

# RF 저잡음증폭기(LNA) 설계 및 성능 분석과 최적 파라미터 도출에 관한 연구

류태영\*, 이창식\*\*  
대구대학교 정보통신공학부

## A Study on analysis performance and The optimum parameter of RF Low Noise Amplifier Design

Tae-Young Ryu\*, Chang-Sik Lee\*\*  
Dept. of Computer and communication Engineering, DaeGu Univ.

### 요 약

RF 전파는 신호레벨이 비교적 작고 간섭 현상에 매우 민감한 특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 미소한 입력전파의 수신시 수신기 전체의 감도를 높이고 잡음을 줄일 목적으로 사용되는 고주파 증폭기가 저잡음 증폭기이다. 본 논문에서는 FET 증폭기를 이용한 LNA설계시 직렬 궤환에 의한 최소 잡음과 최소입력정재파비의 최적 설계 파라미터를 검증한다. LNA의 기본적 특성 분석과 IMT-2000 구역의 1.9GHz대의 휴대단말기용 LNA와 블루투스용 2.4GHz대의 LNA 그리고, 지능형교통시스템에 응용되는 5.8GHz대의 단거리전용통신 LNA를 구현하고 각 주파수별로 특성이 다른 BJT, FET 증폭기를 적용하여 설계하고 성능 분석 및 최적의 파라미터를 도출하였다.

Noise Amplifier: LAN)로 설계한다[10]. 블루투스 (Bluetooth), 단거리전용통신(Dedicated Short Range Communication: DSRC) 등 2.4GHz이상의 대역에 적용되는 마이크로파 증폭기는 대역폭이 10% 정도이므로 협대역으로 판단할 수 있으며, 적용되는 능동 소자(active device)는 주로 바이폴라 접합 트랜지스터(Bipolar Junction Transister: BJT)등을 이용한다[4][7][9].

### 2. LNA 특성해석

### 1. 서론

마이크로파대 전파는 취급하는 신호 레벨이 비교적 작고 유도나 간섭 현상에 매우 민감한 특징이 있다. 따라서, 마이크로파대 응용에서는 열잡음이나 유도잡음의 저감 기술이 핵심 기술이 되므로 마이크로파대 수신기에 사용되는 초단 고주파 증폭기는 미소한 입력 전파를 요구되는 신호 레벨까지 적은 잡음 상태에서 증폭하도록 특별히 저잡음 증폭기(Low

## 2.1 Impedance Matching

임피던스 정합에 의한 특성을 해석하기 위해 Single Stage FET LNA를 전원과 부하 사이의 결합 관계로 고찰하여 입출력의 관계를 나타내면, (그림 2)와 같이 트랜지스터 증폭소자와 입력 및 출력 임피던스 정합회로로 표시 할 수 있다.

(그림 2)에서 Source Impedance는  $Z_{SOURCE}$  이며, Load Impedance는  $Z_{load}$  이다. 따라서, 등가회로는 (그림 2)에서 보는 바와 같이 입력단은 Antenna회로

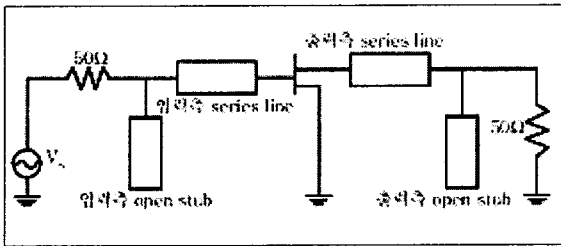


그림 2. 기본적인 증폭기 구성도

와의 결합을 위한 입력 정합회로(Input Matching Network)가 필요하며, 출력단 또한 Down Converter 나 다음의 수신기 회로에서 결합을 위한 출력 정합 회로(Output Matching Network)가 필요하다.

