

# 위성통신용 저 잡음 증폭기 기술

김 용 훈

광주과학기술원 기전공학과

## I. 서 론

정보화 시대가 도래하면서 국가간의 정보 교환이 급속히 증가하고 있으며 이 정보를 전송 또는 연결하여주는 통신 인공위성의 이용과 역할이 아주 중요시되고 있다. 지금까지는 인공위성이 대륙간 통신 중계로만 사용되어왔으나 이동 통신의 기술 개발과 더불어 90년대 말이 되면서 저 궤도를 이용한 위성 이동통신이 새로운 global mobile communication으로 소개되면서 서비스를 시작하게 된다. 위성은 지상과 원거리에 위치하고있어 지상국에서 송신된 상향 신호는 대기권을 통과하면서 현저히 감쇄되어 아주 미약한 신호가 위성의 수신기 입력단에 도달하게 된다. 주변 잡음과 혼합된 미약한 수신 신호를 양질의 신호로 증폭하여 다시 지상국으로 전송하려면 무엇보다 수신기 입력단의 front-end 첫째단에 위치한 저 잡음 증폭기의 특성이 아주 우수하여야 한다. 위성에 이용되는 저 잡음 증폭기도 지상에서 사용되는 저 잡음 증폭기와 개발하는데 큰 차이는 없지만 우주라는 특수한 환경에서 동작하여야하므로 본 기고에서는 우주 환경에서 저 잡음 증폭기의 설계와 제작에 꼭 고려하여야할 사항들을 고찰하여 보았다. 우주 환경에서의 저 잡음 증폭기에 관련되는 요구사항인 신뢰도, 고효율 정류 및 소모전력, 온도 변화에 따른 잡음 지수 이득의 변화 등을 언급하였다. 또한 저 잡음 증폭기 소자의 선택 시 고려 하여야할 점과 증폭기 설계 방법들을 비교하여 위성용 저 잡음 증폭기에 알맞은 회로 구현에 대하여서도 분석하였다.

## II. 우주환경에서의 저 잡음 증폭기

위성에 이용되는 전자부품들은 지상에서 사용되는 부품들과 달리 우주공간의 특수한 환경에서 위성의 수명이 다 할 때까지 미리 정하여진 성능 요구 조건을 만족시켜야만하며 위성용 저 잡음 증폭

기들도 우주 환경에서 위성의 EOL(End of Life) 성능을 충족시킬 수 있도록 설계 되어져야한다. 일반적으로 위성에 이용되는 전자 부품들은 지상과 다른 우주환경에서도 정상적인 전기적 성능을 나타낼 수 있도록 우주검증(space qualification)이 된 소자를 선택하여 시스템의 성능에 맞도록 회로를 설계하여야하는데 전자는 소자의 스크린(screening)에 관한 것이므로 본 내용에서는 더 이상 깊이 다루지 않고 후자에 관하여서 증폭기의 신뢰도와 관련된 전기적 성능 (electrical performance)부분만 좀더 언급하고자한다.

1. 발사환경에서 저 잡음 증폭기의 요구사항

위성용 저 잡음 증폭기는 위성을 실고 가는 로켓의 발사과정에서 발생하는 기계적 충격(mechanical shock), 음향 충격(acoustic shock), 열 충격(thermal shock), 진동(vibration) 등의 발사환경에서도 지탱할 수 있도록 설계 제작 되어져야한다. 로켓의 위성궤도 진입 시간은 비교적 짧으나 발사환경에서 전자 부품에 고장이 발생하지 말아야 우주환경에서 정상적으로 작동할 수 있는 것이다.

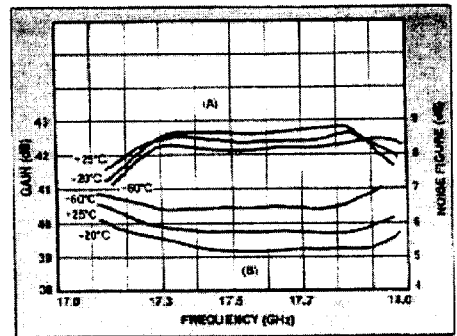
2. 우주환경에서 저 잡음 증폭기의 요구사항

일반적으로 저 잡음 증폭기는 잡음 지수가 작고 이득이 크며 선형성과 입력단과 출력 단의 정합이 좋도록 설계되어져야 한다. 그러나 위성에 사용되는 저 잡음 증폭기는 이러한 일반적인 요구사항 이외에도 위성의 무게와 부피를 줄이고 전력 소모를 줄여야한다. 이렇게 함으로써 위성의 태양 전지판 크기를 좀더 작게 제작할 수 있고 발사 비용과 위성체 제작비용을 궁극적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 지상에서 사용하는 저 잡음 증폭기에 비하여 우주 환경에서 사용되어지는 저 잡음 증폭기는 다음과 같은 사항들이 추가적으로 고려되어 설계되어져야 한다.

