

위성체용 Ku-Band SSPA를 위한 2-단 증폭기의 Worst-Case Analysis에 관한 연구

(A Study on Worst-Case Analysis of 2-Stage Amplifier in
Ku-Band SSPA for Communication Satellite)

鄭起赫*, 李相雄*, 崔聖鎮****, 李永哲****, 羅克煥**, 辛哲宰***

(Ki Hyeok Jeong, Sang Woong Lee, Seong Jhin Choi, Young Chul Lee,
Keuk Hwan Ra, and Chull Chai Shin)

要 約

본 논문에서는 인공위성 중계기용 SSPA에 사용하기 위한 2-단 증폭기를 설계하였으며, 인공위성의 궤도환경에서 요구되는 조건들에 따른 Worst-Case Analysis를 수행하였다. 설계된 증폭기는 2개의 GaAs FETs NE13783을 종속접속하여 LPA(low power amplifier)로 구성하였다. 증폭기의 대역폭은 국내 Ku-밴드 통신위성의 Down-Link 주파수 대역인 11.7~12.2GHz를 채택하였으며, 25mil 두께의 알루미늄을 기판으로 사용하였다. 회로의 설계와 최적화는 초고주파용 상용 CAD 프로그램인 TOUCHSTONE에 의해 이루어졌으며, 모든 측정은 Automatic Network Analyzer를 사용하여 수행하였다.

Abstract

In this paper, We designed a 2-stage amplifier for transponder of satellite with dual GaAs FETs NE13783, and performed the worst-case analysis for circuit qualification in the space environment. The bandwidth of amplifier was chosen 11.7-12.2 GHz which is the down link frequency band for domestic Ku-band satellite communication, and the alumina substrate with 25 mil of thickness. The design and optimization of amplifier was achieved by the commercial CAD program TOUCHSTONE and the measurement was performed through the automatic network analyzer.

*學生會員, **正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)

***正會員, 亞洲大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Ajoo Univ.)

****正會員, 慶南大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyungnam Univ.)

*****正會員, 仁德專門大學 電子科
(Dept. of Elec. Eng., Induk Junior College)

接受日字: 1991年 12月 20日

I. 서 론

1957년 소련이 세계 최초의 인공위성 스푸트니크를 쏘아 올린 이래 30여년간 20여개국이 위성 보유국이 되었고 자체 개발한 위성을 보유한 나라만도 10여개국에 이르는 데도 우리나라는 95년에야 인공위성을 발사할 계획에 있어 때늦은 감이 없지 않다. 우리나라를 포함한 각국이 인공위성개발에 역점을

두는 것은 오늘날 전 세계적으로 국내 또는 국제간 통신의 대부분이 인공위성과 그에 관련된 Radio Relay Link에 의존하고 있으며, 이에 대한 위성관련 기술들이 기술선진국과 21세기 정보화 사회를 이룩하는데 없어서는 안될 핵심기술이기 때문이다.

SSPA는 낮은 전압을 사용하므로 Power Supply의 설계가 간단하고 무게가 가벼우며 TWTA의 절반 가격으로 생산이 가능한 잇점을 지니고 있다. 이에 반해, 이제까지 인공위성 중계기용 증폭기에 주로 사용되고 있는 TWTA는 출력이 큰 장점은 있으나, 가격이 비싸고 부피가 크며 무게를 뿐 아니라 포화 전력점에서 intermodulation이 크고, 특히 고전압 부분의 고장이 잦아서 종종 문제점으로 지적되고 있다. 따라서, 위성 중계기용 출력 증폭기를 반도체화 하려는 노력의 일환으로 1980년대 초반부터 GaAs FET를 사용한 SSPA가 C-Band 위성에 사용되기 시작하였으며, 최근들어서는 Ku-밴드 통신위성에도 SSPA(solid state power amplifier)를 이용하려는 노력이 시도되고 있다.

SSPA의 실제 동작성능을 분석하기 위해서는 인공위성이 그 궤도에 진입한 후에는 수리가 불가능하다는 상황의 고려하에서 환경변화에 대한 Worst-case Analysis를 요하게 된다. 그러나, 선진국에서 이미 이루어진 자료가 공개되어 있지 않고, 또 일부 공개된 자료들도 우리 실정에는 맞지 않으므로 국내 기술에 의한 자체 분석이 필요하다.

