

새로운 파일럿 신호 인가 기법을 이용한 피드포워드 선형증폭기의 설계

Design of Feedforward Linear Power Amplifier using Novel Injection Method of a Pilot Signal

이 경 희 · 박 응 희 · 강 상 기

Kyong-Hee Lee · Ung-Hee Park · Sang-Gee Kang

요 약

본 논문은 하나의 파일럿 신호를 이용하여 다중 캐리어를 수용하는 IMT-2000 전 대역에서 동작하는 중계기 용 Feedforward 선형증폭기의 설계 및 제작에 관한 것이다. 본 논문에서 제시한 방법은 기존에 나와있는 파일럿 신호 인가 방법과는 달리 하나의 파일럿 신호를 분기하여 첫번째 루프(혼변조 신호 추출 루프)와 두번째 루프(혼변조 신호 제거 루프)에 인가함으로써, 증폭기에 입력되는 입력신호의 주파수와 레벨의 변화에 따라 자동 적응적으로 혼변조 신호들을 제거하도록 설계하였다. 제작 결과 2110 MHz~2170 MHz 주파수 범위에서 최종 출력이 20 W_{avg}일 때 임의의 20 MHz에서 IMD 특성이 -60 dBc 이하가 됨으로써 20 dB 이상을 개선시켰으며 제안된 선형증폭기는 중계기의 다중캐리어 선형증폭기로서 적합함을 확인하였다.

Abstract

This paper reports a design of feedforward linear power amplifier using pilot tone for IMT-2000 band repeaters accepting multi-carrier. As this time pilot tone is applied to the circuit differently from the existing method. Only one pilot tone is used in both 1-st loop(IMD abstraction loop) and 2-nd loop(IMD cancellation loop) to cancell IMD signals automatically according to variation of frequency or power level of input signals. As an experiment, in range of 2110 MHz~2170 MHz at LPA output power of 20 W_{avg}, IMD characteristics of over 20 dB was improved maintaining below -60 dBc considering respective 20 MHz. Therefore the supposed feedforward linear power amplifier can be used for linear power amplifier in IMT-2000 band repeaters.

Key words : Feedforward, LPA, Pilot, IMD

I. 서 론

이동통신 시스템에서 기지국 송신시스템의 안테나 전단에 사용하는 전력증폭기는 다수의 이용자에게 좋은 통화 품질을 제공하기 위하여, 높은 출력과 고선형성 및 고효율의 제품이 되도록 요구된다. 이중 전력증폭기에서 발생하는 혼변조 신호들은 시스

템 전체의 신호 대 잡음비를 악화시키고 인접 채널에 간섭 신호로 작용하기 때문에 주파수 사용의 효율성을 저하시키고, 궁극적으로 시스템 전체의 성능을 감소시키는 결과를 초래한다^[1]. 이동통신 시스템 환경에서 전력증폭기의 원하는 출력전력이 정해진 상태에서는 전력증폭기의 선형성과 효율은 일반적으로 서로간에 trade-off 관계가 성립된다. 전력증폭

한국전자통신연구원 전파기반연구부(Advanced Radio Research Department, ETRI)

· 논문 번호 : 20020706-078

· 수정완료일자 : 2002년 9월 2일

기에서 원하는 선형화 양과 구현하려는 전력증폭기의 효율은 다양한 전력증폭기 선형화 방법 중 어느 방법을 사용하느냐의 가장 중요한 요소라 하겠다.

일반적으로 전력증폭기의 선형성을 증가시키는 선형화 방법은 Feedback 방법, Predistortion 방법, Feedforward 방법으로 구분할 수 있다^{[2],[3]}. Feedback 방법은 구현 회로의 크기가 작고 전력증폭기의 효율도 높지만, 발진 가능성과 사용 가능한 주파수 대역이 상대적으로 다른 방법에 비해 좁다는 문제점을 가지고 있다. Predistortion 방법은 전력증폭기 입력부에 전력증폭기의 비선형특성에 반대되는 비선형 특성을 가지는 회로를 삽입하는 방법으로, 제작된 선형증폭기의 효율이 좋고 선형성이 많이 개선된다. 하지만, Predistortion 방법은 사용 가능한 주파수 대역이 좁고, 온도 및 습도 등의 환경변화에 따른 특성 변화가 심하다는 문제점이 있다. Feedforward 방법은 회로가 복잡하고 효율이 비교적 낮다는 단점을 가지지만 선형성의 개선 정도가 크고 외부 환경 변화에도 특성 변화가 크지 않다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 전력증폭기의 안정적인 선형화 개선량보다 효율과 구현 가격을 중심으로 설계할 경우는 Predistortion 방법을 이용하고^[4], 전력증폭기의 효율보다 안정적인 선형화 개선량이 요구되는 경우는 Feedforward 방법의 선형화 방법을 이용한다.

