

CRLH 전송선로를 이용한 공통 모드 억압 평형 필터

Common-Mode Suppression Balanced Filter based on Composite Right/Left-Handed Transmission Line

김영*, 윤정호*, 윤영철**

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

요 약

본 논문은 차동 모드로 동작하는 메타 재질 구조를 바탕으로 평형 필터 설계를 제안한 것이다. 이 메타 재질 구조는 차동 모드 동작에서는 Composite Right/Left-Handed(CRLH) 메타 재질로 동작하여 필터 특성을 갖지만, 공통 모드에서는 통과대역이 차단되는 성질을 갖는 평형 CRLH 단위 셀로 구성되었다. 이러한 차동모드 특성을 갖는 단위 셀을 직렬로 4단을 연결하여 필터를 구성하였으며, 제안된 메타 재질의 특성은 차동 모드 평형 필터로 동작하고, 공통 모드에서는 차단되는 특성을 실험 결과를 통하여 확인하였다. 메타 재질을 이용한 평형 필터는 대역폭이 960 MHz~1000 MHz, 4.1dB의 삽입손실을 갖는 특성을 얻었다.

Abstract

This paper presents a novel balanced filter design based on a metamaterial structure applicable to differential-mode excitation. The metamaterial structure is based on a unit-cell which under a differential-mode excitation behaves like composite right/left-handed(CRLH) metamaterial with filter characteristics. In contrast, the metamaterial unit-cell is below cut-off under a common-mode excitation. Experimental results are used to verify the proposed metamaterial's differential-mode characteristics. The metamaterial is fabricated with a balanced filter design resulting in an operating frequency range of 960~1000 MHz with a insertion loss of 4.1 dB.

Key words : Balanced Filter, Composite Right/Left-Handed Transmission Line, Differential-mode, Metamaterial, Common-mode suppression

I. 서 론

현대 이동통신 시스템에서 대역통과 필터의 역할은 매우 중요하다. 이러한 통신 시스템에서 아날로그 신호는 환경적인 잡음과 전자기기에서 발생하는 잡음에 의해서 그 특성이 열화된다. 여기서 환경적인

노이즈는 전원 공급기, 접지선 그리고 인접 물체들 사이의 간섭 등에 의한 것이며, 전자기기의 잡음은 능동소자 내부의 온도 잡음, 플리커 잡음등이 존재한다. 이러한 잡음은 통신회로의 최소 수신신호 레벨을 결정하게 하는 중요 요인이다. 차동 모드로 동작하는 평형 회로의 중요한 장점은 환경적인 잡음에 대한 높

* 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) : 김영

· 투고일자 : 2011년 6월 24일

· 심사(수정)일자 : 2011년 6월 24일 (수정일자 : 2011년 8월 2일)

· 게재일자 : 2011년 8월 30일

은 면역성을 갖고 있다는 것이다.

기존 평형 회로의 구현 형태를 살펴보면 불평형 신호를 평형신호로 변환시켜주는 발룬을 이용하여 모노폴 안테나와 연결되는 형태로 개발되어 왔다. 이러한 발룬을 이용한 필터 개발 이후에 차동 모드 대역통과 필터는 발룬을 대체하여 개발되기 시작하였는데, 발룬을 이용한 콤팩 라인 필터를 LTCC 재질로 구현 [1]하였고, 반파장 공진기와 4개의 $\frac{\lambda}{4}$ 전송선로를 이용하여 40 GHz 평형 필터 [2]가 개발되었다. 또한, 결합 선로를 이용한 평형필터 [3], 다중 공진기를 이용한 평형 결합 공진기 대역통과 필터 [4] 그리고 계단 공진기를 이용한 평형 이중대역 필터 [5]등이 개발되었다.

본 논문에서는 평형 대역통과 필터를 차동 모드에서 동작하는 CRLH (Composite Right/Left-Handed) 전송선로 [6]의 단위 셀을 이용하여 설계하였으며, 이러한 특성을 이용하여 수신기에 존재하는 공통 모드 신호 레벨을 줄일 수 있는 필터를 구현하였다. 이러한 방법으로 제작된 평형 필터는 아직 발표된 것이 없다. 제작된 평형 대역통과 필터는 중심 주파수가 980 MHz이며, 원하는 삽입손실과 균 지연특성 그리고 30dB 이상의 공통 모드 억압 특성을 얻었다.