본 연구에서는 비유전율이 9.8이고 25mil의 두께를 갖는 알루미늄(Al_2O_3) 기판상에 마이크로스트립 선로를 구성하고 GaAs FET NE13783 두개를 종속접속하여 SSPA의 Amp. 모듈중 중간 드라이버 스테이지인 LPA(low power amplifier)를 설계·제작하고 제작된 증폭기를 인공위성의 궤도환경과 유사한 조건하에서 1,000시간 동안 작동시킨 후에 각 파라메타들의 변화를 측정함으로써 aging(시간경과)에 대한 영향을 조사하였다. 또한 인공위성 내부의 온도는 최소한 $-10^{\circ}C \sim +60^{\circ}C$ 를 유지하도록 설계되어 있으므로 그 범위의 온도변화에 대한 제반 파라메타의 변화를 고찰하였으며, 궤도환경에서 발생가능한 소자의 인가전류나 전압의 변동에 대한 전력이득, 전류 및 잡음지수 등의 변화량을 측정함으로써 증폭기의 Worst-case Analysis를 수행하였다.

증폭기의 설계와 최적화에는 초고주파 상용 CAD 프로그램 TOUCHSTONE을 이용하였으며, 제반 특성은 STE(special test equipment)와 automatic network analyzer를 사용하여 측정하였다.

II. 이론적 해석

그림1과 그림2는 각각 2-포트 회로망과 증폭기의 신호 흐름선도(signal flow graph)를 나타낸 것이다.

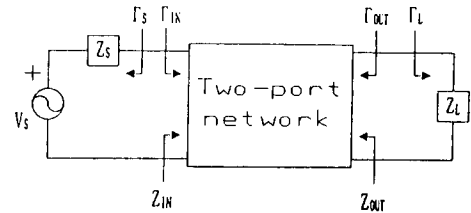


그림 1. 2-포트 회로망
Fig. 1. 2-port network.

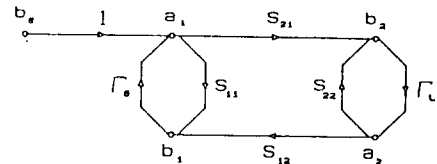


그림 2. 증폭기의 신호 흐름선도
Fig. 2. Signal flow graph of amplifier.

증폭기의 이득은 그림1의 2-포트회로망을 그림2와 같이 신호 흐름선도(signal flow graph)로 나타내어 Mason의 법칙을 적용하여 구하면 다음과 같다.²⁾

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{|1 - \Gamma_{in}\Gamma_s|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \quad (1)$$

여기서, G_T 는 Γ_{in} 의 함수이며, Γ_{in} 은 Γ_L 과 S-parameter의 함수이므로 여러번 반복 계산에 의하여 Γ_L 과 Γ_s 를 결정하게 된다. 그러나, $S_{12}=0$ 인 일방성인 경우에는 $\Gamma_{in}=S_{11}$ 으로 되어 최대 이득 $Q_{T,max}$ 는

$$G_{T,max} = G_{s,max} \cdot G_o \cdot G_{L,max} \\ = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} \quad (2)$$

일 때, 얻어지며 최대이득이 아닌 원하는 이득 G_T 를 갖는 증폭기를 설계하고자 할 때에는 주어진 G_T 에 의하여 일정이득원(constant gain circle)을 스미스도표상에 그려 Γ_L 과 Γ_s 를 결정하고 이에 알맞는 정합회로를 설계해야 한다. 그러나 S_{12} 가 썩이 아닌 쌍방성(bilateral)인 경우에는 operating power gain,

G_p 와 available power gain, G_a 를 구하여 이득을 계산 하여야 한다.⁽³⁾⁽⁴⁾

$$G_p = |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{1 - |S_{11}|^2 + |\Gamma_L|^2 (|S_{22}|^2 - |\Delta|^2) - 2Re(C_2 \Gamma_L)} \quad (3)$$

$$G_a = |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{1 - |S_{22}|^2 + |\Gamma_S|^2 (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2) - 2Re(C_1 \Gamma_S)} \quad (4)$$

여기서, $C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^*$
 $C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*$

이때 주어진 G_p 값에 따른 constant operating power gain의 반경과 중심을 구하여 스미스 도표상에 그려 Γ_L 을 정하고, 이 Γ_L 값에 의하여 최대 출력은 입력과 공액 정합에서 얻어지므로 입력 반사 계수는 $\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$ 에 의하여 구한다. 따라서 위에서 구한 Γ_L 과 Γ_S 에 알맞는 정합회로를 구하여 접속하면 원하는 이득을 얻을 수 있다.

