

X밴드 전자식 레이더 반사기용 마이크로웨이브 증폭기 설계 및 구현

정 종 혁* · 양 규 식**

Design and Implementation of the Microwave Amplifier for X-band Electronic Radar Reflector

Chong-Hyeog Cheong* · Gyu-Sik Yang**

Abstract

Electronic radar reflector may be less familiar, since their uses have been limited to military applications, especially the enhancement of the effective radar cross-sections of missile test range in the drone aircraft and missiles.

With the significant reductions in the cost of microwave semiconductors, it has become possible to apply both techniques to an increasing range of civil applications.

The responses from users of maritime navigational aids have revealed a general need to improve the radar echoes from buoys. Radar beacons are so expensive and their use is limited by the need to avoid obscuring the radar display from many responses.

There are several improved designs of passive radar reflector available, but their performance is ultimately limited by the cross-section area and this is governed by the size of the buoy and the acceptable windage.

Therefore it is needed to investigate the low-cost, low power, electronic radar reflector that can be improve the reliability of response.

If the electronic radar reflector operate with marine X-Band radars and have an

* 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정 전파통신전공

** 한국해양대학교 이공대학 전자통신공학과 부교수

equivalent radar cross section of 20m^2 , 54.5dB gain is needed. When we use the separate transmitting and receiving antenna with 5dB gain, the required gain of microwave amplifier chain is 44.5dB.

Since the input protection diode signal limiter will have an insertion loss of approximately 1dB, the amplifier chain itself must have an overall gain of 45.5dB.

So we have designed and implemented the 5-stage amplifier for X-Band electronic radar reflector using balanced amplifier scheme. The measured results of the characteristics of this amplifier shows the gain above 45dB, noise figure 1.2dB, input return loss -14.2dB, output return loss -16.3dB and IM_3 32dBc at designed frequency band.

1. 서 론

오늘날 연안이나 대양에서의 해난사고가 빈번히 발생되고 있고, 이로 인한 해양오염이 심각한 실정이다. 이제는 전통적인 항해표지 및 시설로써 해상교통의 안전을 유지하기에는 그 한계에 도달했다고 보여진다. 따라서, 새로운 기능을 가진 항해표지의 개발 등 다른 전자적인 항해용 시스템에도 관심을 가져야 할 것이다.

야간이나 우천시 레이더만으로 항해하는 경우에는 어장이나 소형선박 등 다른 위험물체를 인식하기에는 힘들기 때문에, 레이더 반사 면적(RCS ; Radar Cross Section)을 증가시킬 수 있도록 금속판으로 제작된 수동 레이더 반사기(일명 Corner reflector라고 함)를 설치한 항해표지를 해상에 설치하게 되었다.

이러한 수동 레이더 반사기가 항해표지에 설치된 후, 소형선박이나 어장 등 위험물체의 식별이 개선되어 근거리 항해에서 레이더 표적의 식별에 다소나마 도움을 주고 있다^{[7]-[11]}.

하지만, 우천시 레이더 시계를 확보하기 위하여 레이더의 신호처리장치인 강우 클러터 제거기(Anti clutter rain)를 사용하게 되면, 코너 리플렉터가 부착된 기존의 항해표지는 레이더 표시기 상에서 극단적으로 작은 점으로 보여지게 되며, 다른 클러터 속에 파묻혀서 레이더 시계에서 사라지게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 코너 리플렉터를 더욱 더 크게 제작하면 되지 않겠는가 생각할 수도 있겠다. 하지만 그렇게 단순한 것으로는 해결되지 않는다. 왜냐하면, 반사면적을 증가시키기 위해 코너 리플렉터를 크게 만든다면, 그 무게를 지탱하기 위한 부표 또한 크게 제작해야 한다. 그렇지만 해양의 악조건 즉, 파도의 높이나 해풍의 속도에 견뎌내기 위한 코너 리플렉터의 크기는 한정되어 질 수 밖에 없다는 결론에 도

달하게 된다.

