

논문 2008-45TC-10-7

마이크로파대 광대역 가변 선형이득 등화기 설계

(The Design of a Wideband Adjustable Linear Gain Microwave Equalizer)

김 정 연*, 공 동 육*, 박 동 철**, 이 동 호***, 전 계 익*

(Jeong-Yon Kim, Dong-Ook Kong, Dong-Cheol Park, Dong-Ho Lee, and Kye-Ik Jeon)

요 약

본 논문은 6GHz에서 18GHz까지 동작하는 광대역 RF (송수신) 회로 시스템에 적용하기 위한 가변 선형 이득 등화기를 PIN 다이오드를 이용하여 설계하고 Thin Film 공정을 이용하여 Al_2O_3 (알루미나) 기판에 제작하였다. 개발된 가변 선형 이득 등화기는 T형으로 동작 대역 내에서 -7dB ~ -13dB의 가변 기울기를 갖는다.

Abstract

In this paper an adjustable linear gain equalizer which is operated from 6GHz to 18GHz in order to apply wideband RF circuit System is proposed and fabricated on Al_2O_3 substrate using thin film process. An adjustable linear gain equalizer is proposed to T type circuit and designed to aim on variable slope to -7dB ~ -13dB using the PIN Diode

Keywords : Adjustable Linear Gain Equalizer, PIN Diode

I. 서 론

마이크로파 시스템은 광대역 증폭기, 스위치, 위상변위기, 가변 감쇄기 등으로 이루어져 있다. 소자들은 일반적으로 주파수가 증가함에 따라 선형적으로 이득이 감소하게 된다. 선형적인 이득 감소를 보정하는 방식으로 고정 선형 이득 등화기와 기계적, 전기적 방식의 가변 선형 이득 등화기가 있다. 일반적인 고정 선형 이득 등화기의 경우 기울기 가변에 용이성이 떨어지며^[1], 기계적인 기울기 가변 방식은 마이크로파 대역에서 커판시터와 인덕터의 미세 조정에 어려움이 있다. 또한 기

계적인 기울기 가변방식은 가변 속도가 늦고 부피도 많이 차지하여 마이크로파 대역에서는 적합성이 떨어진다. 이에 반해 전기적 기울기 가변형은 가변 속도가 빠르고 작은 부피를 갖고 있어 마이크로파 대역에 적합하다. 하지만 현재 제작된 전기적 방식의 가변 선형 이득 등화기의 경우에는 주로 협 대역 민수용으로 제작되어 있으며,^[2] 기울기 가변 폭이 $\pm 1\text{dB}$ 이다. 본 논문에서는 마이크로파대 광대역의 선형 이득을 보정하기 위해 PIN 다이오드를 활용하여 전기적 방식의 가변 선형 이득 등화기를 설계, 제작하였다. 전기적 방식이 갖고 있는 위와 같은 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, FET나 HBT를 이용한 스위치에 비해 on/off특성이 매우 우수하며 전류조절을 통한 특성을 자유롭게 가변 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. 본 론

1. PIN 다이오드의 특성 및 모델링

PIN 다이오드는 높게 도핑 된 P^+ 와 N^+ 층 사이에

* 정회원, 알에프코어(주)
(RFcore Co., Ltd.)

** 정회원, 충남대학교 전파공학과
(Department of Radio Science and Engineering,
Chungnam National University)

*** 정회원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

※ 본 연구(논문)는 국방과학연구소의 위탁과제에 일환으로 수행되었습니다.(UD060070FD)

