

RF 증폭기의 이득과 위상 제어

姜 仁 鎬*

A Control of Gain and Phase of RF Amplifiers

Inho Kang

요 약

RF 증폭기에 입력전력신호의 크기가 변화함에 따라 증폭기의 이득과 위상도 변하게 된다. UHF 대역에서 ALC, I&Q Demodulator, 검출기, 바이어스 전압에 따라 위상이 변하는 위상변환기, 저위상 변화 감쇠기등으로 이루어진 시스템을 이용해 이득과 위상을 제어하는 방법이 제시되었다. 한신호 뿐만 아니라 Multi tone이 인가 되었을 때는 network analyzer로 위상을 측정할 수 없기 때문에 I&Q Demodulator, xy-recorder, 수동위상변환기인 tuner등으로 구성된 시스템을 이용해 위상을 측정할 수 있었다. 실제 증폭기의 이득과 위상을 임의로 변환시켰을 때 이득은 5dB, 위상은 120° 범위내에서 제어가 가능하다는 것을 실험적으로 증명하였다.

ABSTRACT

As the input power level applied to RF amplifier changes, the gain and phase characteristics of amplifier are also varied. By using the AGC and I&Q Demodulator, a method of controlling the gain and phase is proposed and experimentally verified that the gain and phase are automatically controlled for single tone as well as multitone signals with various input power levels. When multitone signals are applied to RF amplifier, the phase cannot be measured by network analyzer. The phase can be measured by the proposed system which is composed of I&Q Demodulator, xy recorder and tuner. The gain of a designed amplifier practically changes by 5dB at the output and its phase deviates by 120°. The gain is kept constant by using AGC of the proposed system within 0.2dB, and the phase can be locked by using I&Q Demodulator and ALC of the proposed system within 1°.

* 한국해양대학교 전파공학과 전임강사

I. 서 론

증폭기에서 사용되는 반도체 소자인 바이폴라 트랜지스터 및 FET는 비선형성을 갖고 있다. 이러한 반도체 소자는 소신호로 동작시킨 경우는 비교적 선형성을 가지고 있으나 동작증폭기의 출력 전력이 수 100mW 이상에서는 그 선형성이 급격히 나빠진다. 즉 증폭기가 포화영역으로 가게됨으로 증폭기의 이득이 줄게 되고 위상지연현상이 발생하게 된다. 또한 온도가 높은 환경 또는 고출력 증폭기에서 생기는 온도상승은 증폭기의 위상과 이득을 동시에 왜곡시킨다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이러한 이득과 위상의 불필요한 왜곡으로 인해 증폭기의 신뢰성을 잃는 경우가 많게 된다. 인가되는 전력의 크기가 변화하고 온도가 다른 여러환경에서 이득과 위상을 일정하게 하고, 이것을 원하는 이득과 위상으로 조절할 수 있다면 일반 RF 증폭기 회로에 광범위하게 이용될 수 있다고 생각된다.

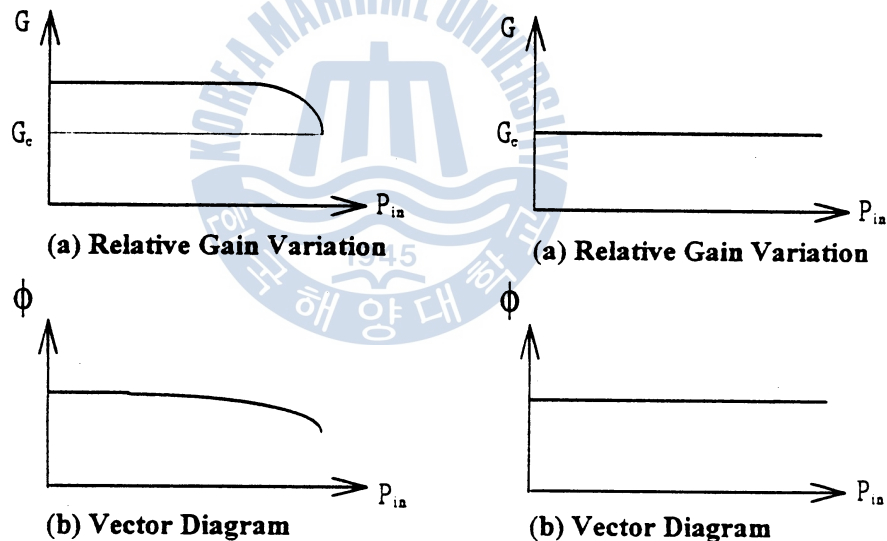


그림 1. 일반적인 증폭기의 출력

본 논문의 증폭기의 출력

기존에 알려진 위상과 크기의 제어기법은 pilot tone을 이용한 방법이었는데, 이것은 pilot tone을 발생시키는 회로와 제거시키는 회로를 동시에 필요하게 된다. 본 논문에서는 pilot tone을 사용하지 않고, AGC와 I&Q Demodulator를 이용해 증폭기의 이득과 위상을 제어할 수 있는 방법을 제시하였으며, 그 시스템은 검출기(Detector),⁽³⁾ 가변위상변환기(Variable phase shifter),⁽⁴⁾ 저위상변화감쇠기(Low phase shift attenuator),⁽⁵⁾ ALC, I&Q Demodulator등으로 구성된다. 증폭기의 이득 제어는 입력 전력과 출력전력을 검출기에 의해 동시에 직류값으로 추출해, 이 직류성분들이 ALC에 인가됨으로 가능하게 된다. 또한 ALC의 내부에 적분기를 장기해, 증폭기 출력의 직류전압이 기준전압과 같아지는 부분에서 이득을 일정하게 유지하도록 설계하였다. 증폭기의 위상조절 시스템은 I&Q Demodu-

