CRLH 전송 선로를 이용한 공진 기법의 전력 결합 기술

A Resonance Power Combining Technique Using CRLH-Transmission Line

김일규 · 김 영 · 권상근 · 윤영철*

Ell-Kou Kim · Young Kim · Sang-Keun Kwon · Young-Chul Yoon*

요 약

본 논문에서는 CRLH 전송 선로를 이용한 공진 기법의 전력 결합 기술을 제안하였다. 사용된 공진 기법의 회로는 증폭기의 정합과 전력 결합 역할을 하는 병렬 캐패시턴스 그리고 증폭기들의 전력 결합을 위한 전송 선로로 구성되어 있고, 여기에 사용된 전송 선로는 CRLH(Composite Right/Left-Handed) 전송 선로로 구현함으로써 회로의 크기를 감소시켰다. 이 기술의 유용성을 확인하기 위해서 제안한 전력 결합 기술을 이용한 2단 증폭기를 구현 및 측정한 결과, 단일 증폭기와 이득은 동일하고, 출력 전력은 2.2 dB 증가하였으며, 기존의 RH 전송 선로를 이용한 전력 결합 증폭기보다 면적이 78.3 % 감소하였다.

Abstract

This paper proposes a resonance power-combining technique using CRLH-transmission line. The circuits using proposed technique consist of the parallel capacitances and transmission lines to satisfy matching conditions and to combine power of amplifiers. The CRLH(Composite Right/Left-Handed) transmission lines are used to reduce the circuit size. As a result, the power combining amplifier using proposed techniques is measured that a gain is equal and the output power is increased about 2.2 dB higher than the single amplifier. Also, a size of amplifier is 78.3 % smaller than the conventional amplifier using RH transmission line.

Key words : Power Combining, Power Amplifier, CRLH-TL Metamaterials

I. 서 론

현대 무선 이동 통신 시스템에서 중요한 지표가 되는 전력 증폭기는 출력 전력과 선형성, 효율 등의 특성을 개선하기 위한 연구가 거듭되고 있으며, GaAs와 GaN FET 등 소자의 물성적인 특성이 개선됨에 따라 고주파수와 고출력 조건을 만족하게 되어가고 있다. 고출력 전력 증폭기의 경우, 물성적인 성질로는 높은 전력을 얻는 것이 한계가 있으므로 회로의 구성을 통하여 전력 결합하는 여러 방법들이 연구되어 왔다.

일반적으로 90°의 전기적 길이를 가지는 윌킨슨 전력분배기/결합기와 3 dB 하이브리드 결합기, 링 하이브리드 등을 이용하여 증폭기의 전력 결합을 하지만, 이러한 방법은 증폭기의 정합 회로와 전력 결합단이 개별적으로 존재하여 회로의 면적이 커지는 단점이 있다[1]~[5].

1998년에 A. Mortazawi에 의하여 제안된 확장된 공진 기법의 전력 결합 증폭기는 전송 선로와 서셉턴스에 의하여 정합과 전력 결합을 동시에 수행하여 전체 회로의 크기가 줄어드는 장점을 가지고 있다.

회로 구조는 분산형 증폭기(distributed amplifier)와

금오공과대학교 전파통신과(Radio Communication Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
*관동대학교 전자정보통신공학부(Electronics and Information Communication Engineering, Kwandong University)
· 논 문 번 호 : 20090529-01S
· 수정완료일자 : 2009년 8월 25일

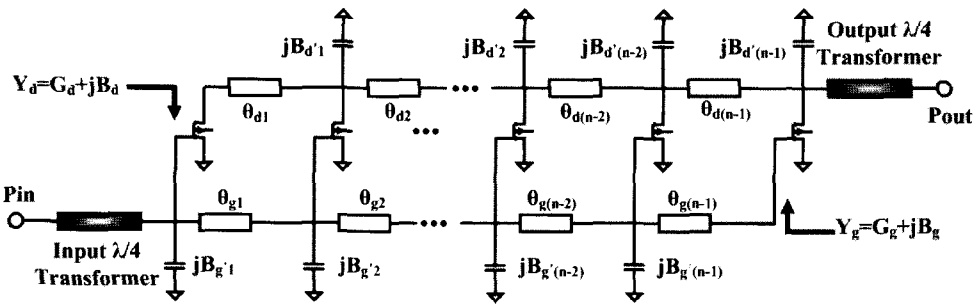


그림 1. 공진 기법을 이용한 N개의 전력 결합 증폭기
Fig. 1. N-way power-combining amplifier using resonance techniques.

