

# Feed-forward 선형화 방식을 적용한 송신 시스템 설계

## Application of Feed-forward Linearization Method to A Transmitter System

김 상 규\*, 김 경 태\*\*

(Sang-Gyu Kim\*, Kyung-Tae, Kim\*\*)

\*경원대학교 대학원 전자공학과 \*\*경원대학교 전자 전기정보공학부

(접수일자: 2003년 12월 4일; 채택일자: 2004년 5월 19일)

본 논문에서는 전력 증폭기의 선형화를 위해 제안된 feed-forward 선형화 방식을 IMT-2000용 송신 시스템에 적용한 새로운 송신 시스템 구조를 제안한다. 이 시스템에서 feed-forward 구조는 왜곡 성분을 비교하고 제거하기 위해 보조 신호(reference signal)을 필요로 하는데, 이 보조신호는 무시할 정도로 낮은 왜곡을 갖도록 낮은 입력 동작 범위에서 동작하는 두 번째 변조기에서 만들어 진다. 이런 구조로 한 결과 송신 시스템에서 증폭기뿐만 아니라 변조기의 왜곡을 줄일 수 있다는 큰 장점이 있다. 본 논문의 시스템은 Agilent 사의 EEssoft ADS ver.2002를 사용하여 설계하였으며, 입력은 1.98GHz 주파수 대역에서 2MHz의 주파수 간격을 갖는 2-tone으로 하였고, 약 49.95dB의 IMD 개선 특성을 얻어, 본 논문에서 제안하는 시스템은 간단함과 선형성을 동시에 제공할 수 있다는 것을 입증하였다.

**핵심용어:** 피드포워드, 증폭기, 선형화

**투고분야:** 음향 통신기술 분야 (6.4)

In this paper, a transmitter system for IMT-2000 using feed-forward linearization method was proposed to linearize power amplifier. The feed-forward structure needs a reference signal to compare and neutralize distortion : this is achieved through the second modulator which is operated at very low input level to obtain a signal with a negligible distortion. Therefore, this structure can reduce distortion of modulator as well as power amplifier. This is the advantage over the existing system structure. The proposed transmitter system is designed and simulated by Agilent ADS ver.2002. A two tone test for the system is done at 1.98GHz center frequency with frequency spacing of 2MHz. The reduction of Inter-Modulation Distortion(IMD) is around 49.95dB. This proposed system offers an excellent combination of linearity and simplicity.

**Keywords:** Feed-forward, Amplifier, Linearization.

**ASK subject classification:** Acoustic Communication

### I. 서 론

이동통신 및 무선통신의 급격한 발전과 엄청난 수요의 증가로 최근 무선통신 기술은 광 대역 시스템을 지향하는 추세이며, 이러한 상황에 맞게 사용자들에게 더 좋은 서비스를 제공하기 위해 미래의 디지털 통신은 높은 대역 효율을 갖는 변조기술을 요구한다. 일반적으로 변조방식은

constant envelope 변조방식과 variable envelope 변조 방식 두 방식으로 구분할 수 있다. Constant envelope 변조방식은 주로 위성통신에 사용되며, 정보가 포락선 안에 있지 않기 때문에 매우 높은 효율을 갖는 반면 대역효율을 낮다는 단점이 있다. 반면 variable envelope 변조방식은 같은 대역폭을 갖는 다른 변조방식에 비해 높은 데이터율(data-rate)를 제공할 수 있으나 변조기나 전력 증폭기 같은 비선형 성분에 의해 스펙트럼 확산이 일어나 ACI (Adjacent Channel Interference)같은 문제가 발생하여 시스템의 성능저하를 가져오는데 이러한 문제를 해결하기 위한 선형화 방식으로는 back-off 방식,

책임저자: 김 상 규 (ksg@web.kyungwon.ac.kr)  
461-701 경기도 성남시 수정구 복정동 산 65 경원대학교 공학관  
512호 무선통신연구실  
(전화: 031-750-5475; 팩스: 031-750-5475)

feedback 방식, predistortion 방식, feed-forward 방식과 같은 여러 가지 방식이 있으나 이중 feed-forward 방식은 비선형성에 의한 왜곡 제거율이 가장 좋은 방식이라고 발표되었다[1],[2].

