

IMT-2000용 피드포워드 전력 증폭기의 이득 평탄도의 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Gain Flatness of Feedforward Power Amplifier for IMT-2000 Band

정 성 찬 · 박 천 석

Sung-Chan Jung · Cheon-Seok Park

요 약

본 논문은 IMT-2000 대역에서 동작하는 피드포워드 증폭기의 선형성 개선을 위한 이득 평탄도의 영향에 관한 것이다. 각 증폭기의 이득 평탄도에 대한 동작 특성을 조사하기 위하여 WCDMA 4FA 신호를 인가하여 최종 출력 10 W에서 측정하였다. 특히, 지연 선로, 위상, 크기의 부정합과 같이 선형성 개선에 영향을 미치는 요인 중 각 증폭기의 이득 평탄도의 변화에 따르는 선형성의 개선에 대하여 조사하였다. 전력 증폭기는 40 MHz, 오차 증폭기는 40 MHz, 80 MHz 대역에서 이득 평탄도를 변화시키면서 측정하였다. 측정 결과, 오프셋 5 MHz 지점에서 20 dB 이상의 개선 효과를 나타내기 위해서는 전력 증폭기는 1.5 dB, 오차 증폭기는 0.5 dB 이내의 이득 평탄도를 가져야 함을 확인하였다. 또한, 오차 증폭기의 이득 평탄도에 따라 피드포워드 증폭기의 선형성이 급격히 변화하였으며, 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 더 중요한 요소임을 확인하였다.

Abstract

This paper reports the effects of gain flatness for linearity improvement of feedforward power amplifier for IMT-2000 band. To investigate the operational characteristics for gain flatness of each amplifier, WCDMA 4FA input signal was used and measured 10 W output power. Especially, linearity improvement for variation of gain flatness of each amplifier was investigated that have an effect on linearity improvement such as delay line, phase, and amplitude imbalances. Variation of gain flatness of main amplifier is 40 MHz and of error amplifier is 40 MHz and 80 MHz bandwidth, respectively. Measured results, gain flatness of main amplifier is less than 1.5 dB and of error amplifier is less than 0.5 dB for more than 20 dB improvement at 5 MHz offset. In addition to that results, the characteristics of feedforward amplifier are drastically varied by gain flatness of error amplifier and it is shown that gain flatness of error amplifier is more important factor for linearity improvement.

Key words : Feedforward, Gain Flatness, Amplifier, IMT-2000

I. 서 론

현재의 디지털 통신 시스템 환경에서 사용되는 전력 증폭기는 최대 전력 효율을 얻기 위하여 포화 영역 근처에서 증폭기를 동작시키게 된다. 포화영역

근처에서 동작하는 증폭기는 비선형 특성에 의해 혼변조 신호가 발생하게 되며, 혼변조 신호는 원 신호에 근접하여 발생하므로 필터로 제거하기 어렵고, 인접 채널의 신호에 영향을 주게 된다^{[1],[2]}. 이러한 고출력 증폭기의 비선형 특성 및 왜곡에 대한 문제

성균관대학교 정보통신공학과(Dept. of Information, Communication and Computer Engineering, SungKyunKwan University)

· 논문 번호 : 20030421-064

· 수정완료일자 : 2003년 6월 9일

를 개선하기 위하여 여러 가지 선형화 방법이 개발되어 왔으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 선형화 기법으로는 전치 왜곡^{[3],[4]} 방법과 피드포워드^{[5]~[8]} 방법이 있다.

전치 왜곡 방법은 선형화시킬 전력 증폭기의 비선형성을 조사하여 전력 증폭기의 비선형성과 반대의 특성을 나타내는 비선형 회로를 전력 증폭기의 앞단에 삽입하는 방법이다. 이러한 전치 왜곡 방법은 회로의 구조가 간단하며, 효율이 높다는 장점이 있지만 사용 가능한 주파수 대역폭이 좁고 외부 환경의 변화에 따른 특성의 변화가 심하다는 단점이 있다.

