

# CRLH 전송선로의 필터 특성을 이용한 트리플렉서와 삼중대역 증폭기에의 응용

## Triplexer based on Filter Characteristics of CRLH Transmission Line and Triple-Band Amplifier Applications

윤정호\*, 김 영\*, 윤영철\*\*

Jeong-Ho Yun\*, Young Kim\* and Young-Chul Yoon\*\*

### 요 약

본 논문에서는 CRLH (Composite Right/Left-Handed) 전송선로의 단위 셀이 갖고 있는 대역통과 특성을 이용하여 서로 다른 대역의 간섭을 최소화한 트리플렉서를 제안하였다. 트리플렉서의 채널 필터는 서로 다른 채널의 공진주파수에서 개방된 것과 같은 입력 임피던스를 갖고 있는데, 이러한 특성은 CRLH 전송선로의 단위 셀의 직렬 공진과 병렬 공진의 결합에 의한 것이다. 구현된 트리플렉서의 측정 결과는 삽입손실 1.5 dB 이하, 반사손실 15 dB 이하, 각 포트간 격리도 25 dB 이하가 되었다. 이러한 특성을 갖는 트리플렉는 삼중대역 증폭기의 입출력부에 연결하여 설계, 실험하였고, 그 결과는 예측된 결과와 유사한 측정결과를 얻었다.

### Abstract

In this paper, we proposed the triplexer using unit-cell of CRLH transmission line which has a bandpass characteristic to reduce adjacent channel interference. The input impedance of triplexer with each channel filter is operated open-circuit at the resonance frequencies of other channels. Such property is due to the combination a series and parallel resonance circuits of CRLH-TL unit-cell. The measured triplexer results are showed a measured insertion loss of each channel, less than 1.5 dB, matching at each port, less than 15dB and isolation between channel, better than 25 dB. Also, to validate the triplexer, a small signal amplifier with triple-band is designed and tested. the measured amplifier results show good agreements with prediction.

Key words : Triplexer, CRLH transmission line, triple-band amplifier

### I. 서 론

최근의 이동통신 단말기는 위성에서 보내준 정보를 이용해 현 위치를 인식하는 GPS(Global Positioning System) 기능이 추가되면서, 3가지의 주파수 대역을

분리하여 처리할 수 있는 트리플 밴드 이상의 다중대역 방식이 요구되고 있다. 이러한 다중 대역의 증폭과 회로 설계에서 요구되는 저전력, 저가격 소형화 등을 위해, 다수의 대역들을 증폭하는 증폭기의 요구가 점차 증가하는 추세이다. 이러한 다중대역의 특성

\* 금오공과대학교 전파통신과(Department of Radio Communication Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 관동대학교 전자정보통신공학부(Department of Electronics & Information Communication Eng., Kwandong University)

· 제1저자 (First Author) : 윤정호,

교신저자: 김 영

· 투고일자 : 2012년 4월 13일

· 심사(수정)일자 : 2012년 4월 13일 (수정일자 : 2012년 6월 12일)

· 게재일자 : 2012년 6월 30일

을 만족시키기 위한 다중화기는 리지 웨이브가이드를 이용한 방법[1], 일반적으로 접근하는 방법[2] 등이 존재한다.

본 논문에서는 CRLH 전송선[3],[4]로 단위 셀의 대역통과 필터 특성을 이용하여 트리플렉서를 구현 [5]하였으며, 이것을 이용한 네 개의 트리플렉서와 세 개의 입출력 정합회로를 이용한 삼중대역 증폭기를 설계하였다. 이와 같은 방법으로 다중대역 증폭기를 설계하면 서로 다른 대역 신호사이의 간섭이 제거되고, 각 주파수에 맞는 입출력 정합회로를 적용함으로써 정합회로 사이의 간섭을 줄일 수 있어 원하는 주파수 대역에서 완벽한 정합을 할 수 있음을 확인하였다[6],[7].

