

X 대역 T/R 모듈의 설계 및 구현

Design and Build of Transmit/Receive Module for X Band

박 성 균

Sung Kyun Park

요 약

본 논문에서는 능동 위상 배열 레이다 시스템에 적용 가능한 송수신 모듈을 설계/제작/측정하였다. 송수신 모듈은 능동 위상 배열 시스템에서 배열의 빔 합성으로 TWTA와 유사한 고출력을 획득하면서 TWTA 같은 중앙 집중식 송신기보다 신뢰성이 높고 기계적 빔 조향보다 기민하게 빔 조향을 가능하게 하는 핵심 구성품이다. 제안된 송수신 모듈은 물리적으로 Brick 구조이며, 전기적으로 common leg 구조로 구성되어 있다. 또한, 소형화를 위해 하나의 유전체 기판 위에 MCM(Multi Chip Module) 형태로 제작되었으며, 실제 군용 레이다 시스템에 적용 가능한 사양을 선정하여 측정하였고, 측정 결과를 통하여 송수신 모듈의 최적화 설계를 위해 고려해야 하는 사항들을 검토하였다.

Abstract

In this paper, we have designed Transmit/Receive Module for X band which can be applied to active phase array radar system. AESA(active electrically beam steered array) is able to transmit high power as like TWTA with composition of T/R Module and steer a main beam faster than mechanically steering system. The proposed structure of T/R Module for X band is brick type for physical structure, common leg structure electrically and small size design as MCM(multi chip module). The results show that the characteristic of proposed T/R module can fully cover the specification of required military radar application.

Key words : T/R Module, AESA, MCM, Common Leg

I. 서 론

T/R 모듈(Transmit/Receive Module)은 배열의 빔 합성으로 TWTA와 유사한 고출력을 획득하면서 TWTA 같은 중앙집중식 송신기보다 신뢰성이 높고 기계적 빔 조향보다 기민성이 요구되는 전자전 체계의 고출력 능동 배열 송신 장치 또는 능동 위상 배열 레이다의 핵심 구성품이다. 더욱이 항공기 탑재 레이다의 경우, 낮은 레이다 유효 반사 단면적과 극도의 빔 기민성을 위해 AESA(Active Electrically Beam Steered Arrays)에 대한 관심이 높아지고 있으며, T/R 모듈은 AESA의 핵심 구성품으로 중요한 위치를 차

지한다. 일반적인 능동 위상 배열 레이다의 구조는 그림 1과 같다^{[1][2]}.

T/R 모듈은 개별 소자의 송수신 기능뿐 아니라 위상 및 이득 제어를 통한 빔 조향 및 빔 폭 변화가 가능하도록 하나의 패키징 내에 구성 부품을 고집적 실장하여 구성한다^[3].

반도체 T/R 모듈의 구조는 가용한 MMIC chip, 패키징 기술, 가격, 무게, 탑재체의 운용 조건 등을 고려하여 결정하여야 한다. 특히 전력 증폭기의 최대 출력 요구 사항, 시스템 잠음 지수의 최소화 등 요구 조건에 따른 패키징 구조를 결정하여야 한다. 현재 대표적으로 연구 개발되고 있는 패키징 구조는 bri-

삼성탈레스(주)(Samsung Thales Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20071130-11S

· 수정완료일자 : 2008년 2월 18일

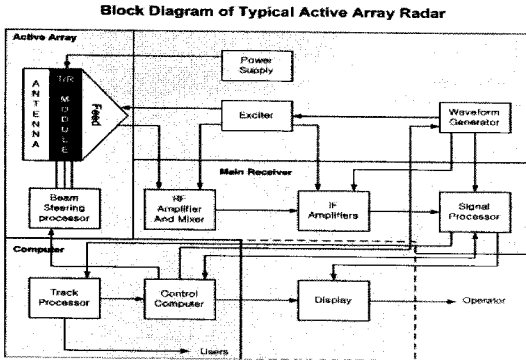


그림 1. 능동 위상 배열 레이더의 구조
Fig. 1. The structure of active phase array radar.

ck type과 tile type이 있으며, 이중 brick type T/R 모듈의 구조는 RF 기관, 제어 기관, 전원 분배 기관 및 방열 기관 등의 여러 스틱으로 이루어져 있다. 이 구조의 특징은 복사 소자 및 여타의 제어 회로 등 부시스템이 모듈과 동일 평면상에서 평행한 방향으로 구성되어지며, 복사 조사에 의한 송신 및 수신 신호는 해당 모듈과 전자기적으로 coupling되거나 동축 커넥터 등에 의해서 연결된다. Tile type T/R 모듈의 구조는 복사 조사를 비롯한 여러 제어 기관 등이 배열 구조와 종 방향으로 stack을 이루는 형태이다. 이런 구조에서는 최상부에 위치한 복사 소자로부터의 송수신 신호는 반도체 모듈로 구성된 2번째 층에 전자기적으로 coupling된다. Tile type 구조는 3차원 구조를 형성함으로써 brick type 구조에 비해 무게나 체적을 상당히 줄일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 이 구조는 공간과 무게에 제한을 받고 있는 탑재체나 항공기들의 conformal array 등에 응용될 수 있다^{[4],[5]}.

일반적으로 T/R 모듈은 4개의 채널을 기본 단위로 하나의 모듈에 구성되며, 전기적 구조로는 송수신 분리형과 common leg 구조가 있다. Common leg 구조는 위상 변위기와 가변 감쇄기를 송신시와 수신시 공통으로 사용함으로써 송수신 분리형보다 MMIC의 수를 줄일 수 있어 많이 사용된다^[6].

