

이동통신 기지국용 포락선 추적 전력증폭기를 위한 고출력 광대역 바이어스 변조기의 안정화 방법

박성두, 박민혁, Phirun Kim, 정용채
 전북대학교 전자정보공학부
 e-mail: psd2325@jbnu.ac.kr

Stabilization method of High Power Wideband Bias Modulator for Mobile Base Station Envelope Tracking Power Amplifier

Sungdo Park, Minhyeok Park, Phirun Kim, Yongchae Jeong
 Division of Electronics and Information Engineering,
 Chonbuk National University

요 약

본 논문은 이동통신 기지국용 포락선 추적 송신기를 위한 고전력 광대역 스위치 모드 선형 바이어스 변조기 설계 기술을 제안한다. 제안된 회로의 선형 단(Linear Stage)은 넓은 대역폭과 적당한 효율을 갖는 Class B 전력 증폭기로 구성되어 있고, 스위치 단(Switched Stage)은 좁은 대역폭과 고 효율을 갖는 동기 정류기로 구성되었다. 루프 이득과 위상 마진에 대한 안정도 해석을 한 결과, 100 W의 최대 출력 전력과 76 MHz의 포락선 대역폭에서 안정적인 동작을 확인할 수 있었다. 제안된 회로는 20 MHz 이상에서의 RF 신호 대역폭 전체에서 사용할 수 있다. 제작된 회로에 정현파와 변조된 시간도메인 파형을 인가하여 안정적인 동작을 확인하였다.

1. 서 론

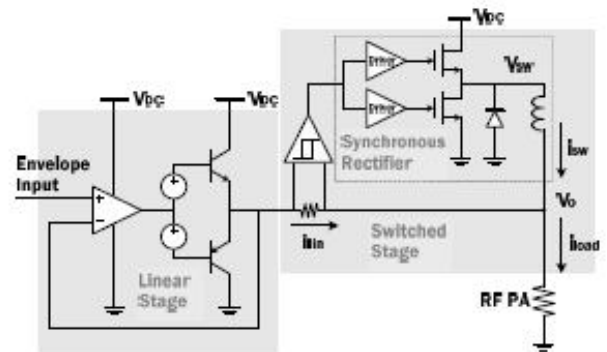
제한된 주파수 대역 내에서 더 많은 데이터 전송을 요구함과 동시에 모바일 무선 통신기기의 폭발적인 수요 때문에 높은 첨두 전력 대 평균 전력비(PAPR)를 갖는 Non-constant 포락선 변조기술들이 개발되었다[1]. 그러나 일반적으로 전력 증폭기(PA)는 최대 전력보다 낮은 전력 레벨에서의 효율은 매우 낮다. 따라서 평균 전력에서의 효율을 높이기 위한 전력 증폭기 설계 기술로 Doherty 증폭기, Out-phasing 증폭기, EER(Envelope Elimination and Restoration), ET(Envelope Tracking), Polar 변조 방식의 기술 등이 개발되었다[2]-[4].

본 논문에서는 이동통신 기지국용 포락선 추적 송신 장치 어플리케이션을 위한 고전력 광대역 스위치 모드 선형 바이어스 변조기 설계 기술을 제안한다.

2. 고출력 광대역 바이어스 변조기

2.1 스위치-모드 선형 바이어스 변조기 설계

제안된 고전력 광대역 스위치 모드 선형 바이어스 변조기의 구조는 그림 1과 같다. 제안된 회로의 선형 단은 넓은 대역폭과 적당한 효율을 갖는 Class B 전력 증폭기로 구성되었고, 스위치 단은 좁은 대역폭과 고효율을 갖는 동기식 정류기로 구성되었다. 전체적인 동작은 이미 발표된 Split-band 방식과 비슷하다[2]-[4].



(그림 1) 제안된 동기 정류기를 이용한 스위치-모드 선형 바이어스 변조기의 블록도.

컨버터의 효율 증가와 Free-wheeling 다이오드 전압 강하를 줄이기 위해서 기존의 Buck Converter 대신에 동기식 정류기를 사용하였다. 높은 스위칭 전류가 인가될 때, 동기식 정류기의 낮은 On-state 저항은 Schottky 다이오드의 전력 소모를 줄이는데 효과가 있다.