일반적으로 수신기의 입력단에 인가되는 잡음에는 대기잡음, 전자의 Brown 운동에 의한 열잡음, 산탄적인 전자의 흐름에 의한 산탄잡음 등 여러가지가 있으나, 잡음전력을 지배하는 대부분의 잡음은 주로 열잡음 (Thermal Noise)이다. 증폭기에 대한 잡음 지수는 다음 식으로 정의된다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

$$F = F_{min} + \frac{R_n}{G_s} \left[(G_e - G_{opt})^2 + (B_s - B_{opt})^2 \right] \quad (5)$$

또는

$$F = F_{min} + 2r_n \frac{|\Gamma_S - \Gamma_0|^2}{|1 + \Gamma_0|^2 (1 - |\Gamma_S|^2)} \quad (6)$$

여기서, F_{min} : 최소 잡음지수

$Y_{opt} = G_{opt} + jB_{opt}$: 최적 소오스 어드미턴스

$Y_s = G_s + jB_s$: 소오스 어드미턴스

Γ_0 : 최적 소오스 반사계수

Γ_S : 소오스 반사계수

R_n : 잡음 등가저항

r_n : 규준화 잡음 등가저항, $r_n = R_n / Z_0$

식(6)으로 부터 증폭기의 잡음지수는 신호원 반사 계수 Γ_S 의 함수임을 알 수 있다. 그리고 이 식은 정잡음지수원 (constant noise figure circles) 이라는 원들로 정의될 수 있는데, 스미스 도표상에 각 원들은 동일한 잡음지수가 되는 신호원 어드미턴스의 궤적을 나타낸다.⁽⁴⁾

일반적으로 그림3과 같이 통신시스템은 여러 증폭 단이 종속 결합되어 이루어 지므로 시스템 전체의

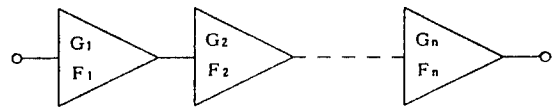


그림 3. n-단 종속 증폭기의 잡음지수
 Fig. 3. Noise figure of n-stage cascaded amplifier.

잡음특성은 각 단의 잡음특성에 따라 결정된다. 그림과 같이 n-단으로 이루어진 증폭기의 총 잡음지수는 식(7)과 같다.

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} G_i} \quad (7)$$

여기서, F_i 는 i 번째 단의 잡음지수이며 G_i 는 i 번째 단의 가용전력이득이다. 따라서 증폭기의 잡음특성은 처음단의 잡음특성에 크게 좌우된다. 그러나 첫째 단의 잡음지수를 최소로 할 경우 상대적으로 첫단의 전력이득이 감소하므로 실질적으로 둘째 단의 잡음지수 및 전체 시스템에 미치는 영향을 완전히 무시할 수 없으므로 둘째 단까지는 잡음지수를 고려한 설계가 이루어져야 한다.

III. 증폭기의 설계 및 제작

Ku-밴드 SSPA의 초단에 사용하기 위한 LPA의 블록선도를 그림4에 도시하였다. 본 논문에서 설계된 LPA는 GaAs FET NE13783 두개를 종속접속하여 이득이 14dB 이상 되도록 하였다. 또 1dB gain compression point의 출력전력은 15dBm이며, 2-단 증폭기 전체의 출력은 11dBm이 되도록 설계하였다.

전송선로의 임피던스는 $\lambda/4$ 트랜스포머를 사용하여 50Ω으로 정합시켰으며, 유전체의 두께가 25mil이고 도체의 두께 0.08mil이며 비유전율 9.8인 알루미늄을 기판으로 사용하였다. 그림4는 제작된 증폭기와 그 측정을 위한 Testfixture이다.

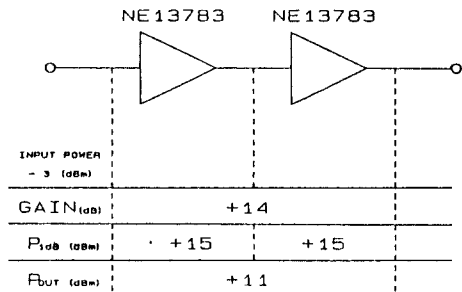


그림 4. LPA의 블록선도
 Fig. 4. Block diagram of LPA.