II. Feedforward 선형화 방법

일반적인 Feedforward 선형화 구조는 그림 1의 형태를 가지고 있다. Feedforward 선형화 방법은 크게 두개의 루프로 구성된다. 첫번째 루프는 입력 신호가 분배되어 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기를 거쳐 전력증폭기에서 증폭된 신호의 일정부분과 입력 신호의 다른 분배된 경로의 신호가 결합(통상 빼기회로라 칭함)하여 전력증폭기에서 발생하는 순수한 혼변조 신호만을 추출하는 루프이다. 이를 통상적으로 1-st 루프 또는 혼변조 신호 추출 루프라고 통한다. 두번째 루프는 첫번째 루프에서 추출된 혼변조 신호를 원하는 세기와 위상으로 변화시켜 전력증폭기의 뒷단에 재결합시켜, 전력증폭기에서 발생한 혼변조 신호를 제거시키는 루프를 말한다. 이

를 통상적으로 2-nd 루프 또는 혼변조 신호 제거 루프라고 한다. 첫번째 루프에서는 전력증폭기의 입력 신호의 세기와 환경 변화에 따른 이득과 위상 변화를 첫번째 루프에 존재하는 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기를 조절하여 최소화시켜야 한다. 두번째 루프는 첫번째 루프에서 출력된 전력증폭기의 혼변조 신호를 전력증폭기 뒤의 지연선로(delay line)의 세기 및 위상 변화량까지 고려된 원하는 상태의 세기와 위상이 되게 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기를 동작시킨다. Feedforward 방법에서 서로 다른 두개의 경로를 거쳐서 온 신호가 결합될 경우에 동일한 세기와 180도의 위상차를 가지고 결합되면 완전상쇄하게 되지만, 세기 또는 위상 오차가 발생하면 결합하는 신호는 완전히 상쇄되지 않는다. 그림 2는 Feedforward 방법 사용시 서로 다른 경로의 신호가 결합되는 경우에 세기 또는 위상 오차에 따른 신호 감쇠 정도를 나타낸 그림이다.

첫번째 루프의 가변 감쇠기, 가변 위상 변환기와 두번째 루프의 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기를 정확하게 동작시키기 위해서는 첫번째 루프의 빠기

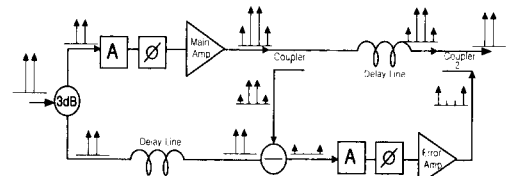


그림 1. 일반적인 피드포워드 선형화 방법
Fig. 1. Typical feedforward linearization type.

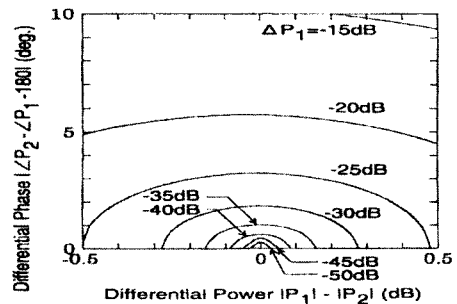


그림 2. 세기와 위상 오차에 따른 Feedforward 방법의 신호 감쇠 특성
Fig. 2. Cancellation chart of feedforward type according to amplitude and phase error.

회로 출력에서 전력증폭기에 입력되는 신호의 감쇠 정도와 두번째 루프의 출력 신호가 전력증폭기 뒷단에 결합하는 부분에서의 혼변조 신호의 감쇠 정도를 알아야 한다. 이러한 정보를 얻기 위하여 Feedforward 방법은 다양한 선형화 기법을 이용하는데, 크게 파일럿 신호를 이용하는 방법과 파일럿 신호를 이용하지 않는 방법으로 구분할 수 있다. 파일럿 신호를 이용하는 방법에서도 인입하는 파일럿 신호의 위치^{[5],[6]}, 파일럿 신호의 개수^[7], 파일럿 신호의 형태에 따라 각기 그 동작을 달리하게 되며, 파일럿을 이용하지 않는 경우에도 순수한 아날로그 기법으로 회로 구현, 마이크로 프로세서의 이용 방법 등에 따라 구현 형태가 달라지게 된다.

