

개선된 기능을 갖는 능동 레이더 반사기 개발에 관한 연구

(A Study on the Development of the Active Radar Reflector with Enhanced Function)

정중혁* 강상욱* 조영창* 최병진* 윤정오* 오주환**
(Jong-Hyeog Jeong) (Sang-Wook Kang) (Young-Chang Cho) (Byung-Jin Choi) (Jeong-Ch Yoon) (Ju-Hwan Oh)

요약 능동 레이더 반사기는 지금까지는 특히 비행물체와 미사일의 레이더 유효 반사 면적을 효과적으로 증가시키기 위한 군사적 응용에만 사용이 제한되어져 왔기 때문에 그다지 친숙한 용어는 아니다. 레이더 트랜스폰더의 가장 잘 알려진 응용은 군용의 피아 식별 장치 (IFF ; Identification Friend or Foe)와 이것의 민간 항공부문이고, 항공 교통 관제(ATC ; Air Traffic Control)를 위한 2차 감시 레이더(SSR ; Second Surveillance Radar), 그리고 보다 최근에는 전세계 해상 조난 및 안전 제도(GMDSS ; Global Maritime Distress and Safety System)의 수색 구조용 트랜스폰더(SART ; Search And Rescue Transponder)등이 있다. 최근 연안이나 대양에서의 해난사고가 빈번히 발생되고 있으므로, 이로 인한 해양오염이 심각한 실정이다. 이제는 전통적인 항해표지 및 시설로써 해상교통의 안전을 유지하기에는 충분치 못하며, 새로운 개념과 구조가 적용되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 개선된 기능을 가지는 능동 레이더 반사기를 제안하고 제작하였다. 제작된 시스템은 기존의 시설에 비해 높은 성능 향상을 보인다.

Abstract Active 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. Perhaps the most widely-known applications of radar transponders are Identification Friend or Foe(IFF) and its civilian counterpart, secondary surveillance radar for Air Traffic Control(ATC), and most recently, as Search And Rescue Transponder(SART) in the Global Maritime Distress and Safety System(GMDSS). Since it happens frequently accidents on the sea, the problems of the contamination more seriously considered. The conventional navigation buoy and utilities are not sufficient to maintain the safety of the sea and thus new structured concept must be considered. Therefore, this paper propose and implement the active radar reflector with a enhanced function. The results are shown that the performance of the system is significantly improved comparing with the conventional utilities.

1. 서론

레이더의 정보 수집 능력을 이용하기 위한 레이더 트랜스폰더(Radar Transponder) 및 능동 레이더 반사기(Active Radar Reflector)는 오랫동안 여러 분야에 이용되어져왔다.

* 경운대학교 정보통신공학과
** 경운대학교 컴퓨터공학과

레이더 트랜스폰더의 가장 잘 알려진 응용은 군용의 피아 식별 장치 (IFF ; Identification Friend or Foe)와 이것의 민간 항공부문이고, 항공 교통 관제(ATC ; Air Traffic Control)를 위한 2차 감시 레이더(SSR ; Second Surveillance Radar), 해상 항해에서의 레이더 비이컨(Radar Beacon), 그리고 보다 최근에는 전세계 해상 조난 및 안전 제도(GMDSS ; Global Maritime Distress and Safety System)의 수색 구조용 트랜스폰더(SART ; Search And Rescue Transponder)등이 있다.

능동 레이더 반사기는 지금까지는 특별히 비행물체와 미사일의 레이더 유효 반사 면적을 효과적으로 증가시키기 위한 군사적 응용에만 사용이 제한되어져 왔기 때문에 그다지 친숙한 용어는 아니다. 하지만, 근래에 마이크로웨이브용 반도체 소자의 가격이 현저하게 낮아져서, 민간부문의 응용분야도 증가될 것이며, 특히 해상에서의 안전 항해를 위한 기술력의 증가도 가능해질 것이다^[1].

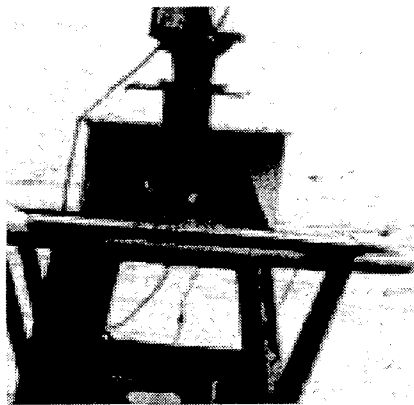
2. 레이더 반사기

2.1 수동 레이더 반사기

금속 도체에 전파가 부딪히면 반사파는 사방으로 확산한다. 큰 형태의 원추형 부표에 입사된 전파는 상향으로 반사되어 레이더로 다시 수신되지 않게 될 것이다. 따라서 항상 강한 반사파를 얻을 수 있도록 삼각형의 금속판을 서로 직각으로 조합하면 어느 방향에서 전파가 입사하더라도, 반사파는 반드시 원래의 방향으로 되돌아간다^[23].