Feed-forward 기술의 기본 개념은 왜곡신호가 주 증폭기에 의해 생성되면, 비선형 증폭기의 출력은 선형적으로 증폭된 신호와 왜곡신호가 합쳐진 것이라고 간주될 수 있다. 그러므로 왜곡신호가 없는 출력신호는 비선형 증폭기의 출력에서 왜곡신호를 없애는 것에 의해 만들어질 수 있다. 따라서 출력신호 중 왜곡신호를 없애기 위한 feed-forward 구조는 두개의 루프로 구성되며, 두 루프중 하나는 예상되는 왜곡 신호를 만들어내는 부분이고 다른 하나의 루프는 비선형 증폭기 출력 중 왜곡 성분을 없애는 부분이다.

본 논문에서는 위에서 언급한 feed-forward 선형화 방식을 IMT-2000 (International Mobile Telecommunication-2000)용 송신기에 적용하여 송신기 내부에 비선형 성분들에 의해 발생하는 IMD (Inter-Modulation Distortion) 성분을 줄이기 위한 새로운 구조를 제시하였으며, Agilent 사의 EESoft ADS ver.2002를 사용하여 설계하고 시뮬레이션 하여 시스템이 간단해 짐과 동시에 선형성이 개선된 것을 입증하였다.

## II. Feed-forward 선형화 이론

일반적으로 전력 증폭기에 단일 주파수의 입력신호를 인가하면 출력 이득의 저하와 위상의 지연이 일어난다. 이것은 입력신호의 크기가 증폭기의 포화영역에 가까워짐에 따라 AM-to-AM과 AM-to-PM효과가 나타나기 때문이다[3],[4]. 또한 여러 주파수의 신호를 입력하면 입력 신호와 동일한 주파수를 갖는 출력 신호 외에 각각 다른 비선형 특성을 갖는 혼변조 왜곡 신호 성분들이 생긴다. 그림 1은 두개의 반송파를 인가한 증폭기의 출력을 나타낸다. 기존의 주파수 외에 발생한 혼변조 성분들은 증폭기가 낼 수 있는 에너지를 소모하여 기본 주파수의 출력을 저하시키며, 특히 기본주파수와 근접하게 위치하여 filter로도 제거하기 힘든 3차 혼변조 신호 성분들 ( $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$ )의 영향이 가장 크다. 따라서 이러한 혼변조 신호 성분들을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법이 feed-forward 선형화 방식이다.

그림 2는 일반적인 feed-forward 선형화 방식을 나타낸다. 동작원리는 다음과 같다. 그림 2에서 2개의 반송파가 선형화기 입력 (RF<sub>in</sub>)으로 인가되면 Wilkinson 전력 분배기에 의해 반송파가 주 경로 (A)와 보조경로 (A')로 같은 크기로 나누어진다. 이때 각 지점 A와 A'에서의 신호 파형은 그림 3-(a)와 같다. 주 경로의 반송파는 전력 증폭기를 통과 (B)하면서 증폭기의 비선형 특성으로 인하여 그림 3-(b)와 같이 반송파의 증폭과 함께 혼변조 성분들이 함께 발생하게 된다. 보조 경로에서는 주 경로 A-B에서 전력 증폭기를 통과하는데 발생된 지연시간을 지연선로 (B')를 사용하여 보상하여 준다. 주 경로에서 전력 증폭기의 출력신호는 방향성 결합기를 통해 일부는 손실 없이 주 경로의 지연선로로 전달 (D)되고 일부는 90도의 위상차를 갖고 가변 감쇠기에 의하여 일정량 감쇠

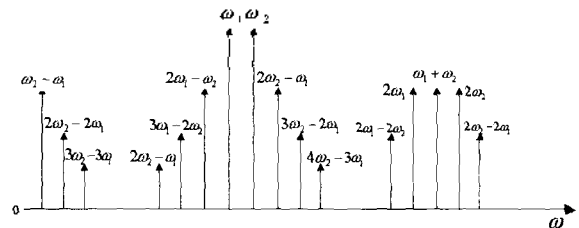


그림 1. 두개의 반송파 입력을 갖는 증폭기의 출력 스펙트럼  
Fig 1. Output spectrum of amplifier with two-tone carrier input.