- 고효율 정류 및 적은 소모전력
- 소형, 경량 제작
- 온도 변화에 따른 이득 안정도
- 온도 변화에 따른 잡음 지수의 변환

- 1dB compression point 변환
- 저 잡음 증폭기의 MTBF(Mean Time Between Failure)

1) 온도 변화에 따른 이득, 잡음 지수 및 변환 증폭기는 주변 온도가 변환에 따라 이득뿐만 아니라 잡음지수도 변하게되는데 그림 1에서처럼 주변 온도가 상승하면 이득이 감소하고 온도가 내려가면 반대로 이득이 증가하는 현상을 보여주고 있다.



(그림 1) 온도 변화에 따른 증폭기 이득과 잡음 지수의 변환

증폭기는 일반적으로 실내온도 23°C 에서 이득 값을 정하며 증폭기에 이용된 소자에 따라 조금 차이는 있지만 저 잡음 증폭기, 드라이버 증폭기인 경우 게이트 단자의 음전압에 따라 차이는 있으며 약 0.01dB - 0.015dB/°C/stage의 이득 변환이 발생한다.<sup>[1,2]</sup> 우주에서의 온도 변환은 위성이 태양을 향할 때와 위성이 지구의 그림자에서 선화할 때 차이가 아주 심하여 위성체의 열 제어 서브 시스템을 이용하여 온도를 제어하며 이러한 온도 변화에 따른 증폭기 이득의 변환을 최소화하기 위하여 증폭기 내부에 온도 보상회로가 필수적으로 필요로 하게 된다. 온도 변화에 따른 잡음지수 변환은 그림 1에서처럼 이득의 경우와 달리 온도가 낮아지면 잡음지수가 감소하고 반대로 온도가 증가하면 잡음지수가 약 0.01dB/°C 증가한다.

저 잡음 증폭기의 이득 온도 보상은 PIN 다이오드를 이용한 감쇄기로 잡음지수에 대한 영향을 최소화하면서 증폭기 이득 slope의 변화를 아주 작게 제어하며 이러한 보상회로를 사용하게되면 온도

변환에 따른 이득 변환을 1/4에서 1/2 까지 줄일 수 있다.

증폭기의 선형 특성을 결정하는 1dB compression point도 저 잡음 증폭기의 경우 동작 온도에 반비례하며 온도가 증가하면 1dB compression point는 0.01dB/°C 감쇄하여 결국 증폭기의 dynamic range를 작게 만든다.

2) 고효율 정류 및 소모전력

우주에서 인공위성에 필요한 전력은 solar cell을 이용한 태양 전지판으로부터 공급을 받으며 모든 전자 부품은 이 전력으로부터 회로에 필요한 전압으로 정류하여 사용한다. 위성용 저 잡음 증폭기는 마이크로파 대역에서는 주로 GaAs FET 또는 HEMT를 사용하며 드레인단에 +5volt ~ +3volt의 전압과 게이트단과 PIN 감쇄기에 -5volt전압이 필요하게되는데 위성으로부터 공급받는 소모전력을 최소화하기 위하여 정류 회로는 최대의 효율과 정류된 전압의 ripple이 최소 되도록 설계 되어야 한다. 위성에서는 효율이 좋은 switching regulator를 주로 사용하며 이 방식은 75% 이상의 전력변환 효율을 제공할 수 있다.

3) 저 잡음 증폭기의 MTBF(Mean Time Between Failure)

저 잡음 증폭기뿐만 아니라 위성에 탑재되는 모든 전자 부품은 위성의 EOL까지 요구된 전기적 성능이 보장되어야 하고 이것은 곧 증폭기에 사용되는 소자의 신뢰도와 관계되나 가속시험(accelerated life testing)을 거쳐 space qualification된 소자를 이용한 1단 저 잡음 증폭기의 경우 전원 공급기를 포함하여 10~100 FITS (failures in 10<sup>9</sup> hours) 정도로 신뢰도를 보장할 수 있는 것으로 예상된다. 예시로 MIL-STD-883 Method 5008 Class B와 S로 스크린 된 소자 경우의 저 잡음 증폭기에 대한 MTBF (hours)를 표 1에 제시하였다.<sup>[2]</sup>

4단 이상의 저 잡음 증폭기 MTBF(hours)는 식1과 같이 계산할 수 있다.

$$MTBF(hours) = 4,000,000hrs \times 3N \quad (1)$$

<표 1> 저 잡음 증폭기 스테이지에 따른 MTBF (hours) 예시

Class	one-stage amplifier	two-stage amplifier	three-stage amplifier	four-stage amplifier
Class B	3,000,000	2,000,000	1,200,000	1,100,000
Class C	12,000,000	8,200,000	4,900,000	4,400,000

여기서 N은 저 잡음 증폭기의 stage 수 이다.