유사한 진행파(traveling-wave) 구조의 분산형 증폭기와 비교하여, 공진 기법을 이용한 전력 결합 방법은 각 증폭기에 동일한 전압 크기에 의하여 전력이 결합된다. 또한, 공진 기법의 전력 결합 증폭기의 전체 이득은 단일 증폭기의 이득과 동일하다[6]~[8].

본 논문에서는 공진 기법의 전력 결합 기술에 사용되는 RH(Right-Handed) 전송 선로는 증폭기의 정합과 전력 결합에 이용되는데, 이것을 CRLH(Composite Right/Left-Handed) 전송 선로로 대체하여 같은 전기적 특성을 얻음과 동시에 전체 회로의 크기를 소형화하는 것을 제안하였다. 2장에서는 공진 기법의 전력 결합 기술과 CRLH 전송 선로 이론 및 구현 방법에 대해서 서술하였고, 3장에서는 제안한 방법의 시뮬레이션과 실험 결과를 나타내었다.

Ⅱ. 소형화된 공진 기법의 전력 결합 기술

2-1 공진 기법의 전력 결합 기술

그림 1에서 보는 바와 같이 공진 기법을 이용한 N개의 전력 결합 증폭기는 N개의 증폭기와 각 증폭기와 병렬로 연결된 서셉턴스, 각 증폭기 사이의 RH 전송 선로 그리고 전력 결합 증폭기의 입·출력단에 정합을 위한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기로 구성되어 있다.

이것의 해석을 간단하게 하기 위하여 두 개의 증폭기를 공진 기법을 이용하여 전력 결합하는 것을 그림 2에 나타내었다.

그림 2(a)에서 첫 번째 증폭기의 입력 어드미턴스 G_g+jB_g와 병렬 서셉턴스 $jB_{g'1}$에 의하여 증폭기 입력에서 바라 본 어드미턴스는 G_g+jB가 되고, 두 번째 증폭기 입력에서 첫 번째 입력을 바라 본 어드미턴스가 G_g-jB가 되도록 전송 선로를 삽입한다. 여기서 서로 공액 관계의 어드미턴스는 그림 2(b)와 같이 전송 선로 길이 θ에 의하여 정합되고, 두 번째 증폭기 입력에서 증폭기들을 바라 본 어드미턴스는 $2G$가 되도록 병렬 서셉턴스 $jB_{g'2}$를 연결한다. 이렇게 구한 어드미턴스 2G와 입력을 정합시키기 위해서 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 사용하여 입력과 정합된다. 이 때, 두 번째 증폭기 입력에서 바라 본 어드미턴스는 식 (1)과 같이 표현할 수 있고, 공액 정합을 위한 전송 선로의 전기적 길이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

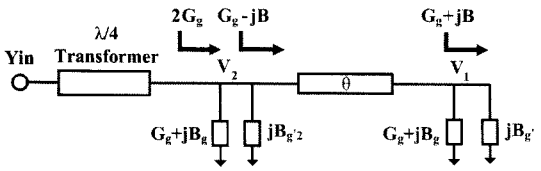
같은 방법으로 N개의 증폭기를 결합하는 방법은 위와 동일하며, 여기에서 사용되는 전송 선로의 전기적 길이는 식 (3)과 같이 표현할 수 있고, 홀수 번째의 서셉턴스는 $B_g+B_{g'N}-B_{g'(N-1)}+B_{g'(N-2)}-\cdots$으로, 짝수 번째의 서셉턴스는 $B_{g'N}-B_{g'(N-1)}+B_{g'(N-2)}-\cdots$로 계산된다.

$$G-jB=\frac{G+j(B+\tan\theta)}{1+B\tan\theta+jG\sin\theta} \tag{1}$$

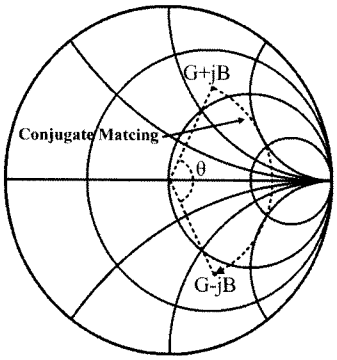
$$\tan\theta=\frac{-2B}{1-G^2-B^2} \tag{2}$$

$$\tan\theta_N=\frac{-2B_N}{1-(NG)^2-B_N^2} \tag{3}$$

그림 3은 식 (2)를 이용하여 정규화된 G와 B에 따른 전송 선로의 전기적 길이 특성을 나타내고 있으며, 정규화된 B값에 따라 전송 선로의 전기적 길이를 선택할 수 있음을 보여준다.



