

손실이 있는 Left-Handed 전송선로를 이용한 감쇠기와 벡터 변조기 응용

Attenuator using Lossy Left-Handed Transmission Line and Vector Modulator Application

김승환*, 김일규*, 김 영*, 윤영철**

Seung-Hwan Kim*, Ell-Kou Kim*, Young Kim* and Young-Chul Yoon**

요 약

본 논문은 메타 재질 구조를 바탕으로 한 가변 감쇠기와 그 응용에 대하여 기술 하였다. 손실이 존재하는 전송선로를 이용한 감쇠기 단위 셀은 CRLH(Composite Right/Left Handed) 전송선로와 다이오드 바이어스 전압에 따라서 내부 저항값의 변화에 따라서 손실을 제어할 수 있는 PIN다이오드로 구성되어 있다. 또한, 내부의 초기 삽입 손실을 줄이기 위해서 두 개의 PIN 다이오드를 병렬로 연결하였다. 이 감쇠기는 감쇠기 단위 셀 숫자를 증가시킴으로서 감쇠량을 증가시킬 수 있는 주기적 구조로 설계되었다. 단위 셀의 전기적 특성은 주파수 1.5 GHz ~ 2.5 GHz에서 10dB의 감쇠량과 최대 150의 위상변화를 확인하였다. 이러한 특성의 감쇠기를 직렬로 연결하여 벡터 변조기에 응용하였다.

Abstract

This paper proposes a design of attenuator based on meta-material structure and its application. The unit-cell attenuator based on the lossy transmission line consists of the CRLH(Composite Right/Left Handed) transmission line and PIN diodes to be controlled internal loss according to diode bias voltage to change resistance of diode. Also, to reduce the initial losses, there is used parallel connection of PIN diodes. To increase attenuations, it is connected a cascade unit-cell of attenuator with periodic structure. The attenuation quantities of unit-cell are about 10dB and phase variations are 150 maximum at 1.5 GHz ~ 2.5 GHz. Also, its application is represented a vector modulator.

Key words : Attenuator, Composite right/left-handed transmission line(CRLH-TL), PIN diode, Vector modulator.

I. 서 론

일반적으로 전압제어 감쇠기는 RF 시스템에서 자

동이득 조절기, 증폭기에서 신호 제어용등으로 많이 사용된다. 또한, 이를 이용한 벡터 변조기는 군용, 우주 와 레이다 시스템 응용분야에 다양하게 사용된다.

* 금오공과대학교 전파통신과 RF회로설계연구실(Radio Communication Eng., Kumoh National Institute of Technology)

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

· 제1저자 (First Author) : 김승환

· 투고일자 : 2009년 5월 27일

· 심사(수정)일자 : 2009년 5월 28일 (수정일자 : 2009년 6월 23일)

· 게재일자 : 2009년 6월 30일

통신 시스템에서 신호 레벨을 제어하기 위해서 필요한 이것은 작은 크기와 넓은 동작영역을 갖는 중요 소자이다. PIN 다이오드를 사용한 가변 감쇠기의 많은 종류는 π 형 감쇠기, 저항을 이용한 감쇠기, 반사형 감쇠기, 하이브리드 커플러 감쇠기등의 형태들이 존재한다[1]-[3].

음의 굴절율과 투자율을 갖는 물질에서의 전자기파는 군속도와 위상속도가 반대로 움직이는 LH(Left-Handed) 특징을 갖고 있기 때문에, 이러한 물질을 LH 재질이라고 한다[4]. 하지만, 순수한 LH 전송선로는 RH(Right-Handed) 파라스틱 효과 때문에 구현할 수 없기 때문에 이것을 대체하는 CRLH 전송선로는 직렬 RH 성분 인덕턴스 LR, 직렬 LH 성분 캐패시턴스 CL, 병렬 RH 캐패시턴스 CR 그리고 병렬 LH 성분 인덕턴스 LL로 구성되는 모델로 사용할 수 있다 [5].