그리고 여기에 다른 방안으로서 레이더 비이컨을 설치한다면, 연안 항로를 항해하는 선박의 레이더 표시기에는 너무나 많은 레이더 비이컨의 응답신호(모르스부호 형태의 자기식별코드 발생)로 인해 항해에 도움을 주기보다는, 항해 종사자들을 더욱 혼란스럽게 만들 것이다. 또한 현재 레이더 비이컨의 가격이 너무 비싸기 때문에, 이것은 적절하지 못한 방안이라 하겠다.

아무튼, 레이더 식별이 아주 명확하게 되도록, 항해에 도움을 주는 항해표지 설비를 개선할 필요가 있다는 것이 많은 항해 종사자들의 요구이다.

따라서, 문제의 해결 방안은 보다 경제적이며 뛰어난 기능을 가진 전자식 능동 레이더 반사기를 사용하는 것이다.

전자식 레이더 반사기는 수신된 레이더 신호를 증폭해서 재전송하면, 증폭기의 이득에 따라 레이더 표시기 상에서 20m^2 이상의 등가적인 레이더 유효 반사면적의 표적으로 보여지게 된다.

이것은 표적의 유효반사면적을 증가시킴과 동시에 응답의 명확성을 개선시킬 수 있으며, 또한 소형으로 제작이 가능하므로, 소형선박이나 기존의 항해표지에 같이 부착하여 사용한다면, 해상에서의 안전사고 예방에 많은 도움을 주게 될 것이다.

그러므로, 이러한 기능을 가지는 X밴드 전자식 레이더 반사기를 마이크로웨이브 능동소자를 이용하여 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 레이더 반사기

능동 레이더 반사기는 레이더로부터 질문되어진 수신신호에 대한 응답신호를 자동으로 송신하는 장치로서 레이더 비이컨, SART, 전자식 레이더 반사기를 들 수 있겠다.

레이더 비이컨은 모르스 부호 형태의 자기 식별코드를 가지고, SART는 조난위치를 표시하기 위해 펄스열 코드를 발사하지만, 전자식 레이더 반사기의 응답은 어떠한 식별부호도 갖지 않는다.

전자식 레이더 반사기는 단지 수신된 레이더 신호를 증폭하는 기능을 가지므로, 수동반사기에서 반사되는 것처럼 동일하게 표시되지만 수동반사기의 응답보다는 더욱 뚜렷하다.

이 장치의 사용목적은 항해 표지설비의 레이더 신호에 대한 반사능력을 증가시키고, 소형 선박의 레이더 탐지를 개선시키며, 충돌에 대한 위험을 감소시키는데 있다.

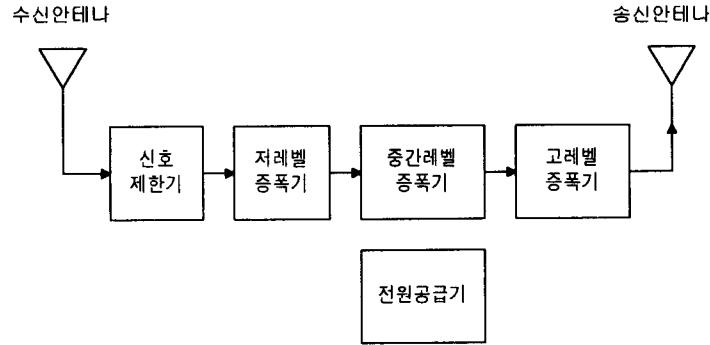


그림 2-1. 전자식 레이더 반사기 계통도.

전자식 레이더 반사기의 필수적인 구성 요소를 그림 2-1에 나타내었다. 수신안테나, 마이크로웨이브 전력 제한기, 저·중·고레벨 신호증폭기, 송신 안테나와 전원공급기로 구성된다. 전자식 레이더 반사기로 들어오는 레이더 펄스는 증폭된 후, 파장이 변하거나 또는 어떤 현저한 지연도 없이 재전송된다.

따라서 이 장치는 표적의 크기를 키우는 것보다는 응답의 명확성을 개선시키는 효과가 있음을 알 수 있다^[5]. 그리고, 전자식 레이더 반사기는 수동반사기의 표시가 억압되는 극단적인 경우를 제외하고는 클러터 제거기에 의해 영향을 받지 않으며, 강우나 해면 클러터 속에서도 표적의 탐지성능을 개선시킨다^{[1],[2]}.

