

임피던스 튜너를 이용한 베이스 전압 변화형 포락선 추적 증폭기의 이득 개선회로의 설계

Design of Improved Gain Circuit for Dynamic Base Voltage Envelope Tracking Amplifier Using Impedance Tuners

Byeoung-ku Jung¹⁾, In-ho Kang¹⁾

I. 서론

최근 이동통신, 위성통신 등 무선통신을 이용한 개인 통신기기의 수요는 점차 확대되면서, 무선 통신 서비스의 품질도 소형화, 다양화, 광대역화, 고품질화가 요구되고 있다. 이렇게 발전하는 무선통신 서비스에서 가장 큰 문제가 되고 있는 것은 배터리 수명이 짧다는 것이다. 또한 소형화되는 단말기에 비하여 배터리의 크기와 용량은 제한되어 있다. 현재 단말기내에서 고출력 증폭기(Power Amplifier Module, PAM)는 단말기의 전체 직류전력의 60%에서 70%까지 소모하는 것으로 알려져 있다 특히 CDMA신호를 이용할 경우 효율을 높이기 위해 낮은 점에서 동작시키게 되면 spectral regrowth로 인하여 ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) 특성이 급격하게 악화되고, 2차 효과로써 modulation accuracy 까지 떨어지는 경향이 있다. 일반적으로 IMT-2000은 W-CDMA와 CDMA2000 모두 CDMA 기술을 사용하기 때문에 증폭기회로가 ACPR특성과 효율을 만족하기 위하여 동작점을 AB급에 동작하도록 되어 있다. 한편, 단말기에서 출력되는 RF신호는 기지국에 도착하였을 때 항상 일정한 신호로 도착하도록 단말기에서 자동적으로 출력이 조절되고 있다. 또한, 단말기와 기지국사이의 변화하는 거리, 세도우 페이딩 등으로 인하여 단말기에서 출력되는 출력 레벨은 0dBm 전후이고, 최대출력이 출력될 확률은 1%전후인 것으로 보고되었다. 최근 이러한 출력 레벨의 확률분포 함수는 계속 발표되어져 왔다[1],[2].

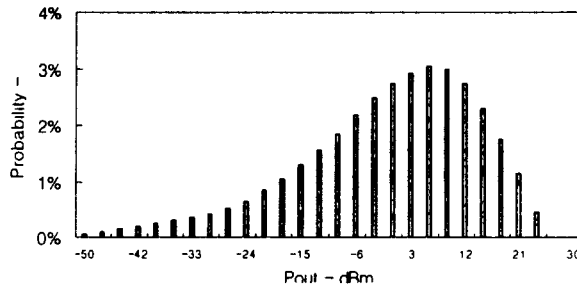


그림 1. IS-95B CDMA 역방향 링크에서 전력 증폭기의 확률 분포함수

Fig 1. Probability distribution function of RF amplifier output power for reverse link IS-95B CDMA

현재 사용되고 있는 전력 증폭기는 낮은 전력이 출력될 확률이 높지만 실제로는 동작점이 높은 바이어스 전압에 의해 고정되어 있으므로 효율의 손실이 심하다. Hanington[3]은 이러한 낮은 전력 크기로 출력될 때 바이어스 전압을 낮게 조절하는 포락선 추적 증폭기(Envelope tracking amplifier)를 제안함으로써 낮은 전력레벨에서의 효율을 높여 배터리의 사용 시간의 연장을 시도하였다. IMT-2000과

