2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

Ku-Band 위성통신용 LNB 수신단의 2단 LNA 설계

곽용수, 김형석
중앙대학교 전자전기공학부

A Study on Design of 2-stage LNA of LNB module for Ku-band

Yong-Soo Kwak, Hyeong-seok Kim**
School of Electrical & Electronics Engineering, Chungang Univ.

Abstract - In this paper, a low noise amplifier(LNA) in a receiver of a Low Noise Block Down Converter (LNB) for direct broadcasting service(DBS) is implemented using GaAs HEMT. The LNA is designed for the bandwidth of 11.7GHz - 12.2GHz. The 2stage-LNA consists of a input matching circuit, a output matching circuit, DC-blocks and RF-chokes. The result of a simulation of the LNA using Advanced Design System(ADS) shows the noise figure less than 1.4dB, the gain greater than 23dB and the flatness of 1dB in the bandwidth of 11.7 to 12.2GHz.

1. 서 론

정보화 시대가 도래하게 되면서 정보를 전송해주는 통신 인공위성의 이용과 역할이 아주 중요시 되고 있다. 근래에는 비교적 간단한 수신 장치를 이용해서 통신위성으로부터 직접 TV 영상신호를 수신하는 DBS(Direct Broadcast Satellite)시스템, 다른 행성에 위치하고 있는 탐사 위성과의 통신, 위치추적 시스템인 GPS(Global Positioning System) 등의 실현이 가능해졌다.[1] 이와 같은 계속적인 이동통신의 기술 개발과 더불어 상업용 위성 통신 분야에서는 사용할 수 있는 주파수대역이 Ku-band로 더욱 확장되었다.[2][3] 그리고, 2001년 말 위성TV의 시범방송이 시작된 이후로, 이제는 위성방송 서비스를 시작하여 제공하는 위치에 까지 이르렀다. 통신위성은 지상에서부터 매우 먼 거리에 위치하고 있기 때문에 위성에서 보내게 되는 신호는 대기권을 통과하는 과정에서 그 크기가 현저히 감쇄하게 되어서 수신기 입력 단에는 아주 미약한 신호만이 도달할 수 있게 된다.

이때, 수신부 시스템의 잡음지수(noise figure)가 매우 중요한 매개변수(parameter)가 되는데, 이 잡음지수는 위성 수신용 안테나인 parabolic 안테나의 수신부인 parabolic 판에서 반사되어 온 전자파가 한 점에 모이는 곳에 달린 feed-horn에 부가적으로 붙는 장치, 즉 Low Noise Block down converter(LNB)에 의해서 결정된다.

LNB의 구성은 Low Noise Amplifier(LNA)와 Ku-Band 신호를 셋톱박스가 처리할 수 있을 만한 신호인, 수백MHz에서 2GHz 까지의 주파수를 갖는 신호로 변환해 주는 변환기(converter)가 연결되어서 이루어진다.

주변의 잡음과 혼합된 미약한 수신 신호를 양질의 신호로 증폭하려면 무엇보다 수신기의 입력단인 LNB가 매우 중요한 역할을 차지한다. 그리고 그 중에서도 LNB의 전치부(front-end)에 위치한 LNA (Low Noise Amplifier)의 특성이 잡음에 대해서 우수하여야 한다.[4]

본 논문에서는 위성통신용 LNB의 핵심부품 가운데 하나인 3단 LNA 중에서 두 번째 단에 사용될 수 있는 LNA를 설계하였다. 위성방송용 주파수인 Ku-band의 10.7GHz에서 12.7GHz 까지의 주파수대역에서 동작하고, 비교적 높은 이득과 양호한 잡음지수를 얻기 위한 GaAs HEMT LNA를 설계하였다. 제품 조사 결과, 실제 시판되고 있는 같은 주파수 대역의 LNA가 일반적으로 27dB의 이득, 1dB 이내의 이득 평탄도, 그리고 1.9dB 이하의 NF를 나타내고 있는 것으로 나타났다. LNA를 3단으로 구성할 경우 앞단의 이득이 가장 낮고, 뒷단의 이득이 가장 크게 설계할 것을 고려하여 둘째 단의 이득을 결정하고, 잡음지수는 되도록 작은 값을 갖도록 하였다. 또한 전체 이득 평탄도는 3단의 증폭기 각각의 평탄도보다 좋지 않을 것이므로 마진을 두어 설계하였다.

최종적으로 Ku-Band 주파수 대역 내에서 23dB이상의 이득, 1.4dB이하의 잡음지수 그리고 1dB이하의 이득 평탄도 특성을 나타내는 GaAs HEMT를 이용한 Hybrid type의 LNA를 설계하였다.

