

증폭기의 이득 평탄도에 대한 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 관한 연구

정성찬, 박천석
(주) 웨이브 일렉트로닉스

A Study on Linearity Improvement of Feedforward Power Amplifier for gain flatness of amplifiers

Sung Chan Jung, Cheon Seok Park
Wave Electronics Co.,Ltd.

Abstract - 본 논문은 IMT-2000 대역에서 동작하는 피드포워드 증폭기의 선형성 개선을 위한 각 증폭기의 이득 평탄도의 영향에 관한 것이다. 피드포워드 증폭기의 동작 특성을 조사하기 위하여 WCDMA 신호를 인가하여 최종 출력 10W에서 성능을 측정하였다. 특히, 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 영향을 미치는 원인 중, 각 증폭기의 이득 평탄도의 변화에 따르는 선형성의 개선 양에 대하여 조사하였다. 전력 증폭기는 40MHz, 오차 증폭기는 40MHz와 80MHz의 대역에서 이득 평탄도를 변화시키면서 선형성의 개선 양을 조사하였으며, 오프셋 5MHz 지점에서 IMSR을 측정하였다. 측정 결과, 20dB 이상의 개선 효과를 나타내기 위해서는 전력 증폭기는 1.5dB 이내, 오차 증폭기는 0.5dB 이내의 이득 평탄도를 가져야 함을 확인하였으며, 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다.

1. 서 론

포화영역 근처에서 동작하는 증폭기는 비선형 특성에 의해 혼변조 신호가 발생하게 된다. 비선형 특성에 의해 발생한 혼변조 신호는 원 신호에 근접하여 위치하므로 필터로 제거하기 어려우며, 인접 채널의 신호에 영향을 주게 된다[1],[2]. 이러한 증폭기의 비선형 특성 및 왜곡에 대한 문제를 개선하기 위하여 전치 왜곡[3],[4] 방법, 피드포워드[5],[6] 방법과 같은 다양한 선형화 방법이 개발되어 왔다.

전치 왜곡 방법은 선형화 시킬 증폭기의 비선형성을 조사하여 증폭기의 비선형성과 반대의 특성을 나타내는 비선형 회로를 증폭기의 입력 단에 삽입하는 방법이다. 이러한 전치 왜곡 방법은 비교적 회로의 구조가 간단하며, 증폭기의 출력 전력을 손실 없이 사용하므로 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 사용 가능한 주파수 대역폭이 좁고 외부 환경의 변화에 따른 특성의 변화가 심하다는 단점이 있다.

피드포워드 방법은 전치 왜곡 방법과 비교하여 회로가 복잡하고 효율이 낮다는 단점을 가진다. 그러나 사용 가능한 주파수 대역폭이 넓고 선형성의 개선 정도가 크며, 외부 환경의 변화에 대한 특성 변화가 작다는 장점을 가진다. 그러나 IMT-2000과 같이 매우 넓은 주파수 대역에서 피드포워드 증폭기가 높은 선형성의 개선을 얻기 위해서는 지연 시간, 위상, 크기의 차이가 대역폭에 대하여 변화가 없어야 한다. 따라서 본 논문에서는 피드포워드의 선형성 개선에 영향을 미치는 위상, 지연 시간, 크기의 세 가지 요인 중 크기와 관련된 이득 평탄도에 의한 영향에 대하여 조사하였다.

서론에 이어 2장에서는 기본적인 피드포워드의 동

작 원리와 선형성 개선에 영향을 미치는 이득 평탄도, 위상 및 지연 시간의 불일치와 안정된 선형성을 유지하기 위한 컨트롤 방법에 대하여 살펴보고, 실험 결과를 나타내겠다. 마지막으로 3장에는 본 논문의 최종 결론을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 피드포워드 선형화 방법

