

고효율 주파수 가변 역 E-급 증폭기

High Efficiency Frequency Tunable Inverse Class-E Amplifier

김 영*

Young Kim*

요 약

본 논문에서는 역 E-급 증폭기 출력 회로의 병렬 공진기를 주파수에 대해 가변되도록 회로를 구성하여 넓은 주파수 범위에서 높은 전력부가효율과 출력전력을 유지하는 방법을 제안하였다. 여기서 사용된 병렬 공진기는 동작 주파수에 따라서 Q 값은 동일하고, 가변 특성을 얻기 위해서 바랙터 다이오드를 사용하여 인덕터와 캐패시터를 만들었으며, 전류 영점 교차를 위한 인덕턴스 성분은 집중소자로 또, 위상 보상을 위한 캐패시턴스는 분포소자로 구현하였다. 역 E-급 증폭기의 주파수 가변 특성을 통해서 효율과 출력 전력을 확인한 실험 결과는 65-120MHz의 주파수 범위에서 증폭기는 최대 75%의 전력부가효율과 25dBm의 출력전력을 얻었다.

Abstract

This paper proposes that an inverse class-E amplifier is used a tunable parallel resonator at output port in order to maintain a high power-added efficiency(PAE) and output power with wide frequency ranges. A tunable circuit has a constant Q factor at operating frequency ranges and because of using varactor diode, the inductor and capacitor values of resonator can be changed. Also, the inductance value for zero-current switching (ZCS) is implemented a lumped element and the capacitance value is made a distributed element for phase compensation. The inverse class E amplifier using tunable parallel resonator is obtained to deliver 25dBm output power and achieve maximum power added efficiency(PAE) of 75% at 65-120MHz frequency ranges.

Key Words : Inverse Class-E Amplifier, Zero Current Switching, High Efficiency, Tunable Amplifier

I. 서 론

무선이동통신 시스템의 송신부에서 전력 증폭기의 선형성과 효율은 전체 시스템의 성능과 부피 및 가격에 영향을 좌우할 정도로 중요하다. 전력 증폭기의 효율 면에서 볼 때, 최근에는 입력전력에 따라 전력 증

폭기의 바이어스를 최적화하는 EER (Envelope Elimination and Restoration), ET(Envelope Tracking) 및 하이브리드 ET 방법 등의 연구들이 진행되고 있다. 이러한 효율 개선 방법에 사용되는 주 증폭기는 일반적으로 고 효율의 D-, E-, F-급 증폭기들이 있다. 여기서 D-급 증폭기는 능동소자와 그에 따른 바이어스 단

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

· 제1저자 (First Author) : 김 영

· 투고일자 : 2010년 1월 5일

· 심사(수정)일자 : 2010년 1월 5일 (수정일자 : 2010년 2월 18일)

· 게재일자 : 2010년 4월 30일

의 추가로 부피가 커지고, F-급 증폭기는 조정할 고조파의 수가 늘어날수록 효율이 높아지는 반면, 회로가 더 복잡해진다[1]-[7].

간단한 회로 구성을 갖고 있는 E-급 증폭기의 최근 동향은 메타물질(Metamaterials)과 결합하여 이중 대역 특성을 갖는 E-급 증폭기가 연구되었고[8], 일반적인 전압 영점 교차(Zero-Voltage Switching: ZVS) 이론에서 전류 영점 교차(Zero-Current Switching: ZCS) 구조의 역 E-급 증폭기도 연구되고 있다[9]. 또한, 도허티 증폭기의 주 증폭기와 보조 증폭기를 E-급으로 사용하여 전체 효율을 높이고, 전압 영점 교차와 전류 영점 교차를 동시에 고려한 증폭기도 이론적 해석이 제시되었다[10],[11].

본 논문에서는 전류의 영점 교차를 관점으로 한 역 E-급 증폭기에서 출력 측의 가변 병렬 공진기를 조정하여 일정 주파수 범위에서 높은 전력부가효율과 출력전력을 갖는 주파수 가변 역 E-급 증폭기를 제안하였다.

먼저, 2장에서 역 E-급 증폭기의 동작원리와 가변 병렬 공진기 설계방법에 대해서 설명하고, 3장에서 시뮬레이션과 제작 및 측정결과를 확인하였다.