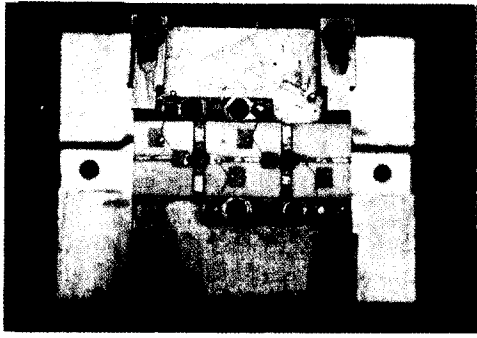


그림 5. 제작된 증폭기와 Testfixture.
Fig. 5. Designed amplifier and testfixture.

IV. Worst-Case Analysis

일반적으로 GaAs FET 증폭기의 제반 파라메타는 aging 또는 온도변화에 따라 많은 영향을 받을 수 있으며, 그에 따른 외부적 현상은 전체 시스템으로부터 발생된 다른 변화요소들과 합쳐짐으로써 증폭기의 정상동작에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 설계된 증폭기가 인공위성 탑재용으로 사용되어 요구되는 수명동안 정상적인 임무를 수행하도록 신뢰도를 향상시키기 위해서는 전력이득과 드레인 전류 그리고 잡음지수 등의 파라메타에 영향을 주는 제반 요인들에 대하여 정량적인 해석이 이루어져야 한다.

증폭기에서 고려하여야 할 가장 중요한 파라메타로는 전력이득 (power gain)과 드레인 전류 그리고 잡음지수 등을 들 수 있으므로, 여러가지 측정을 통하여 그들의 aging과 온도변화에 의한 영향을 연구 조사하였다.

단, 입력측과 출력측의 임피던스 정합회로의 영향은 실험을 통하여 매우 작음이 입증되었으며, 또한 증폭기를 1,000시간 동안 작동시킨 후에 측정해 본 결과 능동소자들이 아주 안정하여져서 aging에 기인되는 전력이득과 드레인전류, 그리고 잡음지수에 대한 영향도 거의 무시할 수 있었다.

1. 전력이득 변화

GaAs FET 증폭기의 aging과 온도에 따른 이득의 변화는 아래와 같이 여러가지 요인의 함수라 할 수 있다.

$$\Delta G = f(\Delta G_{in}, \Delta G_{device}, \Delta G_{comp}, \Delta G_{out}, \Delta G_{volt}) \quad (8)$$

여기서, ΔG_{in} 과 ΔG_{out} 은 각각 입출력 정합회로의

특성변화에 따른 이득의 변화를 나타낸다. 그러나 이 정합회로들은 모두 마이크로스트립으로 이루어진 $\lambda/4$ 트랜스포머와 reactive stub들로 구성되어 있으며 마이크로스트립의 특성상 aging이나 온도 변화에 따른 이득의 변화가 지극히 작아서 다른 요인들에 비해 충분히 무시할 정도가 된다.

ΔG_{device} 는 능동소자의 aging과 온도변화에 따른 이득변화를 나타내는 것으로서, 이는 바이어스회로에 보상회로를 넣음으로서 상쇄될 수 있고 aging의 효과는 없는 것으로 가정하였으므로 ΔG_{device} 는 완전히 무시할 수 있다.

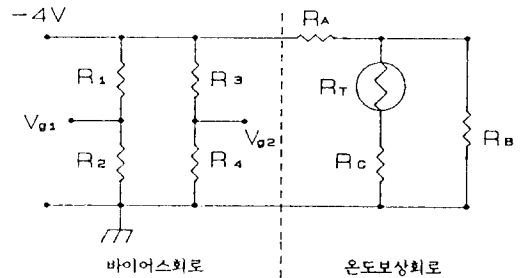


그림 6. 바이어스 회로.
Fig. 6. Bias network.