본 논문에서는 손실이 있는 전송선로를 이용하여, CRLH 전송선로와 PIN 다이오드를 바탕으로 한 감쇠기를 설계하였다. PIN 다이오드는 감쇠기에서 바이어스 전압에 따라서 감쇠량을 제어하는 소자로 사용되고, 이것의 역할은 손실이 있는 CRLH 전송선로의 삽입손실을 변화시키는 것이다. 감쇠기의 단위 셀은 PIN 다이오드와 CRLH 전송선로로 구성되었다. 또한, 더 많은 감쇠량을 얻고자 한다면, 감쇠기 단위 셀을 직렬로 연결하면 되는 구조로 설계되었다. 이러한 특성을 갖는 감쇠기를 이용하여 벡터 변조기의 특성을 구현하였다.

II. 광대역 감쇠기 설계

2-1 손실이 있는 CRLH 전송선로[6]

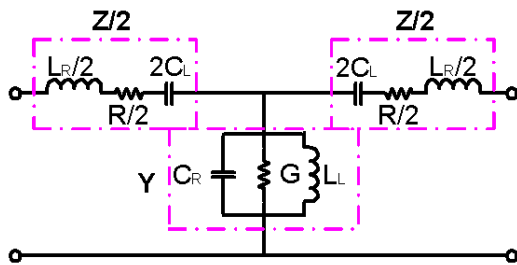


그림 1. 손실이 있는 CRLH 전송선로 등가회로
Fig 1. Equivalent circuit for the lossy CRLH-TL.

손실이 있는 CRLH 전송선로의 등가회로 모델은 손실이 있는 RH와 LH전송 선로가 결합된 그림 1에 나타내었다.

이 모델에서, 단위 길이 당 임피던스와 어드미턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z' = R' + jX' \text{ with } X' = \left(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L} \right) \quad (1)$$

$$Y' = G' + jB' \text{ with } B' = \left(\omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L} \right) \quad (2)$$

위의 방정식을 사용하여, 복소 전달 상수와 특성 임피던스를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z'Y'} \quad (3)$$

$$= \sqrt{(R'G' - X'B') - j(R'B' + G'X')}$$

$$Z_c = R_0 + jX_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + jX'}{G' + jB'}} \quad (4)$$

식 (3)에서 손실이 있는 LH 전송선로에서 전달 상수 γ_L 을 구하면 다음과 같다.

$$\gamma_L = -j \sqrt{\frac{1 - R'G'(\omega/\omega'_L)^2 + j\omega(C'_L R' + L'_L G')}{\omega/\omega'_L}} \quad (5)$$

$$= \alpha_L + j\beta_L$$

식 (5)의 근호안의 값은 테일러 공식에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_L = -j \frac{1}{\omega/\omega'_L} \left[1 + \frac{j}{2} (C'_L R' + L'_L G') \right] \quad (6)$$

$$\beta_L \approx -\frac{\omega'_L}{\omega}, \quad \alpha_L \approx \frac{1}{2} [R Y_o + G Z_c] \quad (7)$$

여기서

$$Z_c = \sqrt{L'_L / C'_L}, \quad Y_o = 1 / Z_c$$

위의 식으로부터 손실이 작은 LH 전송선로는 무손실 LH 전송선로와 같은 전달상수를 갖으며, 기준

의 RH 전송선로와는 같은 감쇠 상수를 갖고 있음을 볼 수 있다.

그림 1의 단위 셀이 N개 직렬 연결된다면, N개 단위 셀의 S-파라미터를 구할 수 있다. 그래서 그것으로부터 손실을 갖는 전송선로의 전달상수 β 와 감쇠 상수 α 를 전송 파라미터로부터 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$S_{21,N} = |S_{21,N}|e^{j\phi(S_{21,N})} = e^{-\alpha l}e^{-j\beta l} \quad (8)$$

$$\beta = -\phi^{unwrapped}(S_{21,N})/l + \theta$$

$$\alpha = -\ln|S_{21,N}|/l$$

여기서 l 은 전송선로의 전체 길이를 나타낸 것이다.