접수일자: 2008년7월10일, 수정완료일: 2008년10월16일

가볍게 도핑 시킨 순수 층(I-층)으로 되어 있다. 역 방향 동작은 도핑 된 내부 층에 공간 전하 영역을 형성하게 되며 외부 층까지 영역이 확대된다. 이러한 특성으로 저항과 커패시터가 병렬연결 된 후 인덕터와 직렬연결 된 등가 회로로 모델링 된다. 순 방향 동작은 인가 전류에 제어되는 저항과 인덕터 직렬연결과 같이 동작 한다.^[3] 역 방향 전류 인가 시 반사손실의 개선의 어려움, 기울기 가변의 용이성이 떨어지는 단점 등을 감안하여 본 논문에서는 순 방향 전류 인가 시 모델링을 적용하였으며, 효과적인 기울기 가변을 위해 PIN 다이오드의 동작 전압이하일 때의 모델링된 요소를 적용 하였다. 다음 그림 1과 2는 전류에 따라 측정된 PIN 다이오드 S파라미터 측정 과정과 측정된 S파라미터를 각각 보여주고 있다. 그림 2에 따르면 PIN 다이오드에 순 방

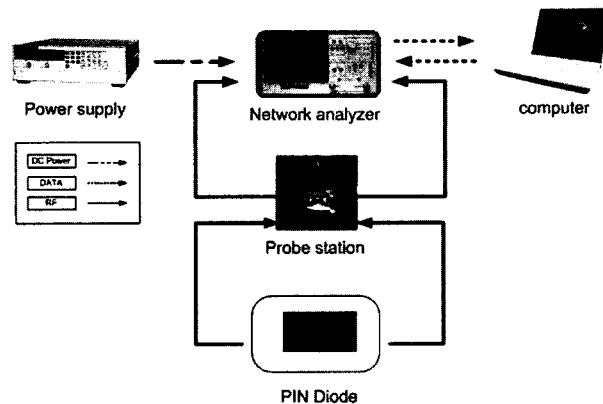
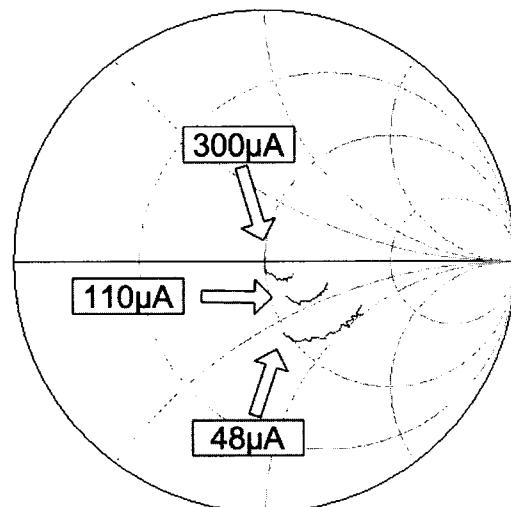


그림 1. PIN 다이오드 S파라미터 측정

Fig. 1. The measurement of PIN Diode S-parameter.



주파수 6GHz ~ 18GHz

그림 2. 전류에 따른 PIN 다이오드 S파라미터 변화

Fig. 2. The variation of PIN Diode S-parameter for current.

향 전류가 약 $48\mu\text{A}$ 이하로 흐를 때 PIN 다이오드는 off 상태가 되며 이때는 PIN 다이오드는 병렬의 커패시턴스가 추가된 형태로 모델링 할 수 있다. 이 때 커패시턴스의 값으로 인한 임피던스가 매우 크게 나타난다. PIN 다이오드의 전류가 $110\mu\text{A}$ 이상에서는 매우 작은 값의 저항과 인덕터의 직렬연결로 모델링된다.

주파수에 따른 S21의 기울기 가변을 위해 PIN 다이오드의 모델을 그림 3과 그림 4(a),(b)와 같이 전류에 따라 달리 모델링 할 수 있다.