III. 저 잡음 증폭기의 기본 이론

1. 선형 two-port의 잡음

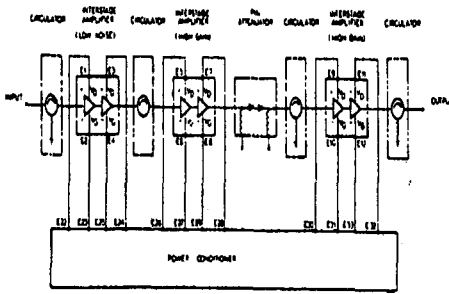
일반적 선형 two-port에서 잡음 지수 NF는 대역폭과 이득의 함수로써 잡음 특성을 나타내며 식 2와 같이 표시된다.

$$NF = \frac{N_o}{kT_oBG} > 1 \quad (2)$$

N<sub>o</sub>=잡음 출력, T<sub>o</sub>= 290°K, k=1.374×10<sup>-23</sup> joule/°K Boltzmann 상수, B=잡음 대역 폭 그리고 G= two-port의 전달 전력 이득 (transducer power gain)이다. 1단으로 구성된 two-port 경우의 잡음 지수와 달리 인공위성에 탑재되는 통신 전송기의 수신기는 지상국으로부터 전송되어오는 상향 신호의 C/N 비를 향상시키기 위하여 수신단 front-end 첫단에 저 잡음 증폭기를 이용하며 또한 충분한 이득을 얻기 위하여 그림2와 같이 여러 단의 증폭기를 직렬 형태로 연결하여 사용한다. 또한 증폭기의 중간단에 2장에서 언급한 것처럼 출력 이득 변동에 대한 온도 보상을 위하여 PIN 감쇄기를 첨가한다. 다단으로 구성된 저 잡음 증폭기에서는 각 단의 증폭기 이득과 잡음 지수에 의하여 전체 증폭기의 특성이 결정되므로 각단의 증폭기 잡음 지수 NF<sub>n</sub>와 이득 G<sub>n</sub> 값들이 회로의 설계에 고려 되어져야한다.

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{NF_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i} \quad (3)$$

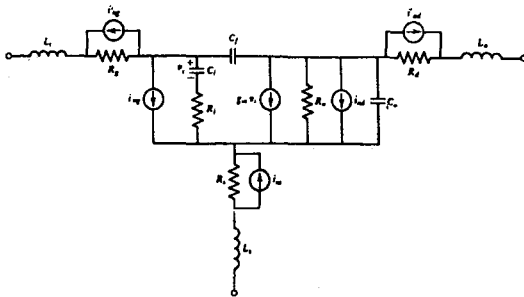
다단으로 구성된 저 잡음 증폭기는 식(3)에서와 같이 첫번째단의 증폭기 잡음 지수가 작고 이득이 충분히 크다면 둘째단 이상의 증폭기로부터의 잡음 증가 영향은 적어지므로 첫번째단에서 최소의 잡음 지수와 최대의 이득을 갖도록 설계 되어져야 한다.



〈그림 2〉 위성용 다단 저 잡음 증폭기의 구성도

2. 잡음 지수(Noise Figure : NF)

최적의 저 잡음 증폭기를 설계하려면 트랜지스터 소자의 잡음 지수 NF, 등가 잡음 저항 Rn 값을 제작자로부터 제공받거나 또는 GaAs FET나 HEMT의 경우 <그림 3>에 제시한 소자의 잡음 등가 모델을 이용하여 값들을 계산한 후 증폭기를 설계 제작 할 수 있다.



