

GaAs MES FET를 이용한 저잡음 증폭기 설계에 관한 연구

전 광 일, 주 창 복*, 박 정 기

고려대학교, *경남대학교

The Design of the Low Noise Amplifier Used GaAs MES FET

Kwang Il Chun,
Korea University

Chang Bok Joo, Chung Kee Park
Kyung Nam University

abstract

The design of a low-Noise amplifier with GaAs schottky-gate field-effect transistors are described
The amplifier achieves 18-20dB gain with a minimum Noise figure 2.0dB at the center frequency of 12GHz

1. 서 론

위성방송 수신기의 컨버터 입력은 약-80dBm 정도의 아주 약한 신호를 수신하기 때문에 컨버터의 마이크로 파증폭기는 저잡음 특성을 가져야 한다.

마이크로 파증폭기는 구조상 Transmission type 과 Reflection type으로 구분되고 대역폭에 따라서 광대역 협대역 증폭기로 나누게 된다.

IMPATT, GUNN, Tunnel diode와 같은 negative resistance를 갖는 Reflection type은 복잡한 Circulator를 필요로 하므로 이보다 Transmission type를 많이 쓰게된다. 또한 Transmission type은 두 가지 형태로 구분할수 있다. Bipolar TR을 이용한 것과 GaAs FET를 이용한 것이다.

GaAs는 Si에 비해서 전자의 이동도가 5-7배나 크고 보다 높은 주 파수(4GHz 이상)에서 제반특성(잡음 지수 안정도)이 Si보다 월등하다

본 논문에서는 2SK353 과MGF-1403을 이용하여 위성 방송수신기에서 사용할수있는 중심주 파수 12GHz에서 최대이득 18-20dB를 갖는 저잡음(최소 잡음 지수 2.0) 증폭기를 두께 0.464mm 비유 전을 2.5 인 미판상에 설계 제작 실험하여 이론과 부합함을 보인다

2. 저잡음 증폭기 이론

(1) 4 단자망 회로 해석

S parameters를 이용하여 증폭기의 신호 흐름도를 아래 그림에 나타내었다.

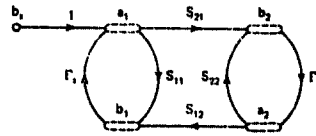


그림1 증폭기의 신호 흐름도

그림에서 Mason's rule을 적용하여

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_{in}\Gamma_L|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_R|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_R|^2} \tag{1-1}$$

$$G_P = \frac{1}{|1 - |\Gamma_{in}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_R|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_R|^2} \tag{1-2}$$

$$G_A = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_L|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{|1 - \Gamma_{out}|^2} \tag{1-3}$$

단

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad \Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_R}{1 - S_{11}\Gamma_R} \tag{1-4}$$

를 구할수 있다

식 1-1에서 Zs, ZL, 이 주어진 ZL, Zs에 대해 정합되기 위해서

$$\Gamma_L^* = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - \Gamma_L S_{22}} \tag{1-5}$$

$$\Gamma_L^* = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - \Gamma_L S_{11}} \tag{1-6}$$

가 되어야 한다

신호원 및 부하가 동시에 정합을 이루었을 때 즉

전달이득을 최대로 할때 식 1-5, 6은 다음과 같이 된다

$$\Gamma_{LM} = C_1 [B_1 \pm (B_1^2 - 4|C_1|^2)^{1/2}] / (2|C_1|^2) \tag{1-7}$$

$$\Gamma_{LW} = C_2 [B_2 \pm (B_2^2 - 4|C_2|^2)^{1/2}] / (2|C_2|^2) \tag{1-8}$$

$$\text{단 } B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \tag{1-9-1}$$

$$B_2 = 1 - |S_{11}|^2 + |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \tag{1-9-2}$$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22} \quad C_2 = S_{22} - \Delta S_{11} \quad \Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \tag{1-9-2}$$

이때 최대전달이득

$$C_{max} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| (K \pm \sqrt{K^2 - 1}) \quad (1-10)$$

식 1-10에서 B_1 및 B_2 가 음일때+, 양일때 -를 취한다

$$G_{TU} = \frac{1 - |\Gamma_{s1}|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_{s1}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_{L}|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_{L}|^2} \quad (1-11)$$

dB 로 표시하면

$$G_{TU} \text{ (dB)} = G_s \text{ (dB)} + G_o \text{ (dB)} + G_L \text{ (dB)} \quad (1-12)$$