## 2.2 마이크로파 증폭기의 안정도(stability)

입력단 반사계수  $|\Gamma_{in}| > 1$  이거나 출력단 반사계수  $|\Gamma_{out}| > 1$ 의 값을 가진다면(입/출력 단자 중 하나의 임피던스가 음의 실수값을 갖는 것을 의미한다) 발진이 일어날 가능성이 있게 된다.  $\Gamma_{in}$ 과  $\Gamma_{out}$ 은 소스와 부하 정합회로에 의존하기 때문에 증폭기의 안정도는 정합회로에서 표현되었던 것처럼,  $\Gamma_s$ 와  $\Gamma_L$ 에 의존하게 된다[6].

무조건 안정 : 모든 수동 소스와 부하 임피던스에 대해서 다음 식이 성립하면 회로는 무조건 안정하다.

$$|\Gamma_{in}| < 1 \text{ 이고, } |\Gamma_{out}| < 1$$

$$\text{즉, } |\Gamma_s| < 1 \text{ 이고, } |\Gamma_L| > 1 \text{ 이다.} \quad (1)$$

조건부 안정 : 전원부와 부하 임피던스의 어떤 범위에서 다음 식이 성립하면, 회로는 조건적으로 안정하다. 이것은 잠정적 불안정 상태라고 말할 수 있다.

$$|\Gamma_{in}| < 1 \text{ 이고, } |\Gamma_{out}| > 1 \quad (2)$$

회로의 안정 조건은 주파수에 의존한다. 따라서 설계한 주파수에 대해서는 안정하고 다른 주파수에 대해서는 불안정할 수 있는 경우가 증폭기에서는 있을 수 있다. (1)과 (2)에 이 조건을 적용하여 무조건적으로 안정하기 위해  $\Gamma_s$  와  $\Gamma_L$ 이 다음을 만족해야 한다.

$$|\Gamma_{in}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \right| < 1,$$

$$|\Gamma_{out}| = \left| S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} \right| < 1 \quad (3)$$

만일 소자가 unilateral하다면  $|S_{11}| < 1$ 이고,  $|S_{22}| < 1$ 이면 무조건 안정하기에 충분하다.

그리고, 증폭기 안정화 상수를 이용한다

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}, \Delta < 1 \quad (4)$$

식을 만족하면 무조건 안정하게 된다.

## 2.3 1단 FET의 직렬 궤환

(그림 3)은 FET 능동 소자의 Symbol과 간단한 증폭기 모델을 보인 것이며, (그림 4)은 (그림 3)의 FET source 단자에 직렬로 이상적인 인덕터를 추가한 것이다. (그림 4)에서 source 와 ground 사이의 추가적인 인덕턴스는 LNA의 고유한 성능 사양을 성취하기 위해서 손실없는 직렬 부궤환을 제공한다[1].

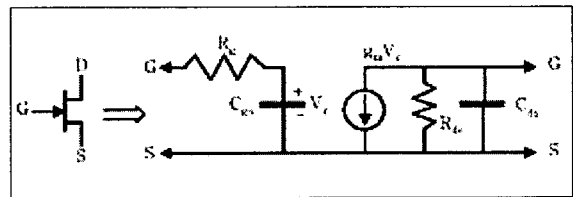


그림 3. FET 심볼과 단순화된 FET 모델

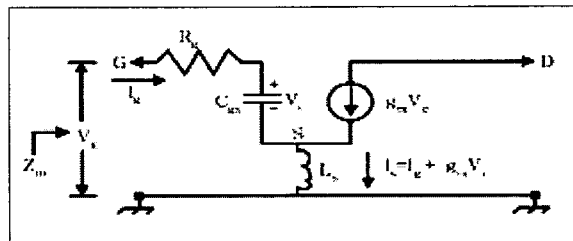


그림 4. 외부 소스 인덕터를 가진 FET 모델

(그림 4)의 회로에서 내부  $C_{gs}$  capacitor 양단에 걸

리는 전압  $V_C$ 는 다음 식으로 된다.

$$V_C = I_g \frac{1}{sC_{gs}} \quad (5)$$

여기서  $s$ 는 복소 주파수 변수이고  $s = \sigma + j\omega = j\omega$ 로 나타낸다. 따라서, 입력 임피던스  $Z_i$ 는 다음식으로 계산된다.

