
전자식 레이더 반사기를 위한 X-band マイクロウェイブ増幅器 설계 및 구현

정종혁*, 양규식**

Design and fabrication of the X-band microwave amplifier for
Electronic Radar Reflector

Chong-Hyeog Cheong*, Gyu-Sik Yang**

요약

본 연구에서는 X밴드 전자식 레이더 반사기에 사용하기 위한 마이크로웨이브 5단 전력증폭기를 평형증폭기 구조를 이용하여 설계하고 제작하였다. 사용한 기판은 FR4이고, 사용한 소자는 FHX35LG, FLK012WF와 FLK022WG이다. 회로의 설계와 최적화는 마이크로웨이브 CAD 프로그램인 CNL/2를 사용하였다. 설계한 주파수 대역에서 측정된 결과는 46dB의 이득과 -14.2dB의 입력반사손실, -16.6dB의 출력반사손실을 나타내며, IM_3 은 32dBc였다. 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다.

Abstract

In this paper, we designed and fabricated 5-stage microwave solid state power amplifier using balanced amplifier scheme for X-band electronic radar reflector. The used substrate is FR4 and the used active devices are FHX35LG, FLK012WF and FLK022WG. The circuit design and optimization had been carried out through the microwave CAD program CNL/2. The measured values show 46dB in gain, input return loss -14.2dB, output return loss -16.6dB and IM_3 is 32dBc at designed bandwidth. The measured results are almost agreed with the simulated values.

* 한국해양대학교 전자통신공학과 박사과정

** 한국해양대학교 전자통신공학과 부교수

접수일자 : 1998년 8월 18일

I. 서 론

야간이나 우천시 레이더만으로 항해하는 경우에는 항해표지나 소형선박 혹은 다른 위험물체를 인식하기 힘들기 때문에, 레이더 반사면적을 증가시킬 수 있는 수동 레이더 반사기를 항해표지설비에 추가함으로서, 레이더 탐지거리를 개선시켜 항해에 도움을 주고 있다. 그러나, 이러한 수동 레이더 반사기는 우천시 레이더 시계를 확보하기 위하여, 강우 클러터 제거기를 작동시키면, 극단적으로 적은 점으로 보이게 되거나 다른 클러터 속에서 아주 쉽게 잃어버리게 된다.^[1]

이러한 문제를 해결하기 위해서는 반사체를 더욱 더 크게 만드는 단순한 방법은 실용적이지 못하다. 왜냐하면, 반사체의 크기를 키운다면 그 무게를 지탱하기 위한 부표의 크기도 당연히 크게 제작되어야 한다. 그렇지만 해양의 악조건, 즉 해풍이나 파도에 견뎌내기 위한 반사체의 크기는 한정될 수밖에 없다.

따라서, 낮은 가격과 낮은 소비전력의 능동소자를 사용하여 레이더 신호에 대한 응답의 일관성을 개선시키는 시스템의 개발을 검토하게 되었다. 능동 소자로 구성된 전자식 레이더 반사기는 수신된 레이더 신호를 증폭하여 재전송하게 되므로, 이 신호는 증폭기의 이득에 따라 레이더 표시기 상에서 20m²이상의 등가적인 레이더 유효 반사면적의 표적으로 보여지게 된다. 이것은 소형으로 제작이 가능하므로, 소형선박이나 기존의 항해표지설비에 같이 부착하여 사용한다면, 해상운송의 안전사고 예방에 많은 도움을 주게 될 것이다.

본 연구에서는 이러한 기능을 가지는 전자식 레이더 반사기에 사용하기 위하여 X밴드 레이더 주파수 대역에서 동작하는 마이크로웨이브 증폭기를 HEMT와 GaAs MESFET를 사용하여 설계하고 제작하였다.