Ⅲ. 새로운 파일럿 신호 인가 기법의 Feedforward 선형증폭기

3-1 개요

전력증폭기의 기본적인 설계는 원하는 출력과 사용하는 대역을 바탕으로 설계된다. 본 논문에서 설계 및 제작한 선형증폭기는 별도의 회로의 수정없이 IMT-2000 주파수 전대역(2110~2170 MHz) 구간에서 임의의 20 MHz 대역에서 동작 가능한 평균

출력전력 20 W급의 중계기용 선형증폭기를 목적으로 하였다. 본 논문에서 사용된 선형화 기법은 파일럿 신호 인가 기법으로 하나의 파일럿 신호를 이용하여 전력증폭기를 선형화하였다. 일반적으로 파일럿 신호를 Feedforward 선형증폭기의 첫번째 루프 이전인 신호 입력부에 인입하면 첫번째 루프의 안정적인 동작 점검을 위해 사용되고, 파일럿 신호를 첫번째 루프의 전력증폭기 전후에 인입하면 두번째 루프의 안정적인 동작 점검을 위해 사용된다. 첫번째 루프의 안정적인 동작을 점검하기 위해 사용되는 파일럿 신호 기법은 입력된 파일럿 신호가 전력증폭기 출력에도 존재하여 별도의 파일럿 신호 제거 기능이 Feedforward 선형증폭기에 첨가되어야 한다.

그림 3은 본 논문에서 설계 및 제작된 Feedforward 선형증폭기의 기본적인 구조를 나타낸 것이다. 본 논문에서 제시하는 파일럿 신호를 이용하는 Feedforward 선형증폭기의 가장 큰 특징은 동일한 파일럿 신호를 이용하여 첫번째 루프의 안정적인 동작 점검과 두번째 루프의 안정적 동작을 점검할 때, 첫번째 루프의 안정적인 동작 점검을 위해 인입된 파일럿 신호를 두번째 루프에의 안정적 동작을 점검하기 위해 인입된 파일럿 신호가 상쇄시켜 선형증폭기 출력부에서는 파일럿 신호가 검출되지 않는 형태의 회로로 구현된 것이다.

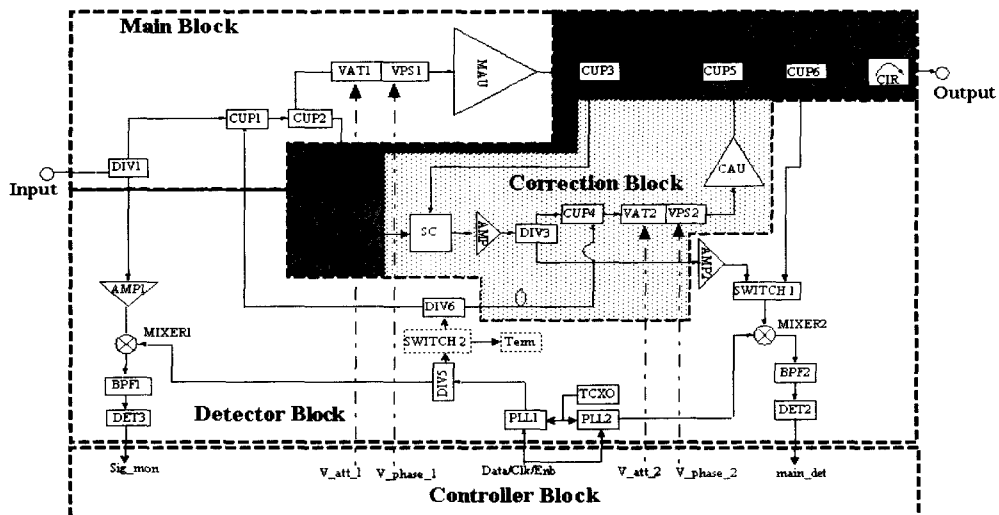


그림 3. 제안된 Feedforward 선형증폭기의 블록도
Fig. 3. The block diagram of supposed feedforward linear power amplifier.