메타 재질을 이용한 차동 모드 평형 필터를 이용한 수신 시스템의 블럭 다이어그램은 그림 1에 나타내었다.

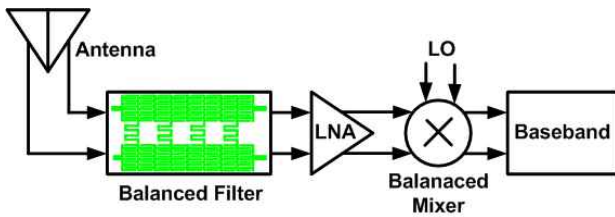


그림 1. 평형 필터를 사용한 수신 시스템 블럭 다이어그램

Fig. 1. Block diagram of receive system using balanced filter

II. 평형필터 설계 이론

2-1 혼합 모드 S-파라미터

4-포트 소자인 평형 필터는 네트워크 분석기로 표준 4-포트 S-파라미터 Sstd를 측정할 수 있다. 또, 2-포트 차동과 공통 모드 S-파라미터 Sdd와 Scc는 4-포트 S-파라미터 Sstd로부터 추출할 수 있다[7].

$$S_{nn} = MS_{std}M^{-1} \tag{1}$$

여기서 M은 다음과 같다.

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

기본적으로, 혼합모드 S-파라미터(Snn)은 다음과 같이 분할할 수 있다.

$$S_{nn} = \begin{pmatrix} S_{dd} & S_{dc} \\ S_{cd} & S_{cc} \end{pmatrix} \tag{2}$$

여기서

$$S_{cc} = \begin{pmatrix} S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cc21} & S_{cc22} \end{pmatrix},$$

$$S_{dd} = \begin{pmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} \end{pmatrix}$$

는 각각 2-포트 차동 (Sdd)과 공통(Scc) 모드 S-파라미터들이다.

2-포트 크로스 모드 S-파라미터 Sdc와 Scd는 차동 모드가 공통모드로 또, 공통모드가 차동모드로 변환되는 것으로 위와 같은 표현으로 나타낼 수 있다.

이상적인 평형구조에서는 크로스 모드 S-파라미터 Sdc와 Sdc는 모든 구성 성분이 0으로 구성된 2x2 행렬이다.

기존의 CRLH 분산과 Bloch 임피던스관계를 사용하여 공통과 차동-모드에서의 분산, 감쇄 상수 그리고 Bloch 임피던스 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\beta_{comm} = \cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{\alpha 11} S_{\alpha 22} + S_{\alpha 12} S_{\alpha 21}}{2 S_{\alpha 21}} \right) / p \tag{3a}$$

$$\beta_{diff} = \cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{dd11}S_{dd22} + S_{dd12}S_{dd21}}{2S_{dd21}} \right) / p \quad (3b)$$

$$\alpha_{comm} = \cosh^{-1} \left(\frac{1 - S_{\alpha c11}S_{\alpha c22} + S_{\alpha c12}S_{\alpha c21}}{2S_{\alpha c21}} \right) / p \quad (3c)$$

$$\alpha_{diff} = \cosh^{-1} \left(\frac{1 - S_{dd11}S_{dd22} + S_{dd12}S_{dd21}}{2S_{dd21}} \right) / p \quad (3d)$$

$$Z_{B,comm} = \frac{j2Z_0 S_{cc21} \sin(\beta_{comm} p)}{(1 - S_{cc11})(1 - S_{cc22}) - S_{cc21} S_{cc12}} \quad (4a)$$

$$Z_{B,diff} = \frac{j2Z_0 S_{dd21} \sin(\beta_{diff} p)}{(1 - S_{dd11})(1 - S_{dd22}) - S_{dd21} S_{dd12}} \quad (4a)$$

여기서, $\beta_{comm}, \beta_{diff}$ 는 공통과 차동 모드 위상 상수, $\alpha_{comm}, \alpha_{diff}$ 는 공통과 차동 모드 감쇄 상수 그리고 $Z_{B,comm}, Z_{B,diff}$ 는 공통과 차동 모드 Bloch 임피던스를 각각 나타낸다. 또한, p 는 단위 셀의 주기, Z_0 는 50 Ω 특성 임피던스를 나타낸다.