2. LNA의 구조

LNB의 일반적인 형태를 살펴보면, LNA - Down Mixer - 대역여파기 - IF Amp가 차례로 연결되어 있는 구조로 되어 있다. 이 때, LNB 전체의 잡음지수는 LNB의 가장 앞단에 위치한 LNA에 의해서 주로 결정되어지며, 이때 LNA는 보통 3단으로 이루어진다. 3단 LNA에서 첫 번째 단은 전체 LNB의 잡음지수를 결정하는 역할을 하고, 나머지의 두 번째와 세 번째 단은 LNB의 잡음지수에 그다지 영향을 미치지 않으므로, 적당한 잡음지수 하에서 비교적 높은 이득을 얻을 수 있도록 하여, 이득을 높이는 역할을 한다.

이와 같은 잡음지수와 이득의 특성을 얻기 위해서 고주파에서도 노이즈특성이 우수한 소자인 GaAs HEMT(High Electron Mobility Transistor)를 이용하여 LNA를 설계하였다. GaAs HEMT는 전자가 주행하는 결정영역(GaAs)과 전자를 공급하는 결정영역 (AlGaAs)을 헤테로 접합을 시킴으로 인해 공간적으로 분리함으로써 전자가 도우너 불순물에 의해 산란되는 것을 감소시켜 고속성을 향상시킨 트랜지스터이다. 특히 GaAs HEMT는 다른 트랜지스터들에 비해서 고주파에서도 저잡음의 특성을 가지고 있어 위성수신용 증폭기에 많이 사용된다.

3. 다단 LNA의 잡음지수(Noise Figure)

LNA를 설계하려면 트랜지스터 소자의 잡음지수, 등가 잡음 저항 Rn 값을 제작사로부터 제공받거나 또는 GaAs FET나 HEMT의 경우 잡음 등가 매개변수를 이용하여 값들을 계산한 후 증폭기를 설계할 수 있다.

잡음지수는 소자의 입력 SNR 과 출력 SNR 값의 비례 관계를 dB로 나타낸 값이며 two-port의 잡음지수는 다음과 같다.

$$NF = NF_{\min} + \frac{4R_n|\Gamma_s - \Gamma_{\min}|^2}{Z_0|1+\Gamma_{sm}|^2[1-|\Gamma_s|]^2} \quad (1)$$

여기서 Rn은 등가 잡음 저항, Z0는 특성 임피던스, Γ_s는 소스 반사계수, Γ_{sm}은 잡음지수가 최소값 NFmin일 때의 소스 반사계수 값이다. 계산을 편리하게 하기 위해서 잡음지수를 소스 어드미턴스에 대해서 전개하면 다음과 같다.

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

$$= NF_{\min} + \Delta F \quad (3)$$

여기서

$$NF_{\min} = 1 + 2\left[R_n G_{cor} + \sqrt{R_n G_n + (R_n G_{cor})^2}\right] \quad (4)$$

$$\Delta F = \frac{R_n}{G_s}[(G_s - G_{sm})^2 + (B_s - B_{sm})^2] \quad (5)$$

위 식에서 NF_{min}=1 일 때의 소자의 소스 어드미턴스 $Y_{sm} = G_{sm} + jB_{sm}$ 이고 잡음지수가 최소가 아닌 경우의 소스 어드미턴스는 $Y_s = G_s + jB_s$ 이다.

식(4)에서 G_n 는 등가잡음 컨덕턴스, G_{cor}는 상관 어드미턴스(correlation admittance)이며 최소 잡음 지수 NF_{min}을 구하기 위한 R_o, G_n, Y_{cor} 값은 잡음 상관행렬(noise correlation matrix) 계산으로 값을 구할 수 있다.[5]

식(5)에서 ΔF 값은 최대 이득을 얻을 수 있는 최적 소스 반사계수 값으로부터 최적 잡음 지수 값을 얻기 위하여 설정된 임의의 소스 반사 계수에 대하여 최소 잡음 지수 값으로부터의 차이를 의미한다. 최저 잡음지수 NF_{min}은 소스 어드미턴스 Y_s를 최적 입력 어드미턴스 Y_{sm} 값에 matching 시킬 때 구할 수 있다.