이와 같은 것을 여러 개 조합하여 만든 것이 코너 리플렉터라 불리며, 원추형 부표의 꼭대기에 부착하여 레이더 탐지성능을 향상시키고 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 수동 레이더 반사기의 사진을 <그림 1>에 나타내었다.



<그림 1> 수동 레이더 반사기.

여러 가지 형태의 코너 리플렉터가 사용되고 있지만, 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

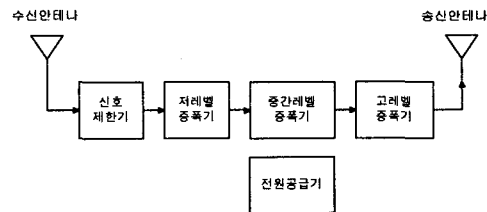
클러터 속에 파묻혀서 레이더 시계에서 사라지게 된다.

일반적으로 현재 사용되는 코너 리플렉터의 유효 반사 면적은 탐지거리 2-3Nm에서 대략 10m²정도로 표시되어지고 있으며, 해양의 악조건, 즉 해풍이나 파도에 견뎌내기 위한 코너 리플렉터의 크기는 한정될 수밖에 없으므로, 탐지거리와 유효 반사면적을 이보다 더 증가시키는 것은 곤란한 실정이다^[4].

2.2 능동형 레이더 반사기

수동 레이더 반사기의 단점을 개선하기 위해서는 보다 경제적이면서 뛰어난 기능을 가지며, 운반이 용이하고 유지보수에도 편리하도록 개선된 구조를 가진 능동형 레이더 반사기를 사용하는 것이다.

능동형 레이더 반사기는 수신된 레이더 신호를 증폭해서, 증폭기의 이득에 따라 레이더 표시기 상에서 등가적인 레이더 유효 반사면적의 표적으로 보여지게 한다. 이것은 표적의 유효반사면적을 증가시키고 동시에 응답의 명확성을 개선시킬 수 있으며, 또한 소형으로 제작이 가능하므로, 소형선박이나 기존의 항해표지에 같이 부착하여 사용하면, 해상에서의 안전사고 예방에 많은 도움을 주게 될 것이다.



<그림 2> 능동형 레이더 반사기 구성도.

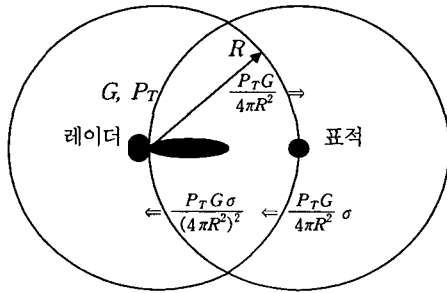
능동형 레이더 반사기의 필수적인 구성 요소를 <그림 2>에 나타내었다. 수신안테나, 마이크로웨이브 전력 제한기, 저·중·고레벨 신호증폭기, 송신 안테나와 전원공급기로 구성된다.

능동형 레이더 반사기의 사용목적은 항해 표지설비의 레이더 신호에 대한 반사능력을 증가시키고, 소형 선박 등의 레이더 탐지를 개선시키며, 충돌에 대한 위험을 감소시키는 데 있다.

수동 레이더 반사기의 표시가 억압되는 극단적인 경우를 제외하고는 클러터 제거기에 의해 영향을 받지 않으며, 강우나 해면 클러터 속에서도 표적의 탐지성능을 개선시킨다.

2.3 레이더 방정식

레이더 방정식은 표적으로부터 반사된 전력과 거리와의 관계를 표시한 식으로서 레이더의 송신기, 수신기, 안테나, 표적의 상태 그리고 주위환경과 밀접한 관계를 가지고 있다^[5-7].



<그림 3> 레이더 전력 밀도의 형태.

레이더의 송신출력을 P_T 라 할 때 등방향성 안테나를 사용하였다고 하면 R 인 거리에서 단위 면적을 통과하는 전력밀도는 <그림 3>에서와 같이 전체 복사전력 P_T 를 $4\pi R^2$ 으로 나눈 값이 된다.