이때 최대전달이득 $G_{TU,max}$ 를 얻기위해서, 즉 동시에 정합시키기 위해서

$$\Gamma_s = S_{11}^*, \quad \Gamma_L = S_{22}^* \quad (1-13)$$

가 되어야 하고 이때 최대전달 이득

$$G_{TU,max} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} \quad (1-14)$$

가 된다

(2) 안정도

증폭기의 안정도는 설계상 매우 중요하며 S-parameters로 정할수 있다 그림 1-1에서 임의 입출력 임피던스 Z_s, Z_L 에 대해서 Z_{in} 과 Z_{out} 의 실수부가 0보다 크면 주어진 주파수에서 unconditionally stable 하다고 한다

unconditionally stable 조건은 다음과 같다

$$K > 1 \quad (1-15)$$

$$|\Delta| < 1 \quad (1-16)$$

단

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (1-17)$$

또한 입력 안정원의 반경과 중심은 다음식으로 주어진다

$$r_L = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (\text{radius}) \quad (1-18)$$

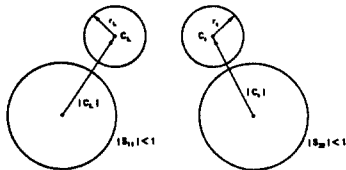
$$C_L = \frac{(S_{22} - \Delta S_{11})^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \quad (\text{center}) \quad (1-19)$$

$$r_s = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (\text{radius}) \quad (1-20)$$

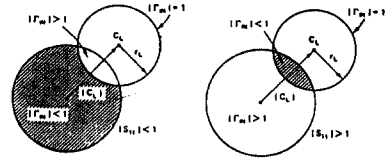
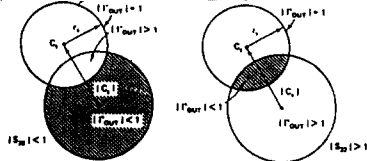
$$C_s = \frac{(S_{11} - \Delta S_{22})^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad (\text{center}) \quad (1-21)$$

위 식에서 주어진 반경과 중심을 smith chart 에 구성하였을 때

unconditionally stable인 경우



와 같이 되며 smith chart의 모든 점에서 안정하다 conditionally stable한 경우



가 되며 빗줄친 부분에서 부하를 취하던 안정한 동작을 할수 있다

(3) 4단자망의 잡음 지수

4단자망의 잡음 지수는 다음식으로 주어진다

$$F = F_n + \frac{R_n}{G} [(G - G_n)^2 + (B_s - B_n)^2] \quad (1-22)$$

잡음 지수는 최적전원 어드미턴스 $Y_n = G_n + jB_n$ 에서 최소값을 갖는다.

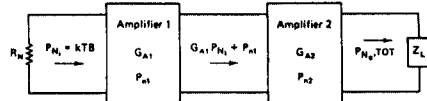


그림 1-2 단 증폭기의 잡음 지수

그림 1-2에서 2단 증폭기 잡음 지수

$$F = \frac{P_{n,TOT}}{P_n G_{A1} G_{A2}} = 1 + \frac{P_{n1}}{P_n G_{A1}} + \frac{P_{n2}}{P_n G_{A1} G_{A2}} \quad (1-23)$$

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}} \quad (1-24)$$

$$F_1 = 1 + \frac{P_{n1}}{P_n G_{A1}} \quad F_2 = 1 + \frac{P_{n2}}{P_n G_{A2}} \quad (1-25)$$

F_1, F_2 는 첫단, 둘째단의 잡음 지수

위 식에서 알수 있듯이 2단 증폭기의 전체잡음 지수는 첫단의 잡음 지수에 따라 결정된다

(4) 이득 설계

증폭기가 최대전달이득을 얻기 위해서는 신호원 및 부하 반사계수가 식 1-7,8의 \sqrt{SM} 및 \sqrt{LM} 이 되도록 정하면 된다 $K > 1$ 인 경우는 G_{max} 는 식 1-10으로 정의되며