II. 가변 역 E-급 증폭기

2-1 가변 역 E-급 증폭기 동작원리[9]

Vincent F. Fusco에 의해 제안된 역 E-급 증폭기는 기존의 전압 영점 교차를 기준으로 하는 E-급 증폭기와는 달리 전류 영점 교차를 기준으로 하여, 그에 따라 출력정합 단은 E-급 증폭기와는 다르게 그림 1 과 같이 직렬 인덕턴스의 전류 유도에 의해 전류와 전압이 교차하는 방식이다.

역 E-급 증폭기 회로 구성은 능동소자와 연결된 인덕턴스 다음 단계 고조파를 제거하기 위하여 병렬 공진기가 존재하고, 전류와 전압의 위상차 보상을 위한 병렬 캐패시턴스가 공진기 다음에 배치된다.

여기에 사용된 능동소자는 인덕턴스의 전류 유도에 의하여 온-오프 동작 특성을 가지고 있다. 먼저, 능동소자가 온 상태일 때는 능동소자의 내부 저항 값이

0이 되어 능동소자의 전압강하는 0이 되고, 능동소자에 흐르는 전류 값만을 가지며, 직렬 인덕턴스의 전압은 스윙된다. 또한, 오프 상태일 때는 능동소자의 내부 저항이 무한대가 되어 능동소자의 전압

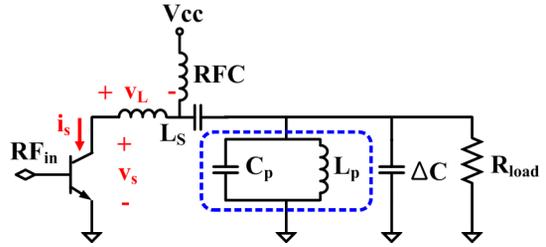
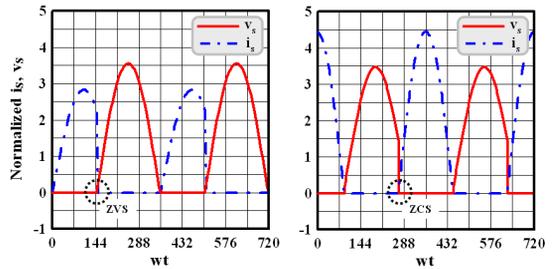


그림 1. 역 E-급 증폭기 블록도
Fig. 1. Inverse class-E amplifier block-diagram.



(a) E-급 (a) Class-E
(b) 역 E-급 (b) Inverse Class-E
그림 2. 스위칭 전압과 전류 파형

Fig.2. Waveforms of switching voltage and current

값만이 존재하여, 능동 소자에 흐르는 전류는 차단되고, 직렬 인덕턴스에 전류가 흘러 전압 강하가 없게 된다.

그림 2는 E-급 과 역 E-급 증폭기의 스위칭 전압, 전류 파형을 나타낸 것으로, E-급 증폭기는 전압 영점 교차로 동작하고, 역 E-급 증폭기는 전류 영점 교차로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

이 때, 스위칭 전류의 주기율이 50%이고, 이상적으로 100%의 효율을 가정하면, 그림 1 에 나타나 있는 역 E-급 증폭기 소자들은 다음의 식 (1)-(5)와 같이 나타 낼 수 있다[6].

$$R = \frac{\pi^2 + 4}{8} \frac{V_{DC}^2}{P_o} \quad (1)$$

$$L_s = \frac{V_{DC}^2}{2\pi^2 f_o P_o} \quad (2)$$

$$\Delta C = \frac{\pi^2 - 4}{4(\pi^2 + 4)} \frac{P_o}{f_o V_{DC}^2} \quad (3)$$

$$L_p = \frac{R}{2\pi f_o Q} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{Q}{2\pi f_o R} \quad (5)$$

여기서, VDC는 컬렉터 혹은 드레인 전압, fo는 중심 주파수, Po는 원하는 출력전력, 그리고 Q는 병렬 공진기의 품질 계수 (Quality Factor)를 나타낸다.

본 논문에서 주파수 변화에 따라 식 (4), (5)의 품질 계수 Q가 일정한 가변 역 E-급 증폭기를 그림 3과 같이 제안하였다.

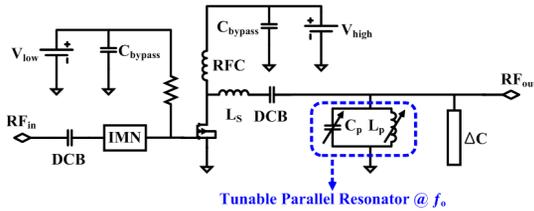


그림 3. 가변 역 E-급 증폭기 회로도
Fig. 3. Tunable inverse class-E amplifier schematic.