피드포워드 방법은 전치 왜곡 방법과 비교하여, 회로가 복잡하고 효율이 비교적 낮다는 단점을 가진다. 이러한 단점에도 불구하고 피드포워드 전력 증폭기는 사용 가능한 주파수 대역폭이 넓고 선형성의 개선 정도가 크며, 온도의 변화와 같은 외부 환경의 변화에 따르는 특성의 변화가 작다는 장점을 가지고 있다. 그러나 IMT-2000과 같이 매우 넓은 주파수 대역에서 피드포워드 전력 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 II장에서는 기본적인 피드포워드의 동작 원리를 소개하고, III장에서는 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 영향을 미치는 이득 평탄도, 위상 및 지연 시간의 불일치에 대해 살펴보겠다. 이어서, IV장에서는 측정 결과를 나타내고, 마지막으로 V장에서는 본 논문의 최종 결론을 제시하였다.

II. 피드포워드 선형화 방법

일반적인 피드포워드 선형화 구조는 그림 1에 나타낸 바와 같이 두 개의 루프를 가지는 형태로 구성되어 있다. 첫 번째 루프에서는 입력 신호가 전력 분배기를 통해 두 개의 경로로 분리가 된다. 분리된 신호 중 하나는 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기를 지난 후 전력 증폭기에서 증폭된다. 전력 증폭기의

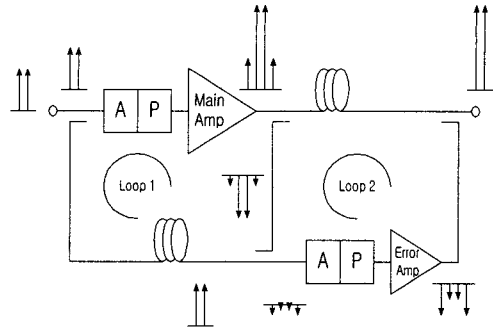


그림 1. 기본적인 피드포워드 선형화 구조
Fig. 1. Basic Feedforward linearization structure.

출력 부분에는 순수한 입력 신호의 증폭된 성분과 증폭기의 비선형 특성에 의해서 발생한 혼변조 신호도 존재하게 되며, 혼변조 신호를 포함한 증폭기의 출력 신호 중 일부가 지연 선로를 지난 입력 신호와 결합된다. 두 경로를 지난 신호의 지연 시간과 크기가 동일하고 위상이 180° 차이가 나면 전력 증폭기에서 발생한 혼변조 신호만이 남게 된다. 즉, 첫 번째 루프는 전력 증폭기에서 발생한 혼변조 신호를 추출하는 루프이며, 이를 통상적으로 1st 루프 또는 신호 제거 루프라고 부른다.

두 번째 루프에서는 신호제거 루프에서 얻어진 순수한 혼변조 신호를 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기 및 오차 증폭기를 이용하여 원하는 출력 전력과 위상을 가지는 신호로 증폭시킨 후 결합기를 이용하여 지연 선로를 통과한 전력 증폭기의 출력 신호와 재결합시킨다. 결합된 전력 증폭기의 혼변조 신호 성분과 오차 증폭기를 통하여 증폭된 혼변조 신호 성분은 첫 번째 루프에서처럼 지연 시간과 크기가 동일하고 위상의 차이가 180°가 되면 완전하게 제거된다. 이를 통상적으로 2nd 루프 또는 오차 신호 제거 루프라고 부른다.

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

Ⅲ. 이득 평탄도, 위상 및 지연 시간의 불일치에 의한 영향

피드포워드 선형화 구조에서 두 경로의 지연 시간이 동일한 경우, 크기와 위상의 불일치에 따른 신호 제거 특성을 그림 2에 나타내었다^{[9],[10]}. 그림 2에 나타낸 바와 같이 전체 대역 내에서 25 dB 이상의 선형성 개선 효과를 가지기 위해서 크기가 동일한 경우 위상의 차이가 약 $180^\circ \pm 3^\circ$ 이내, 위상의 차이가 180° 인 경우 크기의 차이가 약 0.5 dB 이내의 오차 범위를 가져야 한다. w_1, w_2 의 주파수 성분을 가지는 two-tone 입력 신호의 경우, 전력 증폭기가 대역 내에서 중심 주파수인 $(w_1 + w_2)/2$ 를 중심으로 ± 0.5 dB의 이득 평탄도를 갖는다면 지연 시간이 일치하고 위상이 180° 차이가 나더라도 25 dB 이상의 주 신호를 제거하기 어렵다. 그러나 일반적인 전력 증폭기는 혼변조 특성이 -30 dBc 이상이 되도록 설계한다. 따라서 20 dB 이상의 주 신호 제거 특성을 갖는다면 남아있는 주 신호가 오차 증폭기의 선형성에 미치는 영향은 미미하기 때문에 남아있는 주 신호가 전체 피드포워드 증폭기의 선형성에 미치는 효과는 크지 않다.