본 논문의 구성은 2장에서는 CRLH 전송선로를 이용한 트리플렉서 설계 방법과 시뮬레이션 그리고 3장에서는 이것에 대한 구현과 그 응용으로 삼중대역에 적용한 특성에 대해서 설명하고 결론을 낼 것이다.

## II. 트리플렉서 설계

여기서는 트리플렉서를 구성하는 메타 재질 단위 셀의 설계와 해석에 대해서 설명할 것이다. 메타 재질의 기본적인 CRLH 전송선로 단위 셀을 기본으로 사용한 등가회로는 그림 1에 나타내었다.

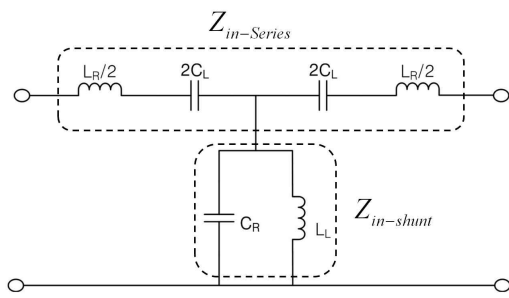


그림 1. CRLH 단위 셀의 등가회로 모델  
Fig. 1 Equivalent circuit model of CRLH unit cell.

이 CRLH 단위 셀의 등가회로는 고역통과 특성을 갖는 LH (Left-Handed) 전송선로와 저역통과 특성을 갖는 RH (Right-Handed) 전송선로가 결합되어 대역통과 특성을 갖는 구조를 갖는다.

그림1에서 나타낸 것과 같이 직렬 캐패시터(CL)과

직렬 인덕터(LR)로 구성되는 직렬 공진기와 병렬 인덕터 (LL)과 캐패시터 (CR)로 구성된 병렬 공진기가 결합된 구조를 갖고 있다. 구성하고자 하는 트리플렉서에서 직렬 공진기는 입력과 출력 포트 사이에 연결시키고, 병렬 공진기는 중단 임피던스와 병렬로 연결되도록 할 것이다.

트리플렉서의 CRLH 전송선로의 단위 셀을 구성하는 직렬 공진기와 병렬 공진기의 입력 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{in-series} = j \left( \frac{\omega^2 L_R C_L - 1}{\omega C_L} \right) + Z_0 \quad (1)$$

$$Z_{in-shunt} = \frac{(\omega L_L)^2 Z_0 + j\omega L Z_0 (1 - \omega^2 L_L C_R) Z_0}{(1 - \omega^2 L_L C_R)^2 Z_0^2 + (\omega L_L)^2} \quad (2)$$

서로 다른 주파수  $f_1$ ,  $f_2$  그리고  $f_3$ 에서 직렬 또는 병렬 공진기 임피던스 값은  $f_1$ 이 직렬 공진회로의 공진 주파수라고 하면 직렬 공진기 임피던스 값은  $Z_0$ 로 수렴하고, 병렬 공진기의 임피던스 값도 동일하게  $Z_0$ 로 수렴하게 됨을 알 수 있다. 하지만 공진 주파수가 아닌  $f_2$  또는  $f_3$  주파수에서 직렬 공진기의 임피던스 값은  $Z_0$ 뿐만 아니라 허수 값도 함께 존재하게 된다. 이 허수 임피던스 값을 적절히 조절하면  $f_2$  또는  $f_3$  주파수에서 직렬 공진기의 임피던스 값은 무한히 큰 값으로 변하게 할 수 있으며 또한,  $f_2$  또는  $f_3$  주파수에서 병렬 공진기의 임피던스 실수부분은 거의 단락되도록 할 수 있을 것이다. 이와 같은 특성을 만족하도록 CRLH 단위 셀 소자 값들을 다음과 같은 수식으로 나타내었다.[5]

$$C_R = \frac{1}{\omega_o^2 L_L} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{1}{\omega_o \cdot R A} \quad (4)$$

$$L_R = \frac{R A}{\omega_o} \quad (5)$$

위의 수식에서 RA 값은 리액턴스의 임피던스 값을 의미한다.