본 논문에서 제안한 Feedforward 선형증폭기의 구조 및 동작을 살펴보면 다음과 같다. 제안한 Feedforward 선형증폭기는 다섯 부분으로 구분되는데, 회로에 입력되는 신호를 증폭하는 Main Block, 첫번째 루프에서 추출한 전력증폭기 혼변조 신호를 원하는 세기와 위상으로 만드는 Correction Block, RF 신호의 세기를 검출하고 파일럿 신호를 공급하는 Detector Block, Detector Block의 DC전압을 이용하여 첫번째 루프와 두번째 루프의 가변 감쇠기와 가변 위상 변환기의 제어 전압 값을 조절하고 외부와의 인터페이스를 담당하는 Controller Block 그리고 지연선로와 기타 수동소자들로 구성된 Passive Block으로 구성된다.

외부에서 입력된 신호의 일부는 Main Block의 DIV1을 통해 분배되어 Main Block의 CUP1을 거쳐서 첫번째 루프에 주입되고 DIV1을 통해 분기된 다른 입력신호는 Detector Block의 AMP1으로 인가된다. AMP1을 거친 입력신호는 주파수 합성기 MIXER1과 대역통과필터 BPF1을 통과한 후 DET3를 통해 검출되며, 검출된 신호 Sig_mon은 Controller Block에서 A/D 변환기를 통해 디지털신호로 변환된다. 이 일련의 과정은 증폭기의 입력 신호의 세기 및 주파수 정보를 제공해 주는 과정이다.

Controller Block은 Detector Block의 내부에 위치하는 주파수 합성기 MIXER1과 MIXER2의 LO 주파수 설정을 하기 위해 PLL1과 PLL2에 필요한 data, clock 및 enable 신호들(Data/CLK/Enb)을 제공한다. 이를 통하여 Detector Block에 존재하는 파일럿 신호는 Controller Block의 제어를 통하여 신호를 발생시키게 되는데, 입력되는 주파수 신호 범위에 따라 발생하는 신호의 위치가 변하게 된다. 본 논문에서는 IMT-2000 전대역에서 첫번째 루프와 두번째 루프의 선형화를 위해 한 개의 파일럿 신호 2182.5 MHz를 이용하였다. 이 주파수는 Main Block의 MAU에서 발생하는 혼변조 신호 성분보다 약간 높은 주파수 특성을 가지며 전체 Feedforward 선형증폭기를 제어하며, 또한 전체적인 선형증폭기의 성능을 고려하여 설정된 값이다.

파일럿 신호가 첫번째 루프와 두번째 루프에 주입되는 과정을 살펴보면 주파수 합성기 PLL 1을 통

해 생성된 파일럿 신호는 두개의 경로로 분기되어 일부는 DIV5, SWITCH2, DIV6을 통해 Main Block의 CUP1에 인입된다. DIV 6에서 분기된 파일럿 신호는 Correction Block의 CUP4에도 인가된다.

먼저 첫번째 루프에 인가되는 과정을 살펴보면 CUP1에 인가된 파일럿 신호는 주신호 제거량을 검출하는 용도로써 파일럿 신호는 증폭기에 입력되는 신호와 CUP1에서 결합되어서 CUP2를 통해 일정량이 각각 주경로와 보조경로로 분배된다. 주경로를 통과하는 입력신호와 파일럿 신호는 가변 감쇠기 VAT1과 가변 위상변환기 VPS1을 거쳐서 주증폭기 MAU에 입력되어 MAU의 출력단에서는 증폭된 입력신호와 파일럿 신호외에 입력신호 2-톤의 인접에 따른 혼변조 성분들이 발생한다. 이러한 신호들은 CUP3을 통해 일부 추출되어 첫번째 루프를 구성하는 빼기 회로 SC에 입력된다. CUP2를 거친 입력신호와 파일럿 신호는 첫번째 루프의 주경로와 보조경로의 Group Delay 밸런스를 위한 지연 선로를 거친 후 빼기 회로 SC의 또다른 입력이 된다. 빼기회로 SC를 거쳐서 경로의 세기는 같고 위상이 180도 차이가 나면 주신호 성분들은 제거되고 혼변조 성분만 남게 된다. 주신호 제거량을 확인하기 위해 Correction Block의 증폭기 AMP와 분배기 DIV3을 거쳐 AMP2를 통과한 후 SWITCH 1이 첫번째 루프와 연결될 때 주파수합성기 MIXER2와 BPF2, DET2를 거친 후의 검출전압을 이용하여 Controller Block은 주증폭기 MAU 앞단에 연결되어 있는 VAT1과 VPS1을 제어하게 된다.

