

GaAs를 이용한 X - Band 용 DBS 수신기 전단부의 MMIC 설계

○ 조승기, 이진구, 김상명, 조광래, 윤현보

동국대학교 전자공학과

Design Methodology of MMIC for X-Band DBS Receiver Front ends using GaAs

Seung-Ki Cho, Jin-Koo Rhee, Sang-Myung Kim, Gwang- Rae Cho and Hyun-Bo Yoon.

Dept. of Electronics, Dongguk University

Abstract

A design methodology for front ends of a Direct Broadcasting Satellite (DBS) Receiver for X-band was reported by utilizing Monolithic Microwave Integrated Cricuits (MMIC) technology.

The frequency converter including a three-stage low-noise amplifier, a image frequency rejection filter, and a mixer and buffer amplifier was designed by a Home-made CAD program.

The results of computer simulation using the CAD program showed that overall gain was over 36.63dB, and noise figure below 2.55dB, respectively.

1. 서 론

III-V 복합 화합물 반도체인 GaAs는 Si에 비해서 6배 빠른 이동도와 2배 정도 빠른 포화 속도를 가지고 있다<1>. 또한 비저항이 약 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상인 Semi-Insulating 재료가 가능하기 때문에 Active 소자와 Passive 소자를 동일 Chip 상에 제조하여 GHz 이상의 매우 높은 주파수 대에서 이용될 수 있는 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits) 화가 가능하다.

일반적으로 인공 위성 방송 수신기 전단부는 그림 1과 같이 X-band 저잡음 증폭기, 영상 주파수 제거 필터, 믹서와 Buffer 증폭기등으로 구성되어 있다. 저렴한 비용으로 성능에 대한 신뢰도를 향상시킨 GaAs를 사용한 X-band 인공 위성 방송 수신기 전단부의 MMIC 개발이 활발히 진행되고 있다<2>-<4>.

본 논문에서는 Passive 소자가 차지하는 면적을 작게 할수 있는 Lumped element를 사용하며 3단 저잡음 증폭기, 영상 주파수 제거 필터, 믹서 및 Buffer 증폭기를

주파수 범위가 11.7~12.2 GHz에서 최적상태로 수신할 수 있도록 설계하여, Home-made CAD Program을 사용하여 컴퓨터 Simulation 하였다.

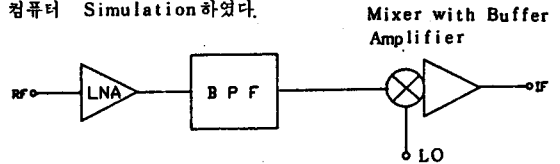


그림 1. DBS 수신기 전단부 Block Diagram

2. Lumped Element 설계

스트립라인의 특성<5>을 이용하여 인덕터 및 캐패시터와 같은 Lumped Element를 설계 하였다.

o Inductor

Straight Ribbon Planar Impedance는 <5>식(1)과 같다. $Z_{in} = Z_0 \tan \frac{2\pi \ell}{\lambda_g}$ (1)

단, Z_0 는 특성임피던스, λ_g 는 관내파장, ℓ 는 전송선로 길이이다.

$\ell / \lambda_g \ll 1$ 일때 식(1)로부터 인덕턴스는 식(2)가 된다. 이때 특성임피던스는 100Ω 이하로 하여야 한다.

$$L = Z_0 \ell / v_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

단, v_p 는 위상속도이다.

그림 2에 특성임피던스가 40, 50, 60 Ω 일때 인덕턴스 값을 길이에 대해서 나타냈다.

작은 면적에서 높은 임피던스값을 얻기 위해서는 Multi-segment가 필요하다. Rectangular Spiral 인덕터에서 Segment의 인덕턴스는 식(3)과 같다<7>.

$$L_x(\text{nH}) = 2\ell_x \{ 2\ell_x / (w+t) + 0.50049 + (w+t) / 3\ell_x \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

단, ℓ_x 는 Segment 길이, w 는 폭, t 는 컨덕터의 두께이며, 단위는 cm 이다.

