}=2$ V, $V_{dc1}=15\sim 25$ V

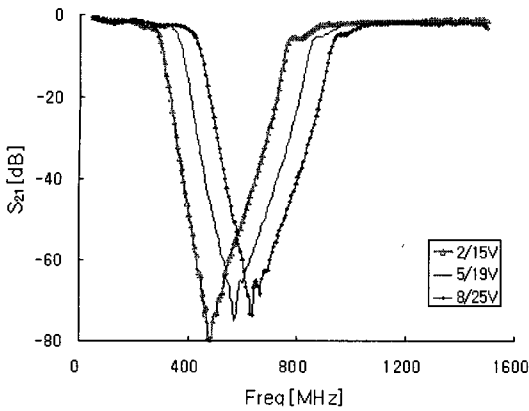


(b) $V_{dc2}=8$ V, $V_{dc1}=15\sim 25$ V

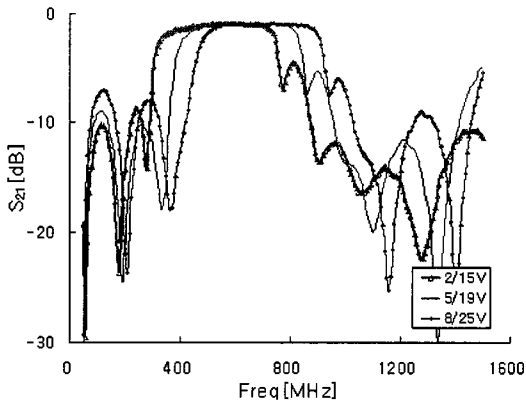
그림 7. Left-handed 전송 선로의 특성 변화에 따른 가변 대역 저지 특성
Fig. 7. Tunable bandstop characteristics with the variation of LHTL.

셀로 구성된 right/left-handed 전송 선로를 이용한 UHF 대역의 가변 대역 저지 필터를 설계하였다. 표 1은 설계 파라미터를 보여주고 있다. 바랙터 다이오드는 소니 1T362를 사용하였다. 그 기본 파라미터는 $C_0=22$ pF, $V_f=22$ V, $M=5$, $C_p=2$ pF이다. 그림 5는 소니 1T362의 커패시턴스 특성 그래프이다. LHTL의 조정 전압 V_{dc1} 이 15~25 V로 변화할 때 바랙터 다이오드의 커패시턴스는 3.64~2.49 pF의 값을 갖고, RHTL의 조정 전압 V_{dc2} 가 2~8 V로 변화할 때 바랙터 다이오드의 커패시턴스는 16.24~6.67 pF의 값을 갖는다.

그림 6(a)는 $V_{dc1}=15$ V, $V_{dc2}=2\sim 8$ V일 때의 특성으로 저역 차단 주파수는 280~380 MHz의 변화를 보



(a) S_{21}



(b) S_{11}

그림 8. 가변 대역 저지 필터 측정 결과
Fig. 8. Measured results of the tunable BSF.

이고 있고, 그림 6(b)는 $V_{dc1}=25$ V, $V_{dc2}=2\sim 8$ V일 때의 특성으로 저역 차단 주파수는 280~400 MHz의 변화를 보이고 있다. 그림 7(a)는 $V_{dc2}=2$ V, $V_{dc1}=15\sim 25$ V일 때의 특성으로 고역 차단 주파수는 760~920 MHz의 변화를 보이고 있고, 그림 7(b)는 $V_{dc2}=8$ V, $V_{dc1}=15\sim 25$ V일 때의 특성으로 고역 차단 주파수는 750~920 MHz의 변화를 보이고 있다. 그림 8(a)는 제작된 가변 대역 저지 필터의 측정 결과로 $V_{dc1}=15$ V, $V_{dc2}=2$ V일 때, $V_{dc1}=19$ V, $V_{dc2}=5$ V일 때, $V_{dc1}=25$ V, $V_{dc2}=8$ V일 때의 삽입 손실이고, 그림 8(b)는 각 경우의 반사 손실이다. 그림 9는 $V_{dc1}=25$ V, $V_{dc2}=2$ V일 때의 회로 시뮬레이션 결과와 제작된 가변 대역 저지 필터의 특성을 비교하고 있다. 저역 통과 영역에서는 설계 결과와 측정 결과가 잘 일치하고 있고, 고역 통과 영역에서는 차단 주파수가 20 MHz의 차

이가 나타났다.