lator와 ALC로 구성된다. 증폭기의 입력신호와 출력신호가 I&Q Demodulator에 인가되면, I&Q Demodulator에서 혼합되 나오는 성분은 90°위상차를 갖는 직류성분이며 이 출력된 직류성분의 위상을 변화시키면 하나의 원을 그릴 수 있다. 이 원에서 한점을 기준점으로 잡고 증폭기 위상이 기준점에서 자동적으로 고정되도록 설계하므로 위상조절이 가능하게 된다. 이 ALC에는 감쇠기가 연결되어 있는데, 이 감쇠기는 감쇠정도에 따라 위상이 변하지않는 저위상 변환 감쇠기를 사용하였다. 또한 Multi tone 신호가 인가되었을 경우 network analyzer로 이 증폭기의 이득과 위상을 측정할 수 없다. 따라서 I&Q Demodulator를 이용한 시스템을 구성해 이득과 위상을 측정하였다⁽⁶⁾.

II. 고출력 증폭기의 이득과 위상제어 원리

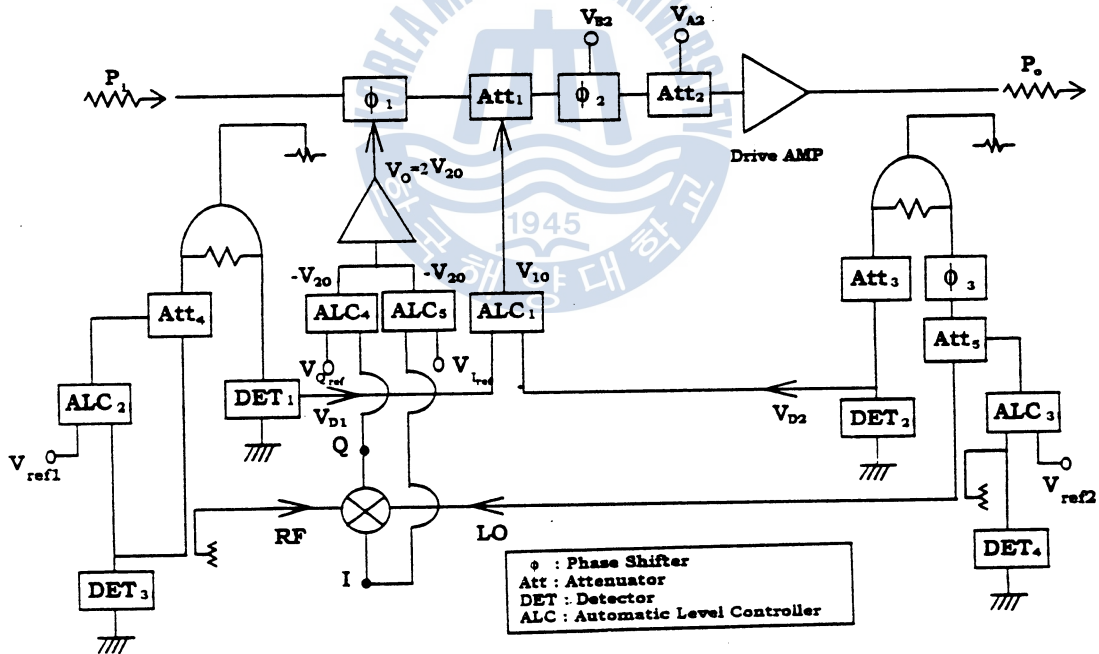


그림 2.1 이득과 위상을 제어하는 시스템

그림 2.1은 이득과 위상을 조절하기 위하여 만든 회로도이다. 여기에 ϕ 는 직류전압으로 위상을 조절하는 위상 변환기, Att는 직류전압으로 감쇠를 제어하는 감쇠기이다. 이 감쇠기는 감쇠정도에 따라 위상이 바뀌면 안되므로 저위상 변화 감쇠기를 사용했다.

DET는 RF 전력크기에 따라 직류전압이 결정되는 검출기이고, ALC는 전력의 크기를 자동적으로 일정하게 조절해주는 제어기이다.