잡음지수를 다른 방법으로 표현하면 증폭기의 출력단에서의 총 잡음 전력과 입력단에서의 저항 R에 의한 열잡음(thermal noise)이 증폭기의 이득을 얻어 나타나는 출력 전력과의 비로 정의할 수 있는데, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$NF = \frac{P_{No}}{P_{N_i} G_A} \quad (6)$$

여기서 P_{No}는 출력에서의 잡음에 의한 전체의 전력을 나타내고, $P_{Ni}=KT_0B$는 저항 R에 의해서 나타나게 되는 열잡음전력(thermal noise power)을 나타낸다. 이때, 시스템의 입력과 출력에서의 신호의 전력을 각각 P_{Si}, P_{So}라 정의하면 $G_A=P_{So}/P_{Si}$ 가 되므로 (6)식은 앞서 언급한 바와 같이 신호 대 잡음비(SNR)로 나타내어지게 된다.

$$NF = \frac{P_{No}/P_{N_i}}{P_{N_i}/P_{No}} = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} \quad (7)$$

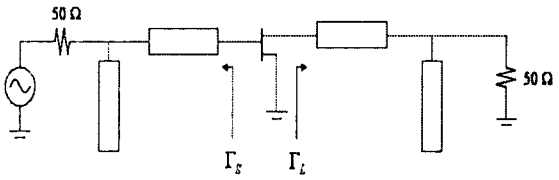
다단 증폭기의 경우, 전체 회로의 잡음지수는 다음 식과 같이 구해진다.[6]

$$NF = NF_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{A1}G_{A2}} + \frac{F_4 - 1}{G_{A1}G_{A2}G_{A3}} + \cdots \quad (8)$$

위의 식에서 보듯이, 전체 시스템에서의 잡음지수는 첫째 입력단의 잡음지수인 F1 의해서 거의 지배되는 것을 알 수 있다. 따라서 다단 LNA의 입력단 설계에 있어서, 잡음지수에 미치는 영향이 매우 큰 첫째 단은 입력 VSWR 및 잡음지수의 특성을 좋게 하도록 설계하여야 하고, 첫째 단 이후로는 잡음지수에 미치는 영향이 매우 적으므로 각각의 단의 잡음지수 특성을 어느 정도 나쁘게 하는 대신 이득 등과 같은 다른 특성을 높여주는 설계방식이 가능하다.

4. LNA의 설계

본 논문에서 사용한 GaAs HEMT를 이용한 1-stage LNA의 입력단 matching과 출력단 matching의 구조는 그림. 1에서와 같은 single open stub을 이용하였다.



<그림 1> 1단 LNA matching 구조

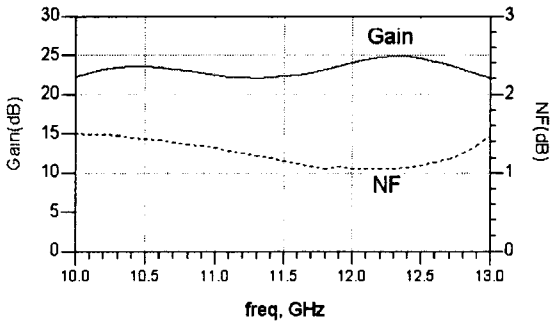
<Fig. 1> Single open stub microstrip line topology of 1-stage LNA

일반적인 LNA의 설계방식은 transistor의 출력단(Γ_L)에서의 matching은 잡음지수와 아무런 관련이 없으므로 오직 보다 더 큰 이득을 얻기 위해서 S22*에 matching을 시키고, 입력단(Γ_S) matching의 경우에는 최소의 잡음지수가 나타나도록 하기 위해서 Γ_{opt}에 matching하는 것이 일반적이다. 그런데 이때 LNA를 다단으로 설계한다면, 다단 LNA의 둘째, 셋째 단은 입력단을 matching 할 때에도 잡음지수를 크게 고려할 필요가 없으므로 대신 더 높은 이득을 얻기 위해서 Γ_{opt}가 아닌 다른 반사계수에 가깝도록 matching하는 것이 가능해진다.

이에 따라서 본 논문에서는, 1단 LNA의 설계에 있어서 입력단에서의 matching점을 Γ_{opt}가 아닌, G_A(available power 이득)=13dB, 잡음지수=0.9dB의 특성을 가지는 위치를 Γ_S로 하였다. amplifier에서 가장 중요한 안정도(stability)를 시뮬레이션 해 본 결과, 이렇게 정한 입력단의 matching 회로에서 주파수를 DC에서 20GHz까지 대역에서 모두 안정화 상태임을 확인하였다.