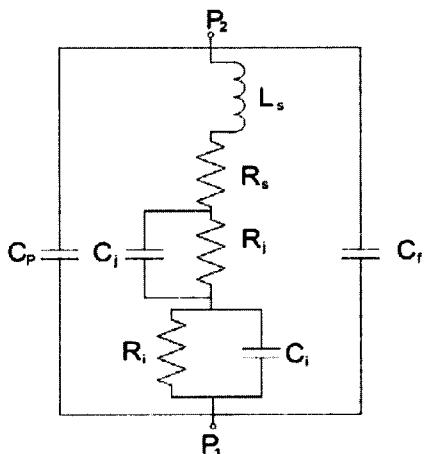
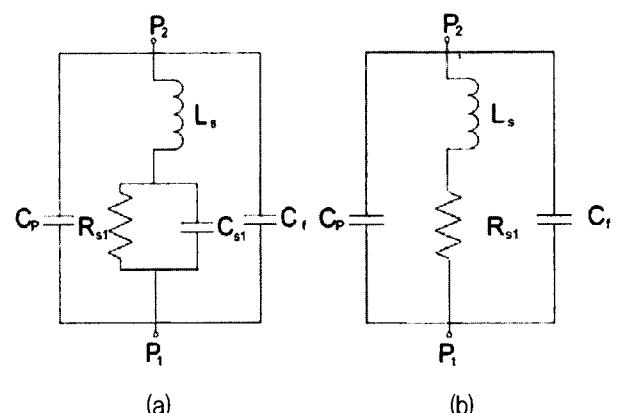
그림 3. 일반적인 PIN 다이오드 등가회로
Fig. 3. Equivalent PIN Diode circuit.^[3]그림 4. (a) 전류 $48\mu\text{A}$, $110\mu\text{A}$ 일 때 등가회로
(b) 전류 $300\mu\text{A}$ 일 때 등가회로Fig. 4. (a) Equivalent circuit at $48\mu\text{A}$, $110\mu\text{A}$.
(b) Equivalent circuit at $300\mu\text{A}$.

표 1. 전류에 따른 파라미터 변화

Table 1. The variation of the parameter in current changes.

Parameter	전류 $48\mu\text{A}$	전류 $110\mu\text{A}$	전류 $300\mu\text{A}$
L_s	0.001nH	0.001nH	0.15nH
R_{s1}	48.65Ω	55Ω	25Ω
C_{s1}	0.3pF	0.5pF	-

그리고 위의 PIN 다이오드 모델을 기반으로 PIN 다이오드의 전류에 따라 측정된 S파라미터를 이용하여 추출된 각 모델의 파라미터를 표 1에 정리하였다.

위의 모델과 추출된 파라미터를 활용하여 본 논문에서 제작된 등화기 회로 설계에 활용하였다.

2. 등화기 회로 설계 및 시뮬레이션

그림 5는 본 연구에서 설계한 가변 선형 이득 등화기의 회로도를 간단히 보여주고 있다. 본 논문에서는 가변 선형 이득 등화기 구현을 위해 T형 구조를 제안하였다. 기울기 가변을 위해 Z_2 에 앞서 설명한 PIN 다이오드를 사용하였다. 그리고 PIN 다이오드가 삽입되는 패턴의 영향으로 발생하는 기생 커패시턴스와 인더턴스를 고려하기 위해 그림 6과 같이 전송선로 모델을 이용하여 PIN 다이오드를 모델링 한다.

앞서 모델링된 PIN 다이오드를 이용하여 등화기를 구현 시 전류 $110\mu\text{A}$ 일 때 주파수에 따른 삽입손실의 기울기를 -10dB 로 설정한다. 이 때 PIN 다이오드는 18GHz 에서 약 -2dB 삽입손실을 갖고 있어서 이상적인 구현을 위해 가상의 0dB 기준 주파수를 20GHz 로 설정 한다. 그리고 기울기 -10dB 를 만족하기 위해, 6GHz 에서는 -12dB 로 삽입손실을 설정 한다. T형 구조는 가상의 기준주파수 20GHz 에서 2개의 Z_2 가 직렬LC공진을 일으키고 Z_1 은 병렬의 $\lambda/4$ 단락 전송선로가 되도록 설계하였다. 공진 점에서의 Q값을 고려해 인더터 값을 커패시터 값보다 크게 하여 기울기 -8dB 로 설정하였다.^[4] 병렬로 연결된 $\lambda/4$ 단락 전송선로와 저항의 Q값을 이용하여 기울기 -10dB 로 설정한다. 그림 7은 동작 주파수인 $6\sim18\text{GHz}$ 에서 설계하고자 하는 삽입손실