2-2 감쇠기의 설계

PIN 다이오드의 내부 저항값을 제어하여 손실이 있는 LH 전송선로로 구현된 감쇠기는 그림 2에 나타내었다.

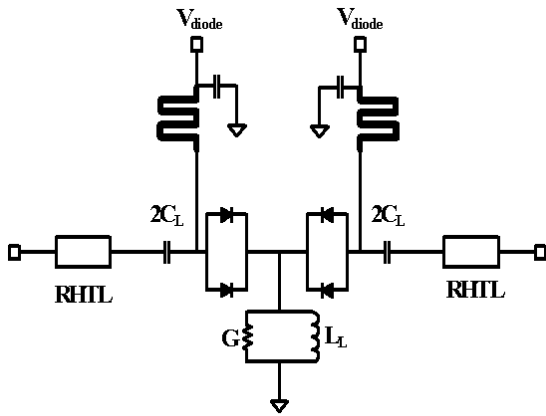


그림 2. 제안된 감쇠기의 단위 셀 회로 모델
Fig. 2. The unit-cell circuit model of proposed attenuator.

그림 2의 감쇠기를 설계하기 위해서 먼저, 동작 주파수 범위에서 설계자가 원하는 위상 변화를 갖는 CRLH 전송선로를 결정해야한다. 두 번째, 동작 주파수에서 사용하기 위한 CRLH 전송선로의 소자값을 계산하여야 한다. 이것은 요구되는 위상 응답을 갖는

CRLH 전송선로를 구성하는 인덕터와 캐패시턴스의 값을 결정하는 것이다. CRLH 전송선로는 비선형 위상 특성을 갖고 있기 때문에, 동작 주파수 범위에서 작은 위상 변화를 만족하여야 한다. 또한, 단위 셀의 숫자가 증가할 때, 삽입 손실은 PIN 다이오드 숫자가 증가함에 따라서 증가할 것이다. 바이어스 전압이 없는 상태의 삽입 손실과 감쇠량은 상관관계가 있다.

여기서 구하고자 하는 CRLH 전송선로는 LH 부분과 RH 전송선로로 구성되어 있기 때문에, 이 CRLH 전송선로의 위상 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$\Phi_{MTM}(f_1) = \Phi_{RH}(f_1) + \Phi_{LH}(f_1) = -Pf_1 + Q/f_1 \quad (9)$$

$$\Phi_{MTM}(f_2) = \Phi_{RH}(f_2) + \Phi_{LH}(f_2) = -Pf_2 + Q/f_2 \quad (10)$$

여기서 $P = -\Phi_{RH}/f_i$, $Q = f_i \cdot \Phi_{LH}$ 를 말한다. 식 (9)와 (10)을 만족하는 P, Q를 구하면 다음과 같다.

$$P = \frac{f_1\Phi_{MTM1} - f_2\Phi_{MTM2}}{f_2^2 - f_1^2} \quad (11)$$

$$Q = \frac{f_1f_2^2\Phi_{MTM1} - f_1^2f_2\Phi_{MTM2}}{f_2^2 - f_1^2} \quad (12)$$

이렇게 구한 값으로부터 LH의 L과 C값을 또, RH 마이크로스트립 길이를 구함으로써 CRLH 전송선로를 구할 수 있다.

제안된 감쇠기를 시뮬레이션하기 위해서, 앤질런트사의 ADS 2005 소프트웨어를 사용하여 다이오드 패키지의 파라미터를 갖는 PIN 다이오드를 모델링하여 사용하였다.

그림 3은 앞에서 설계한 단위 셀 감쇠기를 직렬로 3개를 연결하여 1.5 GHz~ 3.5 GHz까지의 주파수 대역에서 0.63 V~1V까지 PIN 다이오드 전압 가변 시 감쇠 특성을 나타낸 것이다.