¹⁾Dept. of Radio Sciences & Eng. Korea Maritime University

같은 제 3세대 이동 통신 단말기의 고출력 증폭기에 있어서 CDMA2000과 W-CDMA 두 방식 모두 CDMA 방식을 사용하여 AB급으로 동작됨으로 이러한 포락선 추적 증폭기는 향후 효율을 획기적으로 높인다는 점에서 매우 관심을 끌 것으로 생각된다. 그러나 이러한 포락선 추적 증폭기가 동적인 바이어스로 인하여 RF 전력 신호의 크기에 따라 증폭기의 입력과 출력 임피던스가 변화하게 된다. 이러한 임피던스의 변화는 포락선 추적 증폭기의 이득 및 효율을 떨어뜨리고 VSWR을 악화시켜 안정성을 악화시켜 전력증폭기의 파손이나 손상이 빈번하게 발생하게 된다. 본 논문은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 MEMS 스위치형 가변 임피던스를 이용하는 방법을 제시하였으며, DC-DC 변환기를 사용하지 않고, 베이스 전압을 RF 신호 레벨에 따라 변화시켜 전력증폭기의 효율을 개선한 베이스 전압 변화형 포락선 추적 증폭기를 사용하여 증폭기의 효율개선을 실험적으로 증명하게 될 것이다.

II. 포락선 추적 증폭기

Hanington에 의해 제안된 포락선 추적 증폭기의 구조는 그림 2 와 같다.

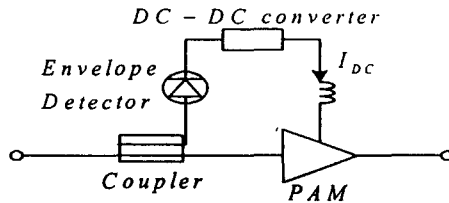


그림 2. 포락선 추적 증폭기

Fig 2. The envelope tracking Amplifier.

RF 입력 신호가 인가되면 커플러에 의해서 포락선 검파기(Envelope Detector)와 전력증폭기로 각각 신호가 들어간다. 포락선 검파기로 들어온 RF신호는 직류로 바뀌게 된다. 이 직류 신호는 크기가 작기 때문에 직접 전력증폭기를 구동시킬 수 없다. 그래서 다음 단인 DC-DC converter[4]에서 전력증폭기를 구동시킬 수 있는 동적 바이어스로 변환시키게 된다. 즉 전력 크기에 따라 적합한 바이어스 동작점을 DC-DC converter를 이용해서 조정한다. 그러나 증폭기의 정합 지점을 낮은 전력 크기에서 잡는다면 높은 전력 크기에 대해서 부정합이 발생한다. 이러한 높은 전력에서의 부정합으로 인하여 높은 전력 신호에서의 효율이 저하되고 이득이 감소한다. 또한 기존의 포락선 추적기에서 DC-DC 변환기를 이용할 경우 DC-DC 변환기가 PWM(pulse width modulation)을 이용하기 때문에 이것으로 인하여 많은 특징이 발생하게 된다. 즉 RF전력이 크게 출력되면 DC-DC 변환기의 내부 TR의 과포화 상태를 일으켜 펄스파가 되도록 하여 DC-DC 변환효율(conversion efficiency)은 이론적으로 100%가 되도록 한다. 그러나 통화빈도가 가장 많은 RF 신호 전력인 낮은 출력이 출력될 때는 내부 TR이 포화 상태로 변환되지 않아 펄스파의 형태를 잃어버리게 되어, 변환효율이 급격히 떨어지는 경향이 있다[5] 또한, 출력된 DC신호와 함께 강한 변조 주파수의 신호도 같이 출력되기 때문에 출력단에 저역통과 여파기가 필요하게 된다. 이 경우 저역통과 여파기의 크기가 너무 큰 문제점을 가지고 있고, 여파기를 통과한 DC신호라고 하더라도 DC-DC 변환기 출력 DC 신호가 너무 크기 때문에 미약한 변조 주파수는 여전히 존재하여 전력증폭기의 ACPR특성을 악화시키게 된다. 게다가 DC-DC변환기 자체의 가격이 비싸며, 전력증폭기와 같은 반도체 공정을 거쳐야 하므로 집적 문제가 심각하다고 할 수 있다. 이런 이유로 그림 4의 개선된 회로를 제안 할 수 있다.

III. 베이스 전압 변화형 포락선 추적 증폭기

그림 3에 의하면 RF 전력 크기가 낮을 때는 A점에서 동작하게 하고 RF 전력이 높을 때는 C점에서

농축하게 한다. 이 때의 A와 C점은 효율성과 선형성의 타협에 의해서 결정된다.