ΔG_{comp} 는 바이어스회로 자체의 특성변화에 따른 영향을 나타내며, 그림6에 보인 바이어스 회로와 같이 각각의 FET는 EOL(end-of-life) 변화가 $\pm 2\%$ 인 axial lead metal film resistor와 EOL, 변화가 $\pm 1.3\%$ 인 NTC 서미스터를 통하여 바이어스 된다. 전력레벨과 이득을 고려하여 선택된 드레인 전류는 10mA이며 저항값의 변화에 따른 최악의 경우에는 저항의 EOL factor가 게이트 바이어스에 $\pm 1\%$ 의 변화를 주게 된다.

실제된 증폭기의 게이트전압값에 대한 이득의 sensitivity는 그림7에 보인 바와 같이 동작점 ($V_g = -0.3V$) 근처에서 약 6dB/volt이었다. 따라서 게이트 전압 1%의 변화는 0.018dB의 이득변화를 의미한다. 또한 온도보상회로의 동작상태를 정확하게 조사하여 본 결과 그로 인한 이득변화를 관찰할 수 있었고 해당 주파수 대역 (11.7~12.2GHz)에 대하여 $-10^\circ C \sim +60^\circ C$ 의 온도범위에 걸쳐 증폭기 이득변화가 ± 0.3 dB 이하임이 밝혀졌다. 또한 게이트 바이어스 전원 자체에 있어 Telstar 4와 같은 위성체에서도 $\pm 1\%$ 까지의 허용오차를 가지고 있으므로 그로부터 기인

되는 이득 변화를 고려해 주어야 한다. 결국 최악의 경우에 바이어스 회로에 대한 증폭기 전체의 이득변화를 합하면 다음과 같다.

$$\Delta G_{comp} = 0.018\sqrt{2} + 0.018 \times 2 + 0.362 \text{ dB}$$

바이어스 저항에 의한 기여도는 각 단의 이득 변화분을 RSS (root-squared-sum) 하였으며 전원 자체의 변화에 의한 기여분은 직접 합하였다.

ΔG_{vout} 는 드레인 전원 전압의 변화에 의한 이득변화를 나타내는데, 통상 인공위성 전원의 전압변동은 $\pm 3.3\%$ 이내로 제한되어 있고 실험을 통하여 측정된 증폭기의 드레인 전압에 대한 이득의 sensitivity는 그림 8에서 보는 바와 같이 거의 일정하게 주어진다. 즉,

$$\Delta G / \Delta V_D \leq 0.636 \text{ dB/Volt}$$

따라서 드레인 전압이 3V일 때 그의 3.3%인 0.1

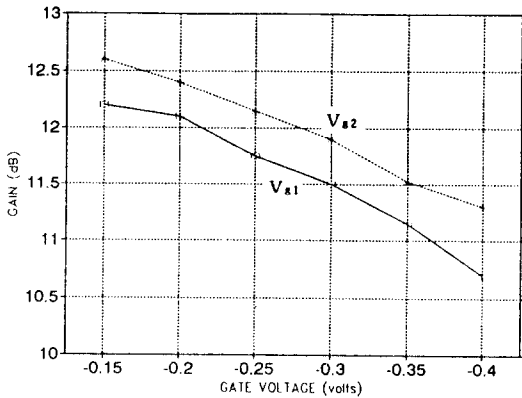


그림 7. 게이트 전압에 따른 이득
Fig. 7. Gate voltage vs. gain.

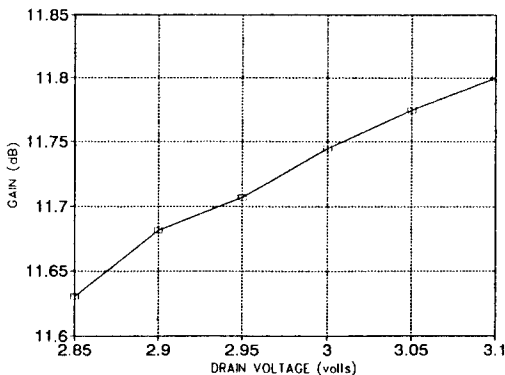


그림 8. 드레인 전압에 따른 이득
Fig. 8. Drain voltage vs. gain.

volt의 전압변화는 다음과 같은 이득변화를 초래한다.

$$\Delta G_{vout} = 0.064 \times 2 = 0.128 \text{ dB}$$

이들을 모두 합하여 증폭기 전체에 대하여 worst-case gain variation을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta G_{wc} = 0.362 + 0.128 = 0.49 \text{ [dB]}$$

이 중에 온도변화에 의해 기여되는 성분 0.3dB를 제외한 worst-case gain variation은 설계된 증폭기의 전체 동작기간에 걸쳐 $\pm 0.19 \text{ dB}$ 이다.

