

벡터 변조기와 feedforward 선형 전력 증폭기의 적응 제어에 관한 simulation

°이재혁*, 양영구*, 김범만*

*포항공과대학교 전자진기공학과 및 전자파특화연구센터

Simulations on the reflection type vector modulator and adaptive control of feedforward linear amplifiers

°Jaehyok Yi*, Youngoo Yang*, Bumman Kim*

*Dept. of Electronic & Electrical Engineering and Microwave Application Research Center
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

신호의 크기와 위상을 조정하는 벡터 변조기는 feedforward 선형화기의 중요한 부분이다. 본 연구에서는 반사형 가변 감쇠기와 위상 변위기를 사용한 벡터 변조기의 모델을 사용하여 신호의 감쇠 변화에 영향을 주는 요인들을 시뮬레이션하여 비교하였다. Feedforward 선형 증폭기는 증폭기나 외부 환경의 변화에 따라 최적의 왜곡제거가 이루어질 수 있도록 하기 위해 적응 제어 장치가 필요하다. 본 연구에서는 gradient algorithm을 이용한 적응 제어 방식들 중 steepest descent 방법과 이를 개선한 adaptive delta modulation 방법을 시뮬레이션하여 비교하였다.

I. 서론

현재의 이동 통신 기지국들에 사용되는 전력 증폭기들은 고출력, 높은 선형성, 수십 MHz의 광대역 특성들이 요구되고 있다. Feedforward 선형화 방식은 광대역에 걸쳐 높은 수준의 왜곡 제거를 할 수 있기 때문에 기지국용 전력 증폭기의 선형화에 많이 쓰이고 있다.

Feedforward 구조는 크게 신호 제거부와 왜곡 제거부로 나눌 수 있는데 신호와 왜곡을 효과적으로 제거하기 위해서는 두 경로 사이의 이득과 위상 오차가 매우 작아야 한다. 따라서 신호의 제거를 위해 감쇠와 위상 조정을 담당하는 벡터 변조기의 성능이 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 주게 된다. 기본적으로 feedforward는 open loop 구조이므로 증폭기의 변화나 온도 변화 등에 의해 신호와 왜곡 제거의 최적조건이 변하게 되므로 이에 적응하여 일정한 성능을 유지할 수 있게 하는 제어 장치가 필요하다. 따라서 올바른 적응 제어 방식의 선택 또한 feedforward 시스템의 성능을 좌우하게 된다.

본 연구에서는 벡터 변조기의 감쇠 성능에 영향을 주는 요인들과 gradient algorithm을 이용한 적응 제어 방식들의 특성들을 시뮬레이션을 통하여 알아보고자 한다.

II. 반사형 벡터 변조기

신호의 완전한 제거가 이루어지기 위해서는 두 신호의 크기가 같고 위상차는 180° 가 되어야 한다. 이러한 조건에서 오차가 생기게 되면 그림 1과 같이 두 신호의 크기와 위상 오차에 따라 신호의 제거량이 제한된다. 현재의 이동 통신 기지국들은 선형 전력 증폭기의 선형화 규격을 60dBc 이상 요구하고 있으므로 만약 30dBc의 전력 증폭기를 사용한다면 30dB 이상 왜곡을 제거해야 한다. 그림 1에 따르면 30dB의 신호 제거를 위해서는 크기 오차는 -0.2dB , 위상 오차는 $+1^\circ$ 이내의 조건을 만족해야 한다. 그래서 Feedforward 선형 증폭기에서 벡터 변조기의 감쇠와 위상 오차는 그림 1과 같이 원하는 제거량에 의해 결정된다.