Straight Conductor Segment 병렬사이에 상호 인덕턴스가 존재하게 된다.

상호인덕턴스는 식(4)와 같다.

$$M = 2\ell_x Q \quad \dots\dots (4)$$

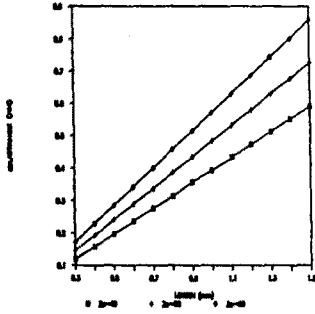


그림 2. 특성 임피던스와 길이에 따른 인덕턴스

Q 는 상호인덕턴스는 파라미터를 말하며 식(5)와 같다.

$$Q = \ln \left[\ell_x / GMD + \left(1 + \ell_x^2 / GMD^2 \right)^{1/2} + GMD / \ell_x \right] - \left(1 + GMD^2 / \ell_x^2 \right)^{1/2} + GMD / \ell_x \quad \dots\dots (5)$$

GMD는 track 중심사이 거리 d 와 거의 같으나 정확한 식은 식(6)과 같다.

$$\ell_x GMD = \ell_x d - \left[1/12 (d/w)^2 + 1/60 (d/w)^4 + 1/168 (d/w)^6 + 1/360 (d/w)^8 + \dots \right] \quad \dots\dots (6)$$

Rectangular Spiral 인덕터는 주파수의 제한을 많이 받게되며 병렬 공진주파수는 식(7)과 같다 $< 8 >$.

$$f = \frac{Z_0}{2\pi L} \quad \dots\dots (7)$$

따라서, 실제로 Rectangular Spiral Inductor의 Inductance는 Stray Parameter 값을 고려하면 공진 주파수 40%내에서 설계해야 한다. 그림 3에 폭과 간격이 0.0125 mm, Outer dimension 0.3 x 0.3 mm인 경우 Inductance를 나타냈으며, 그림 4에 Substrate 두께가 0.2 mm일 때 공진 주파수와 Operating frequency를 설계된 Inductance에 대해서 나타냈다.

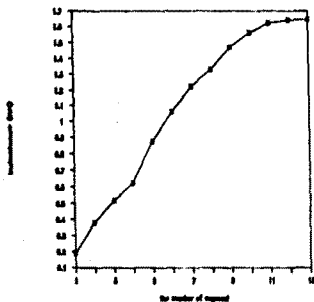


그림 3. Rectangular Spiral Inductor

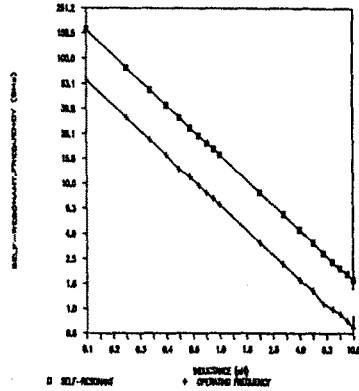


그림 4. 공진 및 동작 주파수에 대한 인덕턴스의 변화

o Overlay Capacitor

Overlay Capacitor의 Capacitance는 fringe 효과를 고려하여 edge capacitance는 포함할 수 있으나 $< 5 >$, Substrate 두께가 dielectric 두께보다 매우 클 경우, 식(8)과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w \ell}{d} \quad \dots\dots (8)$$

단, w 는 Conductor 폭, ℓ 는 길이, d 는 유전체의 두께, ϵ_0 는 자유공간에서 유전율, ϵ_r 는 비유전율 말한다. 그림 5는 유전체가 Si_3N_4 ($\epsilon_r = 6 \sim 7$)과 Ta_2O_5 ($\epsilon_r = 20 \sim 25$)인 경우의 Capacitance를 나타냈다.