2. 전류변화

드레인 전류의 총 변화량은 몇가지 요인에 따라 다음과 같은 함수로 표현된다.

$$\Delta I_d = f(\Delta I_{device}, \Delta I_{comp}, \Delta I_{vout}) \quad (9)$$

이득변화의 경우와 마찬가지로 임출력 정합회로에서의 작은 변동은 증폭기의 드레인 전류에 거의 영향을 미치지 않는다. ΔI_{device} 는 능동소자의 aging과 온도변화 모두에 의한 전류변화이지만, aging의 효과는 없음이 입증되었고, 온도변화의 드레인 전류에 대한 영향은 바이어스 회로 해석의 한 부분으로 간주될 수 있으므로 무시하기로 한다.

ΔI_{comp} 는 바이어스 회로의 영향을 나타내는데 앞 절의 바이어스 회로 내에 있는 부품의 worst-case variation이 1%이고 바이어스 전원 자체의 변화에 의한 영향이 다시 1% 추가되어 게이트 전압에 미치는 총 worst-case variation은 2%이었다. 또한 그림 9에 보인 바와 같이 실험을 통하여 얻어진 게이트 전압에 대한 드레인 전류의 sensitivity는 대략 다음과 같다.

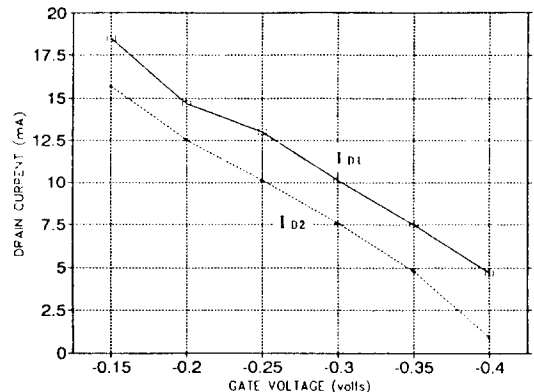


그림 9. 게이트 전압에 따른 드레인 전류
Fig. 9. Gate voltage vs. drain current.

$$\Delta I_d / \Delta V_g = 55.0 \text{ mA/volt}$$

따라서 $V_g = 0.3 \text{ volt}$ 에 대한 드레인 전류의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta I_d = 0.02 \times 0.3 \times 55.0 = 0.33 \text{ mA}$$

그리고 온도변화에 따른 worst-case drain current variation은 25°C 를 기준으로 $\pm 35^\circ\text{C}$ 만큼 변화시키며 측정된 결과는 그림10과 같이 각각의 온도에 대해 다음의 값을 얻었다.

$$\Delta I_{d,comp} = 0.041 \times 35 = 1.44 \text{ mA}$$

따라서, 증폭기 시스템 전체에 대하여 합하여 얻은 바이어스 회로에 기인되는 worst-case drain current variation은 다음과 같이 된다.

$$\Delta I_{comp} = 0.33 \times \sqrt{2} + 2 \times 1.44 = 3.35 \text{ mA}$$

ΔI_{volt} 는 드레인 전원 전압의 변화에 의한 전류변화를 의미한다. 일반적으로 위성체 전원의 규격은 worst-case variation이 $\pm 3.3\%$ 로 되어있고 드레인 전압 V_d 는 3 volt 이므로 대응되는 허용전압 범위는 0.1 volt 이다. 또한 그림11에 보인바와 같이 측정된 드레인 전압의 변화에 대한 드레인 전류의 sensitivity는 개략적으로 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\Delta I_d / \Delta V_d = 0.14 \text{ mA/volt}$$

따라서, 증폭기 전체에 대한 드레인 전원 전압의 변화에 의한 드레인 전류 변화는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\Delta I_{volt} = 2 \times 0.1 \times 0.14 \text{ mA} = 0.028 \text{ mA}$$

최종적으로 이들을 모두 합한 드레인 전류의 총

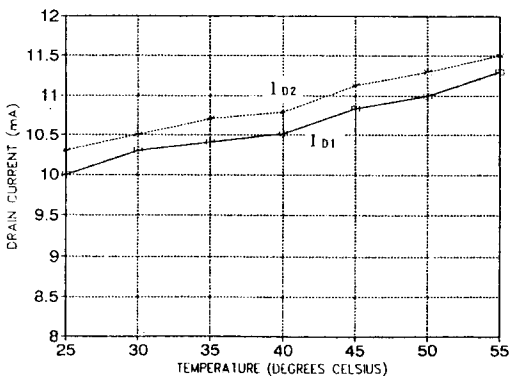


그림 10. 온도에 따른 드레인 전류
Fig. 10. Temperature vs. drain current.