구면 반사체나 코너 리플렉터와 같은 1점 반사체의 유효 반사단면적은 비교적 단순한 수식으로 구하여 진다. 레이더 방사파가 면적이 A 인 반사체의 수직인 평면에 입사하여 대부분의 전력이 반사된다고 가정하면 σ 는 A 와 같게 될 것이다. 이득 G 는 면적 A 와 연관되어

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

로 쓸 수 있고, 따라서 전자식 레이더 반사기에 요구되는 전체 이득은 다음 수식으로 부터 계산되어진다.

$$G_{req.} = \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

여기서, $G_{req.}$ 는 시스템에 요구되는 이득, σ 는 단위 면적당 요구되는 등가 레이더 유효 면적, λ 는 동작시의 파장을 나타낸다.

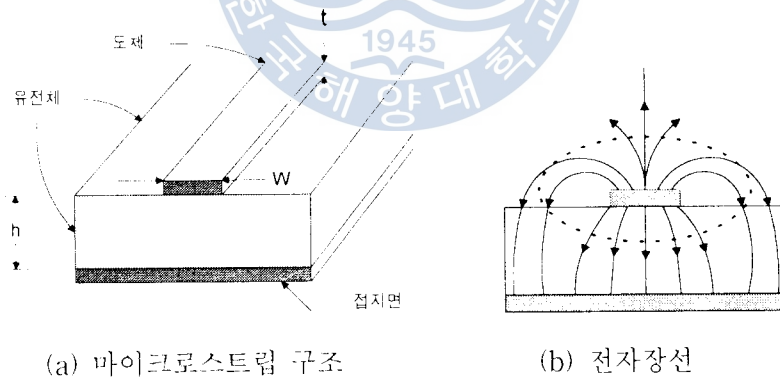
X밴드 항해용 레이더 신호에 의해서 전자식 레이더 반사기가 동작하는 경우에, 20m^2 의 등가적인 레이더 유효반사면적을 가지기 위해서, 시스템에 요구되는 전체 이득은

$$G_{req.} = 4 \times \pi \times 20 / 0.03^2 = 54.5 \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

가 된다. 수신과 송신 안테나는 수평방향에서 명목상 무지향성 편파의 적용 범위를 제공하도록 요구되어지기 때문에, 선박의 기울기 등으로 인해 레이더와 전자식 레이더 반사기 사이에 19도 정도의 고도 차이를 허용하고, 안테나 이득은 안테나 당 대략 5dB 정도로 사용한다. 따라서 마이크로웨이브 증폭단에 요구되는 이득은 44.5dB가 된다. 여기서, 입력단 보호를 위한 다이오드 신호 제한기의 삽입손실은 1dB 정도이므로, 증폭단의 전체이득은 45.5dB를 상회해야만 한다.

3. 마이크로스트립 회로 해석

마이크로스트립 선로의 구조는 그림 3-1(a)와 같으며 유전율이 ϵ_r 이고 높이가 h 인 유전체 기판 위에 두께 t 이고 폭이 W 인 도체 스트립(strip)으로 되어있다. 그림 3-1(b)에서 직선은 전계, 점선은 자계를 나타낸다.



(a) 마이크로스트립 구조

(b) 전자장선

그림 3-1. 마이크로스트립의 구조와 전자장선.

실제로 기판 위에 회로를 설계하기 위해서는 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 (Z_0)와 유전율이 주어지고 선로의 폭을 결정해야 하므로 다음과 같은 공식을 이용하게 된다.

$w/h \leq 2$ 인 경우:

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \quad (3.1)$$

$w/h > 2$ 인 경우:

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B-1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.2)$$

여기서

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} (0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}) \quad (3.3)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

이다. 또한 마이크로스트립 선로에서 전파는 quasi-TEM 모드로 전파하므로 선로의 파장은

$$\lambda = \frac{V_P}{f} = \frac{C}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

로 주어진다. 위의 공식들을 이용하면 원하는 특성 임피던스와 전기적 길이를 갖는 마이크로스트립 선로의 폭과 실제 길이를 결정할 수 있다.