II. 시스템 설계

2.1 시스템 이득

레이더 방사파가 면적이 A인 반사체의 수직한 평면에 입사하여 대부분의 전력이 반사된다고 가정하

면, 레이더 유효반사면적 σ 는 A와 같게 될 것이다. 이득 G는 면적 A와 연관시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

따라서 시스템에 요구되는 전체 이득 G_{req} 은 다음 수식으로부터 얻을 수 있다.^[2,3]

$$G_{req} = \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

여기서, σ 는 단위면적당 요구되는 등가 레이더 유효 면적, λ 는 동작주파수의 파장을 나타낸다. X 밴드 항해용 레이더에 의해서 전자식 레이더 반사기가 동작되는 경우에, 20m²의 등가적인 레이더 유효 반사면적을 가지기 위한 시스템의 전체 이득은 식(2)로부터 54.5dB가 된다. 수신과 송신 안테나의 최대 안테나 이득은 안테나 당 대략 5dB이고, 입력 단 보호를 위한 다이오드 신호제한기 때문에 생기는 삽입손실은 대략 1dB정도이므로, 증폭기의 전체 이득은 45.5dB를 상회해야만 한다.

2.2 평형증폭기

평형증폭기는 안정도가 높으며, 잡음지수와 임출력 반사계수를 아주 좋게 설계할 수 있으며, 임피던스 정합을 용이하게 한다. 동일한 증폭기의 출력은 분배 및 결합방식을 이용하여 합성이 되고, 병렬로 접속된 증폭기 사이는 서로 격리시킨다. 한 소자가 고장나면 나머지 소자에 일정한 부하 임피던스를 제공해 주어야 하고, 나머지 능동소자의 전력의 반은 결합기의 격리저항에서 소모된다. 따라서 전체 증폭기는 이득이 6dB만 줄어든 상태로 계속 동작한다. 그림 2-1은 평형증폭기의 일반적인 구조이다.

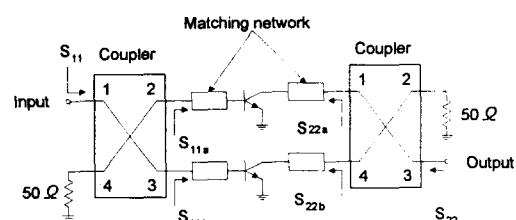


Fig. 2-1 Balanced amplifier configuration.

그림 2-1에서와 같이 동일한 증폭기를 사용한 평형증폭기 구조에서 S-Parameter는 다음과 같다.^[4]

$$\begin{aligned} |S_{11}| &= \frac{1}{2} |(S_{11a} - S_{11b})| \\ |S_{21}| &= \frac{1}{2} |(S_{21a} + S_{21b})| \\ |S_{12}| &= \frac{1}{2} |(S_{12a} + S_{12b})| \\ |S_{22}| &= \frac{1}{2} |(S_{22a} - S_{22b})| \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 증폭기 구성

전체 증폭기 구성은 그림 2-2에 보인 바와 같이 총 5단 증폭회로를 사용하였고, 초단의 Low level Amp와 출력단의 Power Amp는 3dB 결합기를 사용하여 평형증폭기 구조로 구성하였다. 저잡음 증폭기에는 높은 이득과 낮은 잡음지수를 갖는 Fujitsu사의 HEMT(FHX35LG)를 사용하였고, 최종출력단은 Fujitsu사의 FLK022WG를 사용하였고, 드라이브단은 동일한 소자를 사용하였다. 전력 이득을 정합시키기 위한 중간단은 전력이득이 높은 FLK012WF를 사용하였다.

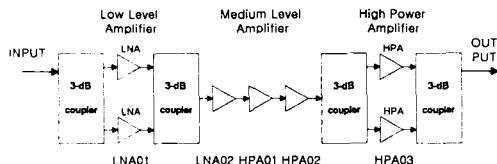


Fig. 2-2 Block diagram of the 5-stage amplifier.

Table 2.1 5-stage amplifier design parameter.