1. 이득을 제어하는 증폭기

그림 2.1에서 입력 전력 P_i 를 인가했을 때 DET_1 , DET_2 에서 RF 신호가 직류신호로 전환된다. DET_1 에서 나온 직류전압을 V_{D1} , DET_2 에서 나온 신호를 V_{D2} 라 하면 V_{D1} 은 ALC₁에 기준전압으로 들어가게 되고, V_{D2} 는 ALC₂의 입력신호로 인가되게 한다. 여기서 검출기에서 나오는 직류신호는 RF 전력이 크면 비례해서 같이 커지게 설계되었다. V_{D2} 가 V_{D1} 보다 크면 원하는 이득보다는 큰 이득을 증폭기가 가지므로 Att₁에서 감쇠가 생기도록 ALC₁의 출력전압이 줄어든다. 이때 ALC₁의 출력전압이 감쇠할 때 ALC₁의 내부에 적분기가 있어 어느 정도 시간을 두고 감쇄하도록 적분기 내의 R, C 값을 조절한다. 이 ALC₁의 출력이 서서히 감소하면 Att₁의 감쇠도 서서히 되어 증폭기의 출력이 시간을 두고 줄어 들게 된다. 결국 V_{D2} 도 줄어들게 되어 V_{D2} 가 V_{D1} (기준값) 보다 작아지면 ALC₁의 동작이 멈추어진다. 결과적으로 ALC₁의 출력이 감쇄기의 감쇄정도를 결정하는 인가 바이어스 전압이 되고, 이 바이어스 전압이 감쇄기의 감쇄값을 조절해서 전체이득을 일정하게 한다. 여기서 주의해야 할 것은 검출기에서 실제 RF 전력이 직류신호로 변하는 과정에서 RF 전력의 값에 제한을 받는다. 실제 검출기에서 일정하게 직류값으로 변환되는 RF 전력은 -3dBm~7dBm사이에 있다. 따라서 검출하기전에 RF 전력을 이 dynamic range 안에 맞추도록 검출기 앞에 증폭기 또는 감쇄기를 사용해야 된다. 또한 이득을 원하는 값으로 잡아 주기 위해서 Att₃의 감쇄기를 사용하였다.

2. 위상을 제어하는 증폭기

그림 2.1에서 I&Q Demodulator 앞에 있는 RF와 LO port에 인가되는 RF 신호는 증폭기의 입력신호와 출력신호이다. 이 두 신호가 I&Q Demodulator로 들어 갈 때 주파수가 같기 때문에 I와 Q port에는 DC 신호가 나오게 된다. 이때 위상변환기 ϕ_3 를 이용해 위상을 360°까지 변화시키면 I와 Q port에서 나오는 신호는 서로 90°의 위상차를 갖는 DC 신호이기 때문에, 그림 2.2와 같이 XY평면 상에 원으로써 표현된다. 그림 2.3은 그림 2.1에 있는 ALC₄, ALC₅ 내부회로도이다. 그림 2.1에서 지금 위상이 위상변환기 ϕ_3 에 의해 B점에 있다고 하면 출력전압 V_0 는 $2V_{20}$ 에 있게 된다. 이 전압 V_0 가 위상변환기 ϕ_1 에 연결되어 있으면 출력의 위상이 B점에서 반시계방향으로 움직이게 된다. 여기서 A점을 지나면 위상이 움직이지 않고 고정되게 하기 위하여 ALC₄, ALC₅를 그림 2.3과 같이 설계하였다. 이 그림에서 V_{Qref} , V_{Iref} 는 I&Q Demodulator에서 각각 IQ port에서의 기준전압이다. 이 회로도에서 입력기준전압 V_{Qref} 는 Op Amp의 반전단자에, V_{Iref} 는 Op Amp에 바로 접속시켰다. 이것은 위상이 A점을 지나면 V_I 는 V_{Iref} 보다 작고, V_Q 는 V_{Qref} 보다 커지기 때문에 서로 보조를 맞추려면 이와같이 회로를 설계해야 된다. 이 원리를 구체적으로 설명하면, 그림 2.3에서 a점의 전압 $V_a = V_Q - V_{Qref}$ 가 된다. 이것이 직류 증폭기로 통과되면 b점의 전압 $V_b = 2(V_{Qref} - V_Q)$ 가 된다. 여기서 그림 2.2에서 위상이 B점에 있게 되면, $V_Q < V_{Qref}$ 가 되어 $V_b > 0$ 이 된다. 결국 적분기의 출력전압은 포화되어 일정한 전압 $-V_{20}$ 즉 $V_c = -V_{20}$ 된다. 또한 a'점에서도 전압은 $V_a' = V_{Iref} - V_I$ 가 된다. 이 신호가 직류 증폭기를