4. 마이크로파 증폭기의 해석

평형 증폭기는 안정도가 높으며, 낮은 잡음지수로 설계할 수 있고, 입출력 반사계수를 낮추며, 임피던스 정합을 용이하게 한다. 동일한 증폭기의 출력은 분배 및 결합방식을 이용하여 합성이 되고, 병렬로 접속된 증폭기 사이는 서로 격리시킨다.

한 소자에 고장이 나면 전력 결합기는 나머지 소자에 일정한 부하 임피던스를 제공해 주어야 하고, 나머지 능동소자의 전력의 반은 결합기의 격리저항에서 소모된다. 따라서 전체 증폭기는 이득이 6dB만 줄어든 상태로 계속 동작한다^[19].

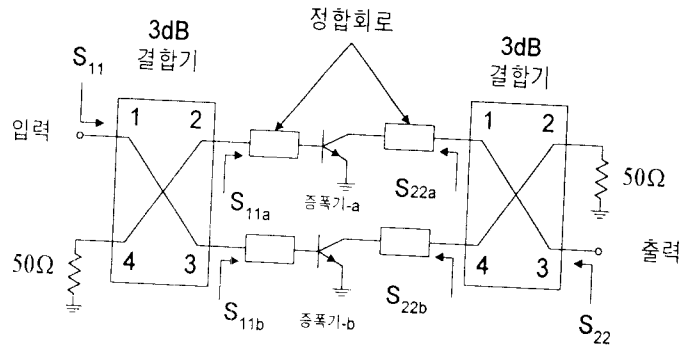


그림 4-1. 평형 증폭기 구조.

5. 시스템 구성 및 특성

X밴드 항해용 레이더에 의해 전자식 레이더 반사기가 동작되는 경우에, 20m^2 의 등가적인 레이더 유효 반사 면적을 가지기 위해, 시스템의 필요한 전체 이득은 식 (2.3) 으로부터 54.5dB가 된다. 따라서 안테나 이득을 제외한 45.5dB이상의 이득을 얻기 위해 5단 증폭기를 설계하였다.

시스템의 등가 레이더 반사면적의 설계목표로 20m^2 을 설정하였으므로, 안테나 이득을 제외한 증폭기의 이득은 44.5dB를 상회하여야만 한다. 입력단 보호를 위한 다이오드 신호제한기의 삽입손실과 나머지 결합손실을 고려하여 46.5dB로 설계하였다.

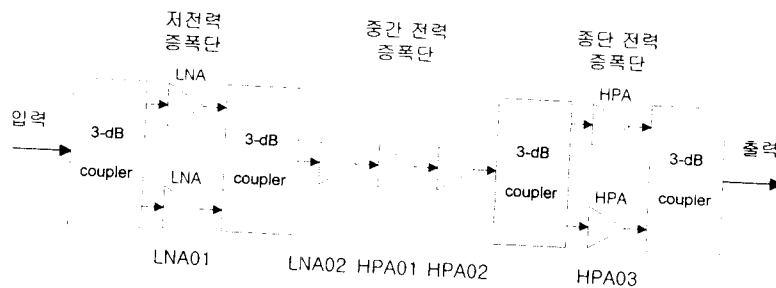


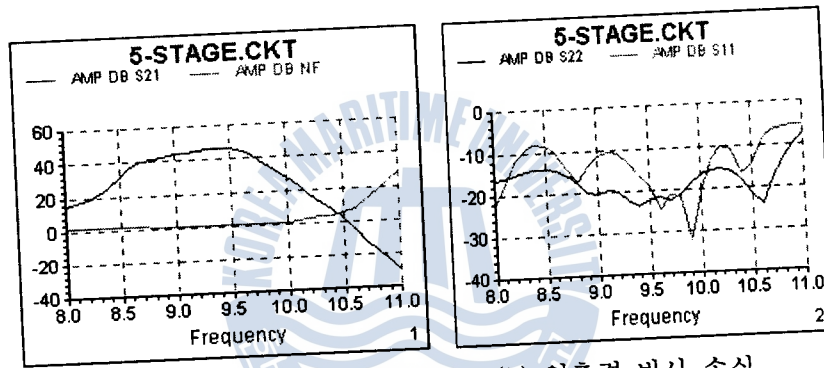
그림 5-1. 5단 증폭기의 구성도.