두번째 루프의 과정을 살펴보면 AMP와 DIV3을 거친 빼기회로 SC의 출력성분들은 CUP4에서 파일럿 신호와 결합되어 가변 감쇠기 VAT2와 가변 위상변환기 VPS2를 거쳐서 에러증폭기 CAU에 인가되며, CUP3과 지연선로를 거친 MAU 출력성분들과 CUP5에서 결합된다. 결과적으로 CUP6을 거친 파일럿 신호의 세기를 검출하여 두번째 루프가 원할히 동작되도록 Controller Block의 신호들 V_att_2와 V_phase_2가 에러증폭기 CAU앞단에 있는 VAT2와 VPS2를 제어하게 된다. 첫번째 루프와 마찬가지로 두번째 루프의 각 경로의 혼변조 성분의 크기는 같고 180도의 위상차를 갖게 되면 결과적으로 최종

Output에서는 순수한 증폭된 신호만 남게 된다.

3-2 제작 및 실험결과

본 논문에서 사용된 Main Block의 MAU(주증폭기)는 Motorola사의 MHL21336, MRF21060, MRF-21125들을 이용하여 설계 및 제작하였으며, Main Block의 전체 이득은 53 ± 0.5 dB (@2110~2170 MHz)이다. Correction Block의 CAU(에러증폭기)는 Mini circuit 사의 ERA-4SM, Watkins Johnson 사의 AH1, AH11과 MRF21060, MRF21125들로 설계 및 제작되었으며, Correction Block의 전체 이득은 50 ± 0.5 dB(@2080~2200 MHz)이다.

Main Block과 Correction Block에서 사용된 가변 감쇠기 VAT1, VAT2와 가변 위상변환기 VPS1, VPS2의 설계를 살펴보면 가변 감쇠기의 경우 사용

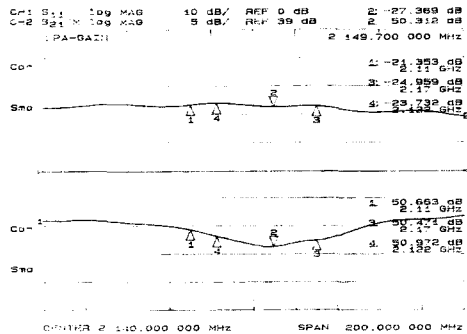


그림 4. 선형증폭기의 이득과 입력 반사계수
Fig. 4. Gain and input reflection characteristics of linear power amplifier.

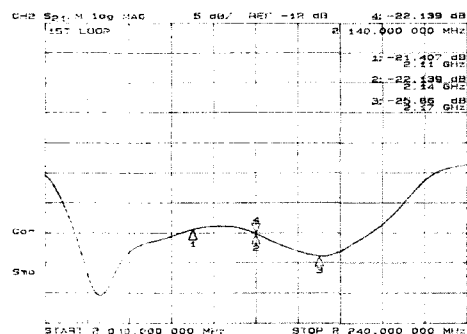


그림 5. 첫번째 루프의 주신호 제거 특성
Fig. 5. The main signal cancellation characteristic of 1-st loop.

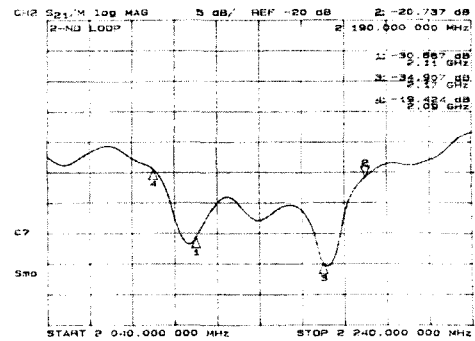


그림 6. 두번째 루프의 혼변조 제거 특성
Fig. 6. The IMD cancellation characteristic of 2-nd loop.

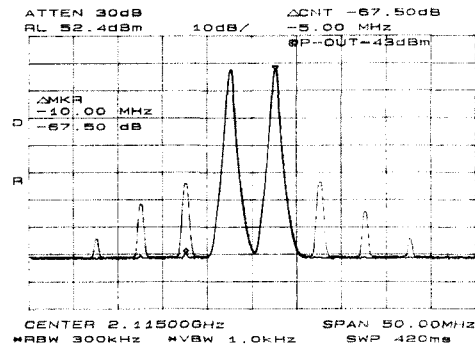


그림 7. 중심주파수 2115 MHz에서의 출력에서 선형화 전후의 특성
Fig. 7. Output before and after linearization at 2115 MHz.