그림 4의 회로는 기존의 정진폭 추적증폭기와 달리 DC-DC 변환기를 사용하지 않고 베이스쪽에 Voltage Controller를 달았다.

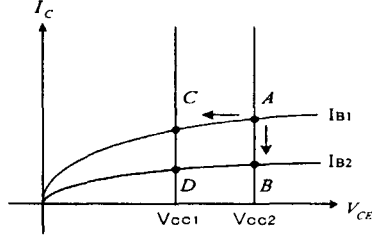


그림 3. 증폭기의 RF전력에 따른 동작점 변화
 FIG 3. The DC bias variation of envelope tracking Amplifier.

그림 7과 같이 변화하는 RF신호에 대하여 그 신호와 비례하는 DC 전압을 추출하기 위하여 방향성 결합기와 포락선 검출기를 사용하여 전력레벨에 따라 그 값에 비례하는 직류전압을 도출한다. 이 직류 전압은 전압 조절기에 의하여 베이스 전압으로 인가되어 변화하는 RF 전력신호에 대하여 이와 비례하는 DC전압을 공급하여 베이스 전류를 변화 시켜 소모전력을 줄이려는 방법이다. 이 경우 베이스 전압의 변화범위가 현재 상용으로 쓰는 제품의 경우(conexant사의 PA는 CDMA방식인 경우 국내 시장 점유율이 가장 높음) 2.7V에서 3.0V까지 변화하게 된다. 즉 RF 신호전력이 낮은 경우 2.7V에서 베이스 전압이 동작되도록 하고, RF 신호 전력이 높으면 3.0V에서 동작이 되도록 사용하면 RF전력 변화에 따른 동작점의 변화를 그림 3과 같이 A에서 C로 유도하여 낮은 전력이 출력될 때 불필요한 전력 소모를 막을 수 있다.

그러나, 이 경우에도 RF 신호 전력의 변화로 인한 TR의 임피던스의 변화[6]를 보정 해야 하는데 본 논문은 그림 4와 같이 MEMS 스위치의 형태[7]로 하여 동작점의 변화에 따라 임피던스가 두가지로 변화하여 입력쪽인 경우 Z_1 과 Z_2 출력쪽인 경우 Z_1' 와 Z_2' 로 변화하도록 하여 임피던스를 보정하도록 하였다.

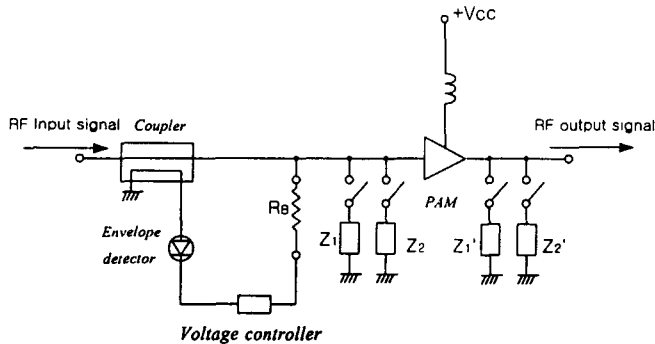


그림 4. MEMS 가변 캐패시턴스를 이용한 베이스 변화용 포락선 추적 증폭기

Fig 4. The dynamic base bias envelope tracking amplifier using MEMS switches.

MEMS 스위칭 소자가 반도체 소자보다 우수한 점은 다음과 같다

1 반도체 소자는 100mW이상의 전력이 인가되면 IMD특성이 급격하게 떨어져 CDMA신호인 경우 spectral regrowth문제가 발생하여 ACPR특성을 악화시키는 것으로 알려졌다 그러나, MEMS소자는 passive소자이므로 비선형특성이 나타나지 않은 것으로 보고된다[8]