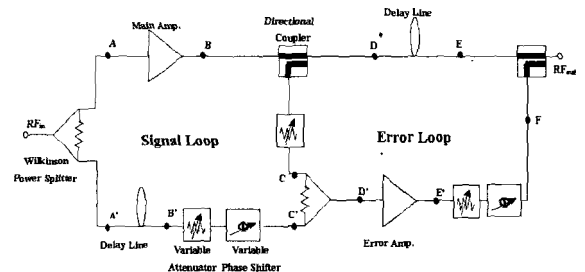


그림 2. 일반적인 feed-forward 선형화 방식  
Fig 2. A general feed-forward linearization method.

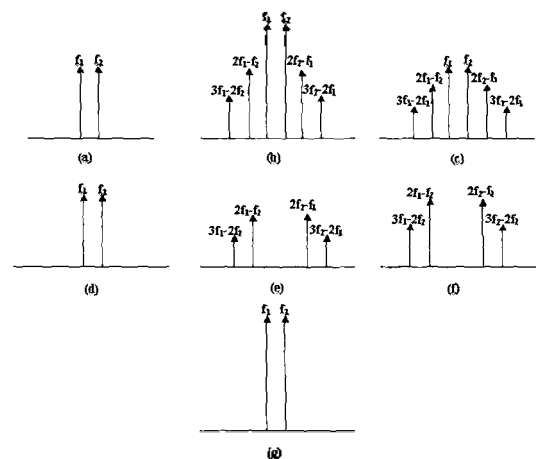


그림 3. 일반적인 feed-forward 선형화 방식의 각 부부의 출력 스펙트럼  
Fig 3. Each section's output spectrum of general feed-forward linearization.

되어 보조 경로의 Wilkinson 전력 결합기에 입력된다. 이때 Wilkinson 전력 결합기에 입력되는 신호 파형은 그림 3-(c)와 같다. 보조 경로에서 지연 선로를 통과한 신호는 가변 감쇠기와 위상 변환기에 의하여 주 경로에서 Wilkinson 전력 결합기로 입력되는 반송파 성분과 크기는 같고 위상이 180° 차이가 나도록 한다. 따라서 보조 경로로부터 Wilkinson 전력 결합기에 입력되는 신호는 그림 3-(d)와 같다. 주 경로와 보조 경로로부터 Wilkinson 전력 결합기에 입력된 신호들이 결합하면 그림 3-(e)와 같이 반송파 신호는 제거되고 혼변조 신호만 남게 된다. 보조 경로의 Wilkinson 전력 결합기에서 나온 혼변조 성분만을 가진 신호는 주 경로의 혼변조 신호에 비해서 상대적으로 작기 때문에 여러 증폭기를 사용하여 그림 3-(f)와 같이 증폭시킨다. 주 경로에서 방향성 결합기를 통과한 (D) 고출력 증폭기의 출력 신호는 지연선로를 보상하여 방향성 결합기에 입력된다. 이때 신호 파형은 그림 2-(b)와 같이 변함이 없다. 보조 경로에서 여러 증폭기를 통과한 신호는 가변 감쇠기와 위상 변환기를 이용하여 주 경로에서 방향성 결합기로 입력되는 신호와 크기는 같고 위상은 180° 차이가 나도록 결합한다. 따라서 보조경로에서 방향성 결합기에 입력되는 신호는 그림 3-(f)와 같다. 주 경로와 보조 경로로부터 방향성 결합기에 입력된 신호들이 결합하면 그림 3-(g)와 같이 혼변조 신호는 제거되고 입력된 반송파만 증폭되어 나온다[5].