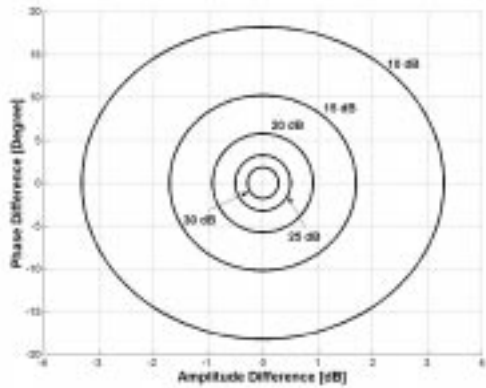
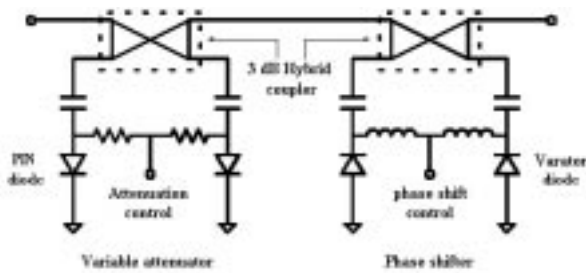
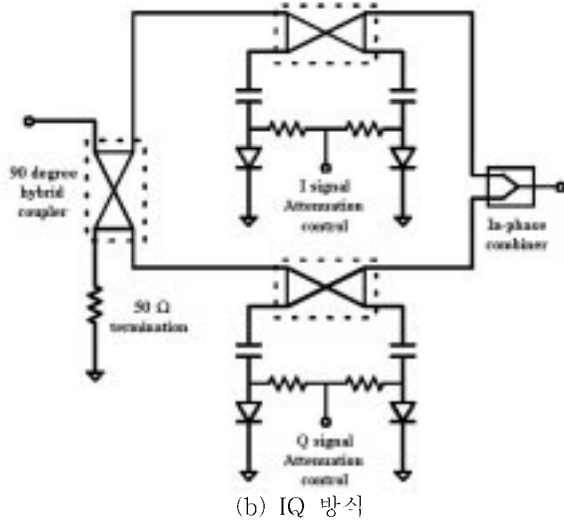


그림 1. 크기와 위상 오차에 따른 신호 제거량

반사형 벡터 변조기는 그림 2와 같이 3dB coupler와 pin diode, varactor diode를 이용하여 가변 감쇄기와 위상 변위기로 이루어진 구조이다.



(a) polar 방식



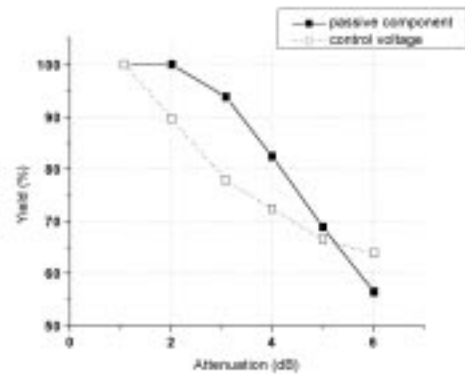
(b) IQ 방식

그림 2. 반사형 벡터 변조기

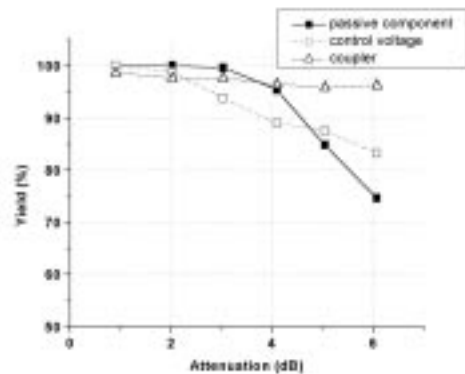
그림 2(a)는 신호의 크기와 위상을 각각 가변 감쇄기와 위상 변위기를 통해 polar plane에서 조정하는 방식이고 그림 2(b)는 90° hybrid coupler를 사용하여 신호를 in-phase와 quadrature 신호로 나누고 각각을 가변 감쇄기로 조정하여

rectangular plane에서 조정하는 IQ 방식이다 [1].

벡터 변조기의 감쇄에 영향을 주는 요소들로는 matching을 위한 capacitor, bias 회로에 사용되는 저항, inductor 등의 수동 소자들과 bias 전압의 변동, 90° hybrid coupler에서 두 경로간의 감쇄와 위상 불균형 등이 있다. 그림 3은 polar 방식과 IQ 방식의 yield 시뮬레이션 결과로 위의 요소들을 변화시켰을 때 각각이 yield에 주는 영향들을 비교하였다. 설계된 벡터 변조기는 2.11~2.17GHz의 주파수 대역을 가지고 0~0.95V bias 전압 범위에서 1~6dB 감쇄 범위를 가진다. Yield 시뮬레이션에서 감쇄 변화의 규격은 30dB 신호 제거 조건을 고려하여 +0.2dB 이내로 정하였다. 수동 소자들은 각각의 값에서 Gaussian 분포를 가지고 -5% 변화한다고 가정하였고 bias 전압의 변동은 +0.01V, hybrid coupler의 감쇄와 위상 불균형은 각각 +0.2dB, +1°로 가정하였다. 결과의 오차 범위는 95% 신뢰도에서 -3~4%이다.