- 2 크기도 MEMS는 수백 $\mu\text{m} \times$ 수백 $\mu\text{m} \times$ 수 μm 로써 극단적으로 작은 것으로 알려져 있다[9]
- 3 varactor diode와 같은 반도체 소자는 mesa공정방식을 취하고 있기 때문에 제작비용이 비싸고, 많은 처리 공정이 요구된다[10].
- 4 varactor diode와 같은 반도체 소자는 가변 캐패시턴스로 이용되었을 때 가변 캐패시턴스의 범위는 지극히 제한되어져 있으며, 주파수가 높을수록 변화폭이 급격하게 떨어져 제4세대 이동통신 주파수로 가면 변화폭은 거의 없는 것으로 알려져 있다. 반면 MEMS 가변 캐패시턴스는 30-40GHz 까지 상당한 폭으로 변화되는 것으로 보고되어 있다
5. 반도체 소자의 Q값은 10전후이지만, MEMS 가변 캐패시턴스의 Q값은 100전후로 월등하게 우수한 것으로 보고되어 있다. 이것은 소자 자체가 전력을 거의 소모하지 않는 것을 의미한다.

IV. 측정 결과

본 논문에서 사용된 전력증폭기는 Conexant사의 RM 912를 사용하였다. 그림. 5는 RM 912구조이다. RM 912는 내부 매칭이된 package 소자로서 소신호와 대신호에 대해서는 그림. 7에서도 보여지듯이 약 26dB 정도의 일정한 이득을 가지는 특성을 보이므로 튜너를 이용해서 최적의 임피던스를 찾는 방법을 사용하였다.

최적의 임피던스를 찾게되면 손실이 적게 발생하므로 적은 양의 전력으로도 많은 이득을 얻을 수 있다. 그러므로 최적의 임피던스를 찾으므로 해서 이득 및 효율이 개선되는 것을 볼 수 있다.

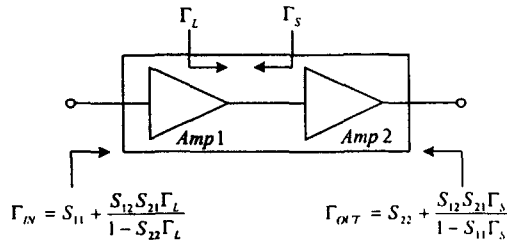


그림 5. RM912의 구조
Fig 5. The structure of RM912.

RM 912의 구조는 2개의 증폭기로 구성된 RFIC회로이다. RFIC의 중간단은 가변 캐패시터를 삽입할 수 없다. 따라서 전력증폭기의 입력과 출력에 바랙터 다이오드를 이용한 정합회로를 연결한다. 이는 전력증폭기의 중간단 부분의 부정합이 입력과 출력 부분에 그대로 반영이 되기 때문에 가능하다고 사료된다. [13]

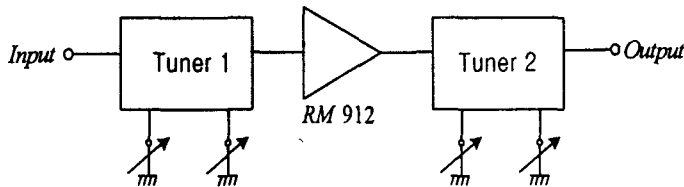


그림 6. 임피던스 측정 회로도
Fig 6. The optimal impedance measurement diagram with variable bias points of RM912.

전력 증폭기의 입력과 출력 이득을 측정하기 위하여 그림 6와 같이 회로를 구성하였다 먼저 낮은 RF신호가 인가될 때 최고의 이득이 나오도록 임피던스에 각각 Tuner 1,2를 인가하여 신세 이득이

가장 높도록 최적의 임피던스를 찾는다. 또한 높은 신호에 대해서 이득이 최대가 되도록 Tuner 1,2 를 조절한다. 이처럼 Tuner를 사용하는 이유는 그림 4의 회로와 같은 MEMS 스위치 가변 캐패시턴스의 효과를 나타낸다고 볼 수 있다.