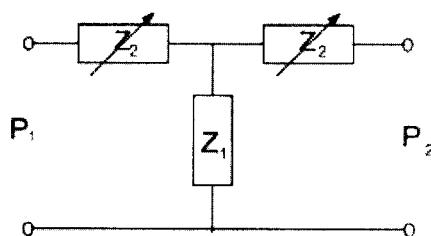


그림 5. 제안한 T형 가변 선형 이득 등화기 회로
Fig. 5. Proposed T-type adjustable linear gain equalizer circuit

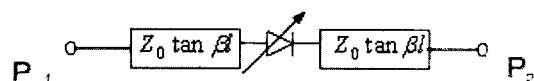


그림 6. 전송선로를 고려한 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit with transmission line

의 이상적인 특성을 보여준다.

이는 다음과 같이 이론적으로 설명을 할 수가 있다. 위 그림에서 보여준 T형 등가 회로를 다음과 같이 임피던스 행렬로 나타낼 수 있다.^[5]

$$[z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_1 \\ Z_1 & Z_1 + Z_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)의 임피던스 행렬을 [S] 행렬로 바꿀 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{(Z_1 + Z_2)^2 - 1 - Z^2}{(Z_1 + Z_2 + 1)^2 - Z^2} & \frac{Z_1(Z_1 + Z_2 + 1) - Z_1(Z_1 + Z_2 - 1)}{(Z_1 + Z_2 + 1)^2 - Z^2} \\ \frac{Z_1(Z_1 + Z_2 + 1) - Z_1(Z_1 + Z_2 - 1)}{(Z_1 + Z_2 + 1)^2 - Z^2} & \frac{(Z_1 + Z_2)^2 - 1 - Z^2}{(Z_1 + Z_2 + 1)^2 - Z^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

앞에서 알 수 있듯이 S_{21} 은 다음과 같다.

$$S_{21} = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_2 + 1)^2 - Z^2} \quad (3)$$

$$Z_1 = R_1 + jZ_{01}\tan\omega_L(\frac{\pi}{2\omega_u}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{R_{s1}}{1 + j\omega R_{s1}C_{s1}} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_s \\ &\quad + jZ_0\tan\beta_1 l_1 + jZ_0\tan\beta_2 l_2 \end{aligned} \quad (5)$$

S_{21} 에 각 주파수마다 원하는 삽입손실 값을 넣고, 20GHz 에서 공진할 수 있는 L, C값을 결정하면 전류 $110\mu\text{A}$ 에 해당하는 모델링된 소자 값을 적용하여 삽입 손실의 기울기가 -10dB 가 되도록 설계한다. 이렇게 하면 변수가 R_1, Z_{01} 두 개가 되며, 두 개의 연립방정식을 세워 풀면 각 변수에 대한 값을 구할 수 있다. 아래 표 2는 연립방정식을 풀어 얻어진 각 회로설계 파라미터 값과 PIN 다이오드의 모델링을 통해 얻어진 값을 정리 한 것이다.

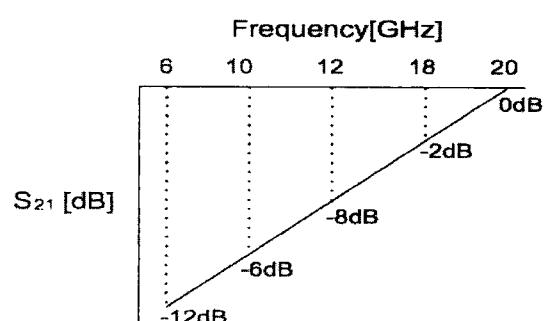


그림 7. 이상적인 기울기 특성
Fig. 7. Slope ideal characteristics.