〈그림 3〉 GaAs FET 소자의 잡음 등가 회로<sup>[3]</sup>

잡음 지수는 소자의 입력단 S<sub>in</sub>/N<sub>in</sub> 값과 출력단 S<sub>out</sub>/N<sub>out</sub> 값의 비례 관계를 dB로 나타낸 값이며 two-port의 잡음 지수는 식 4와 같다.

$$NF = NF_{min} + \frac{4R_n |\Gamma_s - \Gamma_{sm}|^2}{Z_o [1 + |\Gamma_{sm}|^2] [1 - |\Gamma_s|^2]^2} \quad (4)$$

여기서 R<sub>n</sub>=등가 잡음 저항, Z<sub>o</sub>=특성 임피던스, Γ<sub>s</sub>=소스 반사계수, 그리고 Γ<sub>sm</sub>=잡음 지수가 최소 값 NF<sub>min</sub>을 가질 때 소스 반사계수 값이다.

$$\Gamma_{sm} = \frac{Y_o - Y_{sm}}{Y_o + Y_{sm}} \quad (5a)$$

$$\Gamma_s = \frac{Y_o - Y_s}{Y_o + Y_s} \quad (5b)$$

특성 어드미턴스 Y<sub>o</sub>=1/Z<sub>o</sub> 이며 계산을 편리하게 하기 위하여 잡음 지수를 소스 어드미턴스의 함수로 표시하면 식 6과 같다.

$$NF = NF_{min} + \frac{R_n}{G_s} [(G_s - G_{sm})^2 + (B_s - B_{sm})^2] \quad (6)$$

$$= NF_{min} + \Delta F \quad (7)$$

여기서

$$NF_{min} = 1 + 2[R_n G_{cor} + \sqrt{R_n G_n + (R_n G_{cor})^2}] \quad (8)$$

$$\Delta F = \frac{R_n}{G_s} [(G_s - G_{sm})^2 + (B_s - B_{sm})^2] \quad (9)$$

위 식에서 NF<sub>min</sub>=1의 값일 때 소자의 소스 입력 어드미턴스 Y<sub>sm</sub> = G<sub>sm</sub> + jB<sub>sm</sub> 이고 잡음지수가 최소 값이 아닌 경우의 소스 어드미턴스는 Y<sub>s</sub> = G<sub>s</sub> + jB<sub>s</sub> 이다. 식(8)에서 G<sub>n</sub>는 등가잡음 컨덕턴스, G<sub>cor</sub>는 상관 어드미턴스(correlation admittance)이며 최소 잡음 지수 NF<sub>min</sub>을 구하기 위한 R<sub>o</sub>, G<sub>n</sub>, Y<sub>c</sub> or 값은 소자의 잡음 등가 모델을 이용하여 잡음 상관 행렬(noise correlation matrix) 계산으로 값을

구할 수 있다.<sup>[4]</sup>

식(9)에서  $\Delta F$  값은 최대 이득을 얻을 수 있는 최적 소스 반사계수( $\Gamma_s$ ) 값으로부터 최적 잡음 지수 값을 얻기 위하여 설정된 임의의 소스 반사 계수에 대하여 최소 잡음 지수 값으로부터의 차이를 의미한다. 최저 잡음 지수  $NF_{min}$ 은 소스 어드미턴스  $Y_s$ 를 최적 입력 어드미턴스  $Y_{sm}$ 값에 정합 시킬 때 구할 수 있다.

### 3. 등가 잡음 저항

등가 잡음 저항  $R_n$ 은 저항 값인 ohm으로 단위가 표시되지만 실질적인 저항을 의미하지는 않으며 단지 저 잡음 증폭기 설계를 위한 회로의 잡음 모델링에 이용되는 수학적인 변수로써 소스 임피던스가 변함에 따라 잡음 지수의 값이 변하는 민감도를 나타내며  $R_n$  값이 크면 소스 임피던스에 대한 민감도가 높다. 등가 잡음 저항  $R_n$ 은 드레인 전류의 동요(fluctuation)에 따라 발생하는 백색 잡음원으로 나타나기 때문에 “flicker noise”가 발생하는 아주 낮은 주파수 대역을 제외하고는 주파수에 거의 무관한 값을 갖는다. 그렇지만 패키징된 소자의 경우 주파수가 증가하면 기생 소자 성분과 상호작용 때문에 잡음지수가 감소하는 현상을 보여주고 있다. 등가잡음 저항은 식(4)로부터 구할 수 있으며 NE 67383 GaAs FET에대한 등가 잡음 저항  $R_n$  값을 <표 2>에 예시로 제시하였다.

$$R_n = Z_o(NF' - \Gamma_m) \frac{1 + |\Gamma_m|^2}{4|\Gamma_m|^2} \quad (10)$$

여기서  $NF'$ 는  $\Gamma_s=0$  일 때 측정된 잡음 지수 값이다.