Stage	LNA01	LNA02	HPA01	HPA02	HPA03
Device	FHX 35LG	FHX 35LG	FLK 012WF	FLK 022WG	FLK 022WG
G ₁ (dB)			11	7	7
G _p (dB)	11.7	12.2	10.2	6	6.4
N _f (dB)	1.01	1.03	2.5	3.5	3.5

표 2.1에서 G₁(dB)는 1dB 압축점에서의 전력이득이고, G_p(dB)는 동작전력이득, N_f(dB)는 잡음지수를 나타내고, 전체 증폭기 이득은 46.5dB로 설계하였다.

전체 잡음지수 F_o는 Friis 공식에 의하여 다음과 같다.^[4]

$$\begin{aligned} F_o &= F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{a1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{a1}G_{a2}} \\ &+ \frac{F_4 - 1}{G_{a1}G_{a2}G_{a3}} + \frac{F_5 - 1}{G_{a1}G_{a2}G_{a3}G_{a4}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, F_i은 초단 증폭기의 자음지수이고, G_{ai}은 초단 증폭기의 이득이다. 식(4)로부터 F_o는 1.0312dB이다. 이것은 1, 2단 저잡음 증폭기의 잡음지수 합인 1.0117dB와 큰 차이가 없다. 그러므로, 보통 다단증폭기의 전체잡음지수는 1단과 2단의 잡음지수만을 고려하여 설계하여도 무리가 없음을 알 수 있다.

III. 설계 및 시뮬레이션

3.1 저잡음 증폭기

저잡음 증폭기는 통신시스템의 전단부를 구성하는 부품으로서 전체시스템의 잡음지수와 VSWR을 결정하는 중요부분이다. 따라서 저잡음 증폭기는 낮은 잡음지수와 높은 이득, 그리고 낮은 VSWR의 특성을 동시에 만족해야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 낮은 잡음지수와 높은 이득을 가지는 HEMT를 사용하여 설계하였고, 표 3.1에 설계 주파수에서의 S-parameter를 나타내었다.

Table 3.1 S-parameter, K and |Δ| at 9.4[GHz].

	S11	S12	S21	S22	K	Δ
FHX 35LG	0.715 ∠-159.6	0.092 ∠-18.7	2.435 ∠25.7	0.472 ∠-141.6	0.7513	0.2653

일반적으로 RF소자를 사용하여 회로를 설계할 때 사용주파수대역에서의 안정도를 확인하여 안정도 계수 K가 1 이상이 되도록 설계해야 한다. 따라서 소자의 안정도가 1 이하로서 불안정 할 때에는 회로설계를 용이하게 하기 위해서는 안정도 계수 K를 향상시킬 필요가 있다.

여기서, 안정조건을 구하면 다음과 같다.

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (5)$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

2포트 회로망이 무조건 안정하기 위해서는 오직 $K > 1$ 이고 $|\Delta| < 1$ 일 때만 가능하다. 본 연구에서 사용하는 주파수 대역에서의 HEMT의 안정도 계수 K 는 표 3.1에서와 같이 1 이하가 되므로, 무조건 안정조건을 가지기 위해서는 resistive loading 또는 소스단에 직렬귀환을 사용하여 잡음정합과 이득정합을 동시에 이루어 내야 한다.^[4]

저잡음 증폭기의 성능에 영향을 많이 주는 요소 중 하나는 소스 인더터 L_s 의 귀환효과로 알려져 있고, 저잡음 특성을 향상하기 위한 직렬 귀환 방법은 소자의 소스단에 직렬로 인더터를 연결하여 안정도를 향상시키는 방법이다. 소스 인더터 L_s 를 사용하게 되면, 이득이 다소 감소하지만 입력정합이 쉽고 안정도가 개선되는 장점이 있다.^[5]

소자의 잡음 특성은 통상 최소 잡음지수 NF_{min} , 최적 입력 반사계수 Γ_{opt} , 그리고 잡음저항 R_n 으로 나타내며, 설계에 사용된 소자 FHX35LG($Vds=3[V]$, $Ids=10[mA]$)에 대한 주파수별 잡음 데이터를 표 3.2에 나타내었다.

Table 3.2 Noise Parameter of the FHX35LG.