RF 증폭기의 이득과 위상 제어

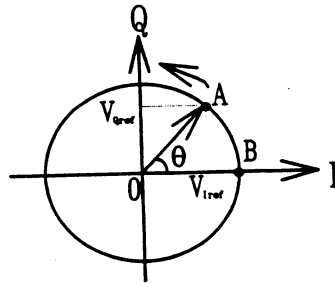


그림 2.2 I, Q prot에서의 직류출력

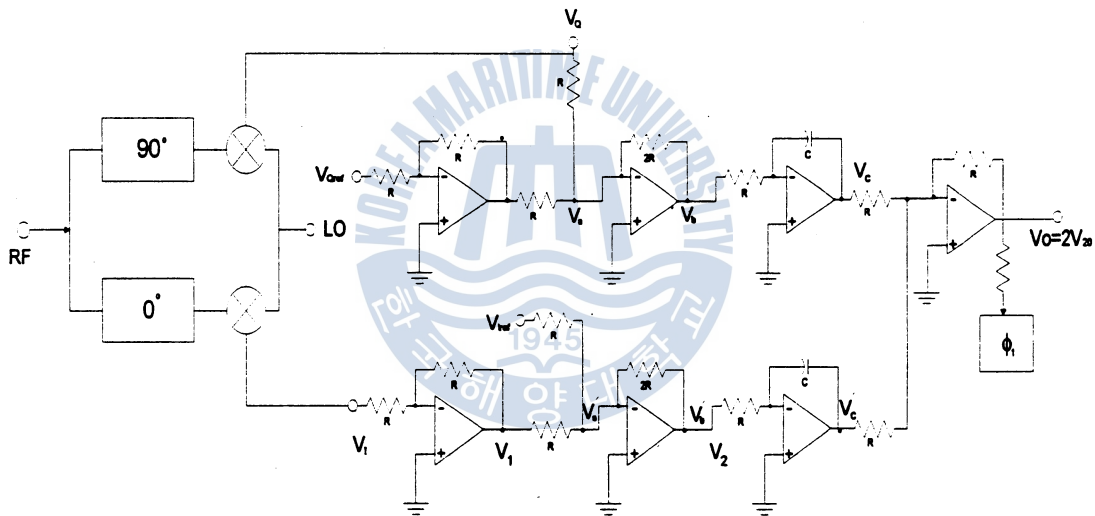


그림 2.3 위상 고정 시스템

통과하면 b'점의 전압 $V_b' = 2(V_1 - V_{ref})$ 가 된다. 여기서 위상이 B점에 있게 되면 $V_1 > V_{ref}$ 가 되어 $V_b' > 0$ 된다. 결국 적분기의 출력전압 $V_c' = -V_{20}$ 에서 포화된다. C점과 C'점에서 V_o, V_c' 전압이 같이 $-V_{20}$ 가 되면 마지막 출력전압은 중첩의 원리에 의해서 $V_o = 2V_{20}$ 가 된다. 이 출력 직류 전압이 위상변환기 ϕ_1 에 연결되어 있어서 B점에 있기만 하면 $V_o = 2V_{20}$ 가 되어서 위상이 커지기 시작한다. 그림 2.1에서 반시계방향으로 위상이 움직이다가 A점을 지나게 되면 V_o, V_c' 모두, 혹은 둘 중 한 부분이 순간적으로 V_{20} 가 된다. 들중한 신호가 V_{20} 인 경우 $V_o = 0V$ 가 되는데 $V_o = 2V_{20}$ 에서 $0V$ 까지 줄어들 때 적분기로 인해 서서히 줄게 된다. 그러면 그림 2.1에서 위상이 시계방향으로 돌게 되어 A점을 거꾸로 지나가게 된다. 직류 신호 V_o, V_c' 둘다 V_{20} 가 되었을 경우도 $V_o = -2V_{20}$ 가 되므로 똑같이 위상이 A점에서 시계방향으로 돌게 된다. A점을 역으로 지나게 되면 $V_o = 2V_{20}$ 가 되어 위상은 다시 반시계방향으로 천천히 돌아간다. V_o 의 변화 속도는 적분기로 인해 느리고 전체 System의 신호처리속도는

평장히 빠르므로 위상은 A점에 고정되어 버림을 알 수 있다. 여기서 그림 2.1에서 RF 신호와 LO 신호의 크기가 일정하지 않게되면, 그림 2.2에서 원의 크기가 위치에 따라 다르게 되는데, 이렇게 되면 V_{Qref} , V_{Iref} 의 값이 바뀌어 위상을 한 곳에 고정시킬 수 없다. 따라서 RF 신호와 LO 신호 바로 앞에 ALC를 걸어서 전력의 크기를 일정하게 하였다. 또한 감쇠기 Att_4 , Att_5 는 감쇠가 되더라도 위상이 변화되지 않도록 설계되어야 하므로 Walker의 저위상 변환 감쇠기⁽⁵⁾를 사용했다.

3. Multi tone이 인가되었때 이득과 위상의 제어

Multi tone이 인가되었을 때는 Network Analyzer로 위상을 측정할 수 없으므로 I&Q Demodulator를 이용해 그림 2.4와 같이 System을 꾸며서 위상을 측정할 수 있다.