앞의 수식(3)-(5)을 종단 임피던스로 정규화 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L'_R = \sqrt{C_R L_R} Z_o \quad (6)$$

$$C'_L = \frac{C_L}{Z_o} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (7)$$

$$L'_L = Z_o L_L \sqrt{\frac{C_R}{L_R}} \quad (8)$$

$$C'_R = \frac{\sqrt{C_R L_R}}{Z_o} \quad (9)$$

수식 (3)에서  $L_L$  값은 임의의 값으로 선택할 수 있다. 본 논문에서는  $L_L = 0.7nH$ 로 선택하였고, RA 값은  $30\Omega \sim 90\Omega$  사이의 값을 선택하였다. RA 값이 커지면 커질수록 대역통과 필터의 차단 특성이 좋아진다. 하지만, 각 소자의 값이 너무 커지거나, 작아지는 경향이 나타나므로 실제 제작 할 수 있는 값으로 선택하기 위해서는 여러 번 시행착오가 필요하다.

위에서 구한 수식을 이용하여 트리플렉서의 중심 주파수가 0.3 GHz, 0.98 GHz, 1.9 GHz로 선택하여 트리플렉서를 설계하였다. 이때 설계된 트리플렉서의 등가회로는 그림 2에 나타내었다. 여기서 직렬공진기는 포트 2에서 LR1, CL1은 0.3GHz에서, 포트 2에서는 LR2, CL2는 0.98 GHz에서 그리고 포트 3에서는 LR3, CL3는 1.98 GHz에서 공진하여 단락회로 동작하며, 병렬 공진기는 포트 2에서 LL1, CR1은 0.98 GHz와 1.9 GHz에서, 포트 2에서는 LL2, CR2,은 0.3 GHz, 1.9 GHz에서 그리고 포트 3에서는 LL3, CR3은 0.3 GHz와 0.98 GHz에서 단락으로 동작하게 된다.

트리플렉서의 중심주파수와 차단주파수 특성을 고려하여 CRLH 전송선로 단위 셀의 이상적인 소자 값을 구하였고 이것은 표1에 나타내었다. 또한 이것을 이용하여 시뮬레이션 한 결과는 그림 3에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 각 중심주파수에서 삽입 손실은 0.3 dB 이하, 반사계수는 30 dB 이하를 얻었으

며, 타 주파수와의 고립도는 25 dB 이상 확보되는 것을 확인하였다.

여기서 사용된 소프트웨어는 AWR사의 Microwave Office를 이용하여 회로 및 EM 시뮬레이션을 통해서 단위 셀의 설계와 해석을 수행하였다.

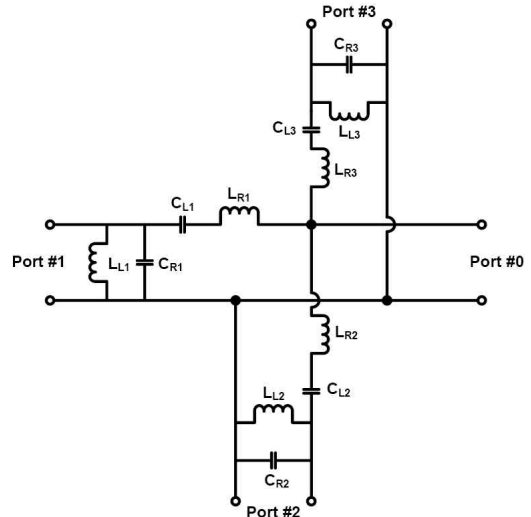


그림 2. 트리플렉서의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of triplexer.

표 1. 트리플렉서를 시뮬레이션하기 위한 CRLH 전송선로 단위 셀의 소자 값

Table 1. Element values of CRLH-TL unit-cell for triplexer simulation.