고역 통과 영역에서 삽입 손실이 크게 나타나는 것은 높은 전압에서 바랙터 다이오드의 손실이 커지는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 10은 제작된 가변 대역 저지 필터의 사진이다. 제작에 사용한 Epoxy 기판은 $\epsilon_r=4.3$, 두께 1.2 mm이고, 필터를 구현한 PCB의 크기는 60×75 mm²이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 right-handed 전송 선로의 저역 통과 특성과 left-handed 전송 선로의 고역 통과 특성을 결합한 구조의 가변 대역 저지 필터를 제안하고 설계, 제작하였다. 바랙터 다이오드와 칩 인덕터를 이용하여 가변 비선형 RHTL, LH TL 단위 셀을 구성하였다. RHTL, LH TL 단위 셀의 분산 특성을 ABCD

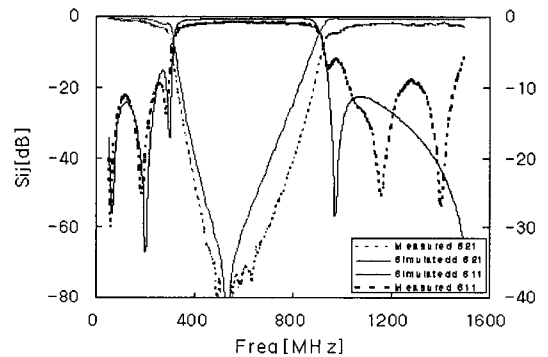


그림 9. 설계 및 측정 결과 비교
Fig. 9. Comparison of the simulated and measured results of the tunable BSF.

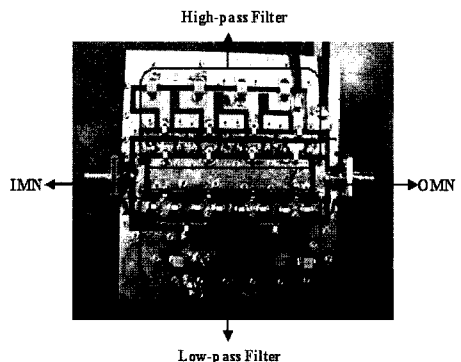


그림 10. 제작된 가변 대역 저지 필터
Fig. 10. Fabricated tunable BSF.

행렬을 통해 구하여 고역, 저역 차단 주파수를 계산하였다. 각각 4개의 단위 셀로 구성된 left-handed 전송 선로와 right-handed 전송 선로를 병렬로 연결하고, $\omega_{BR} < \omega_{BL}$ 되도록 설계하여 대역 저지 특성을 구현하였다. 제안된 가변 대역 저지 필터는 저역 및 고역 차단 주파수를 독립적으로 변화시킬 수 있다. 따라서 임의의 중심 주파수와 대역폭을 구현할 수 있는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Uher, W. J. R. Hoefer, "Tunable microwave and millimeter-wave bandpass filters", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-39, no. 4, pp. 643-653, Apr. 1991.
- [2] G. M. Rebeiz, J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits", *IEEE Microwave Magazine*, vol. MM-2, no. 4, pp. 59-71, Dec. 2001.
- [3] B. Kim, S. Yun, "Varactor-tuned combline bandpass filter using step-impedance microstrip lines", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-52, no. 4, pp. 1279-1283, Apr. 2004.
- [4] C. Caloz, A. Sanada, and T. Itoh, "A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-52, no. 3, pp. 980-992, Mar. 2004.
- [5] S. Lim, C. Caloz, and T. Itoh, "Meta material-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-52, no. 12, pp. 2678-2690, Dec. 2004.
- [6] H. Kim, A. B. Kozyrev, A. Karbassi, and D. W. van der Weide, "Linear tunable phase shifter using a left-handed transmission line", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. MWCL-15, no. 5, pp. 366-368, May 2005.
- [7] L. Jiusheng, Z. Yunyun, D. Tieying, and P. Jiajia, "Bandstop filter base on composite right/left-handed(CRLH) transmission line", in *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, pp. 895-898, Aug. 2007.

성 규 제



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1988년 2월~1993년 7월: 국방과학연구소 연구원
 1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재: 한경대학교 전자공학과 부교수
 2000년 2월~2004년 1월: 한원마이크로웨이브 기술고문
 2004년 2월~2005년 1월: Arizona State University, Visiting Scholar
 2006년 4월~현재: 한경대학교 전자기술융합연구소 소장
 [주 관심분야] 마이크로파 필드해석 및 회로 설계

김 일 규



2005년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 3월~2007년 2월: 금오공과대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2007년 3월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 박사과정

[주 관심분야] RF 회로 설계, 고효율 전력 증폭기 및 선형 화기 설계

김 영



1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1988년 1월~1993년 5월: 이즈텔시스템즈(주) 연구소 선임연구원

1993년 6월~1998년 2월: 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원

1998년 3월~2003년 2월: 두원공과대학 정보통신과 조교수

2003년 3월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 조교수
[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

윤 영 철



1978년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1987년 9월~현재 관동대학교 전자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 설계