<표 2> NE 67383 GaAs FET에대한 등가 잡음 저항

Freq.	$\Gamma_m$	$R_n$	$NF_{min}$
2 GHz	0.69 $\angle$ 21°	0.58	0.3
3 GHz	0.60 $\angle$ 31°	0.57	0.5
4 GHz	0.60 $\angle$ 50°	0.51	0.6

### 4. 이득 및 안정도

저 잡음 증폭기는 최소의 잡음 지수와 최대의 출력단 이득을 얻도록 설계되어야 하나 일반적으로 위성 통신에 이용되는 마이크로파 대역에서의 FET 소자는 특성상 최저 잡음 지수와 최대 가용이득 (maximum available gain) 을 동시에 만족시킬 수 없다. 입력 신호를 최적 입력단 반사계수 ( $\Gamma_s$ )에 정합 시키면 최대 가용 이득(maximum available gain)  $G_{max}$ 를 얻을 수 있으나 이러한 경우 식(9)의  $\Delta F$ 값이 커져 증폭기의 잡음 지수 값이 증가하게된다. 반대로 최저 잡음 지수  $NF_{min}$ 에 입력단을 정합 시키면 제휴 이득 (associated gain)  $G_a$ 를 얻을 수 있으나  $G_a$ 는  $G_{max}$ 보다 0.5dB - 1.5dB 정도 작게된다.<sup>[5]</sup>

이와 같이 상반되는 잡음-이득의 관계를 최적화하여 최저 잡음 지수와 최대 출력 이득을 갖는 저 잡음 증폭기를 설계하려면 잡음 지수 원(constant noise figure circle)과 이득 원(constant gain circle)을 Smith chart에 도시하여 잡음 지수 원과 이득 원이 교차하는 점을 선택하여 입력 소스 임피던스 값으로 선정하면 된다.

잡음 지수 원의 반경과 중심점은 소스 반사 계수와 최적 반사계수 그리고 잡음 지수로부터 식 (11)에서 구할 수 있다.

$$C_r = \frac{\Gamma_{sm}}{1 + N_i} \quad (11)$$

$$r_r = \frac{1}{1 + N_i} \sqrt{N_i^2 + N_i(1 - |\Gamma_{sm}|^2)} \quad (12)$$

여기서

$$N_i = \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{sm}|^2}{1 - |\Gamma_s|^2} \quad (13)$$

최소 잡음 지수 값은  $\Gamma_s + \Gamma_{sm}$  일 때 구할 수 있으며 이때  $N_i = r_r = 0$  이되어  $C_r = \Gamma_{sm}$ 가되어 원 중심점이 최소 잡음 지수를 위한 반사계수 값이 된다. 저 잡음 증폭기에서 입력단에 최소 잡음 지

수를 갖도록 소스 어드미턴스 값을 정하면 이때 출력단에 식 (14)와 같이 부하 반사 계수를 정하여 최대 제휴 이득을 얻을 수 있다.

$$\Gamma_L = \left( \frac{S_{22} - \Gamma_{sm} \Delta}{1 - \Gamma_{sm} S_{11}} \right)^* \quad (14)$$

$$\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21} \quad (15)$$

GaAs FET나 HEMT의 잡음 특성은 일반적으로 매우 우수하나 소자 특성상 낮은 마이크로파 대역에서는 안정 계수  $K < 1$ 이 되어 조건부 안정된(conditionally stable) 특성을 가지고 있어 증폭기가 발진할 수 있으며, 안정 계수  $K > 1$ 이면 이때 소자는 무조건 안정(unconditionally stable)하여 최대 이득을 갖도록 설계할 수 있다.  $K < 1$ 인 경우 소자가 불안정하여 입력과 출력단을 50ohm에 정합 시키기 어려우며 소스 어드미턴스  $Y_s$  값의 선정은 증폭기가 안정 되도록 한 후 정합 시켜야하는데 이때  $Y_s \neq Y_{sm}$  가되어  $\Delta F$  값이 급속히 커지면서 잡음 지수 값이 증가하므로 소자가 안정되면서도  $\Delta F$  값이 작도록 증폭기를 구현하는 것이 필요로 하다. 이러한 방법에 대하여서는 다음 장에서 고찰하여 본다.

## IV. 저 잡음 증폭기 설계 방법

### 1. 소자 선택

위성통신은 주로 1GHz - 30GHz 대역의 마이크로파를 반송파로 사용하므로 이 주파수 대역에서 잡음 지수가 작고 이득이 크며 전력 소모가 적은 소자를 선택하여 저 잡음 증폭기를 구현하여야 한다. Bipolar 접합 트랜지스터는 잡음과 이득 그리고 우주공간에서 우주 방사선(space radiation)에 의한 손실이 FET보다 좋으나 마이크로파 대역에서는 MESFET보다 성능이 떨어진다. 이 주파수 대역에서는 잡음 지수 특성이 좋으면서도 이득이 더 높은 GaAs FET나 HEMT (High Electron