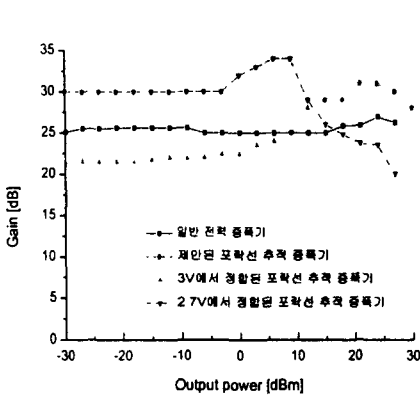


그림 7. 출력 전력에 대한 이득 특성
Fig 7. The gain according to the output power level of power amplifier.

그림 7은 출력전력에 따른 이득 변화를 나타낸다. 보정회로를 사용하지 않은 포락선 추적 증폭기에서 전력이 낮은 부분에서 정합이 된 회로는 전력이 높게 되면, 이득이 10dB이상 감소된다. 반대로 높은 전력에서 정합이 되도록 하였을 때, 낮은 전력이 출력될 때 이득이 8-9dB 감소하는 것을 확인하였다.

이 때, 임피던스 보정을 한 경우 전력이 낮은 전력 부분에서는 8dB의 개선효과가 있었고, 높은 전력 부분에서는 8dB의 개선효과가 있는 것을 확인하였다. 전반적으로 기존의 동작점이 고정된 RM912 보다도 이득 특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 8은 RF신호 전력에 따른 효율을 나타낸다. 낮은 입력에서 정합된 회로의 경우 최대 출력에서의 효율은 18%가 되는데 비하여, 출력에서 정합이 된 경우 효율이 30%가 됨을 확인하였다. 신호가 낮을 때 포락선 추적 전력 증폭기의 효율개선이 어느 정도인지는 그래프상에서는 확인하기 어렵지만 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

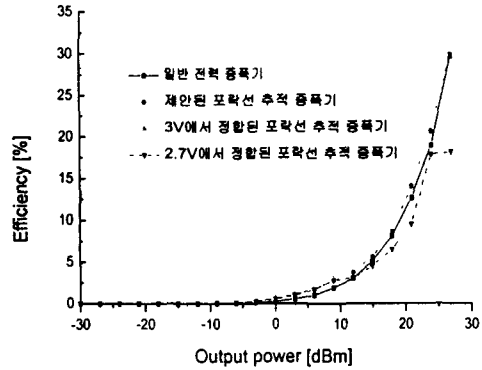


그림 8. 출력 전력에 대한 효율 특성
Fig 8. The efficiency according to the output power level.

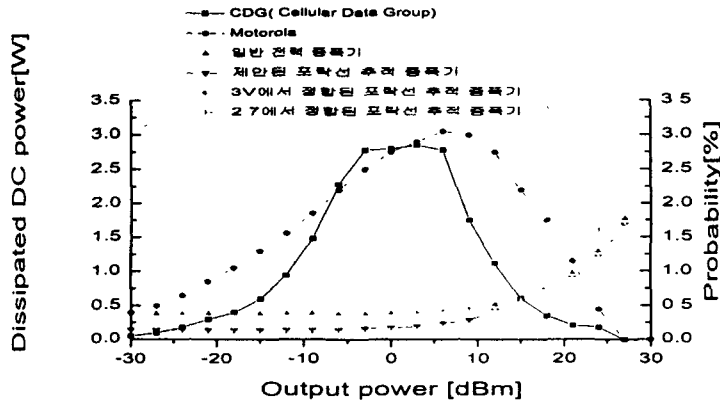


그림 9. 소모된 DC 전력과 확률 분포 함수
Fig 9. The dissipated DC power and probability distribution function according to the power level

그림 9는 신호전력에 따른 직류소모 전력을 나타낸다. 그림 8에서 고정된 바이어스 증폭기에 비해 출

력 전력이 낮을 때 차이가 나지만 그 값이 너무 작아서 그림상으로는 잘 보이지 않는다 이것은 그림 9에서 출력 신호가 0 dBm 근처에서 소모되는 직류전력은 포락선 추적 전력 증폭기의 경우가 고정 바이어스에 비하여 배 이상 적게 소모하는 것을 알 수 있다

그림 9에서의 확률분포함수는 CDG(Cellular Data Group)와 Motorola에서 발표한 확률 분포 함수인데 이 확률분포함수에 각 RF 신호 전력에 따른 소모 직류전력을 곱하면 각 신호전력에 따른 가중된 (weighted) 직류 소모전력이 된다. 이것의 평균치에 의해 기존의 전력증폭기보다 어느 정도 직류 전력의 저축효과가 있는지 알 수 있다[14].