주파수	소자 값					
	0.3 GHz		0.98 GHz		1.9 GHz	
$L_R$ [nH]	$L_{R1}$	61.1	$L_{R2}$	22.7	$L_{R3}$	9.8
$C_L$ [pF]	$C_{L1}$	4.6	$C_{L2}$	1.4	$C_{L3}$	0.6
$L_L$ [nH]	$L_{L1}$	11.5	$L_{L2}$	3.6	$L_{L3}$	1.5
$C_R$ [pF]	$C_{R1}$	24.4	$C_{R2}$	9.1	$C_{R3}$	4.0

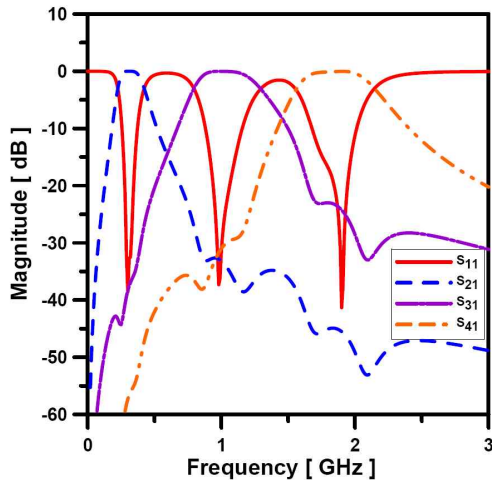


그림 3. 소자 값으로 구현된 트리플렉서의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 3. Simulation results of triplexer using lumped elements.

### III. 실험 결과

#### 3-1 단위 셀을 이용한 트리플렉서

각 포트에서는 자신의 주파수에서는 단락으로 다른 주파수에서는 단선으로 동작하는 트리플렉서를 CRLH 전송선로 단위 셀을 이용하여 구현하였다. 이렇게 설계된 PCB는 그림 4에 나타내었고, 이것은 유전율  $\epsilon_r=2.5$ , 두께  $h=0.787$  mm인 Taconic사 TLX-9을 사용하여 제작하였다.

4 포트의 트리플렉서의 S-파라미터 특성을 확인한 특성은 그림 5에 나타내었다.

측정된 결과를 살펴보면 중심주파수 0.3 GHz에서 삽입손실은 0.5 dB 이하, 반사계수는 20 dB 이하를 얻었으며, 타 주파수 0.98 GHz와 1.9 GHz에서의 고립도는 25 dB 이상 확보하였고, 중심주파수 0.98 GHz에서 삽입손실은 0.7 dB 이하, 반사계수는 13 dB 이하를 얻었으며, 타 주파수 0.3 GHz와 1.9 GHz에서의 고립도는 25 dB 이상 확보하였고 그리고 중심주파수 1.9 GHz에서 삽입손실은 0.7 dB 이하, 반사계수는 14 dB 이하를 얻었으며, 타 주파수 0.3 GHz와 0.98 GHz에서의 고립도는 25 dB 이상 확보되는 것을 확인하였다. 서로 다른 주파수에서의 삽입손실이 25 dB 이상 확보되었기 때문에 포트 간섭이 일어나지 않음을

확인하였다. 결국 통과 대역 이외의 차단 특성이 우수하므로 삼중대역 증폭기가 설계되었을 때 하모닉 성분을 제거하는데 도움이 될 것이다.

MWO 소프트웨어에서 사용하는 각각의 소자 값들은 손실이 없고 품질계수가 높은 소자를 사용하여 설계하였다. 하지만 실제로 사용하는 칩 커패시터와 인덕터는 품질계수가 높지 않고, 5 ~ 10 % 이상의 오차를 갖고 있어, 높은 주파수에서 사용할 때 설계된 소자 값과 다르게 동작하여 회로 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 트리플렉서 회로에서는 이론값과 시뮬레이션 값을 토대로 실험을 하면서 여러 번 시행착오를 통해 원하는 결과를 얻을 수 있다. 실제 제작된 트리플렉서에 사용된 소자 값들은 표 2에 나타내었다.