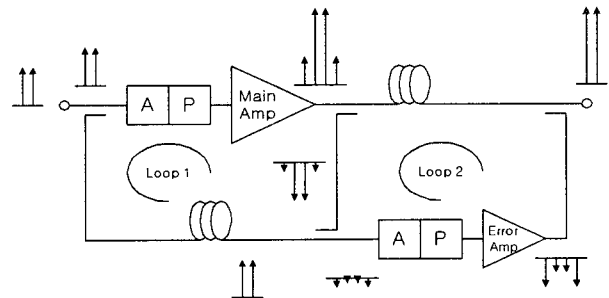


그림 1. 기본적인 피드포워드 선형화 구조

기본적인 피드포워드 선형화 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 두 개의 루프를 가진다. 첫 번째 루프에서는 원 신호와 전력 증폭기의 출력 신호를 결합하여 순수한 혼변조 신호만을 추출하게 된다. 결합기에 만나서 두 신호의 지연 시간이 일치한다면 벡터 모듈레이터를 이용하여 크기와 위상을 조절하여 순수한 혼변조 신호만을 추출할 수 있다. 즉, 첫 번째 루프는 증폭기에서 발생한 혼변조 신호를 추출하는 루프이며, 이를 1st 루프 또는 신호 제거 루프라고 부른다.

두 번째 루프에서는 첫 번째 루프에서 얻어진 혼변조 신호를 벡터 모듈레이터와 오차 증폭기를 이용하여 원하는 출력 전력과 위상을 가지는 신호로 증폭시킨 후 지연 선로를 지난 전력 증폭기의 출력 신호와 재결합시킨다. 결합된 전력 증폭기의 혼변조 신호 성분과 오차 증폭기를 통하여 증폭된 혼변조 신호 성분은 첫 번째 루프와 같이 지연 시간과 크기가 동일하고 위상의 차이가 180°가 되면 완전하게 제거된다. 이를 통상적으로 2nd 루프 또는 오차 신호 제거 루프라고 부른다.

이처럼 피드포워드 방법에서는 서로 다른 두 경로를 지나 결합되는 신호의 지연 시간과 크기가 동일하고 위상의 차이가 180°가 되면 신호가 완전히 상쇄되지만 크기와 위상에 차이가 발생하면 완전하게 제거되지 않는다. 이렇게 상쇄되지 않고 남은 잔여 신호는 피드포워드 증폭기의 성능 저하의 원인이 된다.

2.2 피드포워드 방법의 선형성 개선에 영향을 미치는 요인

2.2.1 지연 시간의 불일치

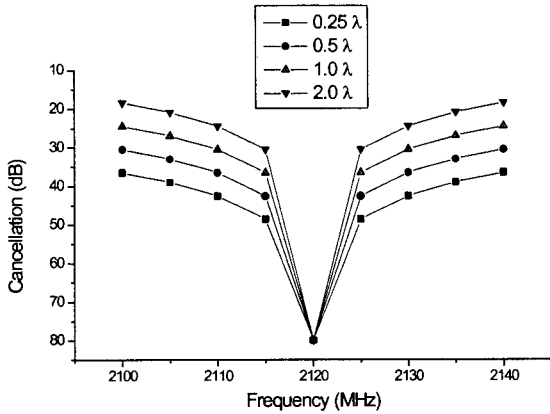


그림 2. 지연 시간의 불일치에 따른 제거 특성

피드포워드 선형화 구조에서 크기가 동일하고 위상의 차이가 180° 인 경우 IMT-2000 주파수 대역에서 지연 시간의 차이에 따르는 신호 제거 특성을 그림 2에 나타내었다. 그림 2와 같이 대역 내에서 지연 시간이 $\pm 0.5\lambda$ 만큼의 차이를 가지면 중심 주파수로부터 20MHz 떨어진 지점에서는 30dB 이상의 제거 특성을 나타내기 어렵다. 따라서 피드포워드 방법으로 높은 선형성 개선 효과를 얻기 위해서는 지연 시간이 대역 내에서 일정하게 유지되어야 한다.