이 전력은 모두 표적에서 반사되어 되돌아오지 않기 때문에, 레이더의 수신방향에 대한 표적의 유효 반사단면적을 σ m²이라고 하면, 표적으로부터 반사되어서 레이더 안테나에 되돌아오게 되므로 R 의 거리를 다시 통과하여 수신되는 전력밀도는 한 번 더 $4\pi R^2$ 으로 나눈 값이 된다.

따라서, 레이더 수신안테나의 유효 개구면적을 A_R 이라 하면, 레이더 안테나에서 수신되는 반사파의 전력 P_R 은 다음과 같이 된다.

$$P_R = \frac{P_T G_T \sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot A_R \quad (2.1)$$

$$= \frac{P_T G_T \sigma}{(4\pi R^2)^2} \cdot A_R$$

레이더에서는 수신과 송신안테나를 공용으로 사용하기 때문에 $G_R = G_T = G$, $A_R = A_T = A$ 이고, 레이더 안테나의 유효 개구면적 A 와 안테나 이득 G 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있으므로,

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.2)$$

따라서, 식(2.1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_R = \frac{P_T \lambda^2 G^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.3)$$

송신경로의 기계적인 손실과 급전 손실을 합한 것은 송신부 손실 L_T 라 하고, 수신기에서 급전, 기계적 손실과 빔의 형태적 손실들은 데이터 처리시 발생하는 손실과 더해지게 되며 이것들을 모두 합한 것을 수신부 손실 L_R 이라 한다.

이러한 손실들은 성능에 실질적인 영향을 주므로, 송·수신기의 높이를 조절하여 급전손실을 최소화해야 한다. 자유공간에서 손실을 고려한 수동 반사기에 대한 이중 경로 거리 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

이중 경로:

$$S_R = P_T + 2G + \sigma + 20 \log \lambda - 30 \log (4\pi) - 40 \log R - L_T - L_R \quad [\text{dBW}] \quad (2.4)$$

$$= S_{R(1)} + \sigma$$

단일 경로:

$$S_{\text{grFS}} = P_T + G + G_{AR} + 20 \log \lambda - 20 \log (4\pi) - 20 \log R - L_T \quad [\text{dBW}] \quad (2.5)$$

식 (2.4)에서 $\sigma = 0$ dBm²으로 놓으면, 자유공간에서 1m²의 등가 레이더 반사 면적을 가진 표적의 예코전력 $S_{R(1)}$ 을 나타낸다.

자유공간 거리 방정식인 식 (2.4)와 식 (2.5)에 다중경로 손실 M 과 기상변화 손실 L_A 항을 고려하여 전체적인 굴절과 손실을 설명할 수 있다. 따라서, 식 (2.6)은 점 반사기로부터 레이더 수신기에 도달된 신호를 나타내고, 식 (2.7)은 레이더로부터 능동형 반사기에 도달된 신호이다.

$$S_R = S_{R(1)} + \sigma + 2M - 2L_A \quad [\text{dBW}] \quad (2.6)$$

$$S_{\text{gr}} = S_{\text{grFS}} + M - L_A \quad [\text{dBW}] \quad (2.7)$$

표적의 유효 반사 단면적은 특수한 모양을 제외하고 간단히 결정할 수 없으므로 레이더의 성능, 즉 최대 탐지거리를 평가할 때는 표적의 유효 반사 단면적의 평균값을 취하는 것이 보통이다.

그러나 구면 반사체나 1점 반사체의 유효 반사 단면적은 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. 따라서 능동형 레이더 반사기에 필요한 전체 이득은 식(2.2)로부터 다음과 같다.

$$G_{ARR} = \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

여기서, G_{ARR} 은 능동 레이더 반사기 시스템에 필요한 이득, σ 는 단위 면적당 등가 레이더 유효 반사단면적, λ 는 시스템 동작 범위의 파장을 나타낸다.

식(2.8)로부터 X밴드에서 $20m^2$ 의 등가적인 레이더 유효 반사단면적을 가지기 위해서, 시스템이 가져야 할 전체 이득은 54.5dB가 된다.

3. 시스템 설계

수신과 송신 안테나는 수평방향에서 명목상 무지향성 편파의 적용 범위를 제공하도록 요구되어지기 때문에, 선박의 기울기 등으로 인해 레이더와 능동형 레이더 반사기 사이에 19° 정도의 고도 차이를 허용하고, 수신과 재송신을 동시에 행하기 위하여, 수신과 송신 안테나 사이에 적절한 격리가 필수적이며, 그렇지 않으면 변동하는 귀환이 발생하여, 능동형 레이더 반사기가 무력하게된다.