$$Z_i = \frac{V_g}{I_g} = \frac{I_g R_g + V_C + I_g s L_s}{I_g} \quad (6)$$

(6)에  $V_C = I_g \frac{1}{sC_{gs}}$ ,  $I_s = (I_g + g_m V_D)$ 를 각각 대입하면 다음 식이 된다.

$$Z_i = \frac{I_g R_g + \frac{I_g}{sC_{gs}} + (I_g + g_m V_D) s L_s}{I_g} \quad (7)$$

다시  $V_C = I_g \frac{1}{sC_{gs}}$ 을 대입하고  $I_g$ 로 나누면

$$Z_i = \frac{I_g R_g + \frac{I_g}{sC_{gs}} + (I_g + g_m V_D) s L_s}{I_g} \quad (8)$$

(8)을 재정렬하고 마지막 항의  $I_g$ 를 소거하면 결과는 다음 식으로 된다.

$$Z_i = R_g + \frac{L_s}{sC_{gs}} + sL_s + \frac{g_m \frac{I_g}{sC_{gs}} s L_s}{I_g} \quad (9)$$

$s = j\omega$ 를 대입하면 위 식은 입력 임피던스  $Z_i$  주파수의 함수로서 주어진다.

$$Z_i = R_g + g_m \frac{L_s}{C_{gs}} + sL_s + j\omega L_s - \frac{1}{\omega C_{gs}} \quad (10)$$

이것은 새로이 합성된 FET의 입력 임피던스이다. (9)를 확실히 정의하기 위해 다시 쓰면 다음 식으로 된다.

$$Z_i = R_g + R_a + j(X_b - X_{cb}) \quad (11)$$

여기에서  $R_a = g_m \frac{L_s}{C_{gs}}$ 는 실효적으로 추가되는 입력 저항이다.

계환이 없는 FET의 입력 임피던스는 (그림 3)의 검증에 의해  $Z_i = R_0 - jX_{Cgs}$ 로 쓸 수 있다. 즉 (9)는 계환이 FET의 입력 임피던스에  $R_0 + jX_{Is}$ 를 추가함을 나타낸다.

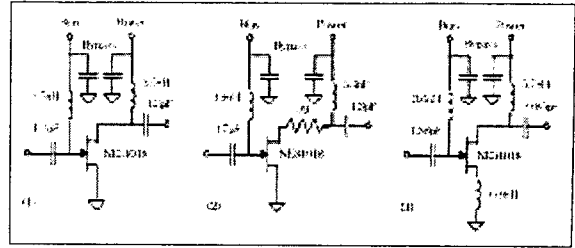


그림 5. (1) 소스 접지형(잠재적으로 불안정), (2) 저항을 추가하여 안정화를 기한 소스 접지형, (3) 직렬 계환을 위한 소스 인덕터

### 2.4 단 FET 기본 증폭기

일반적으로 1단 FET LNA는 저잡음 FET 능동소자에 의해 (그림 5)과 같이 세 가지의 기본 구성 방법이 사용된다[1]. (그림 5)의 (1)은 source 접지형의 전형적인 증폭회로이며, (2)는 drain에 저항을 부가하여 안정화를 기한 회로이다. 또, (3)은 source에 인덕터를 부가하여 직렬 계환을 걸어줌으로써 안정도와 저잡음을 실현하는 회로이다.