Mobility Transistor)를 사용하는 것이 유리하다. 게이트가 2개로 구성된 dual-gate FET는 이득은 크나 증폭기로 사용할 경우 두 번째 게이트를 접지 하여야 하므로 cascode configuration 이 되어 출력 임피던스 값이 높아지고 잡음 지수가 증가하는 단점이 있다. 일반적으로 위성 통신용에는 single-gate로 구성된 MESFET를 주로 사용하며 특히 HEMT는 최저 잡음 지수를 위한 입력 임피던스가 50 Ohm에 가까우며 MESFET의 잡음 지수가 Ku-대역까지 1 -8dB에 비하여 HEMT 잡음 지수는 1-2dB이어서 저 잡음 증폭기의 제작에 적합한 소자로 이용되고 있다. 그러나 HEMT는 온도 변화와 bias 전압이 변동될 때 이득 변환이 MESFET 경우 보다 큰 것으로 나타나 온도 보상 회로가 요구된다.

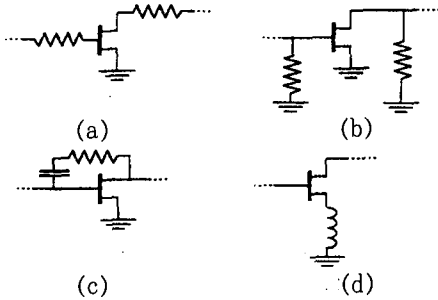
최근에는 단일 소자를 이용한 hybrid 방식의 증폭기 설계 제작에서 벗어나 마이크로파에 이용할 수 있는 우주 품질 인증된 MMIC소자가 제작되어 위성의 통신 시스템에 이용되기도 한다. MMIC는 무엇보다도 기존의 MIC와 달리 크기와 부피가 적어 위성의 크기와 무게, 소모 전력을 줄이는데 기여하는 인공위성용 통신 부품으로 많이 이용될 것이다.

### 2. 증폭기 설계 방법

저 잡음 증폭기는 식(3)에서처럼 최소 잡음 지수 값을 얻으려면 낮은 잡음 지수 값뿐만 아니라 여러 개의 단일 증폭기를 다단(cascade)으로 구성하여 충분히 큰 이득을 갖도록 하여야 한다. 그러나 증폭기를 다단으로 구성할 경우 부품의 숫자가 늘어나 신뢰도가 문제가 된다. 위성에서는 부품의 성능과 함께 신뢰도가 무엇보다 중요시되고 있으며 증폭기 경우의 신뢰도는 2장에서 언급한 것처럼 소자 자체의 우주 품질 인증도 필요하지만 가능한 부품의 개수를 줄이므로 신뢰도를 증가시킬 수 있다. 이와 같이 부품의 개수를 최소화하면서 원하는 이득과 최소 잡음 지수 그리고 증폭기의 발진을 방지하기 위한 안정화 회로를 구성하는 방법에 대하여 고찰하여 보기로 한다.

#### 1) 회로 안정화 방법

증폭기 FET소자에 <그림4>과 같이 작은 저항을 소자의 입력단이나 출력단에 추가하여 회로를 안정 시킬 수 있다. 안정화 방법에는 resistive loading, parallel feedback, series feedback, balanced amplifier 등이 있다.



(a)series resistor (b)shunt resistor  
(c)parallel feedback (d)series feedback

<그림 4> 증폭기 FET소자의 안정화 방법

Resistive loading

<그림 3>의 (a), (b) 에서 보는 것처럼 FET 소자 입-출력단에 작은 직렬 저항 또는 분로 (shunt) 저항을 연결하여 정합 임피던스 값을 불안정 영역에서 이동시키므로 회로를 안정시킬 수 있다. 그러나 손실 소자( lossy element)인 저항 소자 자체가 잡음 특성을 저하시키므로 이러한 회로 topology는 저 잡음 증폭기에 적합하지 않다. 그러나 손실 정합 (lossy matching) 증폭기는 크기가 작고 MHz 대역에서도 증폭기의 광대역 특성이 손상되지 않는 DC 바이어스 전압을 구현할 수 있는 장점이 있어 초 광대역 증폭기 설계에 적합하다. 다른 대안으로 무손실 정합 회로망을 이용한 reactively matched amplifier를 이용할 수 있으나 순수한 reactive 소자만으로는 안정도 변수 K 값을 변경시킬 수 없으며 이 방법은 광대역 특성을 갖는 MMIC 다단증폭기 설계의 topology에 이용될 수 있다.