그러나 20 MHz의 주파수 차이를 갖는 two-tone 신호가 전력 증폭기로 입력되었을 경우, 주 신호가 제거된 후 오차 증폭기의 입력이 되는 3차 혼변조 신호는 60 MHz, 5차 혼변조 신호는 100 MHz의 주파수 대역을 가지게 된다. 즉, 피드포워드 증폭기의 최종 출력에서 3차, 5차 혼변조 신호를 25 dB 이상 제거하기 위해서는 오차 증폭기의 이득 평탄도가

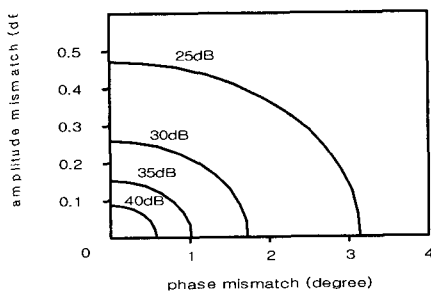


그림 2. 위상 불일치 및 크기 불일치에 따른 제거 특성
Fig. 2. Cancellation characteristics of phase mismatch and amplitude mismatch.

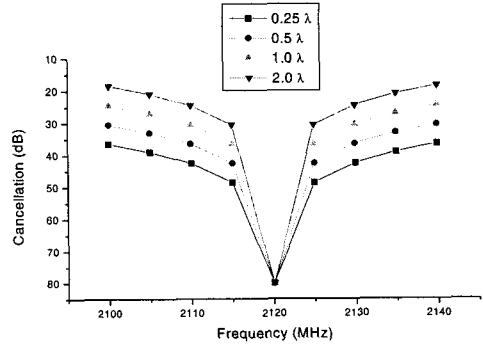


그림 3. 지연 시간의 불일치에 따른 제거 특성
Fig. 3. Cancellation characteristics of time delay mismatch.

± 0.5 dB인 대역이 주 신호의 대역보다 5배 이상이 되어야 한다. 이러한 현상은 대역폭을 갖는 신호에 대해서도 유사하다. 전력 증폭기에서 발생한 혼변조 신호를 제거하기 위하여 100 MHz 이상의 대역에서 일정한 이득 평탄도를 갖도록 오차 증폭기를 제작하는 것은 매우 어려운 작업이다. 따라서 확보해야 할 오차 증폭기의 이득 평탄도를 주 신호의 대역과 비교하여 결정하는 것이 중요하다.

이득 평탄도 및 위상의 불일치와 함께 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 영향을 미치는 또 다른 요인은 지연 시간의 불일치이다. 크기가 동일하고 위상의 차이가 180° 인 경우 IMT-2000 주파수 대역에서 지연 시간의 차이에 따르는 신호 제거 특성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 지연 시간이 $\pm 0.5 \lambda$ 만큼의 차이를 나타내면 중심 주파수로부터 20 MHz 떨어진 지점에서는 30 dB 이상의 제거 특성을 나타내기 어렵다. 따라서 피드포워드 증폭기가 높은 선형성 개선을 나타내기 위해서는 지연 시간, 위상 및 이득 평탄도가 전체 대역 내에서 일정하게 유지되어야 한다.

Ⅳ. 측정결과

전력 증폭기 및 오차 증폭기의 이득 평탄도가 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 미치는 영향을 조사하기 위해 IMT-2000 대역에서 동작하는 증폭기를 제작하였다. 제거되지 않은 잔여 신호에 의해 발생하는 오차 증폭기의 포화에 의한 영향을 최소화하기 위하여 주 증폭기와 오차 증폭기의 전력 비

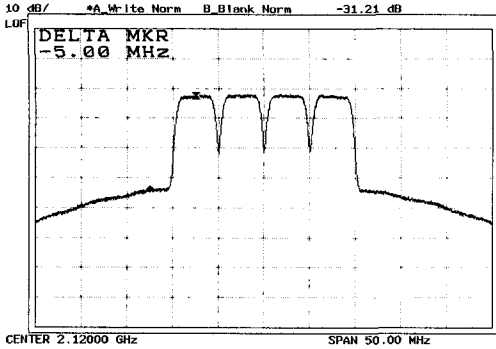


그림 4. 전력 증폭기의 혼변조 특성
Fig. 4. IM characteristic of main amplifier.