표 2. T형 등가회로의 소자 값

Table 2. Element values of T-type equivalent circuit.

R_1	161.4[Ω]
R_{s1}	55.00[Ω]
Z_{01}	30.40[Ω]
L	0.2[nH]
C	0.3[pF]

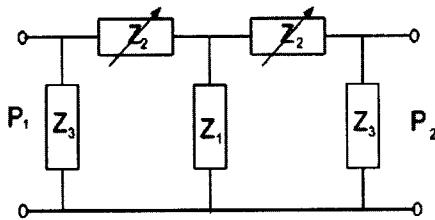


그림 8. 매칭 회로를 삽입한 T형 등화기

Fig. 8. T-type equalizer circuit with matching circuit.

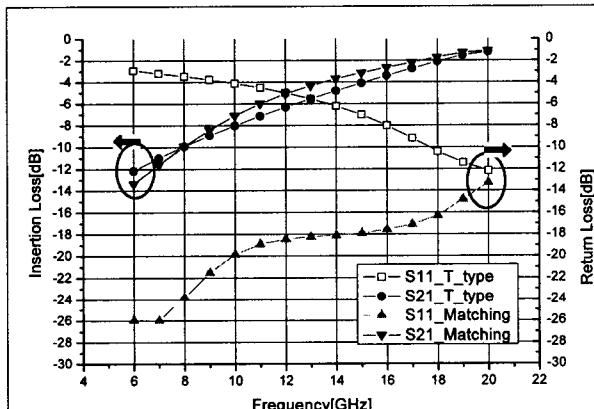


그림 9. 매칭회로를 삽입한 T형 등화기의 S파라미터

Fig. 9. S-parameter of the T-type equalizer circuit with matching circuit.

그림 5와 같은 기본 T형 구조에 PIN 다이오드의 모델과 위에서 얻어진 설계 파라미터 값을 넣어 최종 설계된 등화기의 삽입손실은 20GHz에서 -0.675dB , 19GHz에서 -1.475dB , 18GHz에서 -2.469dB , 6GHz에서는 -12.668dB 로 이상적인 경우와 거의 일치한다. 하지만 대역 내에서 반사손실이 나빠지는 문제가 발생한다. 반사손실을 개선하기 위한 방법으로 그림8에서 보는 바와 같이 T형 구조의 양단에 저항과 $\lambda/4$ 전송선로의 직렬연결의 매칭회로를 삽입하였다.

설계된 등화기의 최적화를 위해 상용 툴을 이용 하였다. 그림 10은 가변 선형 이득 등화기의 구성도이다. PIN 다이오드의 전류인가는 R_{n1}, R_{p2} 를 통해 흐르며

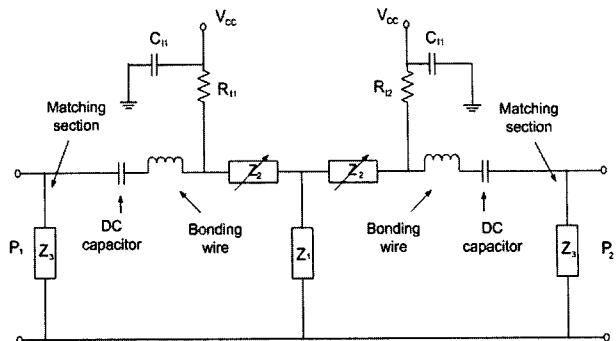


그림 10. 가변 형 선형 이득 등화기 구성도

Fig. 10. The diagram of adjustable linear gain equalizer.