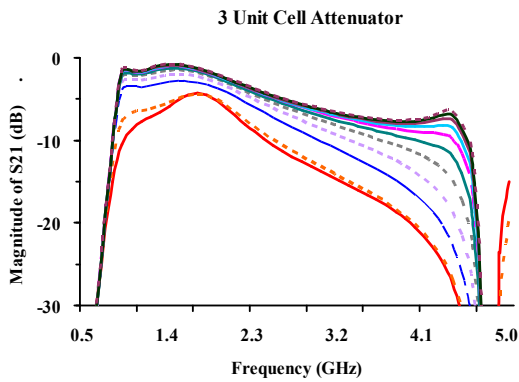


그림 3. 단위 셀 3개로 구성된 감쇠기의 감쇠 특성 시뮬레이션 결과
 Fig. 3. Attenuation characteristics simulation results of three unit cell attenuator.

2-3 감쇠기 제작 및 특성

그림 4는 제작된 3개 단위 셀을 연결한 감쇠기의 사진을 나타낸 것이다. 감쇠기는 타코닉사의 비유전율 상수 $\epsilon_r = 2.5$ 그리고 두께 $h=31\text{mil}$ 인 TLX-9테프론 기판을 사용하여 제작하였다. 사용된 PIN 다이오드는 Avago사의 HSMP4810를 그리고 인덕터와 캐패시터는 Murata 사 제품을 사용하였다.

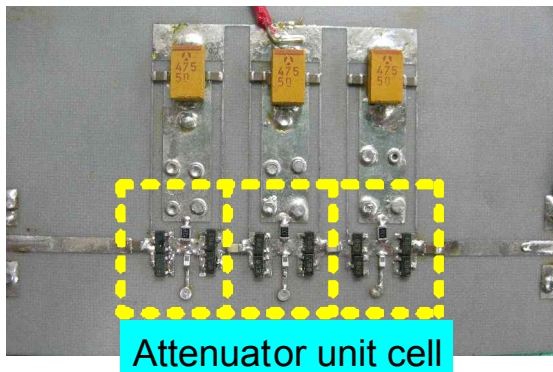


그림 4. 단위 셀 3개로 구성된 감쇠기 사진
 Fig. 4. Photograph of the fabricated three unit cells attenuator.

여기에 사용된 단위 셀 감쇠기는 1.5 GHz ~ 3.5 GHz의 동작 범위에서 네 개의 PIN 다이오드와 직렬 캐패시터 $CL=2.7\text{ pF}$, 병렬 인덕터 $LL=6.7\text{ nH}$ 그리고 직렬 인덕터는 전송선로를 사용하였다. 또한, 병렬 저항은 $130\ \Omega$ 을 사용하였다. 바이어스가 없는 상태에서 삽입 손실을 줄이기 위해서 PIN 다이오드의 내

부 저항을 반으로 하기 위해서 병렬로 PIN 다이오드를 연결하였다. 단위 셀 감쇠기의 특성은 바이어스가 없는 상태에서 삽입 손실은 0.5 dB, 2 GHz에서 0.63 V 바이어스 전압 공급시 10.5 dB의 감쇠량과 최대 150의 위상변화를 얻었다.

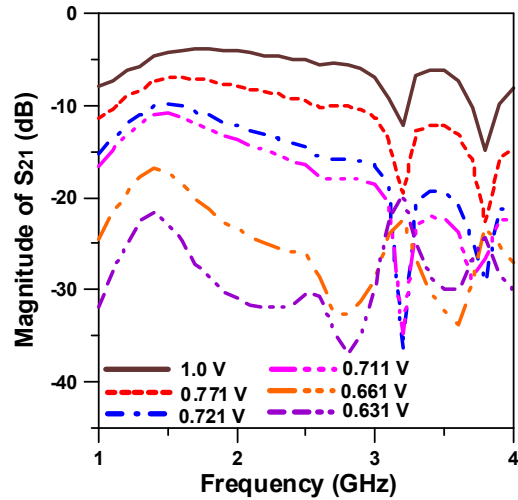


그림 5. 단위 셀 세 개를 연결한 감쇠기의 감쇠 특성
 Fig. 5. Attenuation characteristics of three unit cell attenuator.