를 2:1로 설계하였다. 제작된 피드포워드 증폭기는 출력 전력 10 W, WCDMA 4FA 신호를 인가하여 측정하였으며, 6.7 %의 효율을 나타냈다.

그림 4는 전력 증폭기의 혼변조 특성을 측정한 결과이다. 출력 전력 42 dBm, 오프셋 주파수 5 MHz에서 -31.21 dBc, 오프셋 주파수 10 MHz에서 -33.73 dBc의 IMSR을 나타내었다. 그림 5는 전력 증폭기의 이득 평탄도를 측정한 것이다. 중심 주파수 2120 MHz, 40 MHz의 대역폭에서 ± 0.06 dB의 이득 평탄도를 가졌다. 또한 전력 증폭기의 이득 평탄도에 따른 주 신호 제거 특성은 표 1에 나타난 바와 같이 전력 증폭기의 이득 평탄도에 따라 최소 20 dB 이상의 제거 특성을 나타내었다. 따라서 제거되지 않고 남아있는 주 신호가 오차 증폭기의 선형성에 미치는 영향은 매우 작다. 그림 6은 오차 증폭기의 이득 평탄도를 측정한 것이며, 표 2에 출력 전력 변화에 대한 각 증폭기의 이득 평탄도의 변화를 나타내었다.

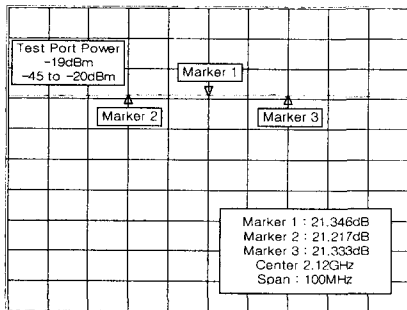


그림 5. 전력 증폭기의 이득 평탄도
Fig. 5. Gain flatness of main amplifier.

표 1. 주 신호 제거 특성

Table 1. Cancellation characteristics of main signal.

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

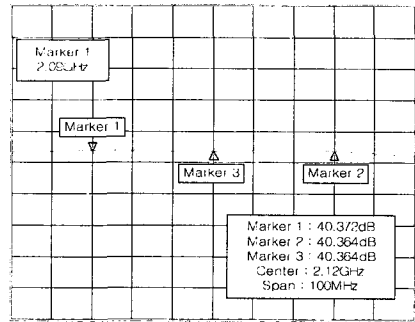


그림 6. 오차 증폭기의 이득 평탄도
Fig. 6. Gain flatness of error amplifier.

표 2. 출력 전력에 대한 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도

Table 2. Gain flatness of main and error amplifier for output power.

MAOP	MAGF	EAOP	EAGF
44 dBm	± 0.01 dB	32 dBm	± 0.04 dB
42 dBm	± 0.06 dB	30 dBm	± 0.004 dB
40 dBm	± 0.03 dB	28 dBm	± 0.01 dB
38 dBm	± 0.08 dB	26 dBm	± 0.03 dB

제작한 피드포워드 증폭기의 첫 번째 루프와 두 번째 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 나타난 바와 같이 지연 시간과 위상의 차이가 피드포워드 증폭기의 선형성 개선에 미치는 영향은 매우 작음을 의미한다. 따라서 각 증폭기의 이득 평탄도가 미치는 영향을 조사하기 위해 각 증폭기의 이득 평탄도를 인위적으로 변화시키면서 피드포워드 증폭기의 특성을 측정하였다.

전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도에 의

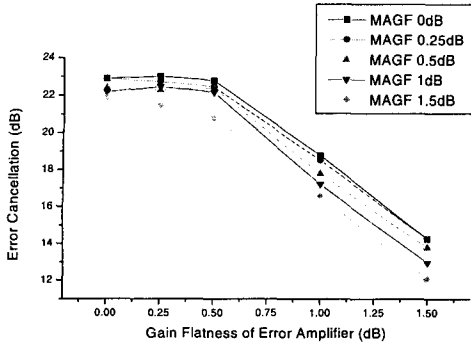


그림 7. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz)
Fig. 7. IM cancellation characteristics of feed forward amplifier(MAGF 40 MHz, EAGF 40 MHz).