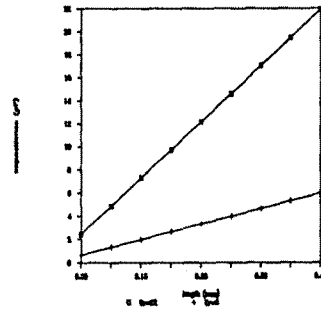


그림 5. Overlay Capacitor의 Capacitance

3. 저 잡음 증폭기 설계

저 잡음 증폭기는 안정도를 판변하여 안정된 범위에서 최소 잡음지수와 최대 이득을 갖도록 설계하여야 한다.

그러나 일반적으로 최소 잡음 지수를 얻을 수 있는 반사계수와 최대이득을 얻을 수 있는 반사계수는 서로 일치하지 않으므로 최적화값을 갖도록 첫째단과 둘째단은 잡음지수가 최소이고 셋째단은 이득이 최대가 되도록 최적 설계하였다.

2-port 회로의 잡음 지수 F 는 $< 9 >$

$$F = F_{min} + \frac{4R_n}{Z_o} \frac{| \Gamma_s - \Gamma_{opt} |}{| 1 + \Gamma_s |^2 (1 - | \Gamma_{opt} |^2)} \dots\dots (9)$$

이며, Z_o 는 특성임피던스, F_{min} 은 최소 잡음 지수, R_n 은 잡음저항, Γ_s 는 Source 반사계수, Γ_{opt} 는 Optimum 반사계수를 나타낸다.

실제하고자 하는 잡음 지수 값으로부터 Source 반사계수를 구한 다음 부하단의 반사계수 Γ_L 은 식(10)과 같다.

$$\Gamma_L = (S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_s}{1 - S_{11} \Gamma_s})^* \dots\dots (10)$$

Transducer 전력이득은 식(11)으로부터 구할 수 있다 <math> < 10 ></math>.

$$G_T = \frac{1 - | \Gamma_s |^2}{| 1 - S_{11} \Gamma_s |^2} | S_{21} |^2 \frac{1 - | \Gamma_L |^2}{| 1 - S_{22} \Gamma_L |^2} \dots\dots (11)$$

단, Γ_{opt} 은 출력 반사계수이다.

GaAs MESFET의 S-parameter와 noise parameter는 표1의 값을 사용하여 다음과 같이 설계하였다.

표1. GaAs MESFET 특성

S-parameter		Noise parameter
Mag.	Deg.	
S_{11}	0.695	$\Gamma_o = 0.523 < 146^\circ$ $R_n = 13.0 \Omega$ $NF_{min} (dB) = 1.83$
S_{12}	0.078	
S_{21}	1.826	
S_{22}	0.584	
	-127	

최소 잡음 지수를 갖도록 설계한 경우

$$\Gamma_{s1} = 0.523 < 146^\circ$$

$$\Gamma_{L1} = 0.576 < 138^\circ$$

$$\Gamma_{s2} = 0.523 < 146^\circ$$

$$\Gamma_{L2} = 0.576 < 138^\circ$$

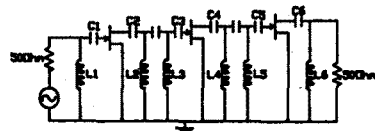
최대 이득을 갖도록 설계한 경우

$$\Gamma_{s1} = 0.824 < 169^\circ$$

$$\Gamma_{L1} = 0.759 < 144^\circ$$

이다.

이와 같은 반사계수 값으로 50Ω 에 정합회로를 구성하여 설계한 3단 저 잡음 증폭기는 그림 6에 나타났다.



$L_1 = 0.475$ $L_2 = 0.439$ $L_3 = 0.475$ $L_4 = 0.439$ $L_5 = 0.218$
 $L_6 = 0.28$ $C_1 = 1.31$ $C_2 = 2.4$ $C_3 = 1.31$ $C_4 = 2.4$
 $C_5 = 1.33$ $C_6 = 6.69$ 단위 L : nH C : pF

그림 6. 설계된 저 잡음 3단 증폭기

각 단에서 반사계수를 구하기 위해서 S-parameter를 ABCD-parameter로 변환시켰다. 둘째단에서 Source 반

사계수를 얻기 위해서 첫째단의 FET ABCD-parameter와 Interstage 정합회로의 ABCD Parameter를 곱한 다음 S-parameter로 치환해서 Γ_{s2} 를 구한다. 이와 같은 방법으로 각단의 반사계수를 구할 수 있다.