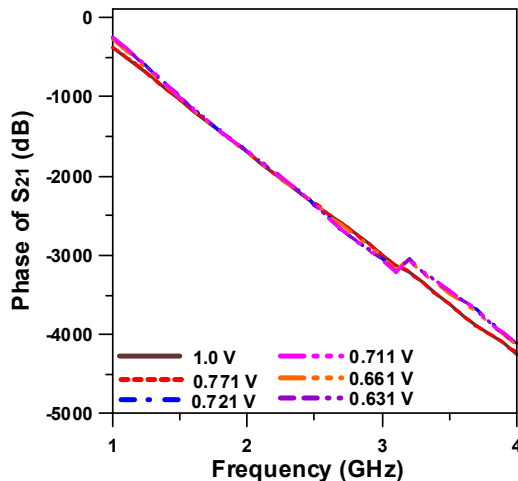


그림 6. 단위 셀 세 개를 연결한 감쇠기의 위상 특성
 Fig. 6. Phase characteristics of three unit cell attenuator.

단위 셀 세 개를 연결한 감쇠기의 S-파라미터는 그림 5에 나타내었다. 이것은 많은 감쇠량을 얻기 위해서 세 개의 감쇠기를 직렬로 연결한 것이다. 단위 셀의 S22의 특성이 나쁘기 때문에, 세 개 단위 셀 감쇠기의 S21 특성은 일정한 특성이 나오는 감쇠량을 얻지 못했다. 하지만, 1.5 GHz ~ 2.5 GHz로 동작 주파

수 범위를 줄여서 본다면 S21의 특성이 일정하게 나옴을 알 수 있다.

또한, 그림 6은 감쇠기의 위상 변화를 바이어스 전압에 따라서 나타낸 것이다. 2 GHz 동작 주파수에서 최대 120의 위상 변화를 얻을 수 있었다.

III. 감쇠기를 이용한 벡터 변조기

벡터 변조기는 신호의 크기와 위상이 동시에 변화시키는데 사용된다. 예를 들어서, 피드 포워드 증폭기는 스푸리어스 제거 루프와 메인 신호 제거 루프에서 신호를 제거하기 위해서 정밀하게 신호를 제어할 때 사용된다. 원하는 위상과 진폭을 만드는 가장 일반적인 방법은 가변 감쇠기와 가변 위상기를 사용하는 것이다[8]. 하지만 벡터 변조기는 신호의 크기만을 변화시켜서 신호의 진폭과 위상을 변하게 하는 방법으로 많이 이용되고 있다.

그림 7에 벡터 변조기의 블록 다이어그램을 나타내었다.

감쇠기의 위상을 보정하기 위한 위상변환기는 바랙터 다이오드를 이용한 구조로 다이오드에 역 바이어스를 인가하면 등가적으로 가변 캐패시턴스로 동작하는 특성을 이용한 것이다.

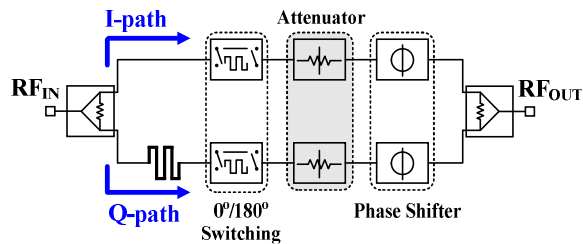


그림 7. 벡터 변조기 구조

Fig 7. Block-diagram of vector modulator.