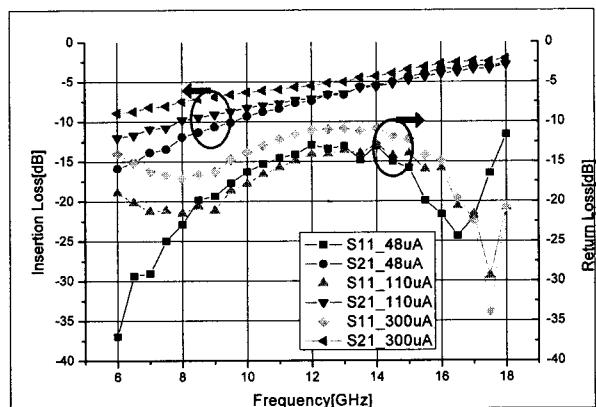


그림 11. 전류에 따른 S파라미터 변화

Fig. 11. The variation of S-parameter in current changes.

표 3. 전류에 따른 파라미터 변화

Table 3. The variation of the parameter in current changes.

전류	반사손실	삽입손실(18GHz)	기울기
$48\mu\text{A}$	$< -10\text{dB}$	-2.6dB	-13dB
$110\mu\text{A}$	$< -10\text{dB}$	-2.8dB	-10dB
$300\mu\text{A}$	$< -10\text{dB}$	-2.0dB	-7dB

RF 신호로 유입되는 DC를 막기 위해 와이어 본딩을 이용하여 커패시터를 삽입하였다. 마이크로파 대역을 감안하여 와이어 본딩 부분을 인덕터 성분으로 대체하여 나타내었다.

순 방향 전류 $48\mu\text{A}$ 일 때 Q값의 증가로 기울기 증가하여 -13dB , 순 방향 전류 $300\mu\text{A}$ 일 때 Q값의 감소하여 -7dB 를 나타낸다.

III. 가변 선형 이득 등화기의 제작 및 측정

그림 12는 American technical ceramics社에 Thin film 공정을 이용하여 두께 0.254mm인 Alumina기판을 사용하여 제작한 가변 선형 이득 등화기이다.

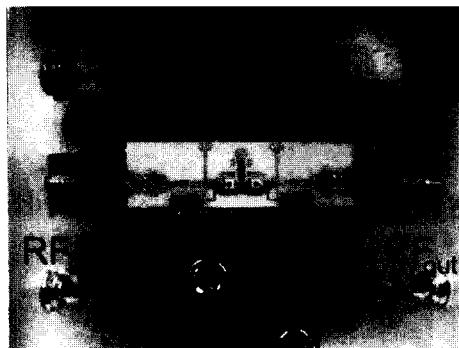


그림 12. 제작된 가변 형 선형 이득 등화기
Fig. 12. Fabricated adjustable linear gain equalizer.

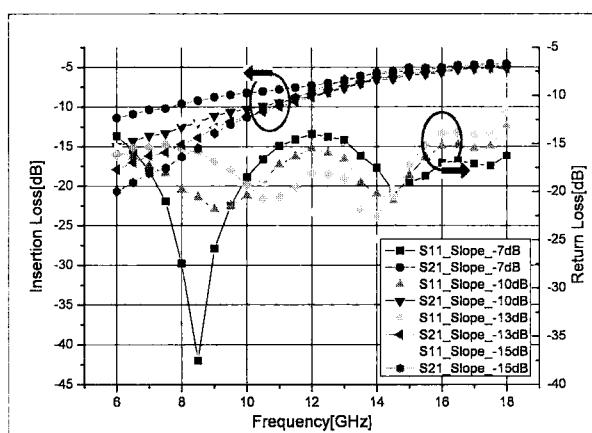


그림 13. 제작된 등화기 전류에 따른 S-파라미터
Fig. 13. S-parameter of fabricated equalizer in current changes.

표 4. 전류에 따른 파라미터 변화
Table 4. The variation of the parameter in current changes.

전류	반사손실	삽입손실(18GHz)	기울기
66μA	< -10dB	-4.9dB	-15dB
100μA	< -10dB	-5.2dB	-13dB
192μA	< -10dB	-5.1dB	-10dB
439μA	< -10dB	-4.5dB	-7dB
678μA	< -10dB	-4.0dB	-6dB

설계된 등화기에 비해 18GHz에 삽입손실이 약 -1.5dB~-2dB 증가한 것은 Connector의 삽입손실로 사료된다. 전류에 따른 변화를 보면 가변 범위가 -6dB~-15dB까지로 넓어진 것을 볼 수 있다.