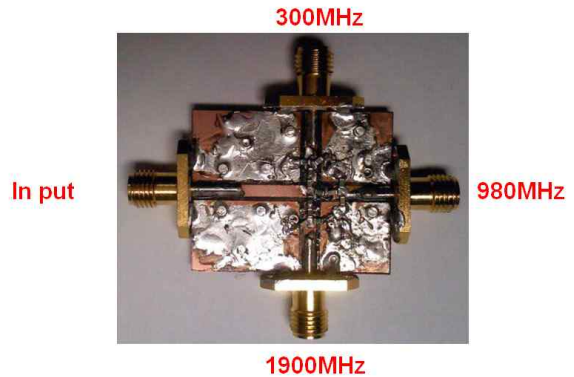


그림 4. 제작된 트리플렉서 사진  
 Fig. 4. Photograph of fabricated triplexer.

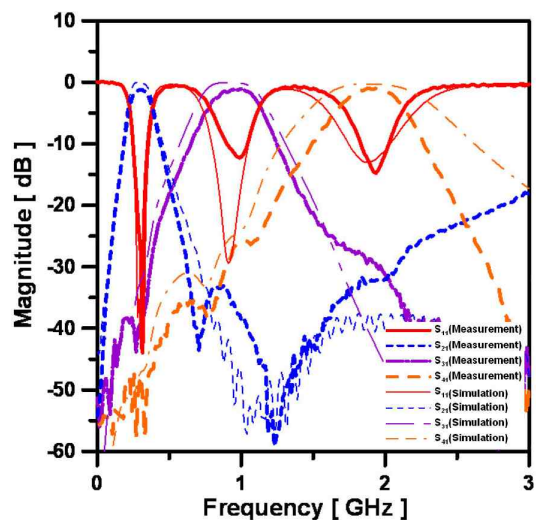


그림 5. 트리플렉서의 측정과 시뮬레이션 결과 비교  
 Fig. 5. Compare measurement to simulation results of triplexer.

표 2. 트리플렉서 실제 제작에 사용된 소자 값  
Table 2. Element values of CRLH-TL unit-cell for triplexer implementation

Frequency	실제 사용된 소자 값					
	0.3 GHz		0.98 GHz		1.9 GHz	
$L_R$ [nH]	$L_{R1}$	68	$L_{R2}$	18	$L_{R3}$	8.2
$C_L$ [pF]	$C_{L1}$	4.3	$C_{L2}$	1.5	$C_{L3}$	0.5
$L_L$ [nH]	$L_{L1}$	12	$L_{L2}$	2.7	$L_{L3}$	1.2
$C_R$ [pF]	$C_{R1}$	22	$C_{R2}$	7	$C_{R3}$	2.7

3-2 삼중대역 증폭기

본 논문은 메타 재료의 CRLH 전송선로의 단위 셀을 이용한 트리플렉서를 구현하고 이것의 응용분야를 보여주기 위해서, 트리플렉서를 증폭기와 결합하였다. 이렇게 메타 재료의 트리플렉서를 이용한 삼중대역 증폭기의 블록도는 그림 6에 나타내었다.

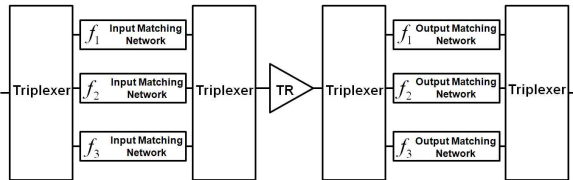


그림 6. 삼중대역 소신호 증폭기의 블록 다이어그램  
Fig. 6. Block-diagram of Triple-band small signal amplifier.

삼중대역 증폭기를 구현하기 위해서 Agilent Technologies사의 ATF33143을 사용하였고, 이것은 유전율  $\epsilon_r=2.5$ , 두께  $h=0.787$  mm인 Taconic사 TLX-9을 사용하여 제작하였다.