2-2 공통 모드 억압 비율

평형 필터의 특성은 식 (5)와 같이 공통 모드 억압 비율(Common-Mode Rejection Ratio: CMRR)로서 그 특성을 나타낼 수 있다.

$$CMRR = 20 \log \frac{|S_{dd21}|}{|S_{cc21}|} \quad (5)$$

2-3 메타재질의 단위 셀 설계

여기서는 메타 재질 단위 셀의 설계와 해석에 대해서 설명할 것이다. 필터의 기본 구성인 CRLH 단위 셀의 마이크로스트립으로 구성된 회로와 이것의 등가회로는 그림 2(a)에 표현하였다. 여기서 표시된 등가회로는 인터디지털 캐패시터를 직렬 캐패시터(CL)와 기생 인덕터(LR) 그리고 단락 스텐브는 병렬 인덕터(LL)와 기생 병렬 캐패시터(CR)의 결합으로 나타내었으며, 이들 값들은 인터디지털 캐패시터와 단락스텐브의 S-파라미터를 측정과 등가회로 변환을 통하여 위에서 표현된 등가회로의 파라미터를 추출할 수 있다[8].

그림 2(a)의 CRLH 단위 셀을 대칭 형태로 연결하여 차동모드에서 동작하는 평형 필터 단위 셀을 구현하였으며, 평형 CRLH 단위 셀의 마이크로스트립 구현과 등가 회로는 그림 2(b)에 나타내었다.

그림 2(b)의 등가회로는 공통 모드에서 동작할 때는 대칭면이 개방되어 병렬로 연결된 인덕터(LL)가 CRLH 전송선로 등가회로에 기여하지 못하게 되어 정상적인 CRLH 단위 셀로 동작하지 않는다.

또한, 차동 모드 동작에서는 대칭면이 단락되기 때문에 병렬 인덕터(LL)이 존재하게 되어 정상적인 CRLH 단위 셀로 동작하게 된다.

CRLH 평형 단위 셀을 구현하기 위해서 마이크로스트립 기술을 선택했으며, 직렬 캐패시터 CL은 인터디지털 캐패시터로, 병렬 인덕터 LL은 높은 임피던스 선로를 단락시킨 단락스텐브로 구현하였다. 여기서 제안된 CRLH 평형 단위 셀은 병렬 인덕터(LL)를 구현하는데 비아를 사용하지 않음으로 인하여 단락스텐브의 제작 과정의 편이성과 도체 손실을 줄여주는 효과가 있다.

여기서 사용된 소프트웨어는 CST사의 CST Studio 2009를 이용하여 EM 시뮬레이션을 통해서 CRLH 단위 셀의 설계와 해석을 수행하였다.

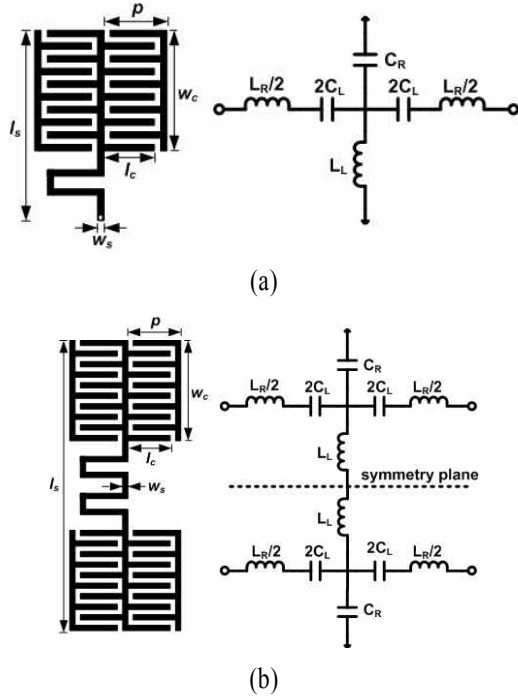


그림 2. (a) CRLH 단위 셀, (b) 평형 CRLH 단위 셀의 등가 회로 모델과 마이크로 스트립 구현

Fig. 2. Equivalent circuit model and microstrip realization of (a) CRLH unit cell, (b) Balanced CRLH unit cell.

앞의 그림 2(b)의 평형 CRLH 단위 셀에서 구한 4 포트 S-파라미터 값을 이용하여 차동과 공통 모드 분산 값과 Bloch 임피던스 값을 그림 3과 4에 나타내었다.