<표 1>는 source 인덕터에 의한 부계환의 영향으로 이득이 다소 감소함을 보인다. 그러나 NF와 안정도 K가 개선되었고 특히, VSWR이 현저히 개선됨을 보여 입출력의 정합이 잘 이루어지고 있음을 보인다. 이와 같은 특성 개선은 LNA의 요구 조건에 잘 부합되므로 초단 LNA 설계에서 부계환이 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

<표 1> LNA 설계 방법의 요약

LNA Type (NE34018 FET @1.96GHz, 2V)	Gain [dB]	NF [dB]	VSWR		Stability Factor K
			Input	Output	
Source Grounded, No stabilization	19.0	1.10	6.16	1.1	0.754
Source Grounded, Stabilized by a39Ω series drain resistor	15.6	0.95	3.13	1.1	1.004
Stabilized by 0.9nH source inductance, No resistor	14.6	0.95	1.43	1.1	1.006

### 3. 시뮬레이션 결과

### 3.1 1.96GHz 1단 FET LNA

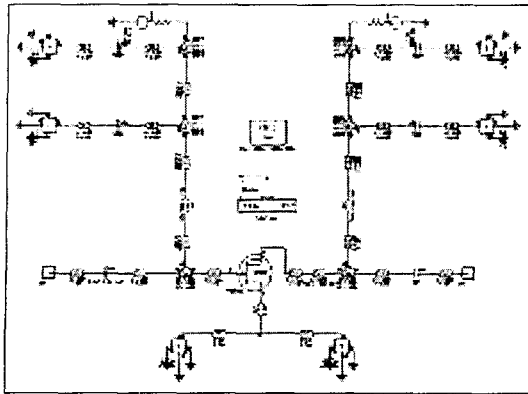


그림 6. 1.96GHz 대의 1단 LNA

FET LNA의 파라미터 도출을 위해 (그림 5)의 기본 회로를 참고하여 시뮬레이션을 하였다. (그림 5)의 (3)에서 본 바와 같이 직렬 인덕터 부계환 방법이 최적 LNA 특성을 얻었으며, Optimize에 의해 회로를 Set 하였다. 회로에 사용된 FET는 ATF10136이며 Bias 점을  $V_{OS}=3.7V$ ,  $I_{OS}=20mA$ 로 했을 때의 시뮬레이션 결과를 <그림 7>에 보였다. 그러나, 계환에 의해 NF와 VSWR이 아주 좋은 수치를 보여주고 있지만 이득이 약 14dB 정도로 비교적 낮아 실용 LNA에서는 2단 증폭이 요구된다.