Class B 출력 단에서 발생하는 크로스오버(crossover) 왜곡은 접합 다이오드의 전위 장벽 때문에 생기는데, 이를 줄이기 위해 높은 이득의 연산 증폭기와 부궤환이 사용되었다. ± 0.7 V의 크로스오버 왜곡 발생 영역이 $\pm 0.7/A_0$ V으로 줄었다. 여기서 A_0 는 연산 증폭기의 DC 이득이다.

선형 단은 Base 드라이버 회로를 갖는 BJT로 구성되었다. 스위치 단은 Gate 드라이버 회로를 갖는 N-channel MOSFET과 병렬 Schottky 다이오드로 구성되어서 회로 동작의 Dead time을 제거하였다.

2.2 선형 단의 안정성 해석

앞 절에서 설명하였듯이, 연산 증폭기의 반전 입력에 있는 계환 루프는 크로스오버 왜곡을 줄이는데 사용된다. 이러한 경우에, 안정성은 계환 증폭기의 전체 대역폭에서 중요한 제한 요인이다. 그림 2는 일반적인 계환 구조의 신호 흐름도를 나타낸다[6]. 출력 신호 x_o 는 증폭기의 입력 신호와 개방-루프 이득의 함수로 표현할 수 있다. 여기서 A 는 개방-루프 증폭기의 이득이다.

$$x_o = Ax_i \tag{1}$$

출력 신호는 동시에 부하와 계환 회로에 전달되며, β 는 계환 인수를 나타낸다. 계환 회로에 의하여 유도되는 신호 x_f 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_f = \beta x_o \tag{2}$$

신호 흐름도에 따르면, 계환 신호는 공급원으로부터 입력되는 신호를 변형시켜서 증폭기에 입력되는 신호를 재생산한다.

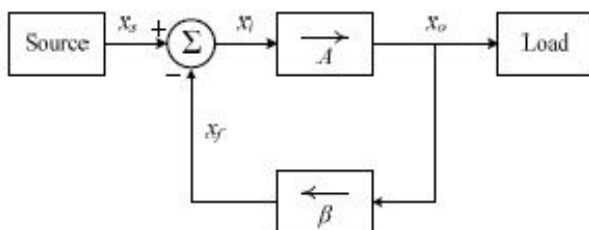
$$x_i = x_s - x_f \tag{3}$$

계환 증폭기의 이득은 입력 신호 대 출력 신호의 비로 정의될 수 있다. 그리고 식 (1)부터 (3)까지에 의해서 계환 증폭기의 이득을 구할 수 있다.

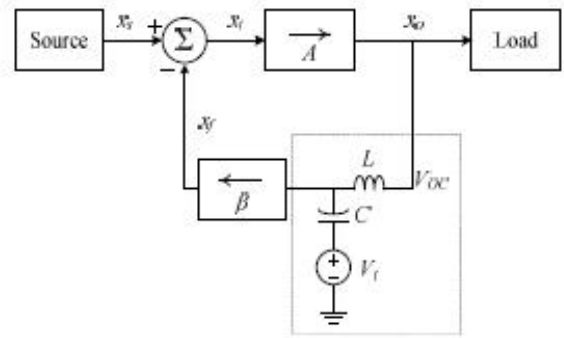
$$A_f \equiv \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1 + A\beta} \tag{4}$$

식 (4)로부터, 안정적인 동작을 위해서, $A\beta$ 는 양의 값을 가져야 된다.

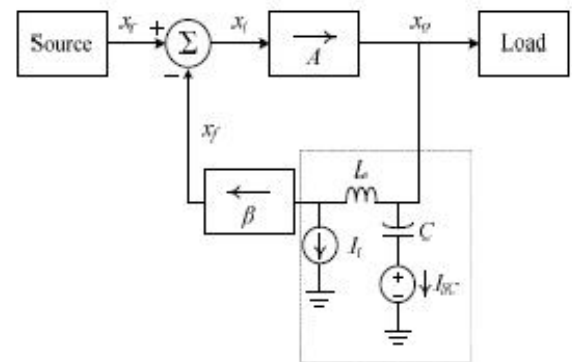
시뮬레이션에서, 2 단계에 걸쳐 간단히 루프 이득 $A\beta$ 를 찾을 수 있었다. 외부의 공급원은 제거하거나 0으로 설정해야 한다. 첫 번째, 그림 3에 보이는 바와 같이 루프의 임의의 지점에서 피드백 루프를 끊는다.