$K = 1$ 인 경우는 최대안정이득

$$C_{max} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right|$$

인 것을 알수 있다

$K < 1$ 인 경우 G_{max} 는 존재하지 않으므로 이때는 동작

전력이득을 이용하여 증폭기를 설계한다

식 1-2를 이용하여 정전력이득원의 중심 C_p 와 반경

r_p 를 구하면 다음과 같이 된다

$$C_p = \frac{C_o^*}{K} = \frac{K_p (S_{22}^* - \Delta^* S_{11})}{1 + K_p (|S_{22}|^2 - |\Delta|^2)} \quad (1-26)$$

$$r_p = \frac{(1 - 2K|S_{12}S_{21}|g_p + |S_{12}S_{21}|g_p^2)^{1/2}}{|1 + K_p (|S_{22}|^2 - |\Delta|^2)|} \quad (1-27)$$

$$\text{단 } g = G_p / |S_{21}|^2 \quad (1-28)$$

(5) 저잡음 설계

식 1-22을 이용하여 정 잡음 지수원의 중심 C_F 와 반경 r_F 는 다음과 같이 주어진다

$$C_F = \frac{\Gamma_n}{1 + N} \quad (1-29)$$

$$r_F = \frac{1}{1 + N} \sqrt{N^2 + N(1 - |\Gamma_n|^2)} \quad (1-30)$$

식 1-22에서 알수있듯이 입력 임피던스 Z_s 에 따라서

잡음 지수는 결정되며 출력 임피던스 Z_L 은 다음 식으로 구할수 있다

$$r_L = \left(\frac{S_{11} - \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in} S_{11}} \right)^* = \left(\frac{S_{11} - \Gamma_{in} \Delta}{1 - \Gamma_{in} S_{11}} \right)^* \quad (1-31)$$

3. 증폭기 설계 및 제작

(1) PARAMETERS

MGF-1403 (최소 잡음 지수)

$$\begin{aligned} I_D &= 10\text{mA}, V_{DS} = 3\text{V}, F = 12\text{GHz} \\ S_{11} &= 0.881/155.3 \quad S_{12} = 0.045/-45.1 \\ S_{21} &= 1.462/-28.3 \quad S_{22} = 0.7/-177.5 \end{aligned}$$

최소 잡음 지수 = 1.8dB

최소 잡음 지수 이득 = 8-10, 5dB

2SK353 (최대 이득)

$$\begin{aligned} I_D &= 20\text{mA}, V_{DS} = 3\text{V}, F = 12\text{GHz} \\ S_{11} &= 0.363/169 \quad S_{12} = 0.076/23 \\ S_{21} &= 1.988/8 \quad S_{22} = 0.642/-108 \end{aligned}$$

최대 이득 = 10dB

(2) 2 단 증폭기 설계

첫단은 최소 잡음 지수를 갖게 설계하고 둘째단은

최대 이득을 갖도록 설계한다

첫단 설계

첫단은 MGF-1403으로 설계한다

의 S-parameter와 식 1-9, 17로 부터 $\Delta = 0.57775/-17.102$, $K = 0.5137$ 이므로 MGF-1403은 conditionally

stable하다 식 1-18-21로부터

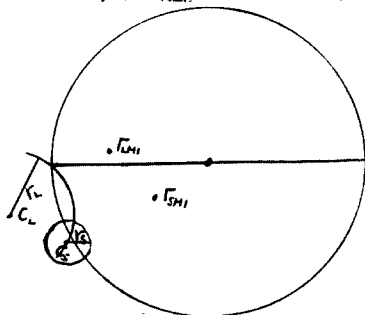
$$C_L = 1.2692/190.098 \quad r_L = 0.4212$$

$$C_s = 1.00838/-151.0086 \quad r_s = 0.1487$$

최소 잡음 지수 입력 반사 계수 $\sqrt{SM1} = 0.527/-148.3$ 으로

부터 식 1-31를 이용하여 $\sqrt{LM1} = 0.751/-179.4782$

$C_L, r_L, C_s, r_s, \sqrt{SM1}, \sqrt{LM1}$ 를 smith chart에 나타내면



그림에서 알수 있듯이 $\sqrt{SM1}, \sqrt{LM1}$ 은 안정한 영역에서 동작한다

둘째단 설계

둘째단은 최대 이득 설계를 하며 2SK353으로 설계한다

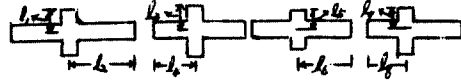
식 1-9, 17에서 $\Delta = 0.1271/97.461$ $K = 1.5627$ 이므로 이