(a) 입력 정합 회로
(a) Input matching circuit



(b) 스미스 도표 도식화
(b) Smith chart representation

그림 2. 공진 기법에 의한 전력 결합 증폭기의 입력 회로 동작
Fig. 2. Input circuit operations of a resonance power-combining amplifier.

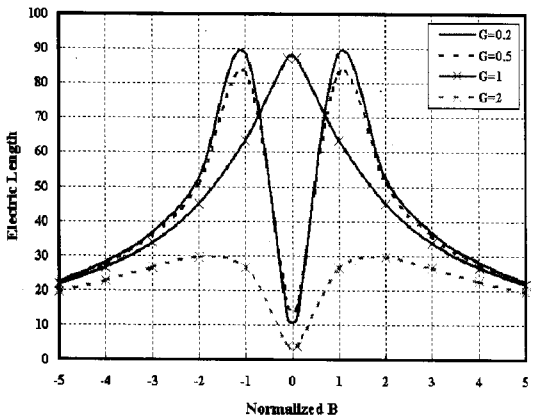


그림 3. 정규화된 G와 B에 따른 전송 선로의 전기적 길이 특성
Fig. 3. Characteristics of transmission line electrical length according to normalized G, B.

2-2 CRLH 전송 선로

일반적인 RH(Right-Handed) 전송 선로는 군속도와 위상 속도의 방향이 동일한 반면, LH(Left-Handed)

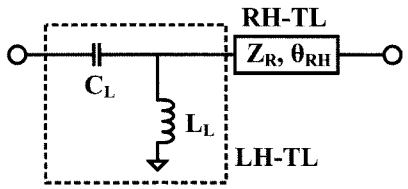


그림 4. CRLH 전송 선로의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of CRLH transmission line.

전송 선로는 군속도와 위상 속도의 방향이 반대인 음의 굴절률을 가지고 있다. 이러한 전기적 특성을 갖고 있는 순수한 LH 전송 선로의 구현은 파라스틱 성분에 의해서 구현이 불가능하여, 그림 4와 같이 RH 전송 선로가 포함된 CRLH 전송 선로의 형태로 구현된다. 이렇게 구현할 수 있는 LH 전송 선로의 파라미터와 RH 전송 선로의 임피던스 및 전기적 길이는 식 (4)~(7)에서와 같이 계산할 수 있다[9].

$$\theta_{RH} = -\arctan\left[\frac{2\pi f_o\left(\frac{L_R}{Z_{oR}} + C_R Z_{oR}\right)}{2-(2\pi f_o)^2 L_R C_R}\right] < 0 \quad (4)$$

$$\theta_{LH} = -\arctan\left[\frac{2\pi f_o\left(\frac{L_L}{Z_{oL}} + C_L Z_{oL}\right)}{1-2(2\pi f_o)^2 L_L C_L}\right] > 0 \quad (5)$$

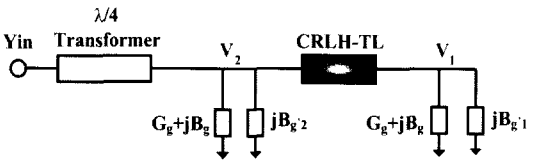
$$Z_{oR} = \sqrt{L_R / C_R} \quad (6)$$

$$Z_{oL} = \sqrt{L_L / C_L} \quad (7)$$

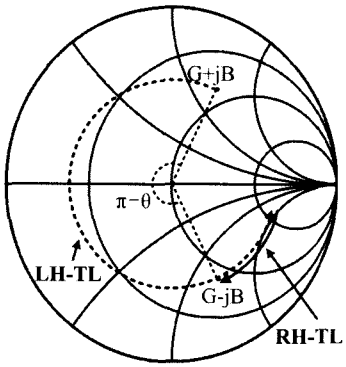
그림 4의 CRLH 전송 선로는 공진기법에 의한 전력 결합에 사용되는 RH 전송 선로를 대체하여 증폭기 정합과 전력 결합에 사용할 수 있으며, 이것은 그림 5(a)와 같이 나타낼 수 있다. 또, 그림 5(b)는 반사계수가 일정한 원 위에서 LH와 RH 전송 선로의 전기적 길이의 합에 의하여 두 개의 증폭기 입력 임피던스를 공액 정합시킬 수 있음을 나타내었다. 여기서 LH 전송 선로의 전기적 길이는 공액 정합을 위한 $(\pi-\theta)$의 전기적 길이와 RH 전송 선로의 전기적 길이를 보상하는 전기적 길이의 합으로 계산된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 실험결과

제안한 전력 결합 기술을 이용하여 증폭기의 전력 결합을 입증하기 위하여 애지런트사의 ADS S/W를 이용하여 시뮬레이션 하였다.