(a) polar 방식의 결과



(b) IQ 방식의 결과

그림 3. 벡터 변조기의 yield 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 polar 방식과 IQ 방식 모두 5dB 이하의 감쇄가 작은 범위에서는 bias 전압의 변화에 가장 영향을 많이 받았다. IQ 방식에서 두 경

로의 불균형이 감쇠에 주는 영향은 다른 요소에 비해 적다.

소자	Catt	R	L	Cph	Vcon
Yield(%)	100	93.7	100	100	77.2

(a) polar 방식의 결과

소자	Catt	R	Gain imbalance	Phase imbalance	Vcon
Yield(%)	100	99.6	100	97.3	91

(b) IQ 방식의 결과

표 1. 백터 변조기의 구성 요소들이 yield에 미치는 영향

표 1의 결과는 각 수동 소자들이 감쇠에 주는 영향을 비교한 결과이다. 감쇠값을 3dB로 고정시키고 비교한 결과 RF matching을 위한 capacitor Catt와 Cph의 변화는 감쇠값에 거의 영향을 주지 않았고 bias 회로에 관계된 저항값의 변화가 영향을 주었다. Polar 방식과 IQ 방식을 비교했을 때 IQ 방식이 회로 구성 요소의 변화에 영향을 덜 받았다. 이러한 결과는 위상 변위기에서 제어 전압에 의한 감쇠 변화가 다른 영향보다 크기 때문에 위상 변위기를 사용하지 않는 IQ 방식이 영향을 적게 받기 때문이다.

III. 신호 제거부의 적응제어

Feedforward 선형 증폭기에서는 끊임없이 변하고 있는 내외부 조건에 따라 최적의 성능을 유지하기 위해서 적응 제어 장치가 반드시 필요하다. 적응 제어에 사용되는 algorithm들은 여러 가지가 있는데 이들 중 gradient algorithm은 오차 표면에 대한 정보가 없이도 local minimum이 없으면 최적점으로 수렴할 수 있는 특성이 있고[2] 구현이 비교적 간단하다는 장점이 있다.

Steepest descent 방식은 gradient를 바탕으로 한 적응 제어 방식으로 전력 경사를 이용하여 수렴 방향과 속도를 결정하게 된다 [3]. 감쇠와 위상 제어를 위한 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$A_{k+1} = A_k - \alpha \frac{P_k - P_{k-1}}{\Delta A} \quad (1)$$

위 방식은 오차 전력의 잠음 때문에 최소점 근처로 수렴 후 제어 상수가 고정되지 않고 흔들리는 문제점이 있다. 이러한 granular noise 현상을 해결하기 위한 방법으로 적응 delta modulation 방

식이 있다[4]. 이 방식은 오차의 방향에 따라 step의 크기를 조정함으로써 granular noise 현상을 없애고 수렴 속도를 향상시킨다. 식 (2)-(5)는 적응 delta modulation 방식을 이용한 제어 상수 갱신 식이다.

$$A_{k+1} = A_k + \delta_k b_k \quad (2)$$

$$b_k = \begin{cases} 1 & \text{if } P_k \leq P_{k-1} \\ -1 & \text{if } P_k > P_{k-1} \end{cases} \quad (3)$$

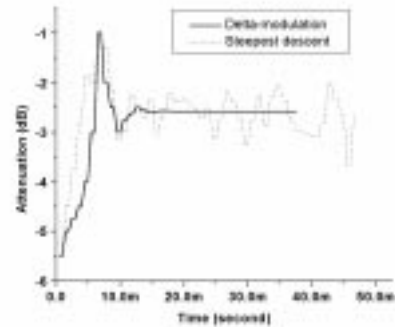
$$\delta_k = M_k \delta_{k-1} b_k \quad (4)$$

$$M_k = \begin{cases} 2 & \text{if } b_k = b_{k-1} = b_{k-2} = 1 \\ 0.5 & \text{if } b_k \neq b_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

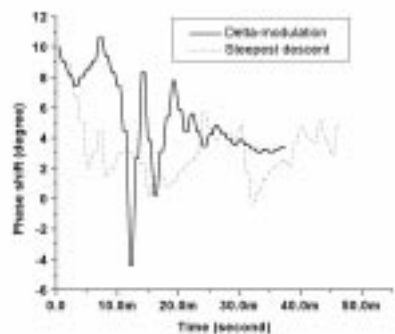
1 otherwise

식 (5)의 M_k 는 step의 크기를 조정하기 위한 계수로 오차가 줄어드는 방향이면 step의 크기를 늘려서 수렴 속도를 빠르게 하고 수렴 후 오차가 변동하면 step의 크기를 줄이게 되므로 일정한 값을 유지하도록 하여 granular noise 현상을 없앨 수 있다.