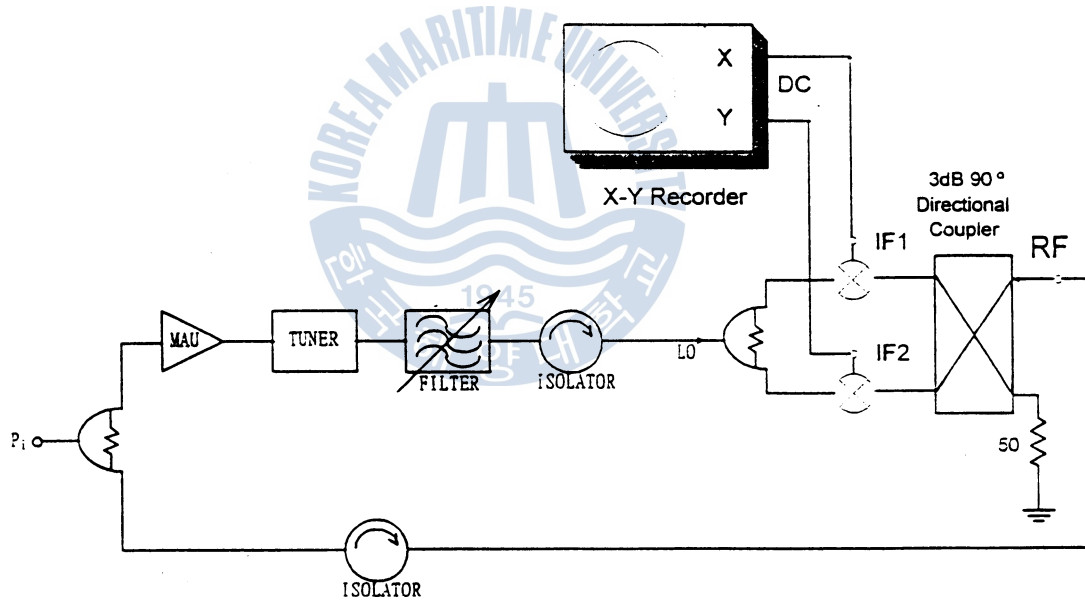


그림 2.4 I&Q Demodulator에 의한 Multi tone의 위상 측정

여기서 사용된 I&Q Demodulator는 2개의 이중평형 혼합기, 90° 방향성결합기와 3dB분배기를 하나로 묶어놓은 Mini Circuits사의 MIQC-895D를 사용하였다. 그림 2.4에서 사용된 Tuner는 90° 방향성결합기의 Through port와 Coupling port에 각각 전송선로를 연결해 두고 있다. 전송선로의 끝을 단락시켜서 나란히 일정하게 변화시켜 주면 크기는 변하지 않고 위상만 일정하게 변하는 위상변환기가 된다⁽⁷⁾. 이 Tuner를 이용해 MAU(Main amp unit)의 위상을 측정할 수 있게 된다. 또한 이 회로에서 I&Q Demodulator의 LO 대 RF 아이소레이션 특성이 -30dB이고 대신호인 LO 신호가 RF port로 넘어가 전원에서 반사되어 RF 신호와 같이 만나게 되면 측정상 오차를 유발할 수 있으므로 아이소레이터를 사용하였다. 한편 실제 I&Q Demodulator에서 나오는 직류신호를 통해 위상을 보다

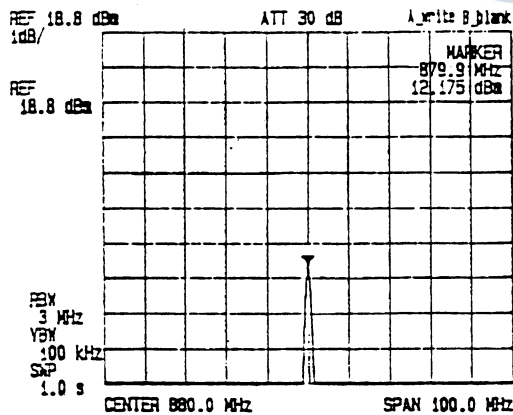
효율적으로 측정하기 위하여 XY-Recorder를 사용해 직접 원을 그려서 위상을 측정하였다.

III. 실험 및 결과

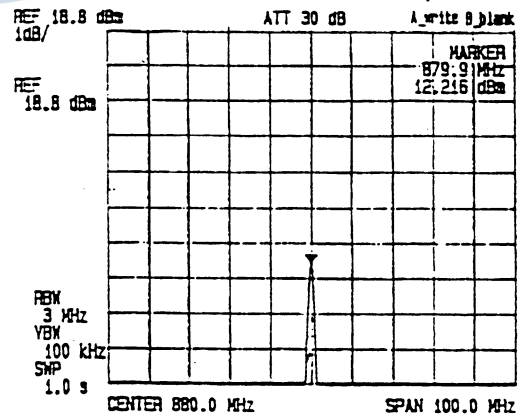
1. 이득 제어 실험

일반적으로 입력 전력 P_i 가 증가하더라도 증폭기의 이득은 크게 변하지 않는다. 이득의 변화폭을 크게 하기 위해 그림 2.1와 같이 감쇠기 Att_2 를 사용하였다. 바이어스 전압 V_{A2} 에 의해 조절되는 감쇠기는 증폭기의 이득 변화 역할을 하게 된다. 입력전력 P_i 가 인가되었을 때는 감쇠기 Att_2 의 감쇠량이 바뀌면 이득이 바뀐 효과와 같다.

결과적으로 감쇠기 Att_2 를 변화시켰을 때 출력 P_o 가 일정하면 변화하는 이득을 ALC에 의해 일정하게 바꾸는 효과와 같게 된다. 또한 그림 2.1의 검출기에서 RF 전력을 검출할 때 검출할 수 있는 전력의 Dynamic range가 있다. 여기서 사용된 검출기는 3dBm에서 7dBm까지 전력이 변할 때마다 선형적으로 DC 전압으로 변하게 된다. 따라서 검출기에 따라서 이득을 제어할 수 있는 범위가 결정하게 된다. Att_1 은 이득이 변하게 되면 ALC의 출력에 의해 감쇠가 되어 이득을 일정하게 해주는