그림 3에서 병렬 공진기의 Cp와 Lp는 주파수에 따라 대역 통과 특성을 갖도록 가변 회로로 구성하였다. 이때 바이어스 전압은 0.9V로 설정했으며, 인덕턴스 Ls는 150nH 그리고, 전압과 전류의 위상을 보정해주는 ΔC는 7.1pF으로 주파수에 따라 일정한 캐패시턴스를 갖는 등가 분포 소자이다.

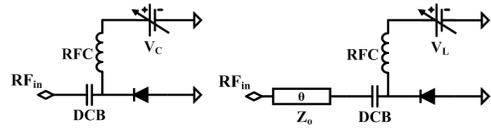
2-2 가변 병렬 공진기 설계

그림 3에서 병렬 공진기의 회로에 사용되는 가변 캐패시터와 가변 인덕터 회로는 그림 4와 같이 구현하였다.

공진기 내의 가변 캐패시터 회로는 그림 4 (a)와 같

이 바랙터 다이오드의 역 전압에 따른 등가 캐패시턴스로 구성되고, 가변 인덕터 회로는 그림 4 (b)와 같이 λ/4 전송선로가 바랙터 다이오드와 직렬 연결되어 다이오드의 역 전압에 따라 등가 인덕턴스로 동작하도록 구성하였다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다,

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{1/j\omega C} = j\omega C Z_0^2 \quad (6)$$



(a) 가변 캐패시터 회로 (b) 가변 인덕터 회로
(a) Variable capacitor circuit (b) Variable inductor circuit.

그림 4. 가변 캐패시터와 인덕터 회로
Fig. 4. Variable capacitor and inductor circuit.

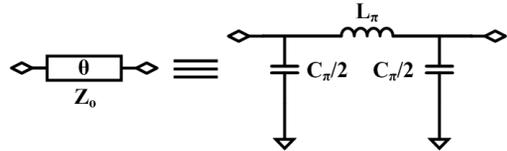


그림 5. 전송선로의 π-형 등가 회로
Fig. 5. π-type equivalent circuit of transmission line.

그림 5는 가변 인덕터 회로에서 사용된 λ/4 전송선로는 주파수가 낮을수록 물리적 길이가 길어지게 되는 것을 보완하기 위하여 π-형 집중소자의 등가회로 설계하였다[12].

III. 시뮬레이션 및 실험결과

3-1 설계 및 시뮬레이션

가변 병렬 공진기 사용한 바랙터 다이오드는 소니사의 1T362로 선택하였고, 중심 주파수 75MHz에서 가변 캐패시턴스와 가변 인덕턴스의 특성을 엔질런트사의 ADS2005 S/W를 사용하여 시뮬레이션하였으며, 그 결과는 그림 6에 나타내었다.

여기에서는 다이오드 역 전압에 따른 가변 인덕터

와 캐패시터 회로의 임피던스 값을 스미스 차트에 나타내었으며, 다이오드의 역 전압에 따른 각 회로의 동작 범위를 보면 등가 캐패시턴스는 2.5 - 27 pF이고, 등가 인덕턴스는 180 - 680 nH됨을 알 수 있다.

역 E-급 증폭기에 사용한 능동소자는 NEC사의 NE85634이고, 10V의 바이어스 전압을 사용하였다.

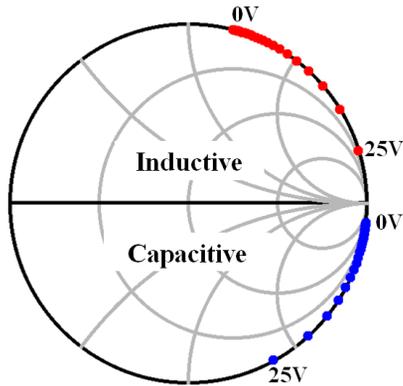


그림 6. 75MHz에서 다이오드 역 전압에 따른 가변 인덕터와 캐패시터 회로의 임피던스 값 변화 (ADS 시뮬레이션)

Fig. 6. Impedance values of variable inductor and capacitor circuit by diode reverse voltage variation at 75MHz (ADS simulation).