matching 후에 추가적인 회로로서, 증폭기의 입력과

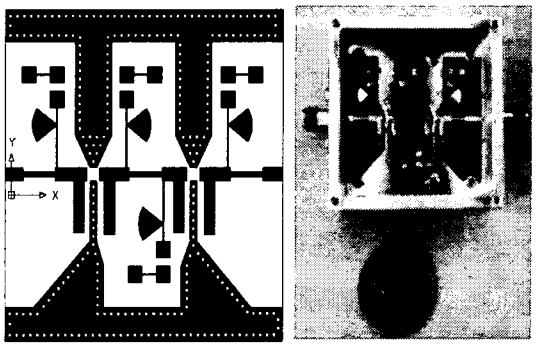
출력 포트에 불필요한 DC 성분이 인가되는 것을 막아주기 위해 각각 DC blocking을 해준다. 또한 DC 전원을 인가할 때, 잡음성분으로 작용할 수 있는 고주파 성분이 함께 흘러들어가는 것을 막아주기 위해서 12GHz 부근의 신호를 차단해주는 radial stub를 이용한 RF choke를 연결하였다. 이렇게 설계된 회로를 Agilent Technology ADS(Advanced Design System) 프로그램을 사용하여 simulation하면서 튜닝 하였으며 그 결과를 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> Gain과 NF의 시뮬레이션 결과
<Fig. 2> Simulation of Gain and NF

5. 제작 및 측정

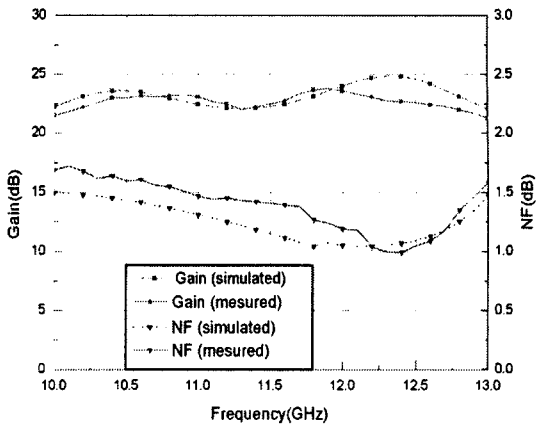
LNA의 제작은 Rogers 사의 RT/Druid 5880 기판(ε_r=2.2, 두께=0.8mm)의 마이크로스트립 전송 선로를 이용하였다. <그림 3>은 레이아웃과 실제 제작품이다.



<그림 3> 2단 LNA의 레이아웃과 제작품
<Fig. 3> 2-stage LNA using Microstrip

이렇게 설계된 GaAs HEMT LNA의 주파수에 따른 이득 특성은 11.7GHz에서 12.2GHz까지의 대역폭에서 이득은 전체적으로 약 23dB의 값으로 나타났고, 이득 평탄도는 1dB이하의 값을 나타내었다.

<그림 4>에서는 설계된 GaAs HEMT LNA의 주파수에 따른 잡음지수의 특성을 나타내었다. 잡음지수가 최소 1.0dB에서 최대 1.38dB의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.



<그림 4> Gain 과 Noise Figure의 시뮬레이션 결과와 제작품의 측정치 비교
<Fig. 4> Simulation and mesured data of Gain and NF

6. 결 론

본 논문에서는 GaAs HEMT를 이용해서 Ku-band 의 위성방송용 LNB를 위한 LNA를 설계하였고, 이를 시뮬레이션을 통해서 결과를 예측해 보고, 제작해 보았다. 설계한 GaAs HEMT LNA의 전체잡음지수는 11.7GHz에서 12.2GHz 까지의 주파수 대역에서 1.4dB 이하의 값을 가졌고 이 때, 같은 주파수 대역에서의 이득은 약 23dB의 값으로 나타났다. 또한, 전체 이득 평탄도는 1.0dB 이하로 평탄한 특성을 나타냈다. 잡음지수는 약 1.4dB로 3단 LNA 설계시 첫째 단의 잡음지수가 더 뛰어날 것을 고려할 때, 잡음지수에 있어서 성능이 더욱 개선될 것이라고 예상된다. 현재의 제작의 동작 주파수대역이 비교적 좁은 것을 고려해 볼 때, 향후 연구에서는 주파수 대역의 확장에 대한 연구가 필요하겠다.

[참고 문헌]

[1] J. Smuk, P. Katzin, V. Aparin, and Shifrin, "Miniature GPS translator module", IEEE MTT-S Dig., vol.1, pp.13-16, 1995.

[2] R.E. Lehmann and D.D. Heston, "X-band monolithic series feedback LNA", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., no.12, pp.1560-1566, 1985

[3] H. Okazaki, K. Horikawa, and M. Tanaka, "Ku-band self-controlled burst mode high power amplifier", IEEE MTT-S Dig., vol.2, pp.557-560, 1994.

[4] 김용훈, 위성통신용 저 잡음 증폭기 기술, 대한전자공학회지 The Magazine of the IEEK, v.025, n.001, pp.31-39, 1998.

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

[6] Guillermo Gonzalez. "Microwave Transistor Amplifiers Aalysis and Design", prentice Hall, 1997.