삼중대역 증폭기의 중심주파수는 0.3 GHz, 0.98 GHz 그리고 1.9 GHz이고 이 주파수 대역에서 무조건 안정이 되도록 병렬 저항을 추가하였고, 입-출력 정합을 위해서 simultaneous conjugate matching을 하였다. 또한, DC 바이어스 회로는 정합회로에 영향을 주지 않도록 하기 위해서 큰 값의 인덕터를 이용하여 회로의 전기적 특성에 영향을 주지 않도록 하였다.

이렇게 설계된 증폭기는 0.3 GHz, 0.98 GHz 그리고 1.9 GHz 세 개의 대역에서 각각 9.3 dB, 10.4 dB 그리고 6.2 dB의 이득을 얻었고, 세 밴드의 입출력 정합부를 모두 결합하여 구현된 삼중대역 증폭기를 그림 7에 나타내었다. 또한, 이것의 전기적인 특성은 그

림 8에 나타내었다.

측정된 결과를 살펴보면 트리플렉서를 이용한 증폭기가 기존의 다중대역 증폭기 또는 광대역 증폭기의 반사손실 특성이 더 개선된 것을 알 수 있다. 이렇게 제작된 증폭기의 특성을 정리하여 표 3에 나타내었다.

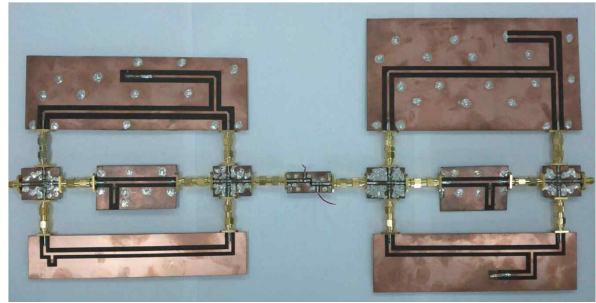


그림 7. CRLH 전송선로의 트리플렉서를 이용한 삼중대역 증폭기 사진

Fig. 7. Photograph of triple-band amplifier using triplexer based on CRLH transmission line

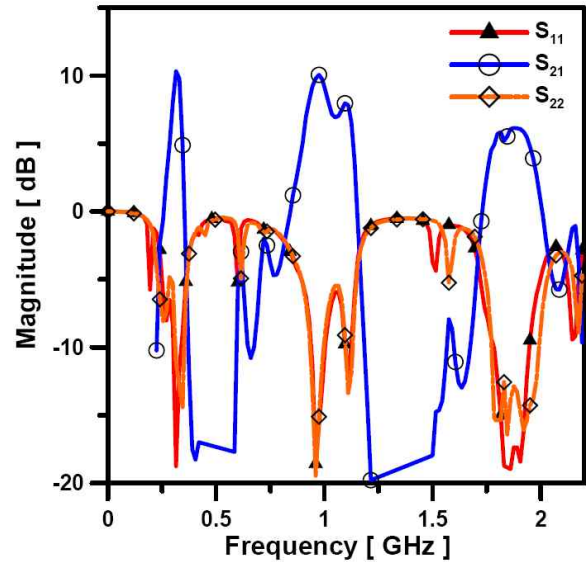


그림 8. 삼중대역 증폭기의 측정 결과

Fig. 8. Measured results of triple-band amplifier

표 3. 트리플렉서를 이용한 삼중대역 증폭기 측정결과  
Table 3. Measured results of triple-band amplifier using triplexer

주파수	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$
0.3GHz	-15.8 dB	-43.0 dB	9.0 dB	-14.3 dB
0.98GHz	-19.5 dB	-33.8 dB	10.0 dB	-13.9 dB
1.9GHz	-18.0 dB	-28.9 dB	6.1 dB	-14.9 dB