Home-made CAD program은 이용하여 컴퓨터 Simulation한 결과, 주파수 범위 11.7~12.2 GHz에서 잡음지수는 2.53dB이하 얻었고, 이득은 27.77dB이상 얻었다. 그림 7,8에 잡음 지수와 이득 및 VSWR를 나타냈다.

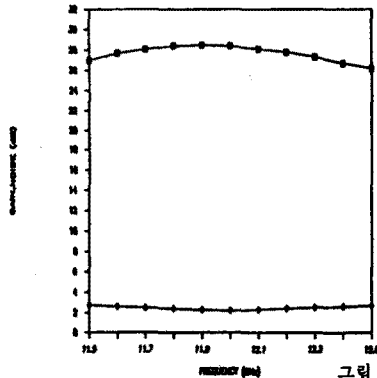


그림 7. 3단 저 잡음 증폭기의 이득 및 잡음 지수

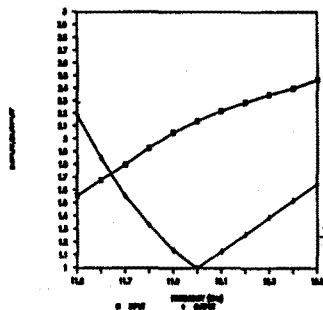


그림 8. 3단 저 잡음 증폭기의 입·출력 VSWR

4. 영상주파수 제거 필터 설계

Home-made CAD program을 이용하여 영상주파수를 제거하기 위해 스테리브의 길이가 2.88mm이고 특성 임피던스가 120Ω 인 $\frac{1}{4}$ open 스테리브를 사용하였다.

그림 9의 결과와 같이 영상 주파수 대에서 10 dB 이상의 손실을 얻을 수 있었다.

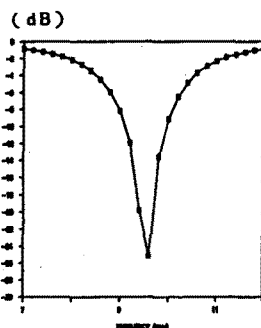


그림 9. 영상 주파수 제거 필터의 삽입 손실

5. 믹서와 버퍼 증폭기 설계

Dual-Gate MESFET는 RF 신호 및 LO 신호를 첫 번째 Gate 와 두 번째 Gate 에 인가했을 때 두 신호가 isolation 되기 때문에 filter 회로를 간단하게 할 수 있다<11>

IF 정합 회로는 칩 면적의 대부분을 차지하기 때문에 면적을 감소하기 위해서 mixer 와 버퍼 증폭기 사이에 IF 정합 회로 대신에 저항과 커패시터로 구성한다. 국부 발진기 주파수는 10.8 GHz 이며, IF 주파수는 0.9~1.4 GHz 이다. 무손실 정합 회로라고 가정했을 때 그림 10의 변환 이득은 식 (12) 와 같다. <12>

$$G_c(RF) = \frac{(g_{m1} g_{m2} R_{L1} R_{L2})^2 R_o}{\pi^2 C_{os1}^2 r_{in} (R_{L1} + R_o)^2 \omega_{RF}^2 \{1 + (\omega_{RF} - \omega_{LO})^2 C_{os2}^2 R_{L2}^2\}} \dots (12)$$