### III. Feed-forward 선형화 방식을 적용한 송신 시스템 설계

그림 4는 본 논문에서 제시하는 feed-forward 선형화 방식을 적용한 송신 시스템 구조를 보여준다. Pulse-shaping filter를 사용하여 대역 제한시킨 수신 주파수 대역신호는 주신호 (Main Signal)과 보조신호(Reference

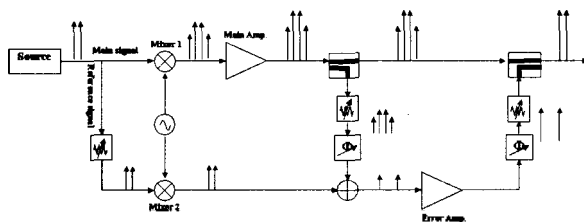


그림 4. Feed-forward 선형화 방식을 적용한 송신시스템  
Fig 4. Feed-forward linearization method applied to transmission system structure.

Signal)로 나뉜다. 주신호는 바로 혼합기1(Mixer1)에 의해 바로 송신주파수 대역으로 상향 변환되어 주 증폭기(Main Amp.)로 입력되고, 보조신호는 혼합기2 (Mixer2)의 출력이 선형성을 유지할 수 있는 범위로 입력 전력을 낮추기 위해 감쇠기를 통해 감쇠된 후 혼합기 2에 입력된다. 낮은 전력으로 혼합기2에 입력된 보조신호는 혼합기1 출력에 비해 상대적으로 낮은 IMD를 갖게 되므로 왜곡성분을 비교하고 제거하기 위해 사용되는 신호로 사용된다. 다른 부분의 동작원리는 feed-forward 선형화 이론에서 설명한 일반적인 feed-forward 방식과 같다. 본 시스템 설계 시 주의하여야 할 것은 왜곡성분이 전력 증폭기 뿐 아니라 혼합기에서도 발생한다는 것이다. 따라서 전력 증폭기의 왜곡 성분 뿐 아니라 혼합기에서 생성되는 왜곡 성분을 줄이는 것이 본 송신 시스템을 선형화 시키는 중요한 부분이라 할 수 있겠다. 본 연구에서는 double balanced mixer 형태를 갖는 수동 혼합기 (passive mixer)를 송신 주파수 대역으로 상향 변환된 신호를 생성하기 위한 변조기로 사용하고, 이렇게 생성된 신호를 제안된 feed-forward 송신시스템에 적용하기 위해 혼합기에 입력되는 입력신호 전력의 크기 대 혼합기의 출력 사이에 비선형 왜곡 관계를 사용한다.

#### 3-1. 혼합기 모델

그림 5는 본 논문에서 balanced modulator로 사용된 balanced diode mixer를 보여준다[6]. 네 개의 다이오드로 구성된 변조기는 기저대역 신호 스위치로 잘 알려져 있으며, LO신호에 의해서 조절된다. 다이오드 전류는 다이오드의 바이어스 전압에 관계가 있으며, transformer가 손실이 없다는 가정 하에 balance modulator는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{mod} = \gamma \cdot s(t) \cdot e^{\beta_{v_{LO} + av_i}} \tag{1}$$

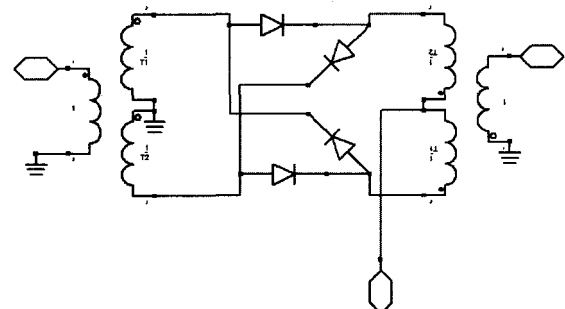


그림 5. 밸런스 다이오드 변조기  
Fig 5. Balanced diode modulator

여기서,  $s(t)$ 는 +1과 -1 사이의 값을 갖는 스위치 함수이고,  $\gamma$ 는 balun, 부하 임피던스에 관련된 상수이며,  $\alpha$ 는 balun 특성상수이다. 또한  $\beta$ 는 다이오드와 balun 특성에 관련된 상수이다[7]. 게다가 변조기의 balancing 효과 때문에 출력으로 전달되는 전압함수는 기수대칭 구조를 가지므로, LO의 모든 짝수 차 하모닉들은 제거된다. 입력인 기저대역의 전압이 작을 경우, 식 (1)은 식 (2)처럼 쓰여질 수 있다.