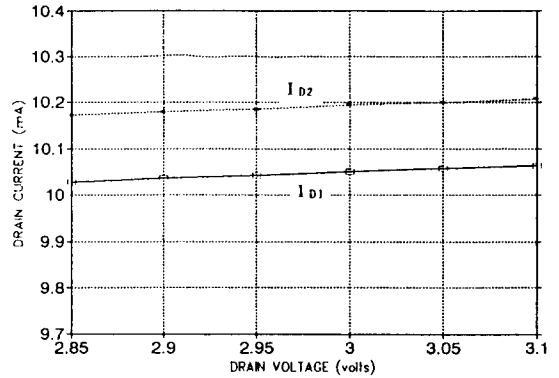


그림 11. 드레인 전압에 따른 드레인 전류
Fig. 11. Drain voltage vs. drain current.

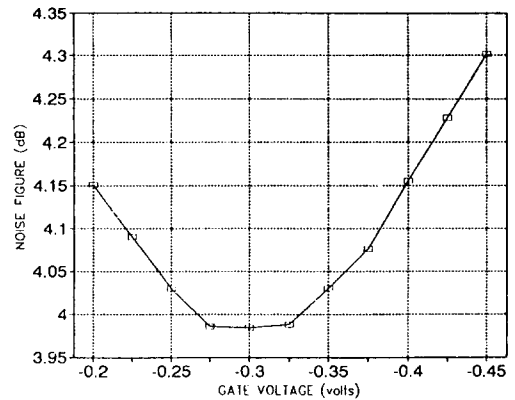


그림 12. 첫째단의 게이트 전압에 따른 잡음지수
Fig. 12. Gate voltage vs. noise figure of 1st stage.

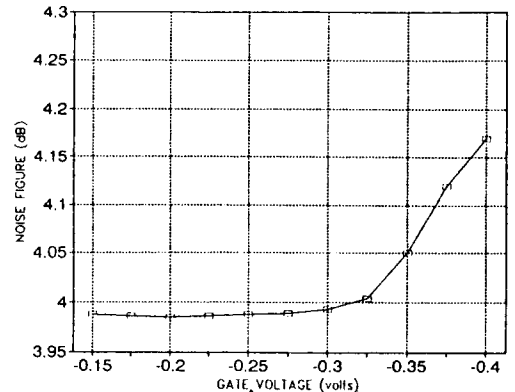


그림 13. 둘째단의 게이트 전압에 따른 잡음지수
Fig. 13. Gate voltage vs. noise figure of 2nd stage.

worst-case variation은 다음과 같다.

$$\Delta I_{a,wc} = 3.35 + 0.028 = 3.378 \text{ mA}$$

3. 잡음지수 변화

설계된 증폭기의 aging과 온도변화에 따른 잡음지수의 변화 역시 아래와 같이 몇가지 요인의 합수라 할 수 있다.

$$\Delta NF = f(\Delta NF_{device}, \Delta NF_{temp}, \Delta NF_{comp}, \Delta NF_{volt}) \quad (10)$$

ΔNF_{device} 는 소자 자체의 aging과 온도변화에 따른 잡음지수의 변화를 나타내며, 실험을 통하여 측정된 결과 aging에 의한 영향은 무시될 수 있었고 온도변화에 의한 잡음지수의 변화는 $0.008 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않았다. 따라서 25°C 를 기준으로 $\pm 35^\circ\text{C}$ 의 온도변화에 대해 잡음지수의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta NF_{temp} = 0.008 \times 35 = 0.28 \text{ dB}$$

ΔNF_{comp} 는 게이트 바이어스 회로와 -0.3V 의 게이트 바이어스 전원에 의한 효과를 나타내며 그 worst-case variation인 2%의 게이트 전압 변화에 대한 잡음지수 변화는 그림 12와 13에서 보는 바와 같이 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다.