표 5.1에는 각 증폭단의 설계이득과 잡음지수를 나타내었다.

표 5.1 5단 증폭기의 설계 파라미터.

증폭단	1단	2단	3단	4단	5단
이득[dB]	11.7	12.2	10.2	6	6.4
N_f [dB]	1.01	1.03	2.5	3.5	3.5

그림 5-2에 각 단의 증폭기를 종속 연결한 전체 5단 증폭기의 이득과 잡음지수, 입출력반사손실을 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 그림 5-2(a)에서 전체이득은 46.5dB이고, 잡음지수는 1.03dB이다. 그림 5-2(b)에서 입력반사손실은 -15dB이고, 출력반사손실은 -20dB이하이다.



(a) 이득과 잡음지수 (b) 입출력 반사 손실

그림 5-2. 5단 증폭기의 시뮬레이션 결과.

6. 제작 및 성능평가



그림 6-1. 제작된 5단 증폭기의 사진(전면).

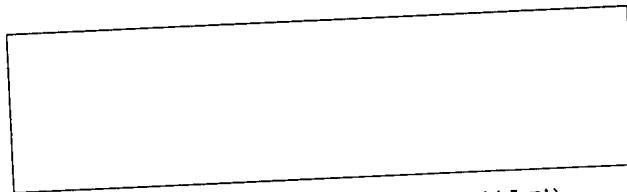


그림 6-2. 제작된 5단 증폭기의 사진(후면).

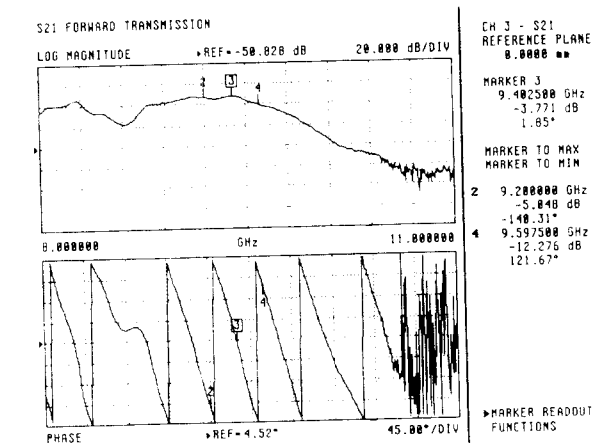


그림 6-3. 5단 증폭기의 이득과 위상(입력전력 : -30dBm).

그림 6 3은 9.4[GHz]에서 입력전력이 -30dBm일 때 출력전력은 -3.771dBm을 나타내고 있다. 20dB 감쇠기를 사용하였으므로 5단 증폭기의 전력이득은 46.229dB로 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 6 4는 전체 시스템의 임출력 반사 손실을 측정된 결과로서, 9.4[GHz]에서 입력 반사 손실은 14.2dB를 나타내어 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였고, 출력 반사 손실은 16.3dB를 나타내며 이것은 시뮬레이션 결과와 비슷함을 알 수 있다.

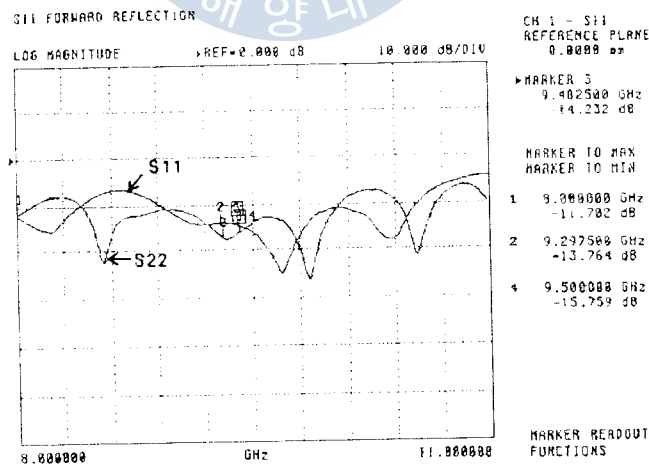


그림 6-4. 전체 시스템의 측정된 임출력 반사 손실.