그림 3은 차동과 공통 모드의 분산 특성을 나타낸 것으로 우리가 설계한 중심 주파수 750 MHz에서의 특성을 보면 차동 모드에서는 분산특성이 나오지만, 공통 모드에서는 750 MHz는 차단되고, 2.5 GHz에서 필터 특성이 나타나는 것은 CRLH 전송선로에 의한 특성이 아닌 필터의 특성이다. 또한, 그림 4의 Bloch 임피던스는 차동 모드에서는 750 MHz 중심 주파수에서 50오옴의 특성을 보여주고 있지만, 공통 모드에서는 단락과 같은 특성이 나옴을 알 수 있다.

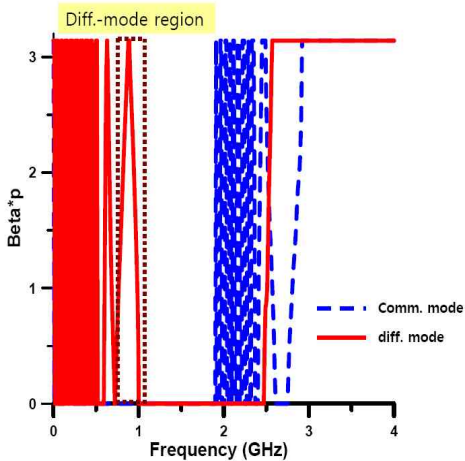


그림 3. 차동/공통 모드 분산 다이어그램
Fig. 3. Differential/common-mode dispersion diagram

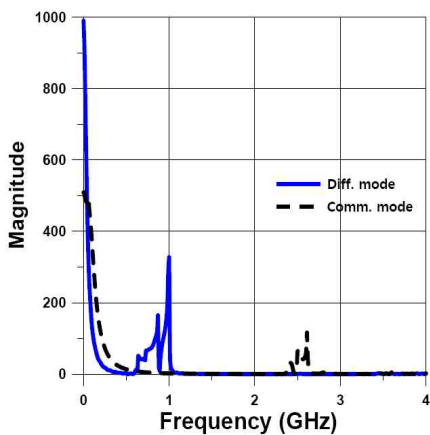


그림 4. 차동/공통 모드의 Bloch impedance
Fig. 4. Bloch impedance of differential/common-mode.

이 결과를 통해서 평형 필터는 차동 모드 동작에서는 평형 CRLH 구조의 필터 특성이 나타나지만, 공통 모드 동작에서는 중심 주파수 대역에서 차단됨을 보여주고 있다.

여기서 설계된 평형 CRLH 단위 셀의 파라미터 값은 $p=4.83$ mm, $l_s=36.21$ mm, $w_s=1.11$ mm, $l_c=2.7$ mm, $w_c=11.65$ mm 그리고 인터디지털의 5개 핑거 쌍은 1.1 mm의 폭과 0.1 mm의 간격을 갖는다.

또한, 추출한 S-파라미터로부터 파라미터 변환에 의해서 추출된 등가회로 소자 값은 $CL=1.11$ pF, $LR=1.92$ nH, $CR=0.74$ pF 그리고 $LL=41.77$ nH이다.

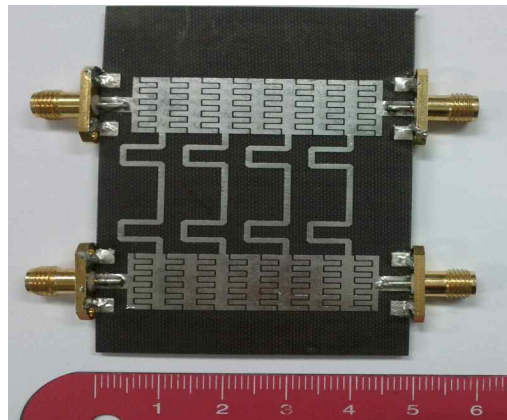
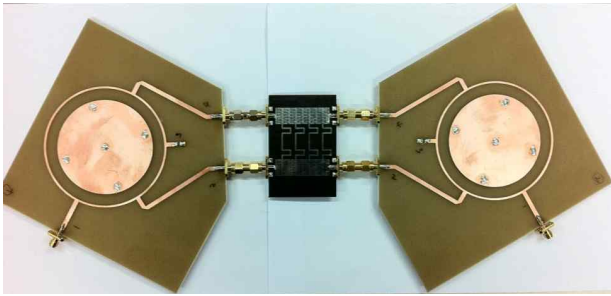