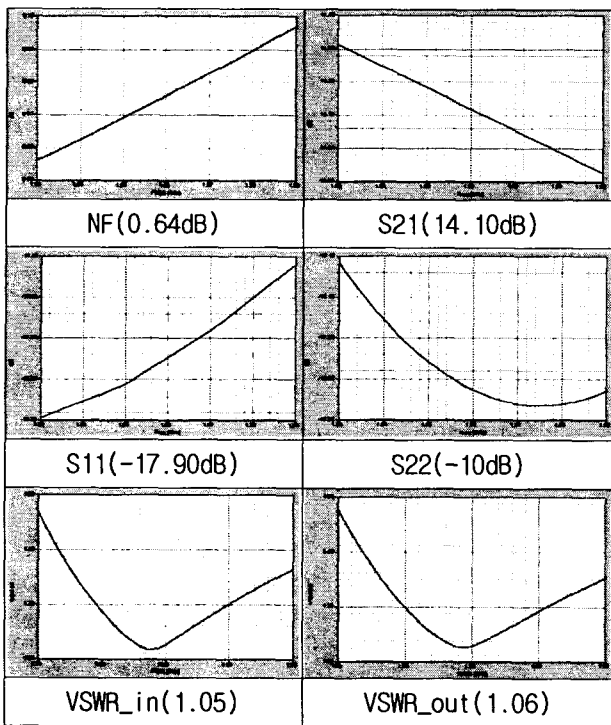


그림 7. 1.96GHz 1단 LNA 시뮬레이션 결과

### 3.2 2.4GHz 1단 BJT LNA

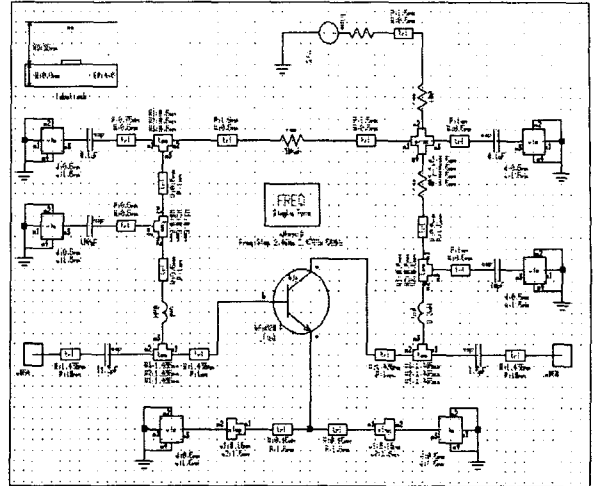


그림 8. 2.4GHz 대의 1단 LNA

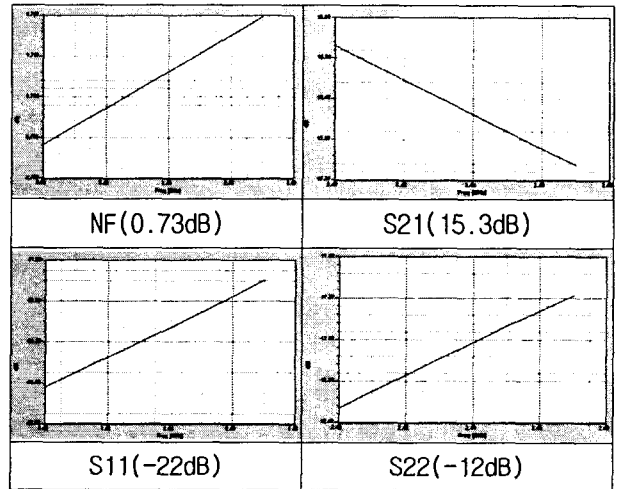


그림 9. 2.4GHz 1단 LNA 시뮬레이션 결과

(그림 8의) 1단 LNA는 블루투스용 협대역 LNA로서는 15dB의 이득과 비교적 좋은 0.73dB의 잡음 지수를 가지고 있어 적합한 성능을 보여주고 있다.

(그림 8)의 LNA는 Siemens사의 SiGe bipolar TR 인 BFP620F 모델을 사용한 것이 특징인데 이 모델은 TR 내부에 임의적인 파라미터값을 추가하여 Sub-circuit하여 하나의 TR Symbol 형태로 만든 것이다. 그리고, Collector단에 직렬 저항을 추가하여 안정도 K를 증대 시켰다.

### 3.3 2.4GHz 2단 BJT LNA

<표 3> BJT 2단 LNA의 성능

Descriptions	Spec.	Unit
Frequency Range	2.4~2.47	GHz
Gain	21	dB
Return Loss	Input	>15
	Output	>15
Noise Figure	1.9	dB
3 <sup>rd</sup> Order Intercept Point	23.6	dBm
Vcc	3	V