된 Pin 다이오드는 HP사의 HSMP4810이며 가변 위상변환기에 사용된 다이오드는 Sony사의 1T362이다. 가변 감쇠기의 측정결과 120 MHz 대역폭(2080 MHz~2200 MHz)에서 제어전압의 변화에 따른 감쇠량은 5 dB이며 이때 위상 변화량은 2도 미만임을 확인하였다. 가변 위상변환기의 경우 120 MHz 대역폭(2080 MHz~2200 MHz)에서 제어전압의 변화(0~12 V)에 따른 위상 변화량이 약 50도이며 이때 세기 변화량은 0.3 dB 미만이고 평탄도 역시 0.2 dB 미만임을 확인할 수 있었다. Main Block, Correction Block, Detector Block, Controller Block 및 Passive Block으로 구성된 제작된 선형증폭기의 특성은 그림 4~그림 11에 나타내었다. 그림 4는 제작된 선형증폭기의 전체 이득의 특성으로 IMT-2000 주파수 전대역인 2110~2170 MHz에서 약 $50.8 \text{ dB} \pm 0.4 \text{ dB}$

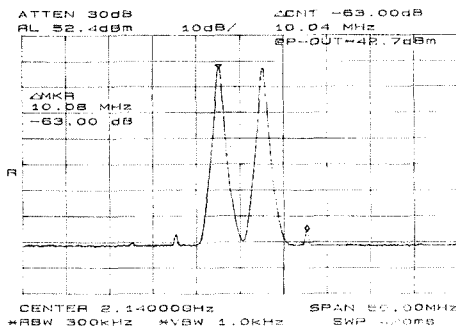


그림 8. 중심주파수 2140 MHz에서의 출력 특성
Fig. 8. Output of linear power amplifier at 2140 MHz.

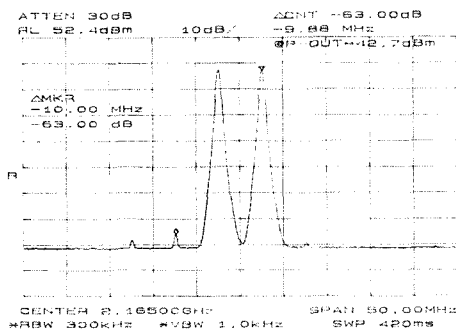


그림 9. 중심주파수 2165 MHz에서의 출력 특성
Fig. 9. Output of linear power amplifier at 2165 MHz.

의 이득 값과 -20.0 dB 이하의 입력 반사계수 값을 가졌다. 그림 5는 제안된 Feedforward 선형증폭기의 첫번째 루프의 제거 특성으로서 Main Block의 DIV1에 신호를 입력시켜 Network Analyzer를 이용하여 첫번째 루프의 양쪽 경로의 최적의 세기조건과 위상조건을 갖을 때의 측정결과이다. IMT-2000 전 주파수 대역에서 고르게 주신호 제거가 가능함을 보여주고 있다. 그림 6은 제안된 Feedforward 선형증폭기의 두번째 루프의 동작 특성으로서 Main Block의 MAU 뒤에서 신호를 입력시켜, 선형증폭기 출력에서 Network Analyzer를 이용하여 측정된 데이터이다. 2090~2190 MHz 대역에서 신호 감쇠량이 -20 dB 이하임을 볼 수 있다. 그림 4~그림 6의 값은 본 실험에서 제작된 선형증폭기가 아무런 별도의 수정없이 IMT-2000 전대역에서 동작 가능함을 알 수 있다. 그림 7은 선형증폭기의 입력 two-

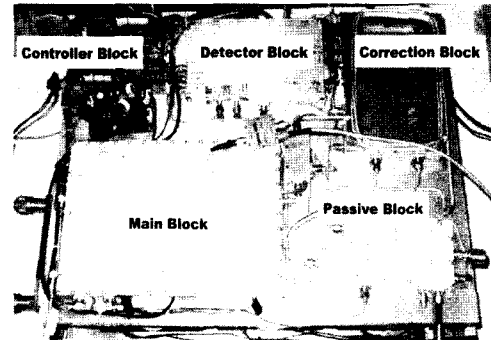


그림 10. 제작된 Feedforward 선형증폭기의 실물사진
Fig. 10. Photograph of implemented feedforward linear power amplifier.