(a) 입력 정합 회로
(a) Input matching circuit



(b) 스미스 도표 도식화
(b) Smith chart representation

그림 5. CRLH 전송 선로를 사용한 전력 결합 증폭기의 입력 회로 동작
Fig. 5. Input circuit operations of a resonance power-combining using CRLH-TL.

증폭 소자는 애질런트 사의 ATF54143이고, 중심 주파수 1 GHz에서 19.6 dB의 이득과 20.4 dBm의 P_{1dB} 압축점 특성을 가진 것을 사용하였다. 유전율 2.5, 두께 31 mil의 테프론 기판을 이용하여 그림 6과 같이 2단 전력 결합 증폭기를 설계하였으며, 시뮬레이션 결과는 그림 7, 그림 8과 같은 특성을 얻었다.

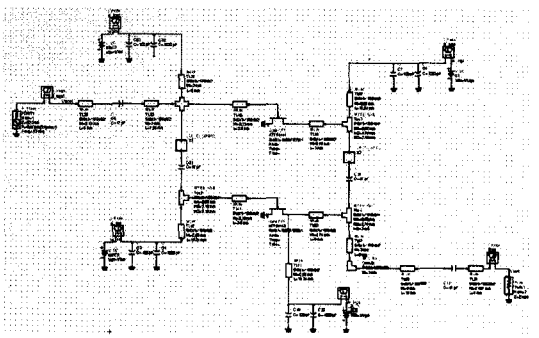


그림 6. 제안한 전력 결합 증폭기의 ADS 회로도
Fig. 6. ADS schematic of the proposed power combining amplifier.

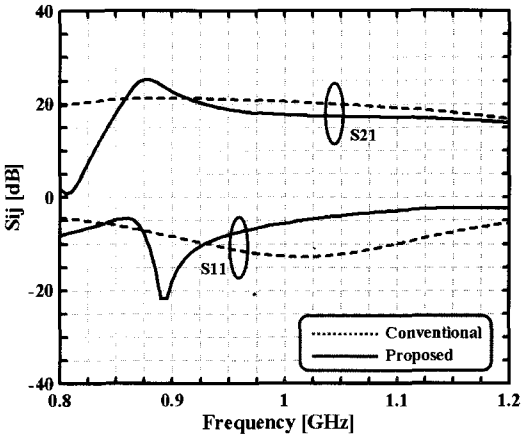


그림 7. 제안한 전력 결합 증폭기의 *S*-파라미터 특성 (ADS 시뮬레이션)
Fig. 7. *S*-parameter characteristics of the proposed power combining amplifier(ADS simulation).

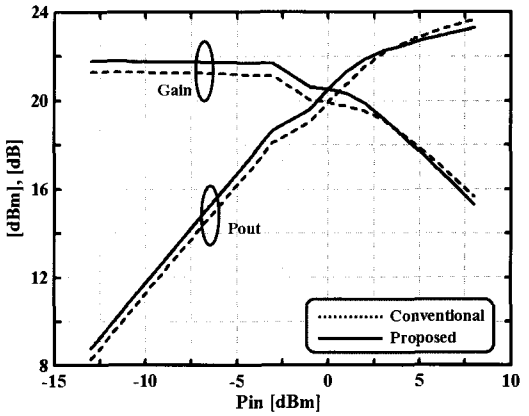


그림 8. 반송파 1-톤 신호 인가 시, 제안한 전력 결합 증폭기의 이득과 출력 전력 특성(ADS 시뮬레이션)
Fig. 8. Characteristics of the proposed power combining amplifier gain and output power P_{out} in case of CW one tone signal(ADS simulation).

그림 7은 ADS S/W를 이용하여 제안한 2 단 전력 결합 증폭기의 *S*-파라미터 특성을 보여주고 있다. 1 GHz로 설계한 중심 주파수가 890 MHz로 110 MHz 아래로 이동하였고, 이 때, −21.75 dB의 S_{11}과 21.3 dB의 S_{21} 특성으로 기존의 2단 공진 전력 결합 증폭기와 거의 동일한 것을 확인하였다.