(a) 바이어스 전압 $V_{A2}=4.5$ V(-6.23dB) 일 때의 측정전압

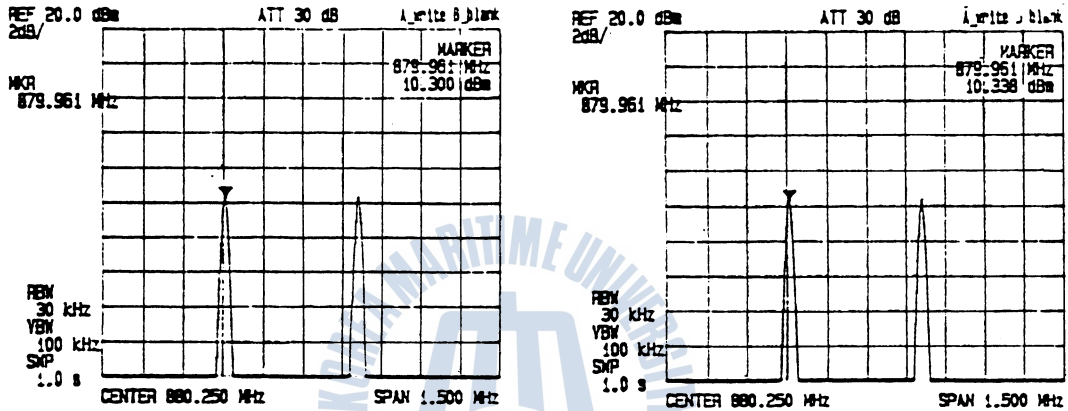


(b) 바이어스 전압 $V_{A2}=20$ V(p1.23dB) 일 때의 측정전압

그림 3.1 Single tone이 인가되었을 때 AGC에 의한 이득제어

역할을 하는데, 이 감쇠기도 감쇠가 생기면 위상이 변하면 안되므로 저위상 변화 감쇠기를 사용하

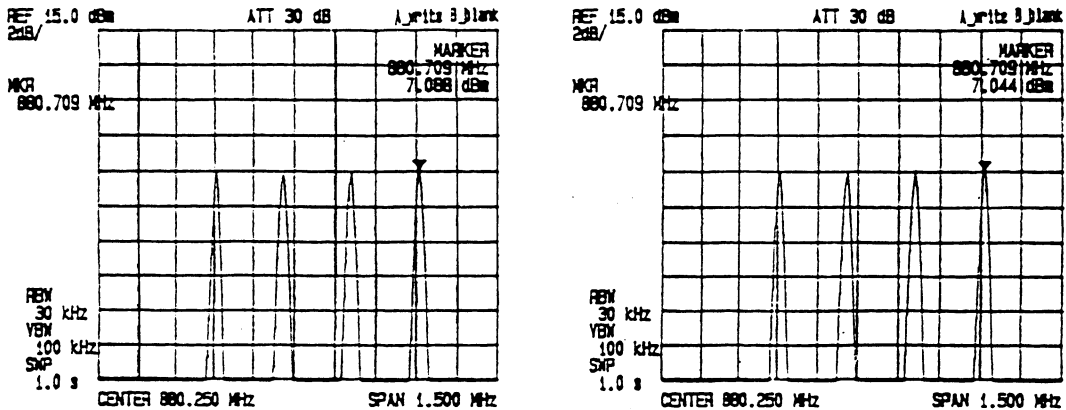
였다. Att₁는 이득을 원하는 이득으로 조정할 수 있도록 하는 역할을 한다. 그림 3.1에서 Single tone신호가 인가되고, 감쇠기 Att₂가 -1dB, -6dB 감쇠되었을 때 ALC를 걸어주면 출력 P₀가 일정하게 됨을 알 수 있다. 그림 3.2와 3.3은 two tone, four tone이 인가되고, 감쇠기 Att₂를 -1dB, -6dB 감쇠시켰을 때, 출력 P₀가 일정하게 됨을 알 수 있다.



(a) 바이어스 전압 $V_{A2}=4.5$ V(-6.23dB) 일 때
의 측정전압

(b) 바이어스 전압 $V_{A2}=20$ V(-1.23dB) 일 때
의 측정전압

그림 3.2 Two tone이 인가되었을 때 AGC에 의한 이득제어



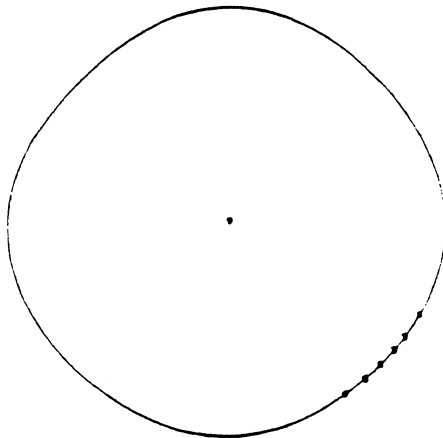
(a) 바이어스 전압 $V_{A2}=4.5$ V(-6.23dB) 일 때
의 측정전압