Freq. [GHz]	NF _{min} [dB]	F_{opt}		R _n [Ω]
		Mag	Ang	
9	0.945	0.62	137.5	8.0
9.4	0.979	0.61	141.7	7.2
10	1.030	0.60	148.0	6.0

표 3.3에서 L_s 의 값이 증가할수록 잡음정합에 대한 최적 입력 반사계수 Γ_{opt} 와 S_{11}^* 의 값이 근접하고, K 값은 주어진 소자에 대해 어떤 값 이상에서는 1보다 크게되어 안정도가 매우 향상된다. 표 3.3에서 잡음저항 Rn 은 L_s 값의 증가에 따라 감소하고, 잡음원의 반경도 커져서 설계가 용이하게 된다.

이때 가장 적절한 L_s 의 값으로 0.05[nH]를 선택하여 설계하였다.

Table 3.3 The variations of NF_{min} , S_{11}^* , Γ_{opt} , R_n , K , $|A|$ (9.4[GHz]).

Ls [nH]	NF _{min} [dB]	Γ_{opt}		S ₁₁		R _n [Ω]	K	A
		Mag	Ang	Mag	Ang			
0.03	0.982	0.607	144.9	0.695	158.1	6.45	0.9741	0.2025
0.04	0.983	0.605	145.9	0.689	157.5	6.21	1.0256	0.1828
0.05	0.984	0.603	147.0	0.683	157.0	5.98	1.0490	0.1641
0.06	0.985	0.602	148.1	0.677	156.4	5.76	1.0402	0.1467
0.07	0.986	0.600	149.2	0.671	155.6	5.55	1.0045	0.1310

표 3.4에서는 설계중심주파수(9.4[GHz])에서 제공된 S-parameter와 계수들을 FHX35LG로 나타내고, L_s 를 부가했을 때 변경된 S-Parameter와 계수들을 FHX35LS로 나타내어 비교하였다. 표 3.4에서 알 수 있듯이, 이러한 조건에서 HEMT는 무조전적인 안정조건 $K > 1$, $|\Delta| < 1$, 입력반사손실의 절대값 $|S_{11}| < 1$, 그리고 출력 반사 손실의 절대값 $|S_{22}| < 1$ 을 만족하였다.

Table 3.4 Compare original S-Parameter with modified S-Parameter.

	S11	S12	S21	S22	K	$ \Delta $
FHX35LG	0.715 $\angle -159.6$	0.092 $\angle -18.7$	2.435 $\angle 25.7$	0.472 $\angle -141.6$	0.7514	0.2654
FHX35LS	0.683 $\angle -157$	0.069 $\angle 23.5$	2.404 $\angle 25.96$	0.461 $\angle -136.5$	1.0490	0.1641

그림 3-1에 제공된 S-parameter를 사용하여 HEMT의 입력측 가용전력이득원을 GA로 나타내고, 잡음지수원은 NFC로 나타내었다. 그리고 입력 안정원은 ISTAB, 출력 안정원은 OSTAB로 나타내었다.

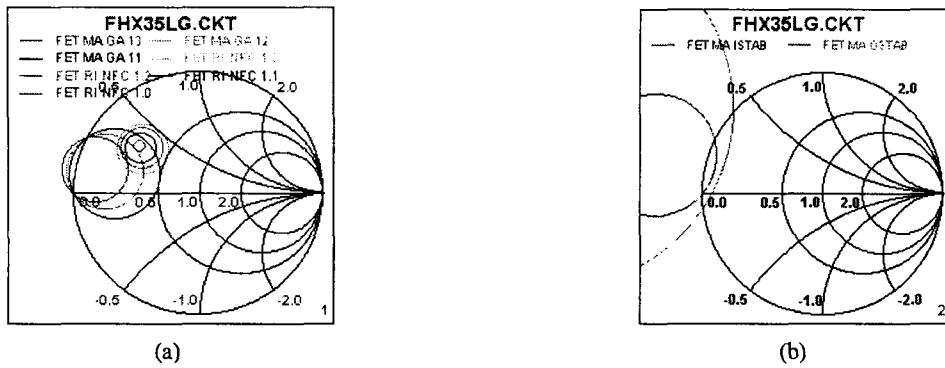


Fig. 3-1 (a) Gain circle, Noise circle, (b) Input & output stability circle.