그림 8은 ADS 툴을 이용하여 제안한 2단 전력 결합 증폭기의 이득과 출력 전력 특성을 보여주고 있

다. 반송파 1-톤 신호 인가 시, 기존의 RH 전송 선로를 이용한 전력 결합 증폭기와 동일한 20.2 dB의 이득과 22.8 dBm의 1 dB 압축점을 얻었다. 또한, ATF-54143의 단일 증폭기보다 0.6 dB 높은 이득을 가지고, 1 dB 압축점은 2.4 dB 더 높아짐으로 인하여 단일 증폭기와 동일 이득과 두 배의 전력으로 결합되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 사용된 CRLH 전송 선로는 입력 정합과 전력 결합을 위한 역할을 하므로 기존 전력 증폭기와 동일한 이득과 출력 전력을 얻었다.

그림 9에서는 제작한 2단 전력 결합 증폭기를 나타내었는데, 제안된 증폭기는 입력측 CRLH 전송 선로는 그림 4의 구조에서 C_L=3 pF, L_L=8.2 nH, L=3mm 그리고 Zo=50 오옴인 단위 셀을 5개 사용하였고, 출력측 CRLH 전송 선로는 C_L=4.7 pF, L_L=8.2 nH, L= 3 mm 그리고 Zo=50 오옴인 단위 셀을 4개 사용하여 구현하였다. 기존의 확장된 공진 기법과 제안한 전력 결합 증폭기의 전체 회로 크기를 비교하였을 때, 제안한 전력 결합 증폭기가 78.3 % 더 작은 것을 확인하였다. 또, 그림 10과 그림 11은 그림 9와 같이 제작된 증폭기의 측정 결과를 나타내었다.

그림 10은 회로망 분석기를 통한 S-파라미터 특성을 보여주고 있고, 그림 11은 반송파 1-톤 신호 인가 시, 이득과 출력 전력 특성을 보여주고 있다. 제안한 전력 결합 증폭기는 20.4 dB의 이득과 22.6 dBm의 1 dB 압축점 특성으로 기존의 RH 전송 선로를 이용한 전력 결합 증폭기와 동일한 특성을 얻었으며, 단일 증폭기와 비교하여 거의 동일한 이득과 2.2 dB 더 높은 1 dB 압축점을 가지는 것을 확인하였다.

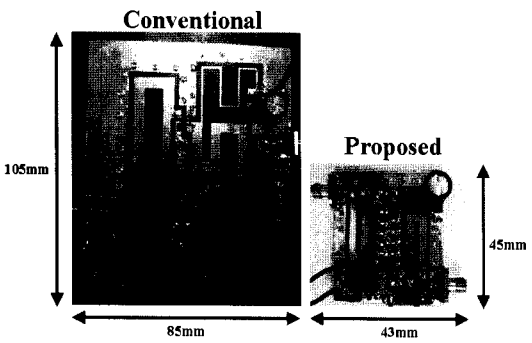


그림 9. 제작된 2-way 전력 결합 증폭기
Fig. 9. Fabricated 2-way power-combining amplifier.

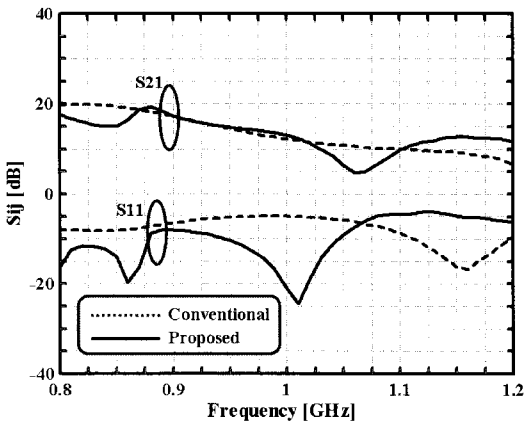


그림 10. 전력 결합 증폭기 S-파라미터 특성(측정값)
Fig. 10. S-parameter characteristics of the power combining amplifier(measured data).