$$V_{\text{mod}} \approx \gamma \cdot v_i \cdot e^{\beta v_{LO}} \cdot s(t) \quad (2)$$

식 (2)는 기저대역의 전압이 작을 경우, 변조기의 출력 전압이 입력 전압  $v_i$ 에 선형적으로 비례하게 된다는 것을 보여준다. 따라서 기저대역의 신호가 작을 때, 변조기의 출력신호는 왜곡 성분이 없는 신호로 나오며 그림 4에서처럼 이를 feed-forward 시스템에 적용시킬 수 있다는 것을 설명해준다. 그림 6은 본 논문에서 사용된 혼합기의 입력전력 변화에 따른 출력의 3차 IMD 변화를 나타낸 그림으로 입력 전력레벨이 작아질수록 3차 IMD 성분 역시 작아지는 것을 보여주므로 왜곡 성분을 비교하고 제거하기 위한 보조 신호를 제공하는 부분이라 할 수 있다.

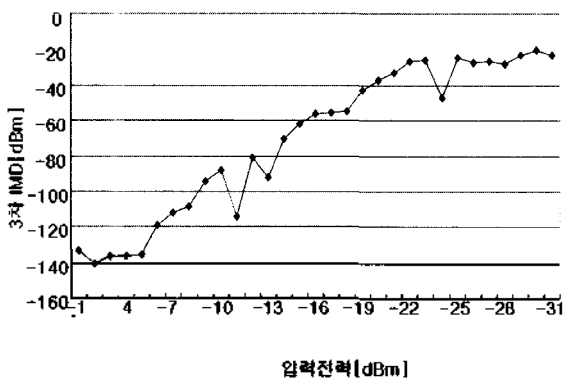


그림 6. 혼합기의 입력 전력 대 3차 IMD 특성  
Fig 6. Input power vs. 3 order IMD characteristic of mixer.

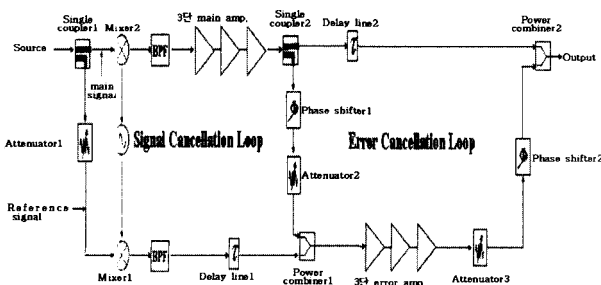


그림 7. 전체 시스템 블록도  
Fig 7. Overall system block.

### IV. 시스템 설계 및 Simulation

본 논문에서는 Agilent 사의 ADS ver.2002를 사용하여 시스템 설계 및 HB(Harmonic Balance) simulation 하였다. 그림 7은 전체 시스템 블록도를 보여준다.

시스템 구성은 90도의 위상차와 10dB의 감쇠를 갖는 single coupler 2개와 1.98GHz의 수신 주파수를 2.14GHz 송신 주파수로 변환시키기 위한 double balanced mixer 형태를 갖는 수동 혼합기 2개, 전력 분배기/합성기 2개, 혼합기로부터 출력되는 신호 중 원하는 대역 외에 하모닉 성분과 혼변조 신호를 제거하기 위한  $a=0.35$ 인 Nyquist filter 2개, 위상과 이득을 조절하기 위한 가변 위상변환기 2개와 가변 감쇠기 3개로 구성된다. 주 증폭기와 오차 증폭기는 이득이 27dB가 되도록 3단 구성하였고 증폭기의 지연시간을 보상하기 위한 2개의 delay