2.2.2 지연 시간의 불일치

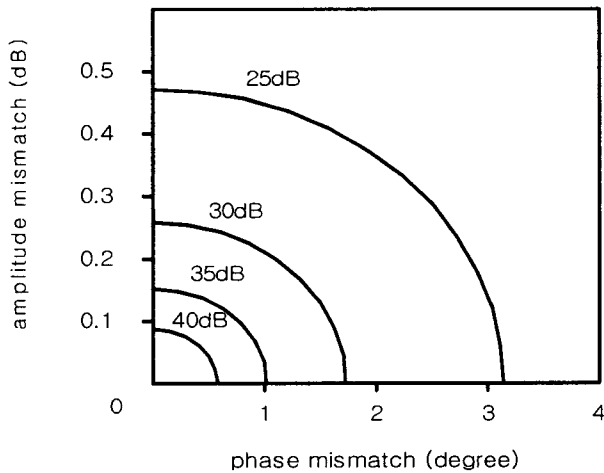


그림 3. 위상 및 크기 불일치에 따른 제거 특성

피드포워드 방법에서 두 경로의 지연 시간이 동일한 경우, 크기와 위상의 불일치에 따른 신호 제거 특성을 그림 3에 나타내었다[7],[8]. 그림 3에 나타낸 바와 같이 전체 대역 내에서 25dB 이상의 제거 특성을 얻기 위해서는 크기가 동일한 경우 위상의 차이가 약 $180^\circ \pm 3^\circ$ 이내, 위상의 차이가 180° 인 경우 크기가 약 0.5dB 이내의 오차 범위를 가져야 한다.

w_1, w_2 의 주파수 성분을 가지는 two-tone 신호의 경우, 증폭기가 대역 내에서 중심 주파수를 중심으로 $\pm 0.5\text{dB}$ 의 이득 평탄도를 갖는다면 지연 시간이 일치하고 위상의 차이가 180° 가 되더라도 25dB 이상의 제거 특성을 가지기 어렵다. Two-tone 신호가 전력 증폭기로 입력되었을 경우, 오차 증폭기의 입력이 되는 3차 혼변조 신호는 two-tone 신호 대역의 3배, 5차 혼변조 신호는 5배의 대역폭을 갖게 되며, 이는 대역폭을 갖는 신호에 대해서도 유사하다. 따라서 3차, 5차 혼변조 신호를 25dB 이상 제거하기 위해서는 오차 증폭기의 이득 평탄도가 $\pm 0.5\text{dB}$ 인 대역이 주 신호의 대역보다 5배 이상이 되어야 한다. 만약 주 신호의 대역이 20MHz이면 오차 증폭기는 100MHz의 대역에서 일정한 이득 평탄도를 유지해야 한다. 그러나 증폭기를 100MHz 이상의 대역에서 일정한 이득 평탄도를 갖도록 제작하는 것은 매우 어려운 작업이다. 따라서 원하는 선형성 개선 양에 따라 확보해야 할 오차 증폭기의 이득 평탄도를 주 신호의 대역과 비교하여 결정하는 것이 중요하다.

2.3 적응 제어 피드포워드 선형화 방법

외부 환경의 변화에 대해 피드포워드 증폭기가 안정적으로 동작하도록 하는 방법 중 대표적인 것이 파일럿 신호를 이용한 방법이다. 파일럿 신호를 이용하는 방법은 사용하는 파일럿 신호의 개수[11], 형태 및 입력 위치에 따라 나뉘어 진다[12]. 파일럿 신호를 피드포워드 증폭기의 최초 입력 단계에 입력하는 방법은 첫 번째 루프의 안정적 동작을 위해 사용하며, 파일럿 신호를 첫 번째 루프에 위치한 전력 증폭기의 전후 부분에 사용하면 두 번째 루프의 안정적 동작을 점진하는데 이용할 수 있다.

그림 4는 본 논문에서 제작한 피드포워드 증폭기의 블록도이다. 제작된 피드포워드 증폭기는 외부 환경의 변화에 대해 주 신호를 안정적으로 제거하기 위한 Control block 및 오차 신호를 안정적으로 제거하기 위한 Pilot block을 포함하고 있다. Control block은 첫 번째 루프, Pilot block은 두 번째 루프에 대해 독립적으로 동작하도록 구성하였다.