그림 3-2는 L_s 를 부가했을 때의 입력측 가용 전력 이득원, 잡음지수원 그리고 입출력 안정원이다. 그림 3-2(a)에서 이득원이 스미스 도표 내부에 도시되어 불안정 영역이 없어짐을 알 수 있고, 그림 3-2(b)에서 불안정 영역은 안정원의 내부이며, 입출력

안정원이 스미스도표의 외부에 위치하므로 무조건 안정조건을 만족함을 알 수 있다. 또한 그림 3-3(a)와 그림 3-3(b)를 비교해 볼 때 안정도 계수 K 는 8-11[GHz]의 넓은 대역에서 $K>1$ 로 되어 무조건 안정조건을 만족함을 알 수 있다.

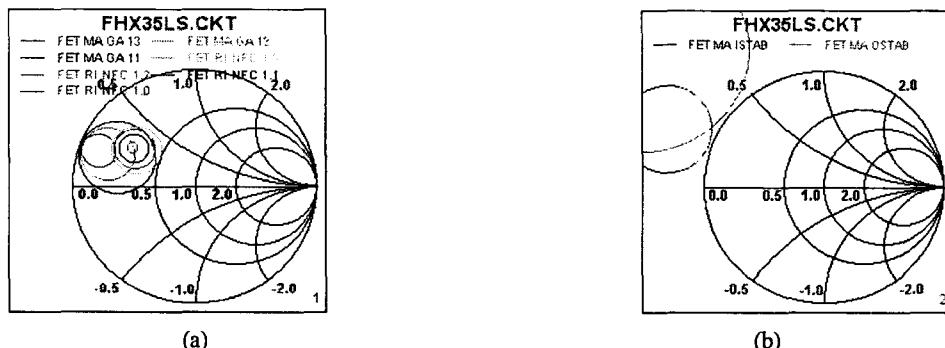


Fig. 3-2 (a) Gain circle, Noise circle, (b) Input & output stability circle.

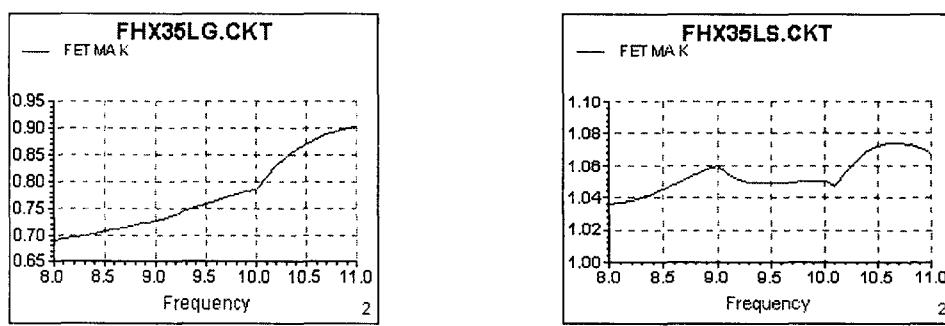


Fig. 3-3 Compared stability factor K.

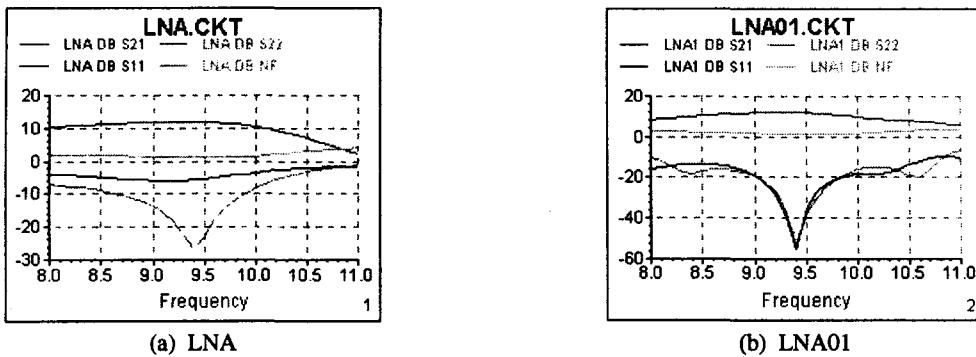


Fig. 3-4 Simulation result for LNA & LNA01.