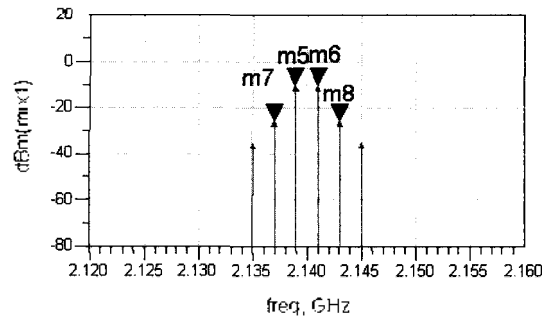
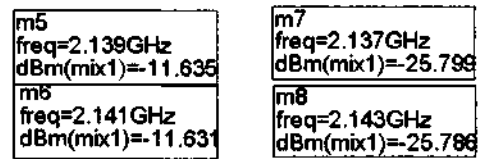


그림 8. 혼합기 1의 출력 스펙트럼  
Fig 8. Output spectrum of mixer1.

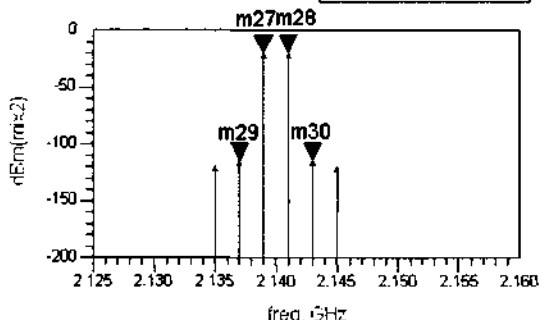
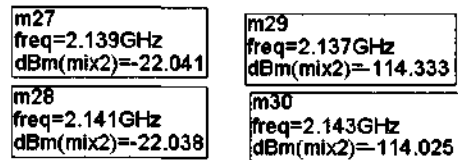


그림 9. 혼합기 2의 출력 스펙트럼  
Fig 9. Output spectrum of mixer2.

line이 포함되며, 입력으로는 IMT-2000용 수신 주파수 1.98GHz를 -10dBm의 크기로 2MHz 주파수 간격을 갖는 two-tone신호를 인가하였다.

그림 8은 혼합기1 (Mixer1)을 통해 송신 주파수 대역으로 상향 변환된 출력 스펙트럼을 나타내며, 그림 9는 입력 전력을 혼합기1 보다 11.5dB 낮추어 인가한 혼합기2 출력 스펙트럼을 보여준다. 입력 전력을 -10dBm으로 하였을 때는 3차 IMD는 -25.799dBm이 출력된 반면에 입력전력을 -21.5dBm으로 하였을 경우 3차 IMD는 -114.333dBm으로 식 (2)에서 보인 것처럼 입력 전력레벨이 작아질수록 3차 IMD 성분 역시 작아지는 출력울 얻을 수 있으며, 이를 보조신호로 사용하였다.

그림 10은 3단으로 구성된 이득이 27dB인 주 증폭기의 출력 스펙트럼을 보여주며, 여기서 증폭된 후 주 신호는 15.254dBm, 3차 IMD는 5.206dBm임을 보였다. 3단 주 증폭기로부터 증폭된 신호는 single coupler2를

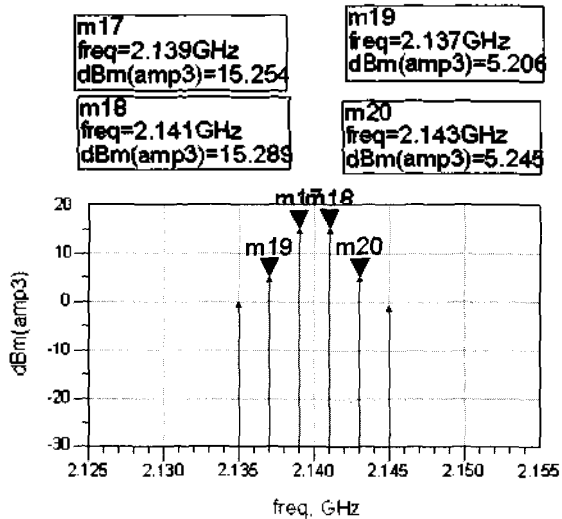


그림 10. 주증폭기 출력 스펙트럼  
Fig 10. Output spectrum of main amplifier.