Control block에서는 C_5 를 통해서 검출된 신호의 전력이 최소가 되도록 컨트롤러를 이용하여 전력 증폭기 앞에 위치한 벡터 모듈레이터를 조절한다. Pilot block에서는 피드포워드 최종 출력 신호의 일부를 C_7 을 통해 검출한다. 검출된 신호는 I-Q 형태로 분리된 파일럿 신호 발생기의 신호와 곱해진 다음 오차 증폭

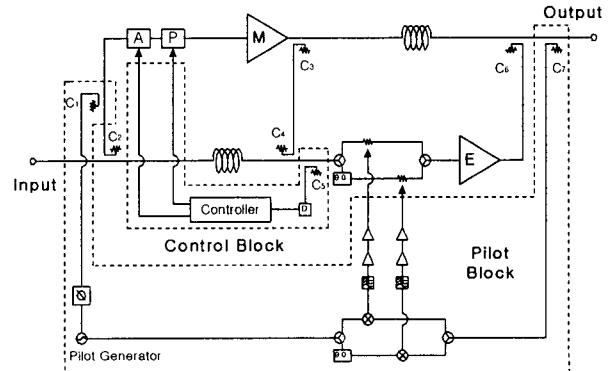


그림 4. 적응 제어 피드포워드 증폭기의 블록도

기의 앞에 위치한 I-Q 형태의 벡터 모듈레이터를 조절하여 C7을 통해 입력되는 파일럿 신호가 최소가 되도록 조절하는 구조이다.

2.4 실험 결과

전력 증폭기 및 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향을 조사하기 위해 IMT-2000 대역에서 동작하는 증폭기를 제작하였다. 제거되지 않은 잔여 신호에 의해 발생하는 오차 증폭기의 포화에 의한 영향을 최소화하기 위해 전력 증폭기와 오차 증폭기의 전력 비를 2 : 1로 설계하였다. 제작된 피드포워드 증폭기는 출력 전력 10W, WCDMA 4FA 신호를 인가하여 측정하였으며, 6.7%의 효율을 가졌다..

제작한 피드포워드 증폭기의 각 루프의 지연 시간은 최대 $\pm 0.5\lambda$ 이내의 오차를 가졌으며, 위상의 차이는 측정 대역 내에서 최대 $\pm 1.3^\circ$ 이내의 오차 범위를 나타냈다. 이러한 결과는 그림 2와 그림 3에 나타낸 바와 같이 제작된 피드포워드 증폭기의 각 루프의 지연 시간과 위상의 차이가 선형성 개선에 미치는 영향이 작음을 의미한다.

표 1은 전력 증폭기의 이득 평탄도에 대한 주 신호의 제거 특성을 측정한 결과이다. 전력 증폭기의 이득 평탄도에 따라 최소 20dB 이상의 제거 특성을 나타내었다. 따라서 제거되지 않고 남아있는 주 신호가 오차 증폭기에 미치는 영향이 매우 작음을 확인할 수 있다.

표 1. 전력 증폭기의 이득 평탄도에 대한 주 신호 제거 특성

MAGF (dB)	Signal Cancellation
0.1 <	30dB
0.25	26dB
0.5	24dB
1.0	22dB
1.5	20dB

전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향을 측정하기 위하여 전력 증폭기는 40MHz, 오차 증폭기는 40MHz와 80MHz의 대역에서 이득 평탄도를 각각 0.1dB~1.5dB 까지 변화시키면서 선형성 개선 양을 측정하였다. 그림 5는 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도를 40MHz 대역에서 변화시키면서 오프셋 주파수 5MHz 지점에서 측정한 결과이며, 그림 6은 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도를 각각 40MHz, 80MHz의 대역에서 변화시키면서 오프셋 주파수 5MHz에서 측정한 결과이다.

그림 5와 그림 6에 나타낸 바와 같이 오차 증폭기가 40MHz 대역에서 0.5dB 이내의 이득 평탄도를 나타냈을 때 전력 증폭기의 이득 평탄도의 변화가 1dB 이내의 범위에서는 최소 22.16dB 이상의 개선 효과가 있었다. 이 결과는 동일한 조건 하에서 오차 증폭기가 80MHz의 범위에서 측정한 결과와 0.31dB의 차이를 나타내며, 지연 시간과 위상의 미세한 차이에 의해 발생하였다. 그림 5에서 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화를 40MHz의 대역에서 측정하였을 때, 이득 평탄도의 편차가 증가함에 따라 선형성 개선 효과가 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 또한, 전력 증폭기의 이득 평탄도가 0.1dB~1.5dB 까지 변화할 때, 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화에 큰 영향이 없이