군사용 추적 레이더의 경우에는 물리적으로 가까운 안테나 사이에 필요한 절연을 시키기 위해 좌수편파나 우수편파방식을 사용한다. 선박레이더의 경우에는 모두 수평편파방식이어서, 이러한 편파의 사용은 불가능하다. 따라서, 각각의 안테나 당 이득은 대략 5dB의 이득을 가진 도파관 슬롯 안테나를 사용하였다.

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.

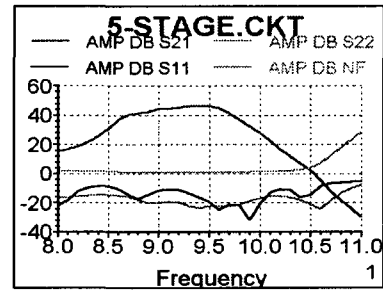
<표 1> 설계 이득과 잡음지수.

증폭단	1단	2단	3단	4단	5단	합계
이득[dB]	11.7	12.2	10.2	6	6.4	46.5
N _f [dB]	1.01	1.03	2.5	3.5	3.5	1.03

총 5단 증폭회로를 사용하였고, 초단의 저전력 증폭단과 중단 전력 증폭단은 3dB 결합기를 사용하여 평형 증폭기 구조로 구성하였다.

<그림 4>에 각 단의 증폭기를 종속 연결한 전체 5단 증폭기의 이득과 잡음지수, 입출력반사손실을 시뮬레이션한 결과를 나타내었다^[8].

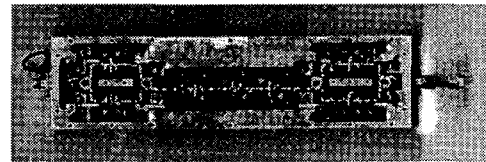
시스템의 동작 중심주파수 9.4[GHz]에서의 전체이득(S21)은 46.5dB이고, 잡음지수(NF)는 1.03dB이고, 입력반사손실(S11)은 -15dB이하이고, 출력반사손실(S22)은 -20dB이하이다.



<그림 4> 전체 이득, 잡음지수, 반사손실.

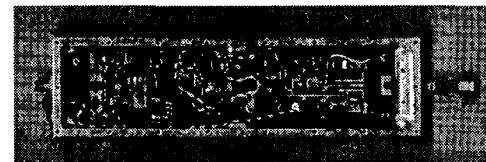
4. 제작 및 측정

제작된 증폭기에 사용한 기판은 FR4이고, 기판의 유전율 4.8, 기판의 높이는 0.7874[mm]이다. 기구물의 전면에는 RF 증폭기 회로를 제작했으며, <그림 5>에 나타내었다.



<그림 5> RF증폭기.

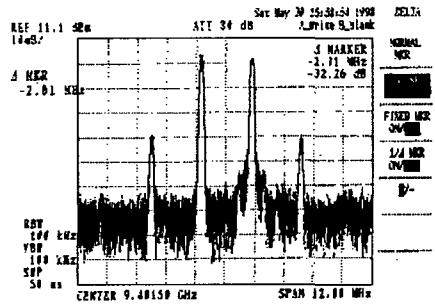
기구물의 후면에는 전원회로를 제작했으며, <그림 6>에 나타내었다. 최적의 바이어스를 위해 각각의 게이트 전압을 조절 가능하도록 하였고, 직류전원의 RF 차폐를 위해 기구물 내벽에 관통 콘덴서를 부착하였다.



<그림 6> 전원회로

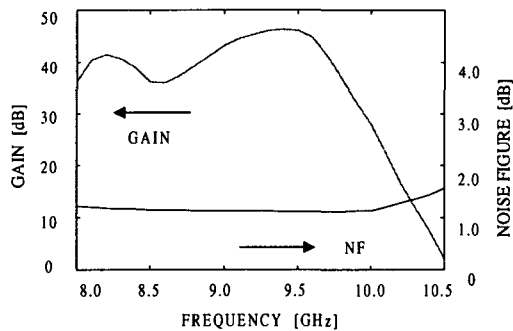
상호 변조 왜곡 특성을 측정된 결과를 <그림 7>에 나타내었다. 2[MHz]차이가 나는 두 입력신호에 대하여 측정된

3차 상호 변조 왜곡항의 크기는 9,398.5[MHz]에서 -28dBm과 9,404.5[MHz]에서 -26.96dBm으로 측정되었다. IM_3 은 각각 -32.26dBc와 -31.24 dBc로 나타났으며, 상당히 양호한 특성임을 알 수 있다.