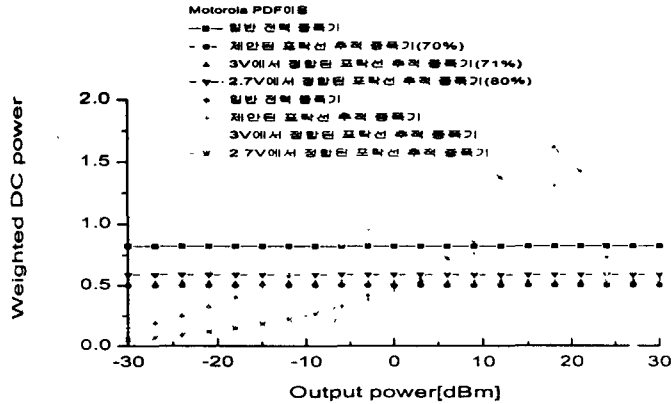


그림 10. Motorola의 PDF를 적용한 출력 전력에 대한 가중된(weighted)된 소모 직류 전력 특성

Fig 10. The weighted DC power consumption and average DC power consumption by Motorola of PDF.

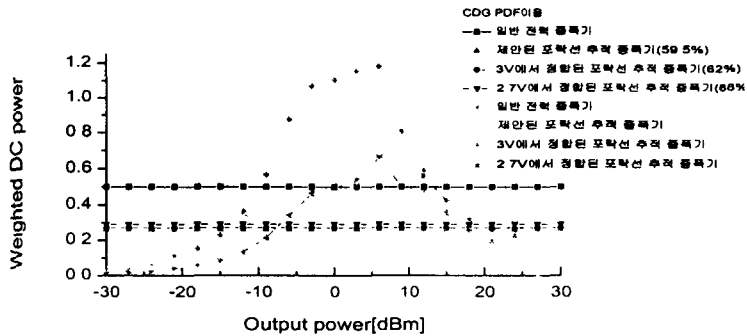


그림 11. CDG(Cellular Data Group)의 PDF를 적용한 전력에 대한 가중된(weighted)된 소모 직류 전력 특성

Fig 11 The weighted DC power consumption and average DC power consumption by CDG(Cellular Data Group) of PDF.

그림 10 과 그림 11은 Motorola사와 CDG사에서 발표된 확률분포를 기초로 하여 가중된 소모 직류 전력을 나타낸 것이다 이때 일직선은 증폭기에서 소모되는 전력의 평균값이다. Motorola 확률 분포 함

수의 특징은 출력레벨이 7dBm일 때가 통화확률이 가장 높은 것으로 나타나고, CDG사에서는 0dBm 일 때 가장 통화확률이 높은 것으로 나타났다. 그림 11에서 기존의 전력 증폭기에 비하여 임피던스 보정회로를 사용하였을 경우 70%, 높은 출력레벨에 대하여 고정 정합회로를 사용한 경우 71%이고 낮은 출력레벨에 대하여 고정 정합회로를 사용하였을 경우 80%가 되는 것을 알 수 있는데 높은 출력레벨에 대하여 임피던스 보정회로를 사용한 경우가 전체 소모전력에는 차이가 없으나 그림 7에서 나타낸 바와 같이 낮은 전력이 출력될 때에는 이득이 감소하고, VSWR특성이 악화되어 전력증폭기의 회로가 손상되거나 파손되는 경향이 있다. 그림 11는 CDG사에서 발표한 확률분포합수를 기초로 하여 도출한 가중된 소모 직류 전력을 나타낸다. 그림으로부터 제안된 포락선 추적 전력 증폭기의 경우 기존의 고정 바이어스 전력 증폭기에 비하여 45.8%만 전력이 소모하는 것으로 나타났다.