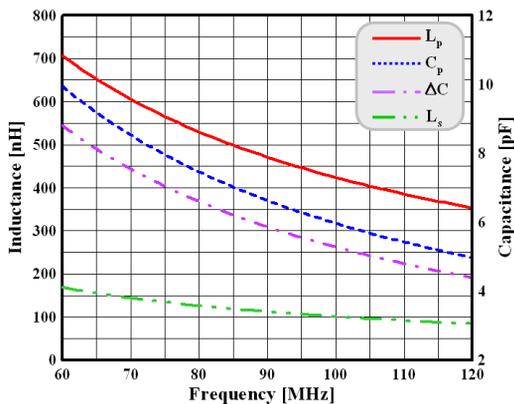


그림 7. Q=1.3일 때의 주파수에 따른 역 E-급 증폭기의 소자 특성

Fig. 7. Characteristics of element values in an inverse class-E amplifier with frequency variation in case of Q=1.3.

식 (4), (5)에서 품질 계수에 따라서 구현할 수 있는 소자가 제한이 되기 때문에 구현이 가능한 적절한 품

질 계수를 선택하는 것이 필요하다. 가변 소자의 조건과 품질 계수가 Q=1.3일 때, 그림 7은 주파수 변화에 따라 역 E-급 증폭기의 소자 값의 변화를 보여주고 있다. 이 데이터는 65-120 MHz 주파수 범위에서 병렬 공진기를 구성하는 가변 인덕터와 가변 캐패시터 값이 그림 6의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

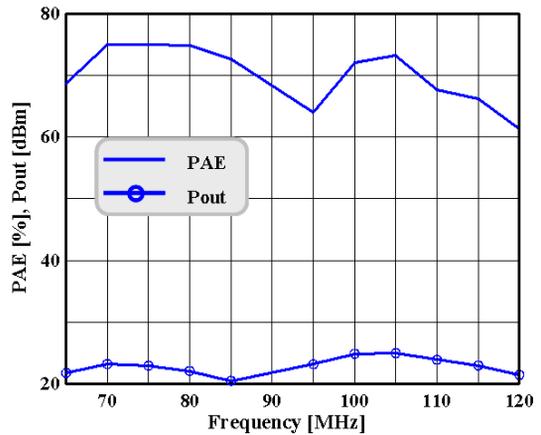


그림 8. 가변 역 E-급 증폭기의 출력전력과 전력부가효율 특성 (ADS 시뮬레이션)

Fig. 8. Characteristics of Pout and PAE (Power Added Efficiency) of tunable inverse class-E amplifier (ADS simulation).

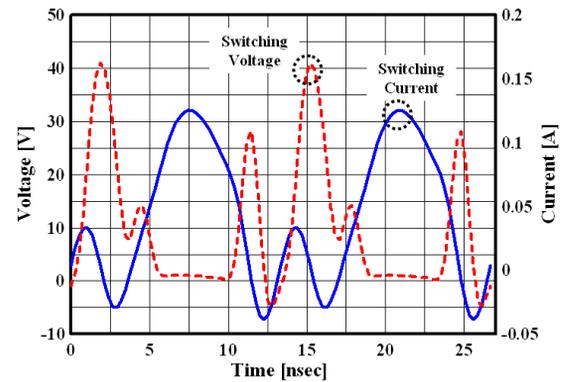


그림 9. 가변 역 E-급 증폭기의 스위칭 전압, 전류파형 (ADS 시뮬레이션)

Fig. 9. Waveforms of switching voltage and current of a tunable inverse class-E amplifier.

그림 8은 가변 병렬 공진기가 포함된 가변 역 E-급 증폭기를 시뮬레이션 한 결과로 출력 효율과 전력을 나타낸 것이다. 주파수가 변함에 따라 가변 역 E-급

증폭기의 전력부가효율과 출력전력은 비교적 평탄함을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 그림 9는 75MHz 주파수에서 출력전력이 23dBm일 때의 스위칭 전압, 전류 파형을 나타내었다.

3-2 제작 및 측정결과

앞 절의 시뮬레이션을 기준으로 가변 캐패시터 회로를 구성하고 있는 바랙터 다이오드를 전압에 따라서 측정된 데이터는 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 보는 것과 같이 측정된 캐패시턴스가 시뮬레이션된 것과 거의 동일하게 변화함을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션의 임피던스는 손실이 없는 스미스 차트의 바깥 원을 따라 변화하지만, 측정된 임피던스는 다이오드 내부의 저항 성분 때문에 스미스 차트 내부의 임의의 레지스턴스 값을 가지고 변화하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 품질 계수 $Q=1.3$ 으로 일정한 가변 병렬 공진기의 공진 특성을 보여주고 있다. 부가적인 공진 회로 없이 1단 병렬 공진기로 구성할 경우, 주파수 범위가 65-120MHz가 최대인 것을 알 수 있다. 또한, 65MHz 이하 그리고 115MHz 이상으로 가면 공진 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 결국 이것은 사용할 수 있는 주파수 범위를 제한함을 알 수 있다.