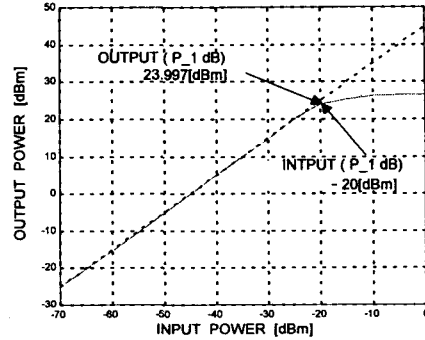
<그림 7> 상호 변조 왜곡 특성(2-tone).

시스템의 이득을 회로망 분석기(Wiltron 37225A)로 측정 한 결과와 잡음지수 분석기(MI2075)로 측정된 잡음지수를 시스템의 이득과 비교하여 <그림 8>에 나타내었다. 9.3~9.5[GHz]의 주파수 대역에서 45dB이상의 이득과 잡음지수 1.2dB정도의 양호한 특성을 나타낸다.



<그림 8> 측정된 이득과 잡음지수.

<그림 9>는 측정된 시스템의 입·출력 전력특성을 정리하여 나타내었으며, 입력 전력이 -20dBm일 때, 출력 전력의 P_1 (dB)는 24dB임을 알 수 있다.



<그림 9> 입·출력 전력 특성.

5. 결론

본 연구에서는 수동 레이더 반사기보다는 경제적이며, 운반이 용이하고, 유지보수에도 편리한 구조를 가지며, 표적의 탐지 성능을 개선하는 기능을 가지는 능동형 레이더 반사기를 설계하고 제작하였다.

안테나를 제외한 시스템의 전력 이득은 대략 45dB 이상으로 측정되어 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제안된 능동 레이더 반사기는 X밴드 대역에서 사용되는 레이더 신호에 응답하여 수동 레이더 반사기의 표시가 억압되는 극단적인 경우를 제외하고는 클러터 제거에 의해 영향을 받지 않으며, 강우나 해변 클러터 속에서도 표적의 탐지성능을 개선시킬 수 있다. 그러므로, 요트 등의 소형선박이나 항해용 브이의 레이다 시계를 증가시키는 수단으로 아주 넓게 사용되어질 것이다.

참고 문헌

- [1] Richard M. Trim, "Radar Transponders and Radar Target Enhancers", *The Journal of Navigation*, vol. 48, no. 3, pp. 396-409, 1995.
- [2] Skolink, M. I., *Introduction to Radar Systems*, pp. 15-65, McGraw-hill, 1970.
- [3] 落合徳臣, 茂在寅男, *レーダの理論と實際*, pp. 15-39, 海文堂, 1970.
- [4] G. J. Sonnenberg, *Radar and Electronic Navigation*,

pp. 317-345, Butterworths, 1980.

[5] Levanon, *RADAR PRINCIPLES*, pp. 4-27, Wiley Inc., 1988.

[6] Byron Edde, *Radar Principles, Technology, Applications*, pp. 53-146, Prentice-hall, 1993.

[7] 李相高, 姜貞洙, 레이다 공학, pp. 57-60, pp. 75-81, pp. 397-401, 보성문화사, 1995.

[8] 정종혁 외5, "개선된 구조를 갖는 능동레이더 반사기 개발에 관한 연구", 한국산업정보학회 춘계학술대회논문집, pp.59-64, 2000.



정종혁

1992년 부경대학교 전자공학과 졸업
1994년 동아대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1999년 한국해양대학교 대학원
전자통신공학과 (공학박사)

2000년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수



강상욱

1992년 송실대학교 전자공학과 졸업
1994년 송실대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1999년 송실대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

2000년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수



조영창

1994년 영남대학교 전기공학과 졸업
1996년 영남대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1998년 영남대학교 대학원
전자공학과 박사수료

1999년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수



최병진

1990년 경북대학교 전자공학과 졸업
1992년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1997년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

1998년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수



윤정오

1989년 경북대학교 전자공학과 졸업
1991년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1998년 경북대학교 대학원
전자공학과 박사수료

1997년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수



오주환

1983년 영남대학교 전자공학과 졸업
1985년 영남대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1996년 아주대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)

1997년~현재 경운대학교 정보통신공학과 교수