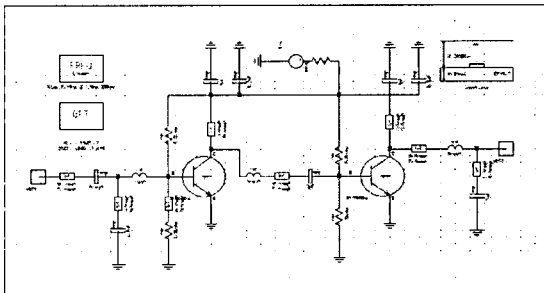


그림 8. 2.4GHz대의 2단 LNA

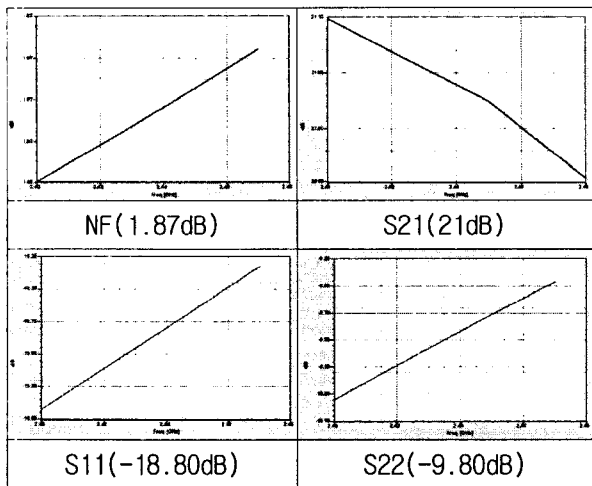


그림 9. 2.4GHz 2단 LNA 시뮬레이션 결과

실용 LNA를 구현하기 위해 ISM-band 2.4GHz Transceiver의 LNA를 설계하고 특성 파라미터를 측정하였다. 2단으로 구성한 LNA의 목표 사양은 <표 3>과 같이 설정하였다. 설계한 2단 LNA는 HP의 AT-41486 BJT를 사용하였다. 첫 단의 저잡음 증폭단은 저잡음 지수(low noise figure) 특성을 나타내게끔 설계이론에 의한 임피던스 정합을 시도하였으며 두 번째 단 증폭기는 가능한 큰 이득을 얻기 위하여 20dB 이득을 튜닝에 의하여 유지할 수 있도록 설계하였다

Optimise결과로부터 회로를 set하고 Bias 점을 선정하였다. 이 시뮬레이션에서 첫 번째 단의 Bias 점은  $V_{CE}=3V$ ,  $I_C=5mA$ 이고, 두 번째 단은  $V_{CE}=3V$ ,  $I_C=15mA$ 이다. (그림 8)에 시뮬레이션으로부터 설계한 2단 BJT 실용 LNA의 회로와 Layout을 보였다. 시뮬레이션 결과 입력 및 출력 Return Loss는 2.4GHz 부터 2.47GHz 영역에서 15dB이하고 이득은 약 21.7dB, NF는 약 1.87dB 이하로 각각 측정 되었다. 또한, Two-Tone 실험에서는  $1P_3$ 가 약 23.6dB이다. 2.4GHz 2단 BJT LNA의 종합적인 성능 특성을 보였다.

### 3.4 5.8GHz 2단 FET LNA

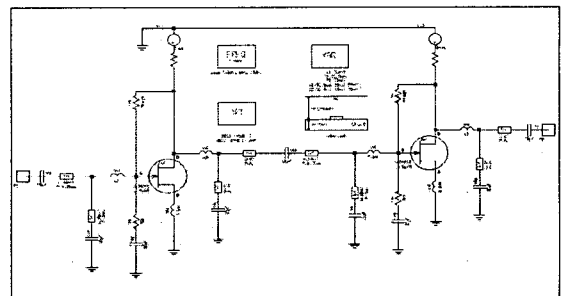


그림 10. 5.8GHz 2단 LNA

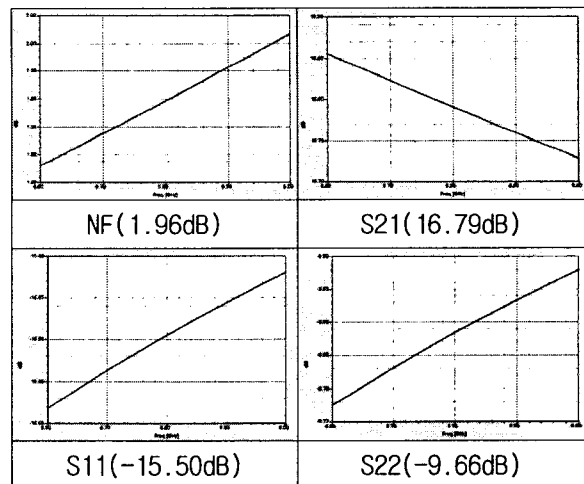


그림 11. 5.8GHz 2단 LNA 시뮬레이션결과

주파수 범위를 5GHz 이상대로 확장하면 기존Lump 회로 소자 구성에 한계가 있으므로 Microstrip Distribute 회로 소자를 사용해야 하며, 발열 및 고주파 특성을 고려하여 Substrate 기판은 유전체 기판을 사용한다. 따라서 앞의 1단 LNA에서 사용한 MESFET의 기본 회로에 Microstrip 소자를 적용하여 5.8GHz대 2단 FET LNA를 설계한다. 시뮬레이션 하기