tone의 중심주파수가 2115 MHz($\Delta f=5$ MHz)일 경우에 선형화 이전과 선형화 후의 혼변조 특성을 비교한 것으로, 선형화 후 3차 혼변조 신호의 값이 -67.5 dBc로 선형화 이전보다 22 dB 이상 혼변조 성분이 제거됨을 보여준다. 그림 8과 그림 9는 two-tone의 중심주파수가 각각 2140 MHz ($\Delta f=5$ MHz)와 2165 MHz ($\Delta f=5$ MHz)일 때 약 20 W 출력에서 주신호와 혼변조 성분신호 사이의 차가 63 dB임을 보여준다. 그림 10은 Heat sink가 포함된 제작된 선형증폭기의 사진이고 그림 11은 Heat sink, 팬 뿐만 아니라 선형증폭기를 쉘프에서 자유롭게 실장 혹은 탈장하게 하는 슬라이딩 가이드 등을 포함한 선형증폭기의 실장부 사진으로서 전체 외곽기구물은 480 mm×350 mm×99 mm의 크기를 갖는다.

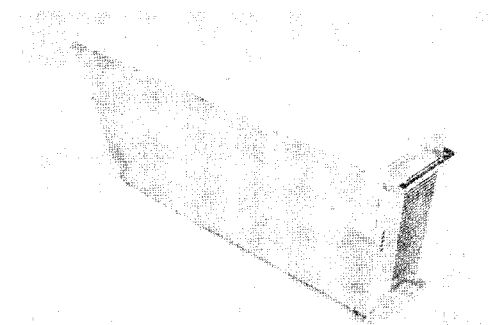


그림 11. 제작된 Feedforward 선형증폭기의 기구 실장 사진
Fig. 11. Photograph of implemented feedforward linear power amplifier zig.

IV. 결 론

본 논문에서는 새로운 형태의 파일럿 신호 인가 기법을 이용한 Feedforward 선형증폭기를 제시하였다. 새로운 형태의 파일럿 신호 인가 기법을 이용한 Feedforward 선형화 회로는 하나의 파일럿 신호를 이용하여 Feedforward 방법의 첫번째 루프와 두번째 루프의 안정적인 동작 점검과 선형증폭기 출력에서의 파일럿 신호를 회로적으로 상쇄시켜 주는 형태를 갖는 방법으로 실험을 통해 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 제작된 선형증폭기는 평균 출력 전력 20 W급으로 별도의 회로 수정없이 IMT-2000 전대역에서 동작 가능하며, 2115 MHz, 2140 MHz, 2165 MHz 세 주파수 대역에서 5 MHz 주파수간격의 두 신호를 입력하였을 경우에 -60 dBc 이하의 혼변조 신호값을 가짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice Hall, 1997.
- [2] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, pp. 267-268, 1999.
- [3] Nick Pothecary, *Feedforward Linear Power Amplifier*, Artech House, 1999.
- [4] K. J. Parsons, A highly-efficient linear amplifier for satellite and cellular applications, *IEEE MTT-S*, pp. 203-207, 1995.
- [5] Robert E. Myer, *Automatic reduction of intermodulation products in high power linear amplifiers*, US 4,580,105, 1986.
- [6] Derek L. Tattersil et al., *High dynamic range modulation independent feedforward amplifier network*, US 5,307,022, 1994.
- [7] Shoichi Narahashi et al., *Feedforward amplifier*, US 5,166,634, 1992.

이 경 희



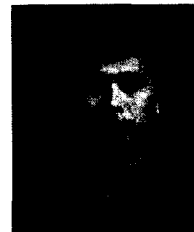
1999년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2001년 2월: 전북대학교 정보통신학과 (공학석사)
 2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원 연구원
 [주 관심분야] 초고주파회로 설계, 전력증폭기

박 응 희



1994년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 2000년 3월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 전력증폭기 및 선형증폭기

강 상 기



1988년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 3월~7월: 삼성반도체통신(주)
 1989년 4월~1992년 7월: 해군통신장교 (중위)
 1994년 2월: 단국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1994년 2월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 이동통신 송수신기, 전력증폭기 및 선형증폭기