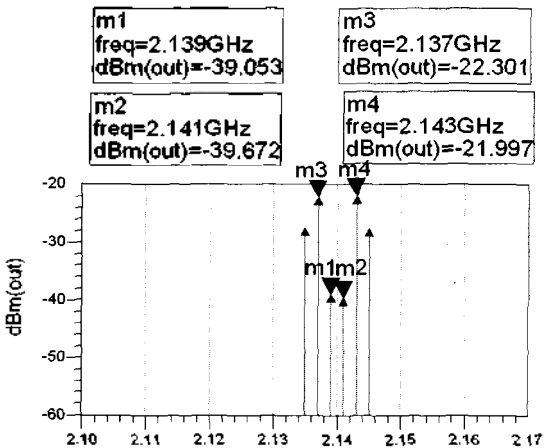


그림 11. 전력합성기1의 출력 스펙트럼  
Fig 11. Output spectrum of power combiner1.

통해 두 경로로 나뉘지는데, 한 경로는 delay line2에 입력되고 다른 한 경로는 가변위상변환기1(phase shifter1)에 입력되게 된다. 이때 delay line1을 통과한 보조 경로 신호와 single coupler2의 출력 중 가변 위상 변환기1로 입력되는 신호의 주 신호의 위상과 이득이 같도록 가변 감쇠기1과 가변 위상변환기2를 조절하여 전력 합성기1에 입력하면 주 신호를 제거할 수 있는데 이를 그림 11에 보였다.

전력합성기1을 통해 출력된 신호는 에러 증폭기에 의해 증폭되고 single coupler2에 의해 delay line2에 입력된 신호와 합쳐져 주 증폭기에서 발생한 3차 IMD 성분을 제거 할 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 주 신호 제거 루프 (signal cancellation loop)와 달리 오차 신호 제거 루프 (error cancellation loop)에서는 주 경로 신호의 3차 IMD 신호의 위상과 이득을 기준으로 하여 위상 변환기2에서는 주 경로 신호의 3차 IMD와 보조 경로 신호의 3차 IMD가 180도 차이가 나게 조절하고 가변감쇠기3은 주 경로 신호의 3차 IMD 신호와 보조 경로 신호의 3차 IMD의 이득을 같도록 조절하여 설계하였다. 이렇게 가변 위상변환기2와 가변감쇠기3을 조절하여 얻어진 신호를 전력합성기2에 입력하면 3차 IMD 신호가 상쇄된 최종 출력을 얻을 수 있는데 이를 그림 12에 나타내었다.

그림 12에서 보인 최종 출력 스펙트럼을 살펴보면, 주 신호는 13.287dBm, 3차 IMD 신호는 -46.408dBm으로 -60dBc의 IMD 특성을 얻었고, 그림 10에 보인 주 증폭기 출력 스펙트럼의 -10.05dBc IMD 특성과 비교해 볼 때 49.95dB의 개선 효과를 보였다. 이는 높은 선형성을 요구하는 다중 채널 전력 증폭기를 적용하는 송신기의 IMD 규격 (-60~-80dBc)에 만족할 만한 결과라 할 수 있다.

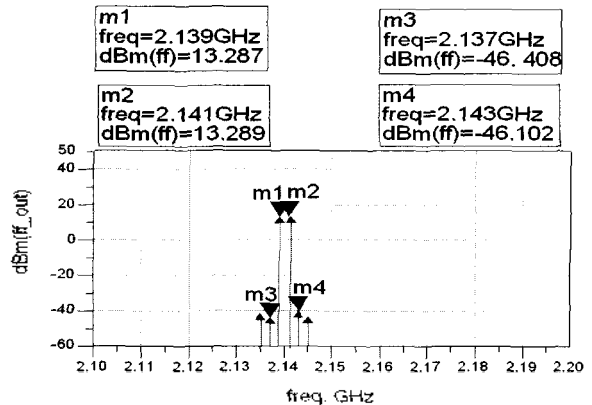


그림 12. 최종 출력 스펙트럼  
Fig 12. Output spectrum of final output.