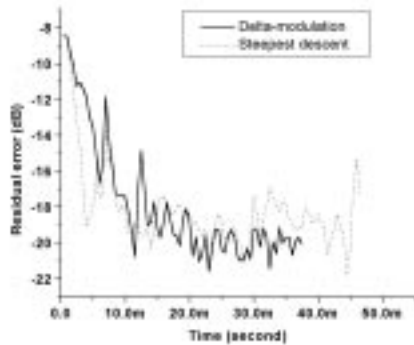
그림 4는 steepest descent 방식과 적응 delta modulation 방식으로 신호 제거부를 적응 제어했을 때 감쇠와 위상 제어, 그리고 오차 전력의 과도 특성 시뮬레이션 결과이다.



(a) 감쇠 제어



(b) 위상 제어



(c) 오차 전력

그림 4. 신호 제거부의 적응 제어시 감쇠와 위상 제어, 오차 전력의 과도 특성

감쇠 제어는 약 30번의 iteration 후에 그리고 위상 제어는 약 70번 iteration 후에 수렴하였다. 시뮬레이션 결과 수렴 후 적응 delta modulation 방식의 감쇠와 위상 제어의 granular noise가 현저히 줄어들음을 확인할 수 있었다. 그림 5는 적응 제어시 신호 제거 전과 후의 전력 스펙트럼을 비교한 결과이다.

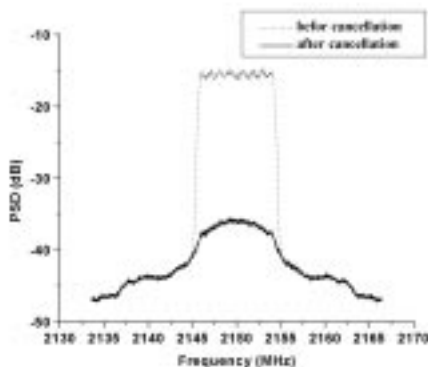


그림 5. 신호 제거 전과 후의 전력 스펙트럼 비교

IV. 결론

Feedforward의 감쇠와 위상 제어에 사용되는 벡터 변조기의 감쇠 변화에 영향을 주는 요소들을 yield 시뮬레이션을 통해 알아보고있다. Hybrid coupler를 이용한 반사형 벡터 변조기의 경우 polar 방식과 IQ 방식 모두 bias 조정 전압에 영향을 가장 크게 받았고 IQ 방식이 polar 방식에 비해 감쇠 변화에 영향을 적게 받았다.

Gradient algorithm을 이용한 적응 제어 방식 중 steepest descent 방식과 이를 개선한 적응 delta modulation 방식을 신호 제거부의 적응 제어 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 비교 결과

step 값이 오차 전력에 따라 조정되는 적응 delta modulation 방식이 수렴 후 granular noise가 훨씬 줄어들었다.

참고문헌

- [1] Lawrence Silverman and Chris Del Plato, "Vector modulator enhances feedforward cancellation," *Microwave & RF*, pp. 83-90, March 1998.
- [2] Simon Haykin, *Adaptive filter theory*, 2nd edition, Prentice Hall, 1996.
- [3] G. Zhao, F. M. Ghannouchi, F. Beaugard and B. Kouki, "Digital implementation of adaptive feedforward amplifier linearization techniques," *IEEE MTT-S Digest*, pp.543-544, 1996.
- [4] N. S. Jayant and Peter Noll, *Digital coding of waveforms*, Prentice Hall, 1984
- [5] Youngoo Yang, Youngsik Kim, Jaehyok Yi, Joongjin Nam, Bumman Kim, Wonwoo Kang and Shinwook Kim, "Digital controlled adaptive feedforward amplifier for IMT-2000 band," 2000 International Microwave Symposium, accepted.
- [6] Youngoo Yang, Youngsik Kim, Jaehyok Yi, Joongjin Nam, Bumman Kim and Myungkyu Park, "Modeling and measurement of two tone transfer characteristics high power amplifiers," submitted to 2000 European Microwaves Conference.
- [7] James K. Carvers, "Adaptation behavior of a feedforward amplifier linearizer," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.44, no.1, pp.31-40, 1995.