전류의 가변에 따라 측정된 등화기의 파라미터를 보면 표 4와 같다.

IV. 결 론

본 논문에서는 PIN 다이오드를 사용하여 6GHz에서

18GHz에서 동작하는 기울기 가변 선형 이득 등화기를 설계, 제작하였다. 사용된 PIN 다이오드는 정확도를 높이기 위해 실제 측정을 통한 모델 파라미터를 추출하여 사용하였고 선형성이 ±1dB가 되었으며, 기존 기술에 비해 가변범위가 ±4dB로 개선되었다. 또한 전기적 기울기 가변에 따른 작은 부피와 빠른 스위칭 속도를 갖는 장점을 갖고 있다. 삽입손실은 18GHz에서 약 -4dB ~ -5dB를 얻었으며, 반사손실은 -10dB이하로 측정되었다. 본 과제에서 개발된 가변 선형이득 등화기는 헬기용 레이다 경보 수신기와 같은 광대역 시스템에 사용될 경우 소자들의 손실에 대한 보정을 할 수 있는 장점이 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Sankara Narayana, "Gain Equalizer Flattens Attenuation Over 6-18 GHz", *Microwave & Wirelss*, pp.74~78, December 1998.
- [2] V. Vassilev, I. Angelov and V. Belitsky, "Design and Performance of a 3.4 to 4.6 GHz Active Equalizer with Controlled Gain-Slope", *Microwave & Wirelss*, pp.30~34, December 1999.
- [3] Bahl Bhartia, *Microwave Solid State Circuit Design*, John Wiley & Sons, pp.409~416, pp.60 1~609, 1988.
- [4] K. Jeganathan, "Design of a Simple Tunable /Switchable Bandpass Filter", *Microwave & Wirelss*, pp.32~40, March 2000.
- [5] David M. Pozar, *Microwave engineering*, John Wiley & Sons, pp.196~263 1998.

저자소개



김 정 연(정회원)
2007년 경기대학교 전자공학과
학사 졸업.
2007년~현재 알에프코어(주)
연구소 연구원
<주관심분야 : MIC, MMIC,
Microwave module >



공 동 융(정회원)
1995년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업.
2000년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업.
2000년~2004년 텔레포스(주)
제품개발부.
2004년~현재 알에프코어(주) 연구소 차장
<주관심분야 : MIC, MMIC, Microwave Module,
Radar용 Solid State TRM>



박 동 철(정회원)
1974년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업
1976년 한국과학기술원 전기전자
석사 졸업
1984년 Univ. of California, Santa
Barbara 박사졸업
1977년~1978년 Ruhr University, Bo-chum,
Germany 방문교수
1994년~1998년 IEEE MTT Korea Chapter
Chairman
1998년~2001년 IEEE EMC Korea Chapter
Chairman
2000년~2001년 한국전자과학회 회장
2005년~2007년 대덕 Wireless 포럼 회장
1976년~현재 충남대학교 전파공학과 교수
<주관심분야 : Microwave and millimeter wave
passive components, Antennas, EMI/EMC>



이 동 호(정회원)
1997년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업
1999년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업
2006년 경북대학교 전자공학과
박사 졸업
2006년 12월 ~ 현재 국방과학연구소 선임연구원
<주관심분야 : MIC, MMIC, Microwave Module,
Radar용 Solid State TRM>



전 계 익(정회원)
1991년 한국과학기술원 전기전자
학사 졸업
1993년 한국과학기술원 전기전자
석사 졸업.
1997년 한국과학기술원 전기전자
박사 졸업
1997년~2000년 LG종합기술원 선임연구원
2000년~현재 알에프코어(주) 대표이사
<주관심분야 : MIC, MMIC, Microwave Module,
Radar용 Solid State TRM>