초단의 증폭기를 저잡음 설계하기 위하여, L_s 를 부가했을 때와 같은 동일한 효과를 가지는 단락스터브를 소스단에 부가하였고, 잡음지수원과 일정 이득 원이 만나는 지점을 Γ_s 로 취하고 스미스 도표 상에서 구한 스터브의 길이를 기초로 하여, CAD 프로그램으로 최적화하여 얻은 결과를 그림 3-4에 나타내었다.

그림 3-4(a)는 평형증폭기 내부의 저잡음증폭기에 대한 시뮬레이션 결과이고, 그림 3-4(b)는 병렬 접속된 2개의 저잡음증폭기와 2개의 3dB 결합기를 포함한 평형증폭기의 이득과 입출력 반사 특성이다. 그림 3-4(b)에서 특히 입력반사특성이 그림 3-4(a)보다는 상당히 많이 개선되었음을 알 수 있다. 이것은 식(3)의 평형증폭기의 특성으로 알려진 것과 같음을 알 수 있다.

3.2 전력 증폭기

3, 4, 5단의 전력증폭기에 사용한 소자의 S-parameter 와 식(5)과 식(6)으로부터 K와 $|\Delta|$ 를 계산하여 표 3.5에 나타내었다. $K > 1$, $|\Delta| < 1$ 이므로, 9.4[GHz]에서 무조건 안정임을 알 수 있다. 3, 4, 5단은 표1에서 설계한 이득에 정합되는 스터브의 길이를 스미스 도표 상에서 구한 값을 기준으로 CAD프로그램으로 최적화하여 설계 제작하였다.

Table 3.5 S-parameter, K and $|\Delta|$ at 9.4[GHz].

	S11	S12	S21	S22	K	$ \Delta $
FLK 012WF	0.771	0.033	1.323	0.785	1.5857	0.5898
FLK 022WG	0.868	0.021	0.869	0.830	1.8021	0.7136

상용 CAD 프로그램에 의해 설계된 정합회로의 시뮬레이션 결과와 실제 측정값이 일치하지 않는 경우가 많으므로, 각단별로 조정하여 기구물에 조립하고 최종적인 조정을 다시 해야한다.

IV. 측정결과

그림 4-1은 5단 증폭기의 이득과 잡음지수, 입출력 반사계수에 대한 시뮬레이션 결과이며, 그림 4-2는 Wiltron 37225A Network Analyzer를 사용하여 5단 증폭기의 이득과 입출력 반사계수를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 입력 -30dBm에 대한 출력이 -3.63dBm 이었고, 20dB감쇠기를 삽입하였으므로 측정된 전체이득은 46.37dB이다. 이것은 설계값 46.5dB와 일치하였다. 측정된 입력반사손실은 -14.2dB이며, 이것은 그림 4-1의 시뮬레이션 결과와 거의 일치하며, 출력반사손실은 -16.6dB로 시뮬레이션 결과와 비슷하였다.

스펙트럼 분석기로 상호변조왜곡을 측정한 결과를 그림 4-3에 나타내었다. 9400.5[MHz]와 2[MHz] 차이가 나는 9402.5[MHz]의 두 신호를 -40dBm의 크기로 조정하여 증폭기의 입력으로 인가하였을 때, 증폭된 기본파는 4.26dBm이고, 제3차 상호변조왜곡항의 크기는 -28dBm과 -26.96dBm으로 측정되었다. 기본파와의 차이는 각각 -32.26dBc와 -31.24dBc로 나타났다.