(b) 바이어스 전압 $V_{A2}=20$ V(-1.23dB) 일 때
의 측정전압

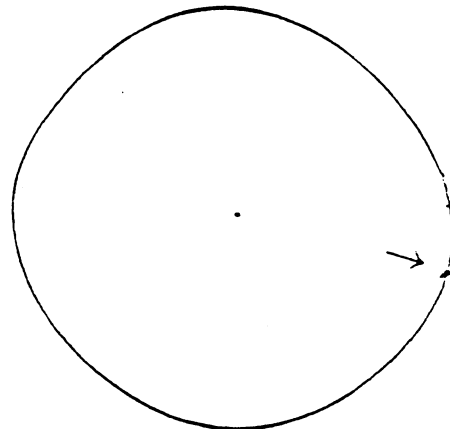
그림 3.3 four tone이 인가되었을 때 AGC에 의한 이득제어

2. 위상제어 실험

위상도 증폭기의 위상변화폭을 키우기 위해 그림 2.1과 같이 위상변환기 ϕ_2 가 사용되었다. V_{B2} 에 의해 조절되는 위상변환기의 위상변화는 증폭기의 위상변화인 것처럼 보이게 된다. 즉, 입력신호 P_i 가 인가되고 위상변환기 ϕ_2 의 위상을 변화시켰을 때 출력 P_o 의 위상이 변화하지 않으면 변화하는 증폭기의 위상을 ALC에 의해 일정하게 locking 시키는 효과와 같게 된다. 그림 3.4는 하나의 신호가 인가되고, ALC를 걸었을 때와 걸지 않았을 때 위상변환기 ϕ_2 의 바이어스 전압 V_{B2} 를 0,1,2,3,4,5 V로 변화시켜 보면서 위상값을 I&Q Demodulator를 이용해 측정하였다. 그림에서 위상변환기 ϕ_2 의 바이어스 전압 V_{B2} 를 0,1,2,3,4,5 V로 변화시켜 보면, ALC를 걸지 않았을 때는 위상이 시계방향으로 꺾히고 ALC를 걸었을 때는 한 점에 위상이 만나는 것을 알 수 있다. 이것으로 위상변환기 ϕ_2 의 위상을 인위적으로 변화시켜 증폭기의 위상을 변화시키면 I&Q Demodulator와 ALC에 의해 제어되는 전압 V_0 가 위상변환기 ϕ_1 을 조절해 출력 P_o 의 위상을 항상 일정하게 만들어 주는 것을 알 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 그림 2.3의 마지막 OP Amp에 출력전압 V_0 가 OP Amp의 출력제한으로 인해 실제 위상변환기의 위상이 180° 정도 밖에 못들도록 되어 있으므로, A점과 B점의 위상차가 너무 크면 제대로 동작이 안됨을 알 수 있다. 그림 3.5, 3.6은 two tone, FM 신호들이 인가된 경우를 나타낸다. Phase locking이 걸리지 않았을 때 위상변환기 ϕ_2 의 여러가지 바이어스 전압 V_{B2} 의 값에 의해 위상이 서로 다르게 나타남을 나타낸다. Phase locking이 걸렸을 때는 증폭기의 위상이 변하더라도 한 점에 위상이 고정되는 것을 알 수 있다.

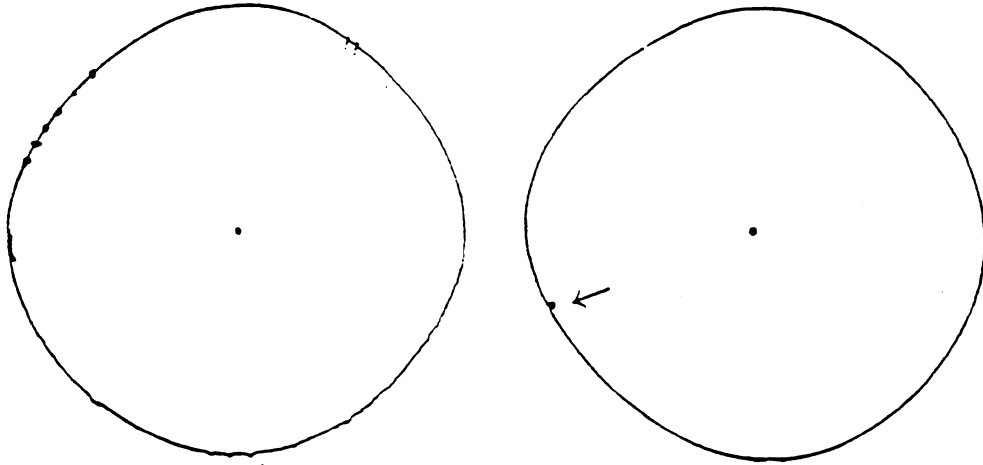


(a) Phase locking 시키지 않은 경우
(반시계 방향으로 $V_{B2}=0,1,2,3,4,5V$)



(b) Phase locking 시킨 경우
($V_{B2}=0,1,2,3,4,5V$ 일때 위상은 한점에서 고정된다.)

그림 3.4 Single tone이 인가되었을 때의 위상제어



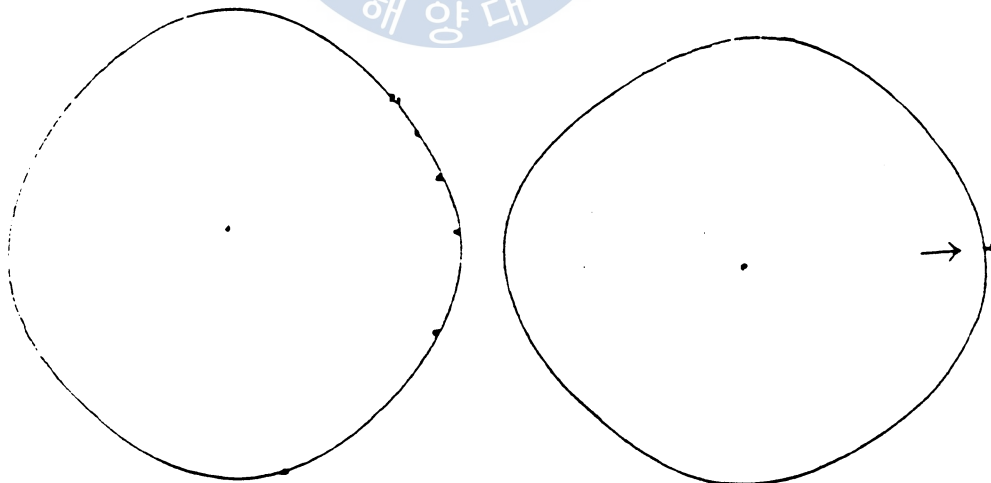
(a) Phase locking 시키지 않은 경우

(반시계 방향으로 $V_{B2}=0,1,2,3,4,5V$)