입력 신호는 90° 하이브리드로 분배되고, 이렇게 나누어진 동위상과 직각 위상 신호는 0°/180° 위상 변환기와 연결된다. 이 0°/180° 위상 변환기는 신호 경로에 따라서 입력 신호의 위상을 바꾸어주는 역할을 한다. 만일 0°/180° 위상 변환기를 0°로 셋팅하면, 0°/180° 위상 변환기의 위상은 변화하지 않는다. 이 신호는 감쇠기로 연결되며 동 위상과 직각 위상의 신

호가 벡터적으로 결합된다. 최종적인 출력 신호는 1사분면을 나타내는 신호가 되며, 동위상 경로의 0°/180° 위상 변환기를 180°로 선택하면 2사분면을 나타낼 수 있다. 따라서 동위상과 직각위상 경로에 있는 0°/180° 위상변환기를 선택함에 따라서 1~4분면을 모두 나타낼 수 있다.

위에서 제안한 벡터 변조기의 동작을 증명하기 위해서, 하나의 단위 셀 감쇠기를 이용한 벡터 변조기 시뮬레이션을 수행한 것을 그림 8에 나타내었다. 이것은 2 GHz에서 4dB 진폭 변화와 14dB 이상의 반사계수 그리고 최대 40의 위상변화를 나타내었다. 각 경로의 감쇠기 위상 변화를 보정하기 위해서 위상변환기를 동위상과 직각위상 경로에 삽입하였다.

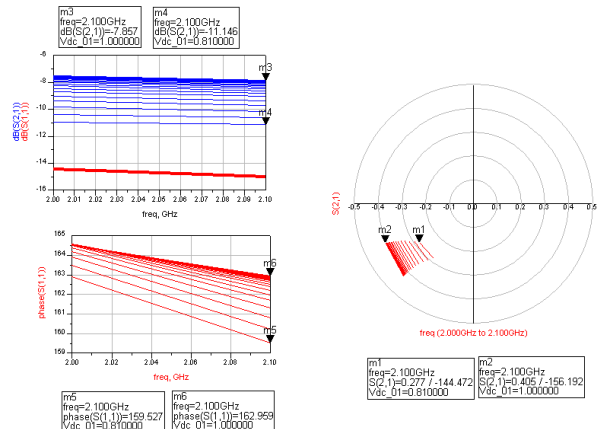


그림 8. 단위 셀 감쇠기를 이용한 벡터 변조기 시뮬레이션 결과 (2GHz)

Fig 8. Simulation results of vector modulator using an unit-cell attenuator (2GHz)

또한, 광대역의 특성을 얻기 위해서, 입력 분배기와 출력 결합기는 1.0 GHz ~ 3.0 GHz까지의 동작 범위를 만족하게 설계하였다[9]. 제안된 벡터 변조기는 1.0 GHz ~ 3.0 GHz에서 설계하였으며, 위상 변환기와 감쇠기는 유전율 $\epsilon_r = 2.5$, 두께 h=31mil의 테프론을 사용하였고, 입출력 디바이더는 유전율 $\epsilon_r = 4.3$, 두께 h=31mil의 에폭시 기판을 사용하였다. 이렇게 제작된 벡터 변조는 그림 9에 나타내었다.

벡터 변조기의 측정된 결과는 그림 10에 나타내었다. 이 결과는 2 GHz 주파수에서 내부 손실 7dB로 정규화한 그래프이다. 그림 10의 검은 점은 동위상과 직각위상 감쇠기를 제어하여 얻은 동작 지점이다.

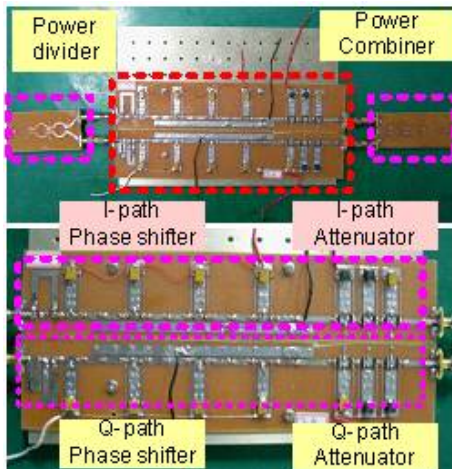


그림 9. 제작된 벡터 변조기 회로 사진
Fig 9. Photograph of implemented vector modulator.