Parallel feedback

출력단의 신호를 저항을 통하여 입력단에 궤환함으로써 소자를 안정시킬 수 있으며 이때 평행

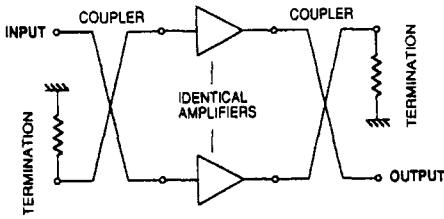
궤환 저항 값으로 인하여 출력 이득이 고주파 부분에서는 감쇄하게 된다. 평행궤환 증폭기 잡음 지수의 증가는 손실 정합 (lossy match amplifier) 증폭기와 비교하여 이론적 해석이나 측정에서 잡음 지수와 이득 특성이 조금 좋은 것으로 보고되고 있으나<sup>[4]</sup> 궤환을 사용 안한 증폭기보다는 잡음이 증가한다.

Series feedback

그림 3(d)처럼 FET 소자의 소스 단자에 저항이나 인덕터를 직렬로 연결하여 접지를 시키므로 parallel feedback 방법과 달리 internal feedback 으로 안정시키는 방법이다. 인덕터를 이용한 직렬 궤환 증폭기는 잡음 정합 임피던스를 거의 최대 이득 정합점에 근사하도록 조절할 수 있고 또한 잡음 특성도 개선할 수 있어 저 잡음 증폭기로 적절한 회로구현 방법이다.

2) Balanced amplifier

밸런스 증폭기는 <그림5>에서처럼 입력단과 출력단에 3-dB 결합기를 이용한 형태이다. quadrature 결합기를 사용하는 경우 두 출력 단자의 위상이 90° 역상이 되고 만일 증폭기 입력단에서 신호가 서로 반사되면 결합기를 경유하여 진행하게 되므로 결국 위상이 180°되어 서로 상쇄되어 완전히 증폭기의 입력단에 정합된다. 이 증폭기는 이러한 특성으로 인하여 MIC 저 잡음 증폭기와 전력 증폭기 구현에 많이 이용되며 single 증폭기와 비교하여 잡음 지수는 결합기 손실만큼 더 증가하고 이득은 단일 증폭기 이득에서 입출력단 결합기의 손실부분 만큼 작다. 증폭기의 안정도는 회로가 충분히 평행 상태라면 아주 우수하며 입출력단의 정합도 아주 좋다. 인공위성용 부품에 대한 요구 조건으로써 아주 중요한 신뢰도에 있어서도 balanced 증폭기는 만약 한쪽의 증폭기가 완전히 고장이 나도 ( 즉  $S_{21}=0$  ) 증폭기의 이득과 출력은 전체의 1/4정도 6 dB 감쇄 하게 되는데 이것은 single 증폭기의 경우 완전히 출력이 없는 경우보다 신뢰도가 훨씬 좋으며 시스템 전체의 고장을 막을 수 있게된다. 그러나 single 증폭기 경우보다 소모 전력과 부품 개수가 2배나되어 위성용 저 잡음 증폭기로서 최적의 선택은 아니다.



〈그림 5〉 밸런스 증폭기의 구성도

3) Cascade 방식

저 손실의 isolator를 사용하여 입력단의 정합을 좋게 하면서 증폭기는 최저 잡음 지수 값을 갖도록 하고 충분한 이득을 얻기 위하여 단일 증폭기를 cascade 하여 설계하는 방식이 가장 일반적으로 많이 사용하며 cascade형의 위성용 저 잡음 증폭기가 〈그림 2〉에 제시되었다.

4) Bias 전압 회로 및 온도 보상회로

FET 소자의 bias는 <그림6>에서처럼 여러 가지 방법을 이용 할 수 있으며 증폭기의 용도에 따라 선택할 수 있다. FET소자에 게이트 단에는 음(-)전압을, 드레인단에 양(+)전압을 인가하는 dual polarity 전압과 소스단에 저항을 첨가하여 드레인단에 양(+)전압만을 사용하는 (a)과 (d)방법을 가장 많이 사용한다. 저 잡음 증폭기에서는 bias 회로에 의하여서도 잡음 특성이 영향을 받으므로 수동 소자에 의한 self-bias 방법보다 트랜지스터를 이용한 능동 bias 회로를 구성하여 사용하는 것이 잡음 특성에 아주 좋다.