또, 그림 12는 전체 제작된 가변 역 E-급 증폭기의 사진을 나타내었다. 이 테프론 기판은 Taconic 사의 3.55의 유전율과 0.815mm의 두께를 가진 기판을 사용하였다. 이 증폭기는 가변회로 추가로 인하여 기존 회로의 크기보다 증가하였다.

제작된 가변 역 E-급 증폭기를 중심 주파수 75MHz에서 측정된 결과는 그림 13에 나타내었다. 여기서 높은 출력 전력에서 시뮬레이션 결과보다 측정된 전력부가효율이 낮은 것은 바랙터 다이오드 내부의 레지스턴스 성분으로 인한 전력 손실이 높은 전력에서 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

그림 14에서는 65-120MHz 범위에서 가변 역 E-급 증폭기의 측정된 특성을 보여주고 있다. 측정된 가변 역 E-급 증폭기에서 20.5 ~ 26.5 dBm 출력과 42 ~ 75%의 전력부가효율을 얻었다. 85MHz에서 최대 전력부가효율과 출력전력은 75%와 25dBm이다.

주파수가 110MHz 이상에서 급격하게 효율이 감소

하는 것은 그 주파수에서 공진기의 특성이 열화됨으로 인하여 효율이 나빠지는 것으로 판단된다.

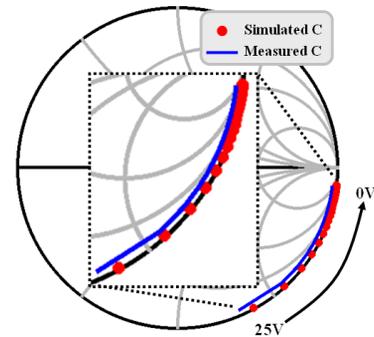


그림 10. 75MHz에서 1T362의 역 전압에 따른 임피던스값의 시뮬레이션과 실험 결과 특성
Fig. 10. Characteristics of simulated and measured impedance values of 1T362 by reverse bias voltage at 75MHz.

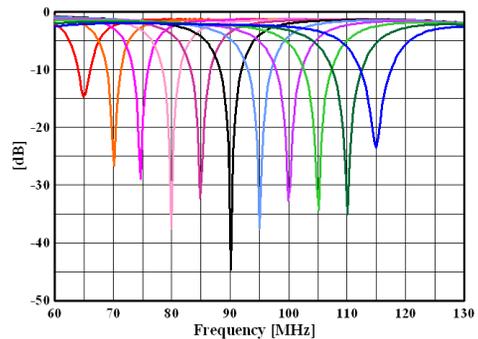


그림 11. 가변 병렬 공진기의 측정된 공진 특성
Fig. 11. Measured resonance characteristics of tunable parallel resonator.

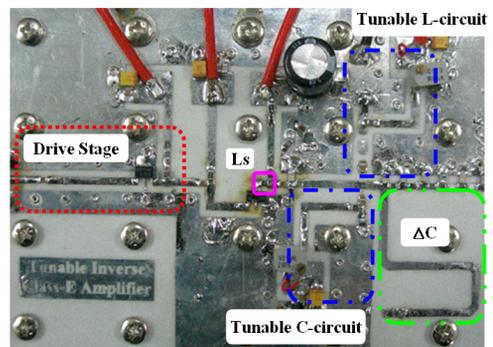


그림 12. 제작된 가변 역 E-급 증폭기
Fig.12. Fabricated tunable inverse Class-E amplifier.

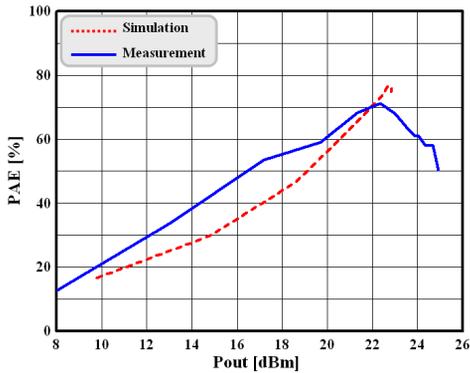


그림 13. 75MHz에서의 제안한 증폭기의 출력전력 대비 전력부가효율 특성

Fig. 13. Characteristics of Pout versus PAE of the proposed amplifier in case of 75MHz.