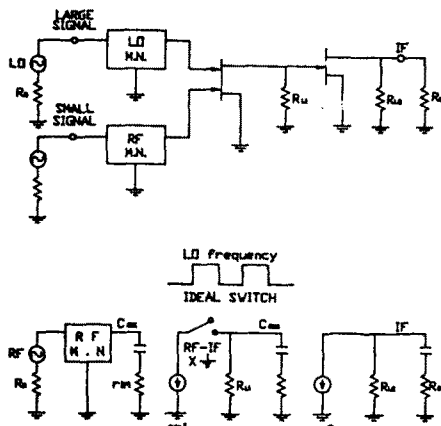


그림 10. 믹서 및 버퍼 증폭기

버퍼 증폭기에서 잡음지수는 Friis 공식 <13>으로 부터 구할 수 있다.

$$F = (G_d + G_i) [F_{m, in} + R_n (G_d + G_i)] / G_d \dots (13)$$

Dual-Gate MESFET는 2개의 Single-Gate MESFET로 간주하여 RF 단과 LO 단으로 정합회로를 구성 하였다. 표 1에서 $G_{os} = 0.57 \text{ pF}$, $g_m = 45 \text{ mS}$, $G_d = 3.6 \text{ mS}$ 을 구했으며 이러한 값들을 이용하여 Mixer와 버퍼 증폭기를 설계하였다. R_{L1} 및 R_{L2} 는 Active layer를 이용하여 다음과 같은 식으로 부터 쉽게 설계할 수 있다. <14>

$$R = R_s \frac{L}{W} + \frac{2R_c}{W} \dots (14)$$

단, R_s 는 Sheet Resistance (Ω/\square), L 은 저항의 길이 W 는 폭, R_c 는 단위 길이당 접촉저항이다. 설계된 저항은

R_{L1} 는 250Ω , R_{L2} 는 50Ω 이다.

Home made CAD program을 이용하여 설계한 후 컴퓨터 Simulation 결과, 그림 11에서와 같이 11.7~12.2 GHz 에서 8.85 dB 이상의 변환 이득과 7.754 dB 이하의 잡음지수를 얻었다.

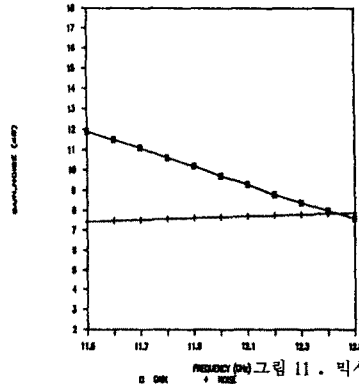
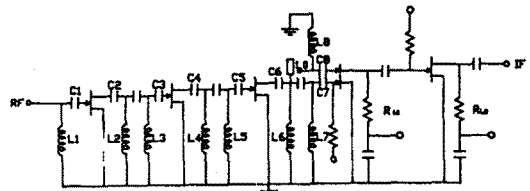


그림 11. 믹서 및 버퍼 증폭기의 이득 및 잡음 지수

6. 결 론

X-band (11.7~12.2 GHz) 신호를 수신할 수 있도록 최적 설계한 인공위성 방송 수신기 전단부를 그림 12에 나타 내었다. Chip 크기를 작게 하기 위해서 Capacitor, Inductor, Resistor 등과 같은 수동소자들도 Home-made



$L_1 = 0.475$ $L_2 = 0.439$ $L_3 = 0.475$ $L_4 = 0.439$ $L_5 = 0.218$
 $L_6 = 0.28$ $C_1 = 1.31$ $C_2 = 2.4$ $C_3 = 1.31$ $C_4 = 2.4$
 $C_5 = 1.33$ $C_6 = 6.69$ $L_7 = 0.585$ $C_7 = 1.26$ $L_8 = 0.307$
 $C_8 = 3.55$ 단위 L : nH C : pF

그림 12. 설계된 DBS 수신기 전단부

CAD program을 이용하여 최적의 설치를 구하는 방법등을 제시하였다.