(그림 2) 일반적인 계환 구조의 신호 흐름도.



(a)



(b)

(그림 3) 루프 이득 해석을 위한 구조도: (a) 개방-회로 전달 함수, 그리고 (b) 단락-회로 전달 함수. 폐쇄 계환 루프

시뮬레이션 물에서 끊어진 루프는 등가적으로 아주 높은 인덕턴스를 갖는 직렬 인덕터(AC 개방, DC 단락)와 아주 높은 커패시턴스를 갖는 병렬 커패시터(DC 개방, AC 단락)의 연결로 치환할 수 있다. 이를 통해 얻어지는 개방-회로 전달 함수는 다음과 같이 결정된다[6].

$$T_{oc} \equiv \frac{V_{oc}}{V_T} \tag{5}$$

마찬가지로, 그림 3의 (b) 로부터 단락-회로의 전달 함수는 다음과 같이 결정된다.

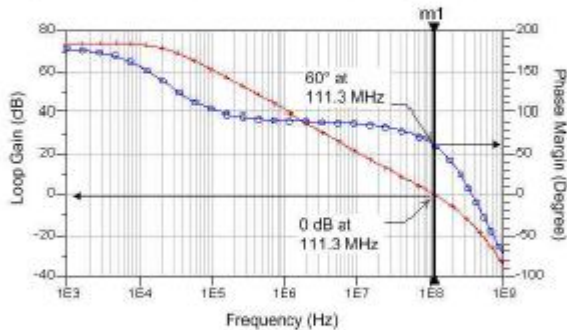
$$T_{sc} \equiv \frac{I_{sc}}{I_i} \tag{6}$$

두 전달 함수로부터, 루프 이득을 다음과 같이 구할 수 있다.

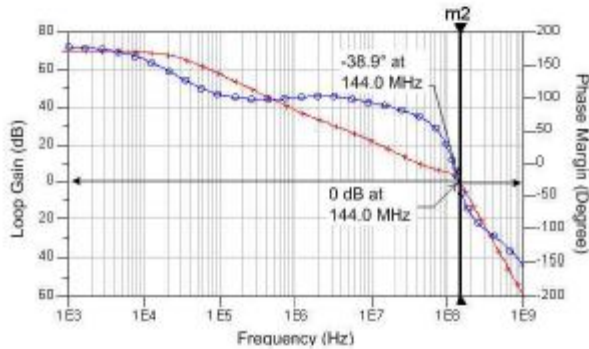
$$A\beta = -1 / \left(\frac{1}{T_{oc}} + \frac{1}{T_{sc}} \right) \tag{7}$$

이때에 간단한 계산을 위해서, 그림 3의 V_T 와 I_i 의 크기는 1로 설정하였다.

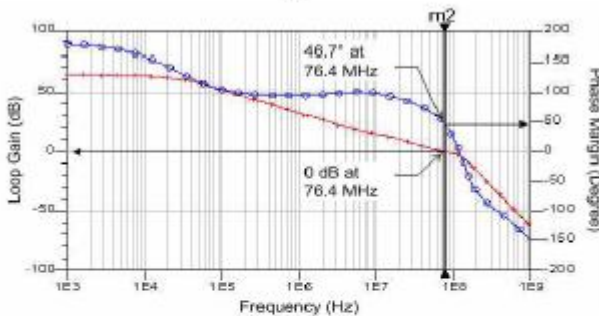
지금까지의 해석에 기초하여 계환 루프를 갖는 Class B 선형 단의 안정성을 해석할 수 있다. 그림 4는 연산 증폭기만 포함된 상태에서의 계환 루프의 루프 이득과 위상 마진을 나타낸다. 0 dB 대역폭은 111.3 MHz이며, 113 MHz에서의 위상 마진은 60°를 넘는다. 보통 계환 루프는 안정적 동작을 위해서 위상 마진이 45°정도 나와야 한다.