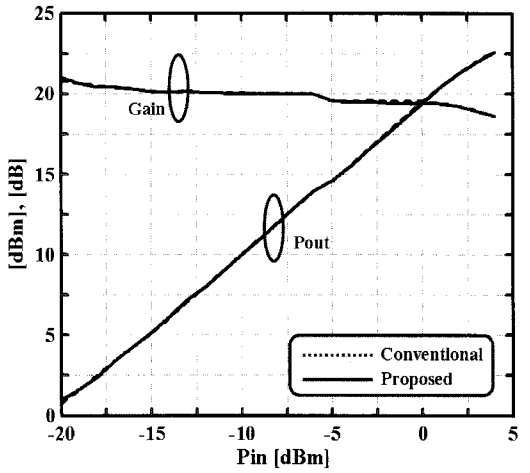


그림 11. 반송파 1-톤 신호 인가 시, 제작된 전력 결합 증폭기의 이득과 출력 전력 특성
Fig. 11. Gain and P_{out} characteristics of the implemented power-combining amplifier in case of CW 1-tone input signal.

표 1에서 측정된 전력 결합 증폭기의 특성을 정리하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 공진 기법을 이용한 전력 결합 증폭기를 구현하는데 사용된 RH 전송 선로를 대신해서 CRLH 전송 선로를 사용하여 전체 회로의 크기는 소형화시키고, 출력 특성은 기존의 전력 결합 증폭기

표 1. RH 전송 선로를 이용한 전력 결합 증폭기와 제안한 전력 결합 증폭기의 특성 비교

Table 1. Comparison of the power-combining amplifier using RH-TL and the proposed power-combining amplifier.

항목	기존의 증폭기	제안한 증폭기
S_{11}	−16.7 dB	−24.6 dB
S_{21}	19.9 dB	19.4 dB
최대 이득	20.4 dB	20.4 dB
1 dB 압축점	22.7 dBm	22.6 dBm

와 동일한 특성을 가지는 방법을 제안하였다. 중심 주파수 1 GHz에서 19.6 dB의 이득과 20.4 dBm의 출력 전력 특성을 가지는 소자를 이용하여 제작 및 측정 결과, 단일 소자와 동일한 이득과 2.2 dB 증가한 출력 전력 특성을 확인하였다. 기존의 전력 결합 증폭기의 특성과 동일하고, 전체 회로 크기는 기존 대비 78.3 % 축소하여 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] K. J. Russell, "Microwave power combining techniques", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, vol. MTT-27, pp. 472-478, May 1979.

[2] A. G. Bert, D. Kaminsky, "The travelling wave power divider/combiner", *IEEE MTT-Symposium Digest*, pp. 487-489, May 1980.

[3] M. Faulkner, P. Chye, and R. Hansen, "V-band PHEMT power amplifier using an N-way chain combiner", *IEEE MTT-Symposium Digest*, pp. 265-268, May 1994.

[4] H. Oh-Hashi, H. Yukawa, and M. Miyazaki, "A compact Ku-band power combining network using rectangular coaxial line technology", *IEEE MTT-Symposium Digest*, vol. 2, pp. 409-412, Jun. 1997.

[5] S. Morimoto, M. Maeda, T. Yokoyama, H. Ishida, M. Nakamura, Y. I. Ota, and D. Ueda, "A compact, high efficiency, 120 watts GaAs power amplifier module for the 3rd generation cellular base stations", *IEEE MTT-Symposium Digest*, vol. 1, pp. 325-328, Jun. 1999.

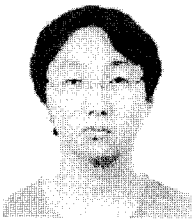
[6] A. L. Martin, A. Mortazawi, and B. C. Deloach, "An eight-device extended-resonance power-combining amplifier", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, issue 6, pp. 844-850, Jun. 1998.

[7] Thomas T. Y. Wong, *Fundamentals of Distributed Amplification*, Norwood, MA, New York, 1993.

[8] Bal S. Virdee, Avtar S. Virdee, and Ben Y. Banyamin, *Broadband Microwave Amplifier*, Norwood, MA, New York, 2004.

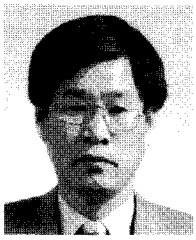
[9] C. Caloz, T. Itoh, *Fundamentals Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application*, Norwood, MA, New York, 2005.

김 일 규



2005년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 박사과정
[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

권 상 근

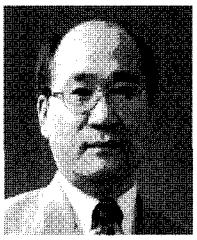


1987년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1993년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1990년 9월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수
[주 관심분야] 영상통신, 디지털 통신 시스템, 신호 처리

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 부교수
[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로해석 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 회로설계