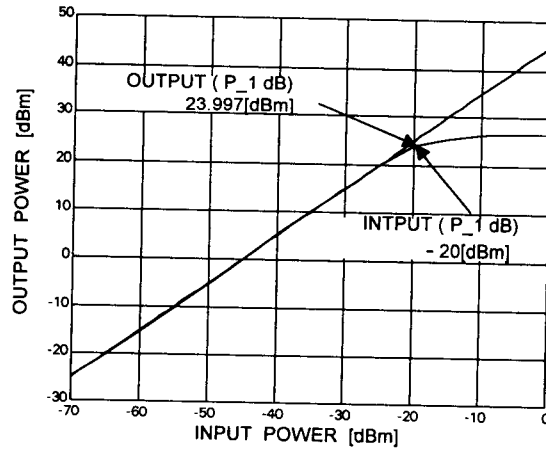


그림 6-5. 전체 시스템의 측정된 입출력 전력 특성.

그림 6-5는 측정된 전체 시스템의 입출력 전력특성을 정리하여 나타내었으며, 입력 전력이 -20dBm 일 때, 출력전력의 $P_1\text{dB}$ 는 24dBm 으로 측정되었다. 그림6-6은 중심주파수 $9.4[\text{GHz}]$ 에서는 46.3dB 의 이득과 잡음지수는 1.22dB 였으며, $9\sim 10[\text{GHz}]$ 대역에서의 잡음지수는 최고 1.3dB 로 측정되었다. 설계한 잡음지수 1.03dB 보다는 높으나 이것은 X 밴드 수신기의 잡음지수가 일반적으로 2.5dB 임에 비하여 양호한 특성임을 알 수 있다.

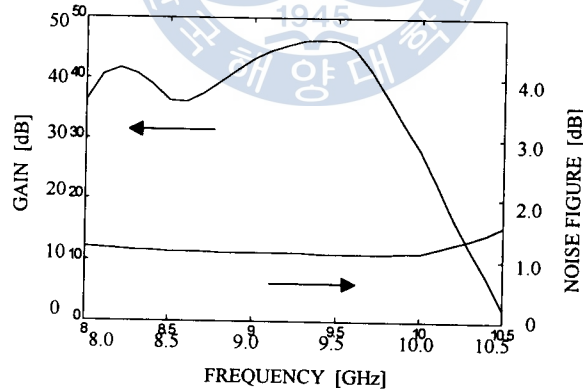


그림 6-6. 5단 증폭기의 이득과 잡음지수.

그림 6-7에서 $2[\text{MHz}]$ 차이가 나는 두 입력신호에 대하여 측정된 3차 상호변조왜곡함의 크기는 $9,398.5[\text{MHz}]$ 에서 -28dBm 과 $9,404.5[\text{MHz}]$ 에서 -26.96dBm 으로 측정되었다. IM_3 은 각각 -32.26dBc 와 -31.24dBc 로 나타났으며, 설계 값과 비교하여 양호한 특성임을 알 수 있다.

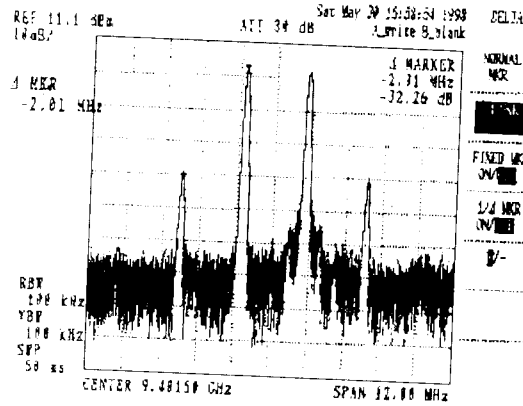


그림 6-7. 상호 변조 왜곡 특성(2-tone).

제7장 결 론

본 연구에서는 X밴드 대역에서 사용되는 레이더 신호에 응답하여 레이더 반사면적을 확실히 증가시키고, 레이더 표시기에서의 항해표지나 소형선박의 인식을 명확히 개선시킬 수 있는 전자식 레이더 반사기용 마이크로웨이브 증폭기를 설계하고 제작하였다.