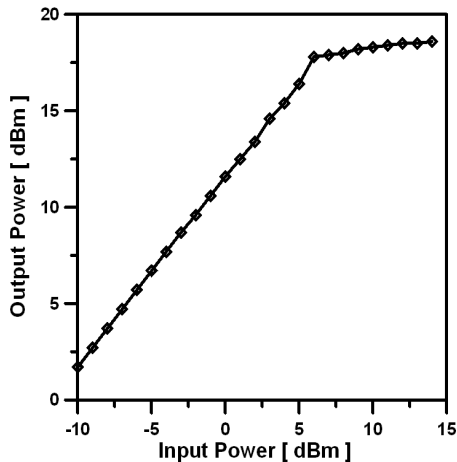


그림 9. 0.98 GHz 대역에서 입출력 특성

Fig. 9. Characteristics of input versus output power at 0.98 GHz

증폭기의 선형 특성을 확인하였는데 0.98 GHz에서의 선형성에 대한 특성을 그림 9에 나타내었다.

설계 주파수별 특성은 0.3 GHz에서 14.0 dBm, 0.98 GHz에서 17.0 dBm 그리고 1.9 GHz에서 20.0 dBm의 P1dB 특성을 얻었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 CRLH 전송선로 단위 셀의 대역통과 특성을 이용한 트리플렉서의 구현과 이것을 이용한 삼중대역 증폭기를 설계하였다. 트리플렉서의 다른 주파수에 대한 억압 특성을 이용한 증폭기는 인접 채널의 전기적인 특성을 25dB 이상 억압하여 다른 주파수에 영향을 없게 하였다.

구현된 회로가 오픈 스테브와 전송선로로 구현되었기 때문에 회로가 커졌지만, 집중소자를 이용하면 좀 더 작게 구현이 가능하고, 트리플렉서 구현을 인터디지털 캐패시터와 단락 스테브를 이용하면 큰 전력을 감당할 수 있는 전력 증폭기에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 본 논문에서 구현된 트리플렉서를 멀티플렉서로 확장한다면 다중대역 증폭기로 확장할 수 있는 특징을 갖고 있다.

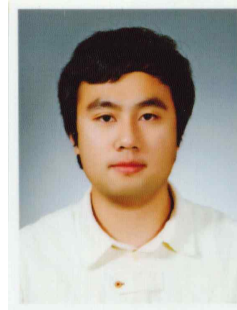
#### 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임.

#### 참 고 문 헌

- [1] Rauscher, C.; Kirchoefer, S.W.; Pond, J.M.; Guyette, A.C.; Jachowski, D.R., "A Compact Ridge-Waveguide Contiguous-Channel Frequency Multiplexer," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* pp. 647-656, Mar. 2009.
- [2] R.J. Cameron, C.M. Kudsia, and R.R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Applications*, Hoboken, NJ: Wiley, 2007, Ch. 18.
- [3] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh, *Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and microwave applications*, 1st ed., JOHN WILEY & SONS, INC, pp.1-139, 2006.
- [4] 김승환, 김영, 이영순, 윤영철, "CRLH 전송선로를 기반으로 한 다이플렉서를 이용한 주파수 체배기," *한국향행학회논문지*, 제14권, 제1호, pp. 66-73, 2010. 2.
- [5] H. R. Ahn, Tatsuo Itoh, "Multiplexers Using Unit-Cell Filters of CRLH TLs", *Proceedings of Asia. Pacific Microwave Conference 2010*, pp.674-677, 2010.
- [6] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers*, 2nd ed., Prentice Hall, pp.212-283, 1996.
- [7] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed., WILEY, 228-232, 2006.

#### 윤 정 호 (尹正豪)



2010년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 졸업 (공학사)

2010년 3월 ~ 2012년 2월 : 금오공과대학교대학원 전파통신공학과 졸업 (공학석사)

2012년 3월 : 한국도κι맥유압공업(주) 기술연구소 근무

관심분야 : Metamaterial, 수동소자 회로 설계, RF 회로 설계

김 영 (金英)



1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 8월: 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

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 부교수

관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

윤 영 철 (尹永哲)



1978년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1989년 2월: 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

1987년 9월 ~ 현재 관동대학교 전자

정보통신공학부 교수

관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계