그림 4-4는 5단 증폭기의 입출력 전력특성을 정리하여 나타내었으며, P_{1dB} 는 -20dBm이고, 이때 출력전력은 24dBm으로 나타났으며, 그림 4-5는 제작된 5단 증폭기의 사진이다.

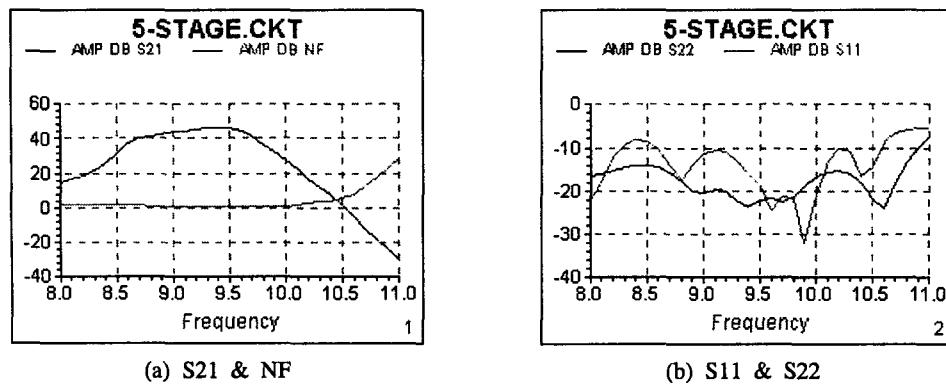


Fig. 4-1 Simulation result for 5-stage amplifier.

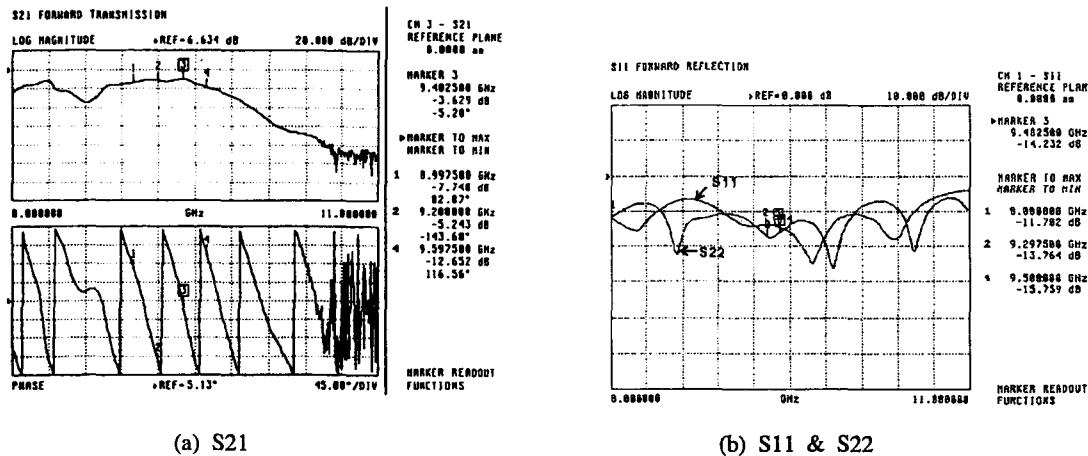


Fig. 4-2 Experiment result for 5-stage amplifier.

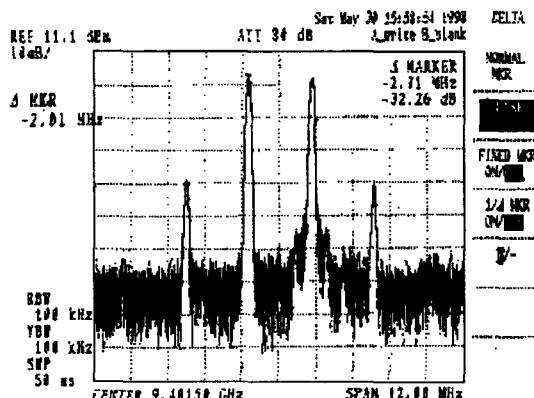


Fig. 4-3 Intermodulation characteristics.