송수신 안테나를 제외한 RF증폭기에서 필요한 이득은 45dB 정도이므로, HEMT와 MESFET를 이용한 5단 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 수신기의 초단에는 HEMT를 이용한 평형증폭기를 구성하였고, 종단 전력 증폭단에 사용되는 MESFET의 G_{dB} 가 낮기 때문에 기본적인 방열 문제와 임피던스 정합 문제를 해결하기 위하여 평형증폭기 구조를 사용하였다.

제작된 증폭기는 9.3~9.5[GHz]의 주파수 범위에서 45dB이상의 이득과 잡음지수 1.22dB, 입력반사계수 -14.2dB, 출력반사계수 -16.6dB로 측정되었다. 사용주파수 대역 내에서 2[MHz] 차이가 나는 -40dBm 크기의 두 입력신호에 대하여 측정된 IM_3 은 각각 32.26dBc와 -31.24dBc로 나타났다.

시뮬레이션 결과와 측정 결과는 거의 일치하였고, 매우 만족할 만한 특성을 얻었다. 따라서 본 연구에서 개발된 전자식 레이더 반사기는 소형 선박이나 항해표지의 레이더 시계를 증가시키는 수단으로 아주 넓게 사용되어질 수 있으며, 기존의 수동 레이더 반사기와 결합하는 것도 가능하다. 이러한 제작기술은 S밴드 전자식 레이더 반사기, 레이더 비이컨, 위성수신기의 제작에도 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Richard M. Trim, "Radar Transponders and Radar Target Enhancers", The

- Journal of Navigation, vol. 48, no. 3, pp. 396-409, 1995.
- [2] N. Ward, "Development and Testing of a Radar Target Enhancer for Navigation Buoys", The Journal of Navigation, vol. 48, no. 1, pp. 70-76, 1995.
- [3] John N. Briggs, "Detection of Marine Radar Targets", The Journal of Navigation, vol. 49, no. 3, pp. 400-409, 1996.
- [4] N. Ward, "The Future of Radar Beacons", The Journal of Navigation, vol. 50, no. 3, pp. 243-247, 1997.
- [5] N. Ward, "The Future of Radar Target Enhancers", The Journal of Navigation, vol. 50, no. 3, pp. 248-249, 1997.
- [6] Skolink, M. I., *Introduction to Radar Systems*, pp. 15-65, McGraw-hill, 1970.
- [7] 落合徳臣, 茂在寅男, *レーダの理論と實際*, pp. 15-39, 海文堂, 1970.
- [8] G. J. Sonnenberg, *Radar and Electronic Navigation*, pp. 317-345, Butterworths, 1980.
- [9] Levanon, *RADAR PRINCIPLES*, pp. 4-27, Wiley Inc., 1988.
- [10] Byron Edde, *Radar Principles, Technology, Applications*, pp. 53-146, Prentice-hall, 1993.
- [11] 李相高, 姜貞洙, *레이다 공학*, pp. 57-60, pp. 75-81, pp. 397-401, 보성문화사, 1995.
- [12] IMO A.615., *Radar Beacons and Transponders*, Annex 1, 2, 3.
- [13] ITU-R M. 824-1., *Technical parameters of radar beacons*.
- [14] ITU-R M. 1176., *Technical parameters of radar target enhancers*.
- [15] E. H. Fooks and R. A. Zakarevicius, *Microwave Engineering using Microstrip Circuits*, pp. 40-110, Prentice-hall, 1990.
- [16] K.C. Gupta, Ramesh Garg, and I.J. Bahl, *Microstrip lines and slot lines*, pp. 107-155, Artech, 1979.
- [17] Edgar. J. Denlinger, "Losses of Microstrip Lines", IEEE, MTT, vol.28, no. 6, pp. 513-521, June 1980.
- [18] B.A. Syrett, "A Broad-Band Element for Microstrip Bias or Tuning Circuits," IEEE MTT, vol.28, pp.925-927, Aug.1980.
- [19] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifier Analysis and Design*, pp. 75-133, Prentice-hall, 1984.