FET은 conditionally stable하다

식 1-9로 부터 $C_1 = 0.3013/159.7244$, $C_2 = 0.6056/2494$

$B_1 = 0.7035$, $B_2 = 1.22642$ 를 얻을수 있다

위에서 구한 $\sqrt{SM1}, \sqrt{LM1}, \sqrt{SM2}, \sqrt{LM2}$ 로 부터 정합회로를 다음과 같이 구성할수 있다



$$l_1 = 0.100535\lambda \quad l_5 = 0.093505\lambda \quad l_2 = 0.5775\lambda$$

$$l_6 = 0.5493\lambda \quad l_3 = 0.13244\lambda \quad l_7 = 0.1327\lambda$$

$$l_4 = 0.146\lambda \quad l_8 = 0.1553\lambda$$

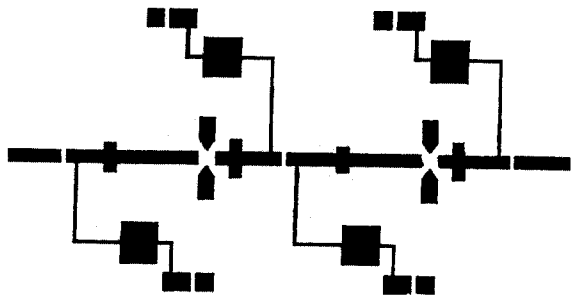
(3) 마이크로스트립선로 제작

폭을 구하는 프로그램은 다음과 같다

```

10 P=3.1415926535897931E+01:MM=444:TT=0.01:EP=2.5:F=12
20 PRINT USING"###.000000" "1M:PRINT USING" GR=88.000 "1ER:PRINT USING" F
   =88.00042"1F
30 PRINT"ID W(LM1) EE W(D1) ER(F) LAMBDA LAMBDA/4"
40 FOR I=1 TO 4:READ ZD1:ZD2:PRINT USING"###.##"ZD1
50 BODU=ZD1:BODU=1/BOD1:ZD1=ZD1:ZD2=ZD2:ZD3=0
60 WHILE (ABS(ZD1-ZD2)/ZD1) > .000001 AND (ZC3)
70 ZD=ZD1+ZD2/2:ZD1=ZD2:BODU=ZD1:BODU=2*BODU
80 ZD1=ZD1:BOD1=ZD1:ZD2=ZD2:ZD3=ZD3+ZD1:ZD1=ZD1:ZD2=ZD2:ZD3=ZD3+ZD1
90 IF W>.25 THEN CPRI=1.000000/P1+2*LOG(ZD1)/ZD1+94.15/LOG(ER)/(MM+B*CPRI)/.08
   BQ/ER
100 ZD1=ZD1:ZD2=ZD2:ZD3=ZD3+(1+0*(F/PP)^2)/3+3+1
110 IF ZD1=ZD2 THEN ZD2=ZD1 ELSE ZD1=ZD1
120 BODU
130 BODU=1/BODU:ZD1=LAMBDA/4-LAMBDA/4:ZD2=LAMBDA/4:PRINT
140 NEXT I:END
150 PRINT USING"###.000000" "44: BODU=300
160 PRINT USING"###.000000" "1ER:PRINT USING" "###.##" "1ER:PRINT USING" 290
180 PRINT USING"###.000000" "1LAMBDA:PRINT USING" "###.##" "1LAMBDA:PRINT USING" 190
190 ER=ER-(ER-88)/(1+0*(F/PP)^2):RETURN
200 P=MM/LOG(1+12*MM/PI) IF MCH THEN P=MM*P+.04*(1-M/PI)^2
210 ER=(ER-1)/2+(ER+1)/2:PRINT USING"###.##" "1ER:PRINT USING" 220
220 A=2B/LOG(ER-1)/2+(ER-1)/2+(ER+1)/2*(1+2B*(1-1/ER)
230 B=MM*(1+2/LOG(ER-1))
240 M=MM*(1+2/LOG(ER-1))
250 IF M<2MM THEN M=MM+EXP(A)/EXP(2*MM)-2)
260 BODU=300
270 B=ER*(ZD1-SI)/601+.004*ZD1
280 PP=ZD1/P1+.8/PI:PRINT USING"###.##" "1ER:PRINT USING" 290
290 LAMBDA=300/F/LOG(ER):RETURN
300 IF TT<.008*H THEN BOTO=330
310 MM=1.25*7*(1+LOG(2*MM/PI))/PI
320 IF MCH/2/PI THEN MM=1.25*7*(1+LOG(2*MM/PI))/PI
330 RETURN
340 DATA 30,50,100,120
  