ΔNF_{volt} 는 3.3%의 드레인 전원 변화에 기인하는 잡음지수의 변동으로 실험적으로 측정하여 본 결과에 의하면 $+0.1\text{V}$ 의 드레인 전압 변화에 의한 효과는 거의 관측되지 않을 만큼 작은 것이었다. 따라서 잡음지수의 변화에 기여하는 인자로는 오로지 온도 변화만이 중요해지며 그에 의한 총 worst-case variation은 다음과 같다.

$$\Delta NF = 0.28 \text{ dB}$$

V. 결 론

본 연구에서 제작된 증폭기의 입력측과 출력측 정합회로들은 모두 마이크로스트립으로 구성되고 있고, 마이크로스트립의 aging이나 온도변화에 따른 특성의 변화가 지극히 작아서 임피던스 정합회로의 영향은 충분히 무시할 수 있음이 입증되었다.

또한 증폭기를 1,000시간 동안 작동시킨 후에 측정해 본 결과 능동소자들이 아주 안정하여져서 aging으로 인하여 나타나는 전력이득과 드레인전류, 그리고 잡음지수에 대한 영향도 거의 무시할 수 있었다.

인공위성의 궤도환경과 거의 유사한 조건을 갖추고 실험을 한 결과 제작된 증폭기의 총 전력이득 변화량은 최악의 경우에 0.49 dB 이며 온도변화에 기인하는 성분을 제외하면 0.19 dB 로서 매우 우수한 특성을 나타내었다. 또한 드레인 전류의 총 변화량은 증폭기의 선체 동작기간에 걸쳐 3.378 mA 이었다. 그리고 온도변화에 의한 잡음지수의 변화는 $0.008 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않았으므로 잡음지수의 변화에 기여하는 인자로는 오로지 온도변화만이 중요해지며, 그에 의한 총 worst-case variation은 0.28 dB 이었다.

위와 같은 결과는 본 논문에서 설계된 증폭기가 인공위성 중계기용 SSPA에 사용되는데 손색이 없음을 의미한다.

參 考 文 獻

- [1] Bruce R. Elbert, *Introduction to Satellite Communication*, Artech House, Inc., 1987.
- [2] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc., 1984.
- [3] Tri T. Ha, *Solide-State Microwave Amplifier Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [4] H. Fukui, "Available power gain, noise figure and noise measure of two-port & their graphical representation," *IEEE Trans. Circuit Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [5] T.C. Edwards, *Foundations for Microstrip Circuit Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [6] "Representation of noise in linear two port," *Proc. IRE*, vol. 48, no. 1, pp. 69-74, Jan. 1960.
- [7] Samuel Y. Liao, *Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [8] Raymond S. Pengelly etc., *Microwave Field Effect Transistors-Theory, Design and Applications*, John Wiley & Sons Inc., 1982.
- [9] T.S. Laverghetta, *Handbook of Microwave Testing*, Artech House, Inc., Aug. 1980.

著 者 紹 介



鄭 起 赫 (學生會員)

1967年 2月 25日生. 1990年 2月
광운대학교 전자공학과 졸업.
1990年 8月~현재 광운대학교
대학원 전자공학과 석사과정 재
학중. 주관심분야는 이동통신, 위
성통신 등임.



李 相 雄 (學生會員)

1962年 2月 20日生. 1985年 2月
광운대학교 전자공학과 졸업.
1987年 2月 광운대학교 대학원
전자공학과(공학석사). 1987年
2月~1991年 3月 한국통신 연
구개발단. 1990年 8月~현재 광

운대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관
심분야는 위성통신 등임.



崔 聖 鎭 (正會員)

1960年 1月 1日生. 1982年 2月
광운대학교 전자공학과 졸업.
1984年 2月 광운대학교 대학원
전자공학과(공학석사). 1991年 2
月 광운대학교 대학원 전자공학
과(공학박사). 1987年 3月~ 현

재 인덕전문대학 전자과 조교수. 주관심분야는 SAR
영상처리 및 영상통신 등임.

李 永 哲 (正會員) 第27卷 第2號 參照

현재 경남대학교 전자공학과
교수



羅 克 煥 (正會員) 第28卷 A編 第9號 參照

현재 광운대학교 전자공학과
교수



辛 哲 宰 (正會員) 第27卷 第3號 參照

현재 아주대학교 전자공학과
교수