## V. 결 론

본 논문에서는 마이크로파 전력 증폭기를 선형화 시키기 위한 feed-forward 선형화 방식을 IMT-2000용 송신 시스템에 적용시킨 새로운 방식의 송신 시스템 구조를 제안하고 Agilent 社의 EESoft ADS ver.2002를 사용하여 HB 시뮬레이션 하였다. 시스템은 single coupler 2개, 혼합기 2개, 대역통과 필터 2개, 27dB의 이득을 갖는 3단 증폭기 2개, delay line 2개, 가변 위상 변환기 2개, 가변 감쇠기 3개, 전력 합성기 2개로 구성하였다. 입력신호는 1.98GHz의 중심 주파수를 -10dBm 크기로 한 2MHz의 주파수 간격을 갖는 2-tone신호를 사용하였다. 시뮬레이션 결과 feed-forward 선형화 방식을 적용하기 전에는 -10.05dBc의 IMD 특성을 얻은 반면, feed-forward 선형화 방식을 사용한 후에는 -60dBc의 IMD특성을 얻어 49.95dB의 IMD 개선 특성을 보였다.

본 논문의 가장 큰 특징은 다음과 같다. 기존의 전력 증폭기에만 국한하여 적용시켜왔던 feed-forward 선형화 방식과 달리 전력증폭기뿐 아니라 변조기로 사용되는 혼합기까지 feed-forward loop에 적용하였다. 이로 인해 기존의 송신 시스템에서는 전력증폭기 선형성에 막대한 영향을 미치는 혼합기가 높은 선형성을 가져야하며 그렇지 않은 경우 전력증폭기에 큰 부담을 주었으나, 본 연구방식에서는 증폭기 뿐 아니라 혼합기의 상변조신호를 동시에 간단히 해결할 수 있다는 큰 장점이 있어 송신시스템 전체의 성능을 높여 전송품질의 향상을 기대할 수 있다. 하드웨어로 구현 시 부정합으로 인해 발생한 손실을 교정하기 위한 튜닝작업과 RF대역에서 구현하기 힘든 스킵트 특성이 좋은 대역통과 필터의 설계 혹은 선택만 주의한다면 시뮬레이션결과와 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 입력전력의 변화, 동작 온도의 상승, 습도 및 주변 환경의 변화들에 의해 변화되는 비선형 특성을 적응적으로 제어 할 수 있는 DSP control 부분을 추가하는 연구를 지속한다면 앞으로의 이동통신 기술 발전에 많은 기여를 할 수 있으리라 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. S. Ariyavisitakul and T.P. Liu, "Characterizing the Effect of Nonlinear Amplifier on Linear Modulation for Digital Portable Radio Communication", IEEE transactions on

Vehicular Technology, 39, Nov.1990.  
 2. J.Kenney, A.Leke, "Design Consideration for Multicarrier CDMA Base Station Power Amplifier", Microwave & RF, February 1999.  
 3. G.D. Vendelin, A.M. Pavio and U.L. Rohde, "Microwave Circuit Design-Using Linear and Nonlinear Technique", John Wiley & Sons, 1990.  
 4. R.S. Tucker, "Third-Order Intermodulation Distortion and Gain Compression in GaAs FET's", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech, Vol. MTT-27, No5, 400~408, May, 1979.  
 5. O. Cheong, C. Yiyuan, and Z. Xiaowei, "1.9GHz Adaptive Feedforward Power Amplifier," Asian-Pacific Microwave Conference, 745-748, 1998  
 6. R.R. Collin, "Foundation of Microwave Engineering", Mc-Graw-Hill, U.S., 2nd, 1992  
 7. Stephen A. Mass, "Microwave Mixers", Artech House, 2nd, 1993, 269~273

## 저자 약력

### • 김 상 규 (Sang Gyu Kim)



1997년 2월 : 경원대학교 전자공학과(공학사)  
 2002년 2월~현재: 경원대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
 \*주관심분야: 선형 전력 증폭기, RF 회로 설계

### • 김 경 태 (Kyung Tae Kim)

1978년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1980년 8월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1987년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1987년 9월~현재: 경원대학교 전자 전기정보공학부 정교수  
 1991년 12월~1992년 12월: 미국 펜실베이니아 주립대학 객원교수  
 \*주관심분야: 광통신, 이동통신 및 신호처리