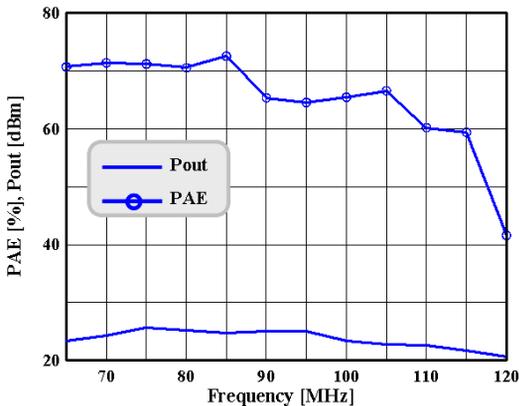


그림 14. 측정된 가변 역 E-급 증폭기의 출력전력과 전력부가효율

Fig. 14. Measured data of Pout and PAE of tunable inverse class-E amplifier.

IV. 결 론

본 논문에서는 역 E-급 증폭기의 병렬 공진기를 가변함으로써, 주파수에 따라 높은 전력부가효율과 출력전력을 유지하는 방법을 제시하였다. 제작 및 측정 결과, 65-120MHz 범위 내에서 최대 75%, 최소 40%의 전력부가효율과 25dBm의 출력전력 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 회로의 경우, 병렬 공진기의 품질 계수가 주파수에 따라 동일한 특성을 갖고 있음을 장점으로 E-급 증폭기를 설계할 수 있다.

본 논문에서 예시로 제작한 E-급 증폭기의 1단 병렬 공진기에 추가적인 공진기를 추가할 경우, 주파수 동작 범위는 늘어날 수 있다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해서 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] Kahn, L.R., "Single Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration," *Proc. IRE*, vol.40, pp.803-806, July 1952.
- [2] Junghwan Moon, Jangheon Kim, Ildu Kim, Jungjoon Kim, and Bumman Kim, "A Wideband Envelope Tracking Doherty Amplifier for WiMAX Systems," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.18, no.1, pp.49-51, January 2008.
- [3] Ildu Kim, Young Yun Woo, Jangheon Kim, Junghwan Moon, Jungjoon Kim, and Bumman Kim, "High-efficiency hybrid EER transmitter using optimized power amplifier," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.56, no.11, pp.2582- 2593, November 2008.
- [4] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Norwood, MA, New York, 1999.
- [5] El-Hamamsy, S., "Design of High-Efficiency RF Class D Power Amplifier", *IEEE Trans. Power Elect.*, vol.9, no.3, May 1994.
- [6] Sokal, N.O., and A.D.Sokal, "Class E-A New Class of High Efficiency Tuned Single-Ended Power Amplifiers", *IEEE J. Solid State Circuits*, SC-10, no.3, pp.168-176, June 1975.
- [7] F. H. Raab, "Class-F Power Amplifiers with Maximally Flat Waveforms," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.45, no.11, pp.2007-2012, November 1997.
- [8] Seung Hun Ji, Choon Sik Cho, Jae W. Lee, Jaeheung Kim, "Concurrent Dual-Band Class-E Power

Amplifier Using Composite Right/ Left-Handed Transmission Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.55, no.6, pp.1341-1347, June 2007.

- [9] Thian Mury, Vincent F. Fusco, "Inverse Class-E Amplifier with Transmission-Line Harmonic Suppression," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol.54, no.7, pp.1555-1561, July 2007.
- [10] Yong-Sub Lee, Mun-Woo Lee, Yoon-Ha Jeong, "High-Efficiency Class-E-Cells-Based GaN HEMT Doherty Amplifier for WCDMA Applications," *Proceedings of the 38th European Microwave Conference*, pp.428-431, October 2008.
- [11] Elisa Cipriani, Paolo Colantonio, Franco Giannini, Rocco Giofrè, "Optimization of Class E Power Amplifier Design above Theoretical Maximum Frequency," *Proceedings of the 38th European Microwave Conference*, pp.1541-1544, October 2008.
- [12] H. Choi, Y. Jeong, J.S. Kenney, C. D. Kim, "Design of a microwave group delay time adjuster and it's application to a feedforward power amplifier," *Microwave Journal*, vol.51, no.2, pp. 88-100, February 2008.

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