그림 5. 제작된 평형 대역통과 필터의 PCB 구조
Fig. 5. PCB layout of fabricated balanced filter

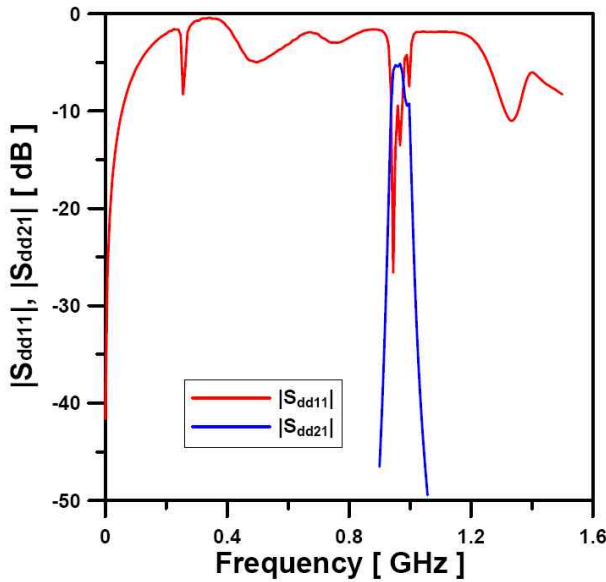
III. 실험결과

차동 모드로 동작하면서, 공통 모드를 억압하는 평형 필터는 평형 CRLH 단위 셀을 직렬로 4개를 연결한 형태로 구성된 평형 대역통과 필터를 구현하였다. 이 평형 필터 설계 PCB 구조는 그림 5에 나타냈으며, 유전율 $\epsilon_r=2.5$, 두께 $h=0.787$ mm인 타코닉 TLX-9 으로 제작하였다.

4 포트의 평형 필터의 특성을 확인하기 위하여 먼저, 차동모드 S-파라미터를 확인하기 위해서 필터 양 끝에 경로의 위상이 180° 위상차가 존재하는 링 하이브리드 결합기를 제작하였다. 이 결합기의 특성은 중심 주파수 980 MHz에서 0.8 dB의 S21 그리고 26 dB의 S11 특성을 확인하였다. 또한, 공통 모드의 S-파라미터 특성을 확인하기 위한 동위상 분배기의



(a)



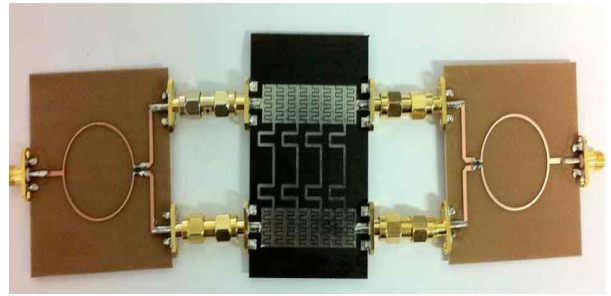
(b)

그림 6. (a) 차동 모드 측정 회로 (b) 차동 모드에서의 측정 결과

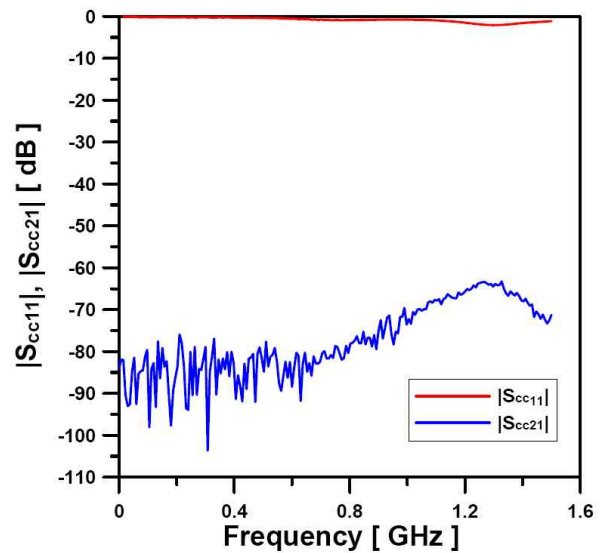
Fig. 6 (a) Measurement configuration of differential mode (b) Measurement results of differential mode

특성은 중심 주파수 980 MHz에서 0.79 dB의 S21 그리고 20 dB의 S11 특성을 확인하였다.