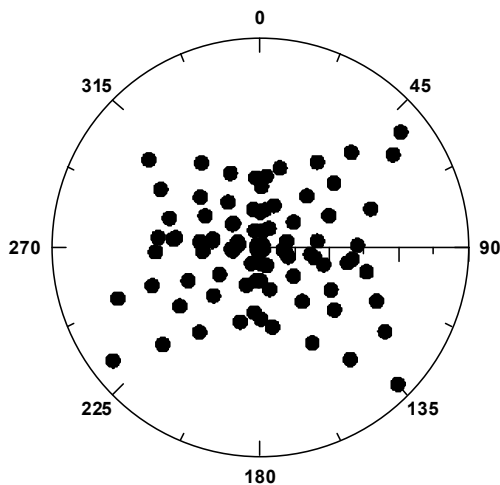


그림 10. 벡터 변조기 실험 결과 (2GHz)
Fig 10. Measurement results of vector modulator (2GHz).

IV. 결 론

이 논문은 메타 재질 구조를 바탕으로 한 가변 감쇠기와 그것을 이용한 벡터 변조기에 대한 설계에 대해서 나타내었다.

손실이 있는 전송선로를 이용한 감쇠기의 단위 셀은 CRLH 전송선로와 PIN 다이오드로 구성되었다. 이 단위 셀 감쇠기를 직렬로 연결하여 더 큰 용량의 감쇠기 제작이 가능하여 이것에 대한 특성도 확인하였다.

설계된 감쇠기를 사용하여, 신호의 크기와 위상을 동시에 제어할 수 있는 벡터 변조기를 제작하였다.

이러한 부품은 RF 시스템 응용분야에서 신호 레벨의 정밀 튜닝, 자동 이득 조절기등에 이용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해서 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] B.T. Henoch, P. Temm, "A 360° reflection type diode phase modulator", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.1 9 pp. 103-105, Jan, 1971.
- [2] 정용채, 장익수, "벡터 감쇠기의 설계", *한국전자공학회논문집*, 제 35권 11호, pp.1067-1073, 1998년 11월.
- [3] G.B. Norris, D.C. Boire, G. St. Onge and C. Wutke, "A fully monolithic 4-18 GHz digitally vector modulator," *IEEE MTT-S Digest*, pp.789-792, 1990.
- [4] V.G. Veselago, "The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan. 1968.
- [5] C Caloz, T Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley & Sons Inc, pp 63-139, 2006.
- [6] C. Caloz and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed(LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line." *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52 no.5, pp. 1159-1166, May, 2004.
- [7] I.H. Lin, M. Devincintis, C. Caloz, and T. Itoh, "Arbitrary dual-band components using composite right/left-handed transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.52, no.4, pp.1142-1149, Apr. 2004.
- [8] 류정기, 오승엽, "벡터 모듈레이터형 광대역 위상 변위기의 설계 및 제작", *한국전자공학회논문집*, 제14권 7호, pp.734-740, 2003년 7월.
- [9] Homayoon Oraizi, Ali-Reza Sharifi, "Design and

Optimization of Broadband Asymmetrical Multi-section Wilkinson Power Divider", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 5, May 2006.

김 승 환



2008년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학과(공학사)
2008년 3월 ~ 현재: 금오공과대학교 대학원 전파통신공학과 석사과정
관심분야 : RF 회로 설계, Metamaterial, 수동소자 회로 설계, 고 효율 전력 증폭기 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

김 일 규 (金一奎)



2005년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공(공학사)
2007년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공(공학석사)
2007년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 전파통신공학과 박사과정 재학중

관심분야 : RF 및 microwave 회로 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

김 영 (金 英)



1988년 2월: 서강대학교 대학원 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 조교수
관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계