위한 설계회로는 (그림 10)와 같이 NE34018 MESFET를 사용 하였다. 실용 LNA를 위해서 (그림 8)의 BJT의 경우와 마찬가지로 2단으로 LNA를 구성하고 각 단의 최적 잡음지수 및 증폭도를 결정하여 특성 시뮬레이션을 행하였다. (그림 10)는 설계된 실용적인 5.8GHz 지능형교통시스템 LNA의 회로로 구성되나 이득의 추가적인 보안을 요구할 시 3단 증폭을 하여야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수 GHz대 LNA의 잡음지수를 최소화 하고 회로의 안정도를 개선하는 소자 파라미터를 추출하기 위해 1단 증폭기 및 2단 증폭기에 대해 Performance 시뮬레이션을 하였다. 설계된 1단 LNA의 경우 BJT와 FET 모두 이론적인 설계 값과 거의 일치하며 직렬 인덕턴스의 증가에 의한 케환 작용이 NF와 안정도 K를 크게 개선함을 보였다. 1단 FET 시뮬레이션 결과, 인덕터 또는 저항에 의한 직렬 케환 작용이 비케환에 비해 약 3~4dB 정도 이득이 감소되었으나, 입력 VSWR이 크게 개선되고 낮은 NF, 10이상의 안정도 K를 얻을 수 있어 LNA에서 요구되는 특성과 잘 일치하고 있다. 그러나, 인덕턴스의 증가는 결과적으로 부케환을 걸어주게 되어 LNA의 이득을 감소시키므로 실용상은 2단 LNA 구성을 필요로 할 수 있다. 블루투스용 2.4 GHz대의 BJT를 사용하여 설계한 1단, 2단 LNA는 모두 좋은 성능을 보였으며, 5.8GHz의 지능형교통시스템에 사용되는 LNA는 현재로서도 사용함에 불편이 없으나 이득 부분을 조금 추가하여 주면 더욱 보완 될 것으로 보이며 FET 및 기판 재료에 기인하는 것으로 판단되어 최적의 LNA 파라미터 도출을 위한 연구가 계속 되어야 할 것으로 기대 된다.

#### 참 고 문 헌

[1] Dale D.henkes, "LNA Design Uses Series Feedback to Achieve Simultaneous Low Input VSWR and Low Noise," Applied Microwave &

Wireless, Oct. 1998, pp.32-33.

[2] Sean R. Mercer, "Exact Simulation of LNA Reduce Design Cycle Time," Applied Microwave & Wireless, Jan. 1999, pp.74-82.

[3] Sen-You Liu and Huey-Ru Chuang, "A 2.4GHz Tranceiver RF Front-endfor ISM-band Digital Wireless communications," Applied Microwave & Wireless, June. 1998, pp.32-48.

[4] G. Capponi, B. DiMaio and P. Livreri, "A New Criterion Noise Active Devices,"Microwave and Optronics Conference, Stuttgart, Germany, Apr. 1990, pp. 24-26.

[5] K. Feher, "Wireless Digital Communication Modulation & Spread Spectrum Application," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.

[6] Laurenc G. Cowles, "Transistor Circuit Design,"Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1972.

[7] Robert Soares, "GaAs MESFET Circuit Design," Chapter 3, 3.3.2.3, Fig. 3.12, Artech House, 1988.

[8] G. Capponi, B. DiMaio and P. Livreri, "CAD-Oriented Procedure for Low-Noise HEMT Amplifier," Microwave Engineering Europe, Mar./ Apr. 1993.

[9] Inder Bahl and Parkash Bhartia, "Microwave Solid State Circuit Design," Jone Wiley & Sons, Chapter7, section 7.5.4, Fig 7.22, 1998.

[10] Kamilo Feher, "Wireless Digital Cellular Communication," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.