한 영향을 측정하기 위하여 전력 증폭기는 40 MHz, 오차 증폭기는 40 MHz와 80 MHz의 대역에서 이득 평탄도를 0.1 dB~1.5 dB까지 변화시키면서 선형성 개선량을 측정하였다. 그림 7과 그림 8은 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도를 각각 40 MHz 대역에서 변화시키면서 오프셋 주파수 5 MHz에서 측정된 결과이다. 그림 9와 그림 10은 전력 증폭기의 이득 평탄도는 40 MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도는 80 MHz 대역에서 변화시키면서 오프셋 주파수 5 MHz에서 측정된 결과이다. 그림 7과 그림 9에 나타난 바와 같이 오차 증폭기가 40 MHz 대역에서 0.5 dB 이내의 이득 평탄도를 나타냈을 때 전력 증폭기의 이득 평탄도의 변화가 1 dB 이내의 범위에서는 최소 22.16 dB 이상의 개선 효과가 있었다. 이는 동일한 조건 하에서 오차 증폭기가 80 MHz의 범위에서 측정된 결과와 0.31 dB의 차이를 나타내며, 지연 시간과 위상의 미세한 차이에 의해서 발생하였다. 이러한 현상은 오프셋 주파수가 10 MHz인 경우에도 유사하게 나타난다. 또한, 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화를 40 MHz의 대역에서 측정하였을 때, 이득 평탄도의 편차가 증가함에 따라 선형성 개선 효과가 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 그림 8과 그림 10에서 전력 증폭기의 이득 평탄도가 0.1 dB~1.5 dB까지 변화할 때, 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화에 큰 영향이 없이 선형성 개선 양의 차이는 전체적으로 약 2

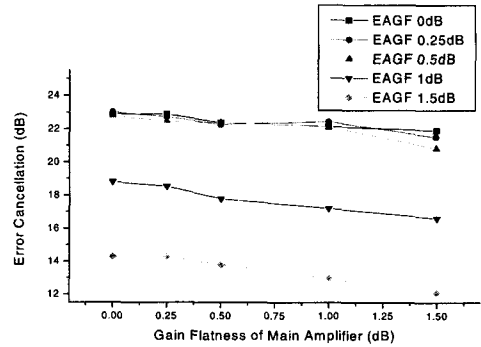


그림 8. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz)
Fig. 8. IM cancellation characteristics of feed-forward amplifier(MAGF 40 MHz, EAGF 40 MHz).

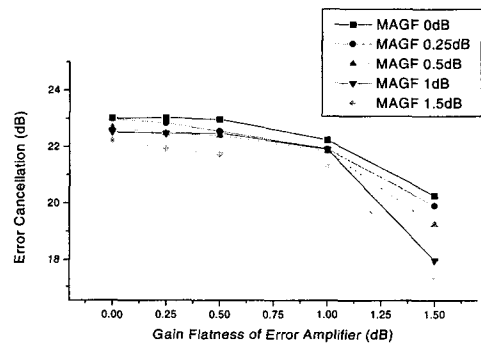


그림 9. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 80 MHz)
Fig. 9. IM cancellation characteristics of feed-forward amplifier(MAGF 40 MHz, EAGF 80 MHz).

dB 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 11은 본 논문에서 제작한 전력 증폭기와 오차 증폭기가 최소의 이득 평탄도를 가지면서 피드포워드 증폭기가 최대의 선형성 개선 효과를 나타낸 경우를 측정된 그림이다. 그림 4에 나타난 전력 증폭기의 혼변조 특성과 비교하여 23.01 dB의 개선 효과를 나타내었다.

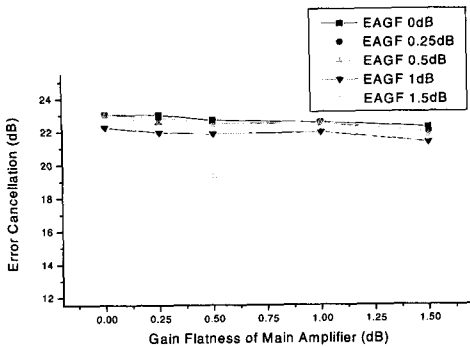


그림 10. 피드포워드 증폭기의 오차 신호 제거 특성 (전력 증폭기의 이득 평탄도 40 MHz, 오차 증폭기의 이득 평탄도 80 MHz)

Fig. 10. IM cancellation characteristics of feedforward amplifier(MAGF 40 MHz, EAGF 80 MHz).