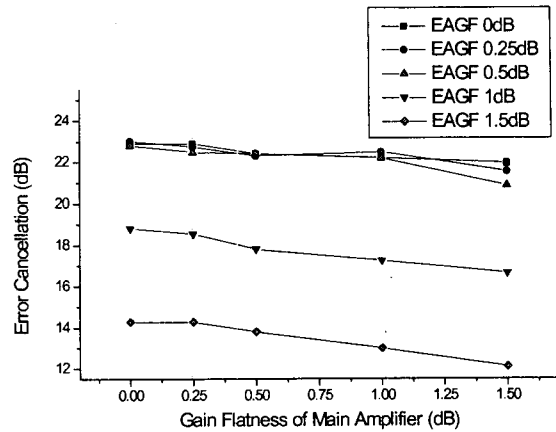


그림 6. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 40MHz)

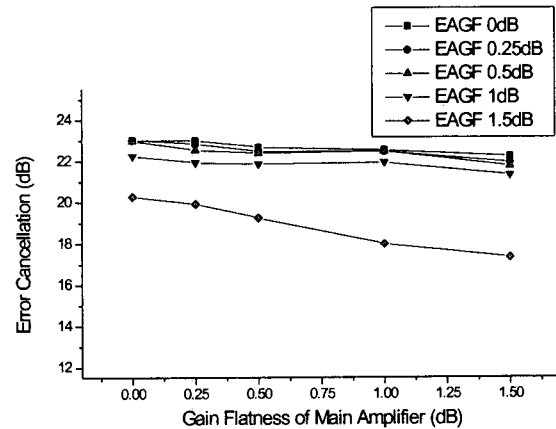


그림 5. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 80MHz)

선형성 개선 양의 차이는 전체적으로 약 2dB 정도이다. 이러한 결과로 전력 증폭기의 이득 평탄도가 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 미치는 영향이 오차 증폭기의 이득 평탄도에 의한 영향보다 매우 작음을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 본 논문을 위해 제작한 피드포워드 증폭기의 실험 결과이다. 그림 7은 최대의 선형성 개선 효과를 나타낸 경우를 측정한 그림이며, 전력 증폭기의 혼변조 특성과 비교하여 23.01dB의 개선 효과를 나타내었다. 그림 8은 그림 4에 나타낸 파일럿 신호를 이용한 피드포워드 증폭기의 실험 결과이다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 기본적인 피드포워드 구조와 컨트롤 회로를 이용하여 최저의 혼변조 특성을 찾는 경우 측정 결과의 차이는 출력 전력의 변화에 따라 0.13dB~0.41dB를 나타내었으며, 컨트롤 회로가 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 피드포워드 증폭기를 구성하는 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. IMT-2000 주

(참 고 문 헌)