(그림 4) 연산 증폭기의 위상 마진 해석.



(a)



(b)

(그림 5) 계환 루프를 갖는 Class B 선형 단의 위상 마진 해석: (a) 최적화 전, 그리고 (b) 최적화 후.

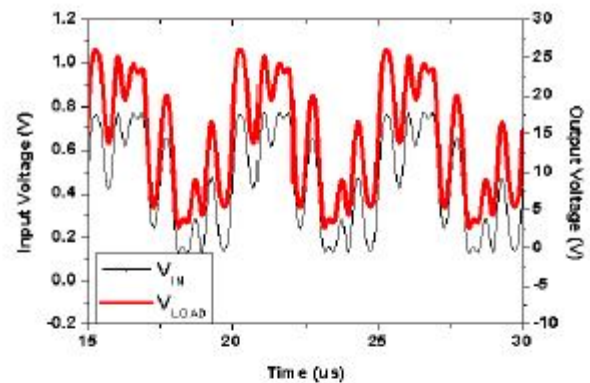
그림 5는 계환 루프를 갖는 Class B 선형 단의 루프 이득과 위상 마진을 나타낸다. 그림 5의 (a)로부터 0 dB 대역폭은 144.0 MHz이다. 그러나 위상 마진은 -38.9°이며, 이는 계환 루프가 144.0 MHz에서 불안정함을 의미한다. 이 문제를 풀기 위해서, 계환 계수 β 를 최적화해서 루프 이득을 줄였으며, 계환 저항 값의 조합을 조금 증가시키거나 선형 단의 요소를 변화시켜 루프 이득을 조절하였다. 그 결과, 그림 5의 (b)에 보이는 바와 같이 46.7°의 위상

마진을 갖는 76.4 MHz의 0 dB 대역폭을 얻을 수 있었다. ET용 공급 변조기를 위해서는 기저대역 신호 대역폭의 3 배를 적용해야 하므로[5], ET용 변조기에 적절하게 사용 가능하다.

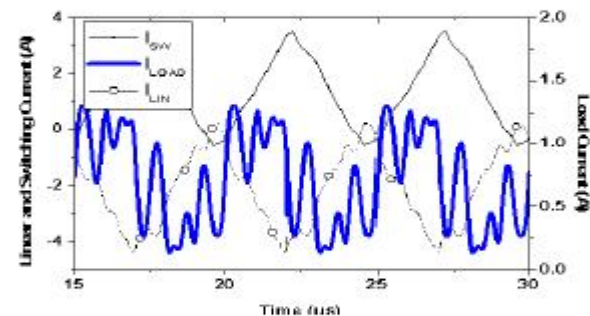
제안된 공급 변조기는 광대역 LTE 신호와 같은 20 MHz 이상의 RF 신호 대역폭을 갖는 신호원에 적용될 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 6은 주파수 변조된 신호를 변조기에 인가했을 때의 입력 및 출력 시뮬레이션 파형 결과이다. 이 때, 인가된 신호는 $V_N = 0.45 + 0.32 \times \sin(2\pi \times 250\text{kHz} \times t) + 1 \times \sin(2\pi \times 1\text{MHz} \times t)$ 이다. 시뮬레이션 결과로부터 입력과 출력 사이의 왜곡이나 위상차는 거의 찾아볼 수 없다. 대 신호가 인가된 경우, 스위치 단은 오직 전류의 선형적인 변화를 제공할 수 있고 높은 Slew-rate와 높은 차수의 리플 성분은 선형단의 전류에 의해 제공된다. 스위치단과 선형단 전류는 구조상으로 지속적으로 선형적인 부하 전류를 생산하며 결합된다.