CAD로 Simulation한 결과, 최적의 이득과 최저의 잡음 지수를 고려하여 설계한 3단의 저 잡음 증폭기는 주파수 범위 11.7~12.2 GHz 에서 이득과 잡음 지수가 각각 27.7 dB 이상 및 2.53 dB 이하였다. 영상 주파수 제거 필터는 영상 주파수대에서 10 dB 이상 손실을 얻었다. Mixer와 Buffer 증폭기는 IF 주파수 0.9~1.4 GHz에서 이득은 8.85 dB 이상이었으며, 잡음지수는 7.75dB 이하였다. 인공 위성 방송 수신

기 전단부의 전체 이득은 그림 13에서와 같이 주파수 범위 11.7~12.2 GHz 에서 36.63dB 이상이었고, 잡음 지수는 2.55 dB 이하였다.

설제한 인공 위성 수신기 전단부에 이득이 12 dB 이상 잡음 지수가 3 dB이하인 IF 증폭기를 첨가 한다면 11.7~12.2 GHz 대의 인공 위성 방송 수신이 가능하다 하겠다. 또한 방위 산업용 각종 전자장비 및 레이다등에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

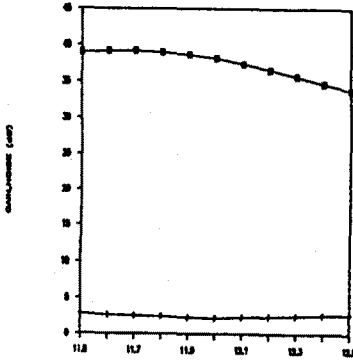


그림 13. DBS 수신기 전단부의 이득 및 잡음 지수

7 참고 문헌

1. J. Ruch and W. Fawcett, "Temperature dependence of the transport properties of gallium arsenide determined by a Monte Carlo method," *J. Appl. Phys.*, vol.41, pp.3843-3849, Aug. 1970.
2. C. Kermarrec, P. Harrop, C. Tsironis and J. Faguet, "Monolithic Circuits for 12 GHz Direct Broadcasting Satellite Reception," in 1982 IEEE MTT Monolithic Circuit Symp. Dig., pp.5-10.
3. R.A. Pucel, "Design Considerations for Monolithic Microwave Circuits," *IEEE Trans. MTT*, Vol. MTT-29, No.6, pp.513-534, June 1981.

4. S. Hori, K. Kamei, K. Shibata, M. Tatematsu, K. Mishima and S. Okano, "GaAs Monolithic MIC'S for direct Broadcast Satellite Receivers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol MTT-31, pp.1083-1088, Dec. 1983.
5. 이진구 외, "GaAs를 이용한 저잡음 및 고전력 소자와 Monolithic Microwave 및 Digital 적접회로 설계," 연구보고서, 전자통신연구소, 1987.
6. Ch'en, D. and D. R. Decker, "MMICs the Next Generation fo Microwave Components," *Microwave Journal*, pp.67-68, May 1980.
7. Greenhouse, H.M., "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors," *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, Vol. PHP-10, pp.101-109, June 1974.
8. H.G. Dill, "Designing Inductors for Thin-Film Applications," *Electronic Design*, pp.52-59, February 17, 1964.
9. Tri, T. Ha, "Solid State crowave Amplifier Design," *John Wiley & Sons*, 1981, pp.97.
10. guillermo genzalea, Ph.D., "Microwave Transistor amplifiers Analysis and Design," *Prentice-Hall*, 1984, pp.92-94.
11. T. Sugiura, K. Honjo, "12-CHz-Band GaAs Dual-Gate MESFET Monolithic Mixers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-33, NO.2, Feb. 1985, pp.105-110.
12. K. Honjo, Y. Hosono, and T. Sugiura, "X-Band Low-Noise GaAs Monolithic Frequency Converter," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-33, No.11, November 1985, pp.1231-1235.
13. K. Hartmann, "Noise Characterization of Linear Circuits," *IEEE Trans. Circuit Syst.*, Vol. CAS-23, pp.581-590, Oct. 1976.
14. Ralph E. Williams, "Gallium Arsenide Processing Technigues," *Artech. Hose Inc.*, pp.253.