(b) Phase locking 시킨 경우

($V_{B2}=0,1,2,3,4,5V$ 일때 위상은 한점에서 고정된다.)

그림 3.5 Twon tone이 인가되었을 때의 위상제어



(a) Phase locking 시키지 않은 경우

(반시계 방향으로 $V_{B2}=0,2,4,6,8,10V$)

(b) Phase locking 시킨 경우

($V_{B2}=0,2,4,6,8,10V$ 일때 위상은 한점에서 고정된다.)

그림 3.6 FM 신호가 인가되었을 때의 위상제어

IV. 결 론

본 논문은 UHF 대역에서 고출력증폭기의 이득과 위상을 제어하는 시스템을 설계, 제작하였다. 측정시스템은 ALC, I&Q Demodulator, 바이어스 전압에 따라 위상이 변하는 위상변환기, 감쇠가 생기더라도 위상이 변하지 않는 저위상 변환 감쇠기, RF 신호를 직류신호로 크기에 따라 변환시켜주는 검출기 등으로 구성된다. 제작된 시스템으로 측정한 결과 이득은 증폭기가 바이어스 전압에 따라 -5dB 변하더라도 전체이득은 변하지 않았고, 오차는 0.2dB 이하임을 확인할 수 있었다. 또한 위상은 바이어스 전압에 따라 10° 전후 간격으로 증폭기의 위상을 변화시키더라도 전체위상은 변하지 않았고, 오차는 1° 이하임을 확인할 수 있었다. 여기서 유의해야 될 점은 시스템내에 있는 검출기가 RF 신호의 크기에 따라 일정하게 DC 신호로 변환시키는 과정에서 너무 낮거나, 너무 높으면 특성이 급격히 안 좋아지게 된다. HP사의 HSMS 2800인 경우 -3dBm부터 7dBm까지만 측정이 가능하게 되지만, 다이오드 종류에 따라 Dynamic range가 10dB 이상 될 수도 있다. 실제 사용되는 고출력 증폭기의 이득변화는 2-3dB이므로 Dynamic range 범위 안에 들게 된다. 또한 I&Q Demodulator와 ALC로 구성된 부분의 출력이 최대시스템에서 나오는 최대 직류출력은 15V밖에 되지 않아서 실제 360°까지의 전압을 커버할 수 없지만 실제 사용되는 고출력 증폭기의 위상변화는 최대 20° 전후이므로 이 부분까지는 위상을 고정시킬 수 있다. 또한, Op Amp의 바이어스 전압을 키우면 Op Amp가 자주 손상되어 ALC의 오동작을 유도하므로 OP Amp에 가급적 작은 바이어스 전압을 걸어줄 필요가 있다. 한편, 여기 사용된 System은 감쇄기로 이득을 조절하기 때문에 이득을 키울 수는 없다. 시스템 안의 저위상변환 감쇄기는 Dynamic range가 10dB이고 이때의 입력 반사 손실을 작게하면서 (10dB 이하) 위상을 3°정도 밖에 변하지 않도록 하였다. 실제 사용되는 이득변화는 2~3dB 이므로 위상은 1°이내에서 변하게 된다.

위상과 이득을 제어하는 이 시스템은 이득과 위상을 정확하게 고정시키며, 이득과 위상을 제어할 수 있어서 선형화기기 등 대출력 증폭기의 위상과 이득을 맞추어줄 필요가 있을 때 응용도가 높다. 또한, Multi tone에 대한 위상 측정을 하는 시스템도 비교적 낮은 가격으로 제작이 가능하기 때문에 일반실험에 많이 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. John L.b.Walker, "High power GaAs FET amplifier", Artech House, 1993.
2. S.A.Mass, "Nonlinear microwave circuits", Artech House, 1988.
3. L.Bahl, P.Bhartia, "Microwave solid state circuit design", John Willey & Sons Inc., 1988.
4. S.K.Koul, B.Bhat, "Microwave and millimeter wave phase shifters", Artech House, 1991.
5. S.Walker, "A low phase shift attenuator", IEEE Trans Microwave Theory and Tech., vol.42, No.2, pp.182~185, 1994.
6. 강인호, 이창복, 정옥현, 장익수, 윤상원, "Quadrature mixer를 이용한 S-parameter의 측정", 대한 전자공학회 마이크로파 연구회 학술발표회 논문집, pp.166~168, 1994.
7. 김병철, "3-dB Coupler Tuner를 이용한 대신호 S-Parameter의 측정", 박사학위논문, 서강대학교, pp.6~18, 1991.