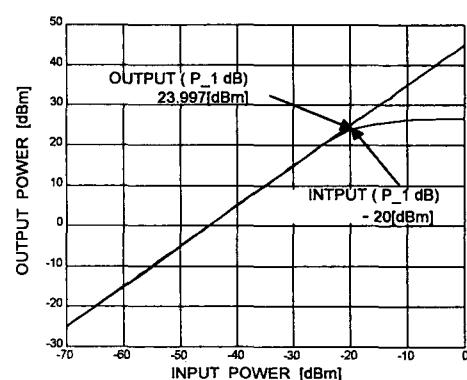


Fig. 4-4 Input and output characteristics.

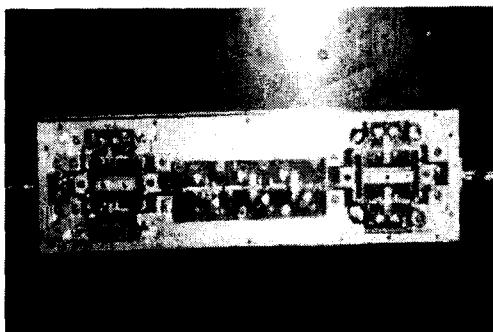


Fig. 4-5 Photograph of the 5-stage amplifier.

V. 결 론

본 연구에서는 X밴드에서 동작하는 전자식 레이더 반사기에 사용하기 위한 마이크로웨이브 5단 전력증폭기를 설계 제작하였다. 수신기의 초단에는 HEMT를 이용한 평형증폭기를 구성하였고, 최종출력단도 역시 MESFET의 전력포화와 임피던스정합을 해결하기 위하여 평형증폭기 구조를 사용하였다.

31mil두께의 유전율 4.8인 FR4기판을 사용하여 제작하였고, 동일 기구물의 전면에는 RF회로를 장착하고 후면에는 전원회로를 장착하였다.

제작된 증폭기는 9.3-9.5[GHz]의 주파수 범위에서 46dB 정도의 이득과 입력반사손실은 -14.2dB, 출력반사손실은 -16.6dB로 측정되었다. 상호변조특성을 측정한 결과 IM_3 은 -32dBc이었다. 측정결과는 시뮬레이션 결과와 거의 일치하며, 대체로 만족할만한 특성을 얻었다.

따라서, X밴드 레이더 전파를 수신하여 증폭시켜 재전송하는 전자식 레이더 반사기로 충분히 사용될 수 있으며, 이러한 제작기술은 S밴드 전자식 레이더 반사기 제작, 레이더 비이전 제작 및 위성수신기 제작에도 응용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 산학연 컨소시엄 과제의 연구 결과중 일부분입니다. 본 연구의 수행에 도움을 주신 (유)신동파 (주)삼양무선에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Richard M. Trim, "Radar Transponders and Radar Target Enhancers", *The Journal of Navigation*, vol. 48, no. 3, pp. 396-409, 1995.
- [2] Levanon, "RADAR PRINCIPLES", pp. 4-27, Wiley Interscience, 1988.
- [3] Byron Edde, "Radar Principles, Technology, Applications", pp. 53-146, Prentice-hall, 1993.
- [4] G. Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifier Analysis and Design", Prentice-hall, 1984.
- [5] R.E. Lehmann and D.D. Heston, "X-band monolithic series feedback LNA," *IEEE MTT*, vol. 28, no.12, pp. 1560-1566, Dec. 1985.



정종혁(鄭宗赫)

1961년 4월생
1992년 2월 부경대학교 전자공학과 졸업
1994년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
1994년~현재 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정



양규식(梁圭植)

1953년 11월생
1974년 2월 한국항공대학교 통신공학과 졸업
1984년 2월 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
1991년 8월 동 대학원 전자공학과 졸업(박사)
1986년~현재 한국해양대학교 전자통신공학과 부교수