(a)

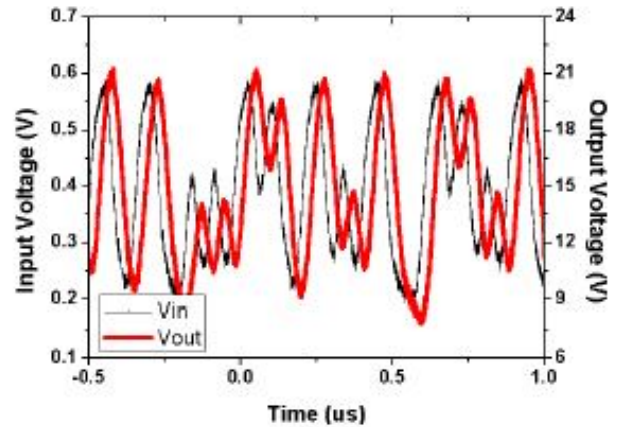


(b)

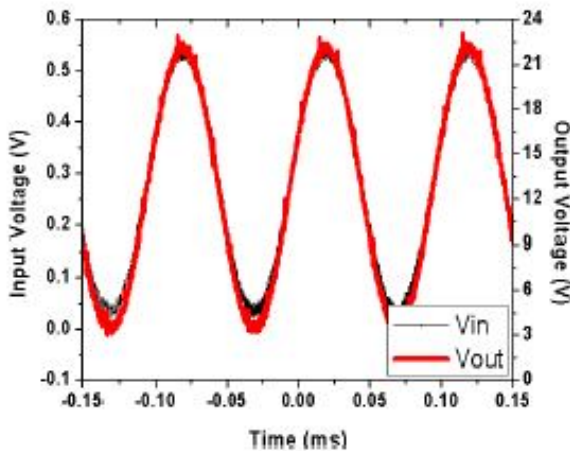
(그림 6) 주파수 변조 신호 $V_N = 0.45 + 0.32 \times \sin(2\pi \times 250\text{kHz} \times t) + 1 \times \sin(2\pi \times 1\text{MHz} \times t)$ [V]: (a) 입력과 출력 전압, 그리고 (b) 선형 단, 스위칭 단, 그리고 출력 전류.

그림 7과 그림 8는 측정 결과를 나타낸 것이다. 측정 장비의 전압 공급량이 ± 25 V로 제한되어 있어 연산 증폭기

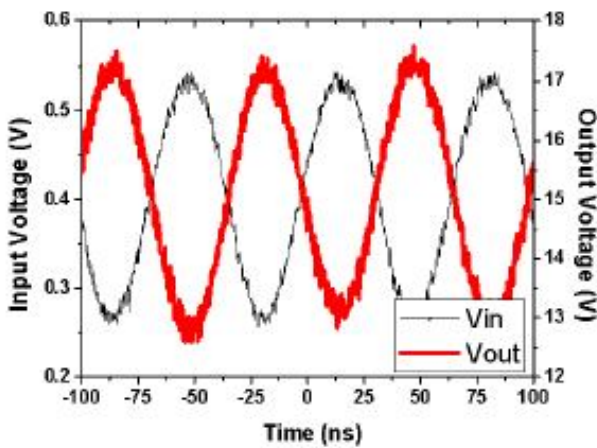
의 전압 헤드룸을 2 V 정도 고려하였고, 최대 전압을 23 V로 설정하였다. 그림 7과 8에서 나타나 있듯이, 500 kHz의 높은 Slew-rate (고출력) 신호와 15 MHz의 높은 Slew-rate (고주파) 신호를 인가하여도 입력과 출력 사이에 왜곡이 없는 것을 확인할 수 있다. 40 ns의 지연은 전력 MOSFET 스위치와 Gate 드라이버에 의한 전파 시간 때문이다. 15 MHz에서의 이득 감소는 루프 이득 해석으로부터 추측할 수 있었다. 임의의 포락선 신호의 예로, 기본적으로 함수 발생기에 저장되어 있는 500 kHz의 PNCODE3 시간-도메인 신호를 적용하였고, 전형적인 입력-출력 간의 특성을 확인하였으며, 그 측정 결과를 그림 7에 나타냈다.



(그림 7) PNCODE3 파형을 인가하여 측정된 입력과 출력 전압.



(a)



(b)

(그림 6) 측정된 입력과 출력 전압: (a) 500 kHz 정현파, 그리고 (b) 15 MHz 정현파.