V. 결론

포락선 추적 증폭기는 CDMA방식을 사용하는 제 3세대 이동통신 단말기에서 효율을 획기적으로 개선시킨다는 점에서 대단한 관심을 일으키고 있다. 본 논문은 DC-DC 변환기를 사용하지 않고 베이스쪽 전압을 변화시켜 효율개선을 시키는 포락선 추적 증폭기에 대하여 실험을 하였다. 그러나 이러한 포락선 추적 증폭기는 RF신호레벨이 바뀌면 동작 바이어스가 변하게 되어 입력과 출력 임피던스가 변하는 본질적인 문제가 발생하게 된다. 본 논문은 이러한 동적 바이어스에 의한 부정합을 MEMS 가변 임피던스로 보정하는 방법을 제시하였다. 실제 8dB정도의 이득 감소분의 이득 개선효과를 얻었고, 효율도 급격하게 개선되는 것을 확인하였으며, 실제 현재 사용중인 고출력 증폭기에 비해 전력소모는 평균 59.5%정도만 소모하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. Standing, B. Gilsdorf, D. Newman, G. Norris, G. Sadowiczak, R. Sherman, T. Quach, "High Efficiency CDMA RF Power Amplifier Using Dynamic Envelope Tracking Technique", IEEE MTT-S Digest, pp 1843-1846, 2000
- [2] G. Hamington, P. Chen, P. Asbeck, L. Lason "High-Efficiency Power Amplifier Using Dynamic Power-Supply Voltage for CDMA Application," IEEE Tran. Microwave Theory Tech. Vol.47, No 8, Aug., 1999
- [3] G. Hanington, P.F. Chen, V. Radisic, T. Itoh, and P.M. Asbeck, "Microwave power amplifier efficiency improvement with a 10MHz HBT DC-DC Converter" in IEEE MTT-S Tech Dig., pp 589-592, 1998
- [4] F. Raab and D. Rupp, "Class-S high efficiency amplitude modulator," RF Design, Vol. 17, No 5, pp 70-74, May 1994
- [5] T. B. Nishimura, N. Iwata and G. Hau, "Wide-Band CDMA Highly-Efficient Heterojunction FET over Wide Range Output Power with DC-DC Converter" IEEE MTT-S Digest, pp 1091-1094, 1999
- [6] I. H. Kang, J. Y. Kim, "The Design of Compensated Impedance for a Dynamic Envelope Tracking in Cellular Radio Handsets", Microwave Journal, Vol 44, No.8 pp 106-120, Aug 2001
- [7] 강인호, "MEMS 가변 임피던스를 이용한 이동 통신 단말기의 포락선 추적 증폭기의 이득개선 회로", 한국 특허 출원번호 2001-7115.
- [8] E. R. Brown, "RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated Circuits, IEEE Trans, MTT, vol 46, NO 11 pp 1868-1880 Nov 1998 (precisely 1872 page)
- [9] A. Dec, K. Suyama, "RF Micromachined Varactors with Wide Tuning Range", IEEE-MTT-S Symp 1998
- [10] U. L. Rohde, D. P. Newkirk, "RF/Microwave Circuit Design for wireless application", Wiley-Interscience, 2000, pp 159-160.
- [11] H. D. Wu Etc, "MEMS Design for tunable capacitors", IEEE-MTT-S 1998
- [12] Z. Feng Etc, "Design and Modeling of RF MEMS Tunable Capacitor Using Electro-Thermal Actuators", IEEE-MTT-S Symp pp. 1507-1510 1999
- [13] G. Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design", Prentice Hall, 1997
- [14] H. Lilja, H. Mattila, "W-CDMA Power Amplifier Requirements and Efficiency Optimization Criteria", IEEE MTT-S Digest, pp 1843-1846, 1999