```

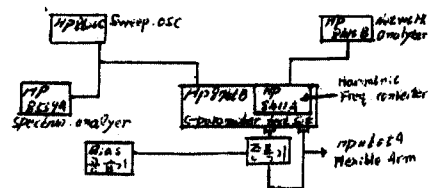
구한 결과들로 부터 증폭기 전체 pattern의 확대도는 아래와 같다



4. 실험 및 결과고찰

증폭기의 이득 및 정재비 측정 장비를 도시하면

아래와 같다



위 그림과 같이 측정장비를 구성하여 측정한 결과는

다음과 같다

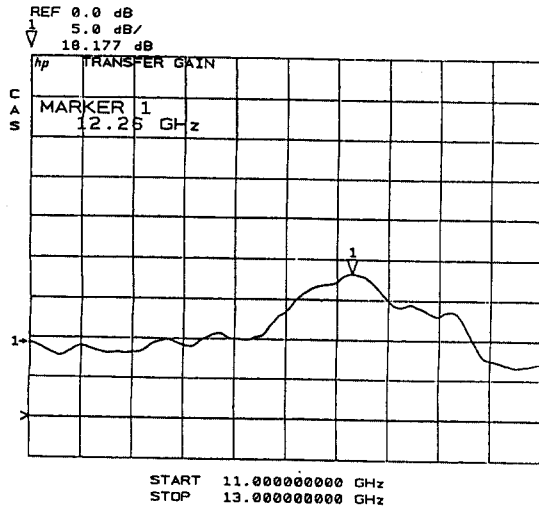


그림3 증폭기 이득

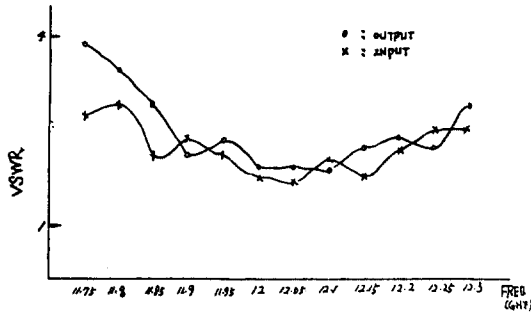


그림4 증폭기 정재파비

증폭기의 잡음지수 측정장비 구성도는 아래와 같다

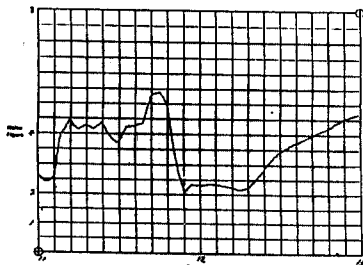
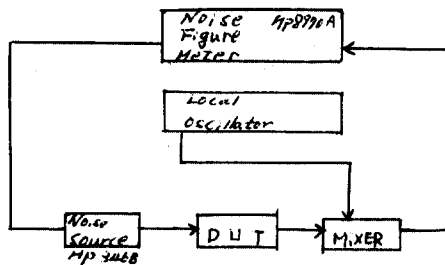


그림 5 증폭기 잡음지수

5. 결 론

본 논문에서는 정합회로를 되도록 단순하게 구성하여 저잡음 증폭기를 설계하여 최대이득

18.177dB와 최소잡음지수 2.1dB를 얻었다

그러나 입출력 정재파비가 약간 높다

그것은 수동설계에 의한 것으로 컴퓨터를 이용하

여 설계하면 정확한 정합을 시킬수 있을 것으로

생각된다

위성방송 수신기의 마이크로파 증폭기는 보통 16dB

정도의 이득과 3dB 이하의 잡음지수 이므로 본 논문

에서 제작한 저잡음 증폭기는 위성방송 수신에 사용 할 수 있다

6. 참 고 문 헌

- 1) T.C. EDWARDS, "Foundations for Microstrip circuit Design", John Wiley & Sons, Inc. 1981.
- 2) Guillermo Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers analysis and Design" prentice-Hall, Inc. 1984.
- 3) Tri T. Ha, " Solid-state Microwave Amplifier-Design" John wiley & sons, Inc. 1981.
- 4) Ralph S. Carson, "High-frequency Amplifiers" John. wiley & sons, Inc. 1975.