4. 결 론

본 논문에서는 이동통신 기지국용 포락선 추적 송신 장치 어플리케이션을 위한 고출력 광대역 스위치 모드 선형 바이어스 변조기 설계 기법을 제안하였다. 제한 루프가 있는 상태에서의 안정적으로 동작하게 하였으며, 제안된 광대역 공급 변조기의 루프 이득과 위상 마진 해석을 수행하였다. 제작된 변조기에 여러 파형을 인가하여 이동통신 기지국용 고출력 광대역 바이어스 변조기로 사용가능함을 실험적으로 증명하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Norwood, MA, Artech House, 2002.
- [2] H. Ertl, J. W. Kolar, and F. C. Zach, "Basic considerations and topologies of switched-mode assisted linear power amplifiers," *IEEE Trans. Industrial Elect.*, vol. 44, no. 1, pp. 116-123, February 1997.
- [3] G. R. Walker, "A class B switch-mode assisted linear amplifier," *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 18, pp. 1278-1285, November 2003.
- [4] F. H. Raab, "Split-band modulator for Kahn-technique transmitters," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 887-890, June 2004.
- [5] B. J. Minnis, P. A. Moore, P. N. Whatmough, P. G. Blanken, and M. P. Van Der Hiejden, "System-efficiency analysis of power amplifier supply-tracking regimes in mobile transmitters," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 56, no. 1, pp. 268-279, January 2009.
- [6] A. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits (6th edition)*, Oxford University Press, 2010.

VOL.1 NO.2
한국스마트미디어학회
2012 추계학술대회
2012 KISM Fall Conference 2012

일시 : 2012년 11월 30일(금)~12월 1일(토)
장소 : 전북대학교 전주캠퍼스 공과대학 8호관
주최 : 한국스마트미디어학회
주관 : 전북대학교 BK전자정보고급인력양성사업단

<http://www.kism.or.kr>



Session II-C (212호), 11:40~12:55

좌장 : 나인호(군산대)

11:40-11:55 제목 : PIN 다이오드를 이용한 가변 음의 균지연회로 설계
 저자 : 정준형(전북대), Kolet Mok(전북대), Phirun Kim(전북대), 정용채(전북대)

11:55-12:10 제목 : 휴대기기용 생체신호 검출회로 설계
 저자 : 조종민(서경대), 정준모(서경대), 임신일(서경대)

12:10-12:25 제목 : 길쌈부호기를 이용한 LDPC 부호어 생성 및 복호방법 제시
 저자 : 이종수(전북대), 황은한(전북대), 송상섭(전북대)

12:25-12:40 제목 : 전류 거울 기반 SenseFET 방식의 오프셋 전류에 대한 보상 기법
 저자 : 장성원(전북대), 이동건(전북대), 정항근(전북대)

12:40-12:55 제목 : 이동통신 기지국용 포락선 추적 전력증폭기를 위한 고출력 광대역 바이어스 변조기의 안정화 방법
 저자 : 박성두(전북대), 박민혁(전북대), Phirun Kim(전북대), 정용채(전북대)

Session II-D (209호), 11:40~12:55

좌장 : 최한석(목포대)

11:40-11:55 제목 : 가변 템포 음악에서의 개선된 마디찾기 알고리즘
 저자 : 주영호(전북대), 바니야 바부카지(전북대), 이준환(전북대)

11:55-12:10 제목 : 부분 검색을 위한 텍스트 라인 검출
 저자 : 뉴엔휘황(전남대), 이귀상(전남대)

12:10-12:25 제목 : 지역적 특징 기반 꽃 인식 기법
 저자 : 오강한(전남대), 김수형(전남대), 나인섭(전남대)

12:25-12:40 제목 : 집단지성을 이용한 트위터 내 명사 자동 의미 태깅 기법
 저자 : 이은지(조선대), 정희진(조선대), 김판구(조선대), 신주현(조선대)

12:40-12:55 제목 : 문서 범주의 균형에 따른 가중치를 이용한 BkNN 알고리즘
 저자 : 조훈(전북대), 박순철(전북대)