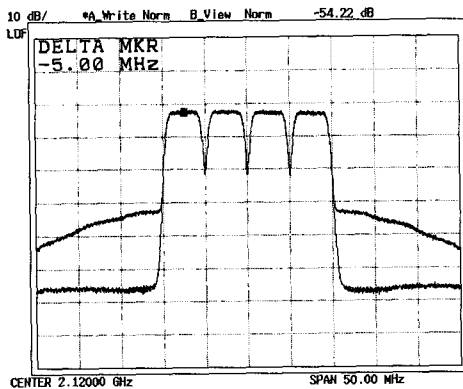


그림 11. 피드포워드 증폭기의 측정 결과
 Fig. 11. Measurement result of feedforward amplifier.

V. 결 론

피드포워드 증폭기를 구성하는 전력 증폭기와 오차 증폭기의 이득 평탄도가 선형성 개선에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. IMT-2000 주파수 대역인 2120 MHz에서 20 MHz의 대역을 갖는 WCDMA 4FA 신호를 입력하여 전력 증폭기는 40 MHz, 오차 증폭기는 40 MHz와 80 MHz의 대역에 대하여 이득 평탄도를 0.1 dB ~ 1.5 dB까지 변화시키면서 피드포워드 증폭기의 성능을 측정하였다. 오차 증폭기의 이득 평탄도의 변화를 40 MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우 전력 증폭기의 이득 평탄도가 선형

성의 개선에 미치는 영향은 최대 2.19 dB 이내였으며, 80 MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우는 최대 2.95 dB의 값을 나타냈다. 또한, 전력 증폭기의 이득 평탄도가 0.1 dB ~ 1.5 dB 사이에서 변화할 때, 오차 증폭기의 이득 평탄도에 의한 선형성 개선량의 차이는 40 MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우는 최대 9.84 dB, 80 MHz 대역을 기준으로 측정하였을 경우는 최대 4.9 dB의 값을 나타냈다.

전력 증폭기의 이득 평탄도가 1 dB 이내인 경우, 오차 증폭기가 40 MHz의 대역에서 0.5 dB 이내의 이득 평탄도를 가졌을 때, 최소 22.16 dB 이상의 개선 효과를 나타냈다. 이 결과는 오차 증폭기가 80 MHz의 범위에서 측정한 결과와 0.31 dB의 차이를 가짐을 의미한다. 또한, 오차 증폭기가 40 MHz의 대역을 갖는 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, 오차 증폭기가 주 신호 대역보다 2배 이상의 대역에서 이득 평탄도의 편차를 줄이는 것이 높은 선형성 개선 효과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Cteve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, pp. 179-208, 1999.
- [2] Nick Pothecary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, pp. 43-77, 1999.
- [3] 정용채, "혼변조 신호의 개별 차수 조정 Pre-distortion 선형화기 설계", 서강대학교, 1995년.
- [4] Hyun-Min Park, Dong-Hyun Baek, Kye-Ik Jeon and Songcheol Hong, "A Predistortion Linearizer Using Envelope-Feedback Technique with Simplified Carrier Cancellation Scheme for Class-A and Class-AB Power Amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 7, pp. 898-904, Jun. 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] Scott T. Behan, *Feedforward Cancellation Amplifier Utilizing Dynamic Vector Control*, US 5, 508, 657, 1996.
- [7] Eid E. Eid, 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.
- [8] 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.
- [9] R. J. Wilkinson, P. B. Kenington, "Specification of error amplifiers for use in feedforward transmitters", *IEE Pro-G*, vol. 139, no. 4, pp. 477-480, Aug. 1992.
- [10] Peter B. Kenington, *High-Linearity RF Amplifier Design*, Artech House, pp. 262-267, 2000.

정 성 찬



1998년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2000년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전력 증폭기 및 선형

화기 설계

박 천 석



1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
 1995년~현재: 성균관대학교 정보

통신공학과 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 능동 및 수동 소자, 안테나, 전력 증폭기 및 선형화기 설계