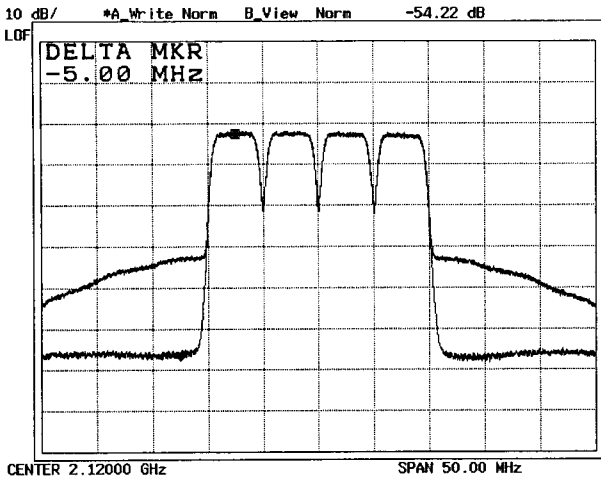


그림 7. 피드포워드 증폭기의 최대 선형성 개선 결과

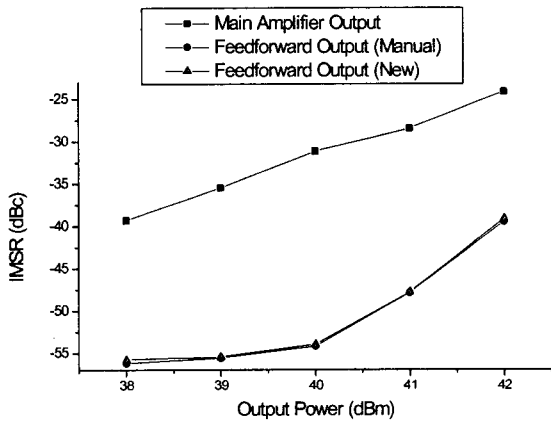


그림 8. 피드포워드 증폭기와 파일럿 컨트롤 회로를 이용한 피드포워드 증폭기의 혼변조 개선 특성

파수 대역에서 WCDMA 4FA 신호를 입력하여 전력 증폭기는 40MHz, 오차 증폭기는 40MHz와 80MHz의 대역에 대하여 이득 평탄도를 0.1dB~1.5dB 까지 변화시키면서 성능을 측정하였다. 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화를 40MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우 전력 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향은 2.19dB 이내였으며, 80MHz를 기준으로 측정하였을 경우는 2.95dB의 값을 나타냈다. 또한, 전력 증폭기의 이득 평탄도가 0.1dB~1.5dB 사이에서 변화할 때, 오차 증폭기의 이득 평탄도에 의한 선형성 개선 양의 차이는 40MHz 대역을 기준인 경우 9.84dB, 80MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우는 4.9dB의 값을 나타냈다. 또한, 오차 증폭기의 이득 평탄도를 40MHz의 대역을 기준으로 측정하였을 경우, 이득 평탄도의 편차가 증가함에 따라 선형성 개선 효과가 급격히 감소함을 확인하였다.

이러한 실험 결과로 전력 증폭기의 이득 평탄도 보다 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향이 더 중요함을 확인할 수 있었다. 또한, 파일럿 신호를 이용한 컨트롤 회로를 이용하여 측정된 결과와 최대의 선형성 개선을 나타냈을 때를 측정된 결과가 0.13dB~0.41dB의 차이를 나타내며, 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

- [1] Steve C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, pp. 179-208, 1999
- [2] Nick Potheary, Feedforward Linear Power Amplifiers, Artech House, pp. 43-77, 1999
- [3] 정용채, "혼변조 신호의 개별 차수 조정 Predistortion 선형화기 설계", 서강대학교, 1995
- [4] Hyun-Min Park, Dong-Hyun Baek, Kye-Ik Jeon, and Songcheol Hong, "A Predistortion Linearizer Using Envelope-Feedback Technique with Simplified Carrier Cancellation for Class-A and Class-AB Power Amplifiers", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 48, no. 7, pp. 898-904, June, 2000
- [5] Y.K.Gary Hau, Vasil Postoyalko, and John R. Richardson, "Design and Characterization of a Microwave Feed-Forward Amplifier with Improved Wide-Band Distortion Cancellation", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 1, pp. 200-203, Jan., 2001
- [6] Eid E. Eid and Fadhel M. Ghannouchi, "Adaptive Nulling Loop Control for 1.7-GHz Feedforward Linearization Systems", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 45, no. 1, pp. 83-86, Jan., 1997
- [7] R.J. Wilkinson and P.B. Kenington, "Specification of error amplifiers for use in feedforward transmitters", IEE Pro-G, vol. 139, no. 4, pp. 477-480, Aug., 1992
- [8] Peter B. Kenington, High-Linearity RF Amplifier Design, Artech House, pp. 262-267, 2000
- [9] Scott T. Behan, Feedforward Cancellation Amplifier Utilizing Dynamic Vector Control, US 5,508,657
- [10] Youngoo Yang, Youngsik Kim, Jaehyok Yi, Joongjin Nam, Bumman Kim, Wonwoo Kang, and Shinwook Kim, "Digital Controlled Adaptive Feedforward Amplifier for IMT-2000 Band", IEEE MTT-S, pp. 1487-1490, 2000
- [11] Robert E. Myer, Automatic Reduction of Intermodulation Products in High Power Linear Amplifiers, US 4,580,105, 1986
- [12] Derek L. Tattersil et al., High Dynamic Range Modulation Independent Feedforward Amplifier Network, US 5,307,022, 1994