링 하이브리드 결합기를 이용한 차동 모드에서의 특성을 측정하기 위한 회로는 그림 6(a)에 나타내었고, 그때의 특성은 그림 6(b)에 나타내었다. 또한, 공통 모드에서의 평형 필터의 특성을 확인하기 위하여 평형 필터 양 끝에 동위상 분배기를 연결하여 S-파라미터 특성을 측정하기 위한 회로는 그림 7(a)에 나타내었고, 그때의 특성은 그림 7(b)에 나타내었다. 그림 6 (b)는 그림 5에서 보여준 제안된 평형 필터의 차동 모드 주파수 특성을 보여주고 있다. 측정된 차동 모드 중심 주파수는 980 MHz, 측정된 3 dB 대역폭은 10% 그리고 최소 삽입 손실은 4.2 dB이다.



(a)



(b)

그림 7. (a) 공통 모드 측정 회로 (b) 공통 모드에서의 측정 결과

Fig. 7 (a) Measurement configuration of common mode (b) Measurement results of common mode

이렇게 손실이 큰 것은 커넥터 연결에 의한 손실, PCB 손실 그리고 방사 손실등이 결합되었기 때문이다. 제작된 PCB의 크기는 $0.26\lambda_g \times 0.21\lambda_g$ (50 mm X 40 mm)이다. 여기서 λ_g 는 차동모드 중심 주파수의 관내 파장을 의미한다. 넓게 본 측정 데이터에서는 2.5 GHz 주파수까지 50dB 이상의 감쇄 특성을 갖고 있음을 보여준다.

또한, 그림 7 (b)는 그림 5에서 보여준 제안된 평형 필터의 공통 모드 주파수 특성을 보여주고 있다. 측정된 공통 모드 응답은 980 MHz 통과 대역폭 내에서 -70 dB 이상의 억압 특성을 보여준다. 제안된 평형 필터는 차동 모드 중심 주파수 980 MHz 근방에서 우수한 공통 모드 억압 특성을 보여주고 있다.

그러므로, 제작된 평형 필터에서는 신호의 불균형

이 최소가 되도록 하는 것이 평형조건에 가깝게 되는 것이다. 윗 식은 평형 필터의 대역통과 대역에서 공통 모드 억압 레벨을 나타내는 특성으로 알려져 있다. 그림 5의 제안한 평형 필터는 차동 모드 중심 주파수 980 MHz에서에서 최대 65 dB의 CMRR을 갖고 있으며, 평형 필터의 대역폭 960~1000 MHz에서는 60 dB이상의 CMRR 값을 갖고 있다.

V. 결 론

이 논문은 평형 CRLH 전송선로 단위 셀을 이용하여 중심주파수가 980 MHz인 차동모드 평형 필터를 구현하였다. 이 필터는 공통모드의 억압정도를 나타내는 CMRR이 60dB 이상 확보되는 것을 확인하였고, 4.2dB의 삽입손실을 얻었다. 이러한 평형 필터는 이동통신 시스템에서 요구하는 좋은 수신 감도를 요구하는 수신기에 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M.C. Park, B.H Lee, and D.S. Park, "A laminated balanced filter using LTCC technology," in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, 2005, pp. 4-7.
- [2] A. Ziroff, M. Nalezinski, and W. Menzel, "A 40 GHz LTCC receiver module using a novel submerged balancing filter structure," in *Proc. Radio Wireless Conf.*, 2003, pp. 151-154.
- [3] C. H. Wu, C. H. Wang and C. H. Chen, "Novel balanced coupled-line bandpass filters with common-mode noise suppression," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 2, pp.287-295, Feb. 2007.
- [4] C. H. Wu, C. H. Wang and C. H. Chen, "Balanced coupled-resonator bandpass filters using multisection resonators for common-mode suppression and stopband extension," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 8, pp.1756-1763, Aug. 2007.

- [5] J. E. Lim, M. H. Nam, H. O. Choi, and J. H. Lee, "Two-port balanced dual-band bandpass filter based on stepped impedance resonators," *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010*, pp. 1114-1117., Dec. 2010.
- [6] 김 영, "CRLH 전송선로 리키 웨이브 안테나를 이용한 평형 믹서," *한국전자과학회 논문지*, 제19권, 제9호, 2008년 9월.
- [7] D. E. Bockelman, and W. R. Eisenstadt, "Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 43, no. 7, pp.1530-1539, July 1995.
- [8] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line theory and microwave applications*, New Jersey: J. Wiley & Sons, 2006.

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 정 호 (尹正豪)



2010년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 졸업 (공학사)
 2010년 3월~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 전자통신공학과 재학 중
 관심분야 : Metamaterial, 수동소자 회로 설계, RF 회로 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

전자정보통신공학부 교수

관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계