온도의 변화에 따라 증폭기 이득 변화를 보상하기 위하여 게이트 전압을 온도 변환에 따라 차이가 나도록 bias 전압을 공급하는 방법이 있으나 잡음 지수가 증가하고 출력 이득이 떨어질 뿐만 아니라 intermodulation product 가 온도에 따라 크게 변하는 단점이 있다. 증폭기의 동작 온도와 bias 전압의 변동에 적은 영향을 받으면서 잡음 지수가 작고 출력 이득을 정확히 제어할 수 있는 방법은 PIN 다이오드 감쇄기를 회로의 중간단에 첨가하여 온도 보상을 할 수 있다. 이때 PIN 다이오드의 삽입손실이 적도록 설계하여 증폭기 전체 이득이 감소되지 않도록 하여야한다. <그림2>처럼 증폭기가 cascade된 경우 1째 단에는 최소 잡음지

수에 마지막 단에는 온도 보상된 bias 회로를 이용하여 일정한 이득을 출력단에 제공할 수 있도록 하여야한다.

	Bias order	Bias polarity
(a)	(1) $V_g$ (2) $V_d$	$V_g < 0$ $V_d > 0$
(b)	(1) $V_g$ (2) $V_d$	$V_g > 0$ $V_d > 0$
(c)	(1) $V_g$ (2) $V_s$	$V_g < 0$ $V_s < 0$
(d)	$V_d$ (only)	$V_d > 0$
(e)	$V_s$ (only)	$V_s < 0$

〈그림 6〉 FET소자의 bias 방법

V. 결 론

우주라는 특수한 환경에서 사용되는 인공위성용 저 잡음 증폭기를 개발하는데 꼭 알아야 할 기술적 사항과 회로의 설계에 필요한 기본 설계 개념에 대하여 고찰하여보았다. 우주환경에서 저 잡음 증폭기의 설계 요구 사항에서는 신뢰도와 주변 온도의 변화에 따른 잡음 지수, 이득의 변화 그리고 전력 소모를 줄일 수 있는 정류회로 방법으로는 switching regulator를 제시하였다. 잡음 지수 특성을 좋게 하면서 안정된 증폭기를 구현하기 위하여서는 series feedback 방법을 이용하여 단일 증폭기를 구현하는 것이 유리하며 balanced amplifier 경우 입력단 정합 특성은 좋으나 잡음 지수와 출력 이득에서는 series feedback 보다 성능이 약간 떨어지는 것을 고찰 할 수 있었다. 증폭기의 동작 온도 변화에 따른 보상 회로는 PIN다이오드를 이용한 감쇄기가 이득 제어면 에서나 잡음 지수 면에서 특성이 좋음을 알 수 있었다. 결론적



으로 위성용 저 잡음 증폭기의 제작을 위하여서는 우주환경, 증폭기의 신뢰도, 최소 잡음 지수, 최대 체휴 이득, 안정도 그리고 온도 변화에 따른 보상 방법 등을 고려하여 최적이 되도록 설계 하여야한다.

참 고 문 헌

[1] O. Ariel, T.Thibout, J.L.Lacombe, "A 1 to 18 GHz High Gain Ultra-Broadband Amplifier with Temperature Compensation," Microwave Journal, pp. 251-262, May, 1989.

[2] MITEQ, AFS Amplifier Products data sheet.

[3] Tri T. Ha, Solid State Microwave Amplifier Design, ch.3 John Wiley, 1981.

[4] K.B. Niclas, "The Exact Noise Figure of Amplifier with Parallel Feedback and Lossy Matching Circuits," IEEE Trans. on MTT, pp. 832-835, May, 1982.

[5] H.F. Cooke, M.Omori, "Basic Techniques minimize Noise in RF Amplifiers," Microwaves & RF, pp. 83-89, April, 1989.

[6] J. Czech, M. Schuenzel, W. Wuerscher, Modulare 4-GHz-Breitbandverstaerker Komponenten fuer Nachrichtensatelliten, NTZ Bd. 30, Heft 5, s. 407-411, 1977.

저 자 소 개



金 容 勳

1952年 9月 3日生  
 1974年 2月 경희대학교 전파공학과(학사)  
 1976年 2月 연세대학교 전자공학과(석사)  
 1990年 7月 독일, Stuttgart 대학교(공학박사)

1976年 8月~1980年 7月 공군제2사관학교 전자공학 교관  
 1980年 9月~1981年 7月 연세대학교, 광문대학교 강사  
 1981年 9月~1983年 9月 독일 Berlin 공대, 항공우주연구소 연구원  
 1983年 10月~1990年 9月 독일 Stuttgart 대학, 우주항법 연구소 연구원  
 1990年 10月~1994年 7月 한국 항공우주연구소 우주응용기술연구실, 전자답재기기 실장  
 1995年 2月~현재 광주과학기술원, 기전공학과 부교수

주관심 분야: 밀리미터파 능·수동소자 및 시스템, 마이크로파 및 밀리미터파 영상시스템