본 논문에서는 물리적으로 brick type 구조를 갖고 전기적으로 common leg 구조를 같은 4채널 T/R 모듈에 대한 설계, 제작 및 시험 결과를 기술하였으며, 한 개의 채널에 대해 소형화 구현을 위해 유전체 기

판위에 MMIC를 집적하는 MCM(Multi Chip Module) 형태의 구조를 제안하였다.

II. 본 론

2-1 설계

T/R 모듈은 능동 위상 배열 안테나에 적용할 경우, 개별 복사 소자의 진폭과 위상을 독립적으로 제어하여 개구면의 전력 분포를 변화시켜 다양한 부엽 준위를 갖는 빔 형성과 빔 조향이 가능하다. 배열 소자의 간격은 빔 조향 범위와 grating lobe 영역을 결정하게 되고, 이에 따라 T/R 모듈의 출력 포트 간 간격 및 모듈의 두께가 결정된다.

빔 조향 범위는 방위각으로 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 고각으로 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 가 되기 위해서 아래 식에 따라 배열 소자의 간격을 결정할 수 있다.

$$d \leq \frac{\lambda_{\min}}{1 + \sin \theta_{\max}} \quad \text{where} \quad \begin{cases} \lambda_{\min} : \text{대역내 최소 파장} \\ \theta_{\max} : \text{최대 빔 조향각} \end{cases}$$

배열 소자의 간격은 방위각으로 16 mm가 되며, 고각으로 20 mm가 된다. 이에 따라서 T/R 모듈의 출력 포트 간 간격은 20 mm로 결정되고, T/R 모듈의 두께는 16 mm 이하로 결정되어진다.

개략적인 T/R 모듈의 전기적 목표 성능은 표 1과 같다.

Common leg 구조의 T/R 모듈의 구성도는 그림 2

표 1. T/R 모듈 전기적 목표 성능
Table 1. The specification of T/R module.

항목	목표 성능
주파수 범위	9~10 GHz
이득	40 dB±3 dB(송신) 20 dB±3 dB(수신)
잡음 지수	4 dB 이하
송신 출력	7 W 이상
DUTY	10 %, max
PRF	10 kHz, max
정재파비	2:1 이하
위상 조절 범위	6 bit(5.6° step)
이득 조절 범위	5 bit(23 dB/0.75 dB step)

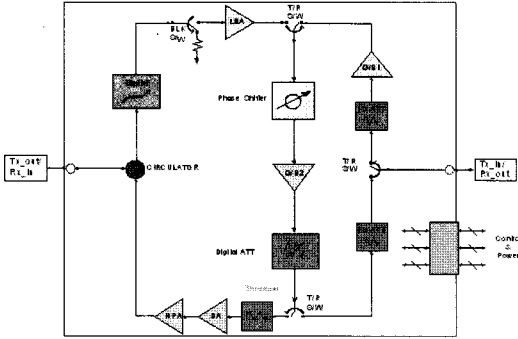


그림 2. Common leg T/R 모듈 구성도
Fig. 2. Block diagram of common leg T/R module.

와 같으며, 송신 또는 수신 시 RF switch에 의해 phase shifter와 digital attenuator는 공통 경로로 사용되어진다. 모듈의 출력쪽은 circulator를 사용하여 송/수신 isolation을 확보하였으나, 송신 출력에 비해 isolation이 부족하여 LNA를 보호하기 위하여 LNA 전단에 limiter와 blank switch를 배치하여 LNA가 송신 출력에 의해 고장나지 않도록 하였다.

송신 및 수신 경로에 대한 dB budget 계산은 그림 3과 같다. 송신 이득은 40 dB이고, 수신 이득은 20.35 dB로 목표 성능을 만족한다. 실제 구현시 이득 손실이 발생할 경우에는 고정 Attenuator의 값을 조정하여 일정부분 보상할 수 있도록 하였다.

수신 noise figure는 2.7 dB로 계산되었으나, wire bonding으로 인한 손실분을 고려할 경우, 1.2~1.3 dB 정도 noise figure가 열화되어 수신 noise figure는 4 dB 이하를 어렵게 맞출 수 있을 것으로 예상되어진다. 그림 4는 wire bonding에 의한 손실분을 예측한 것이다.

2-2 제작 및 구현

1. GPO	-0.50	0.50	11. GPO	-0.50	0.50
2. LIM	-2.50	2.50	12. LIM	-2.50	2.50
3. DIGITAL ATTEN	-2.00	2.00	13. THERMAL PAD	-0.48	0.50
4. GAIN BLOCK1	15.00	2.20	14. Rx Path Tdb	20.35	2.70
5. LIM	-2.50	2.50			
6. PHASE SHIFTER	-9.00	9.00			
7. GAIN BLOCK2	15.00	2.20			
8. DIGITAL ATTENUATOR	-4.00	4.00			
9. LIM	-2.50	2.50			
10. THERMAL PAD	-3.00	3.00			
11. DRV AMP	16.00	4.00			
12. LNA	21.80	8.00			
13. CIRCULATOR	-0.50	0.50			
14. GPO	-0.48	0.50			
15. Tx Path Tdb	40.00	9.29			

그림 3. 송/수신 dB budget
Fig. 3. dB budget of transmit and receive.

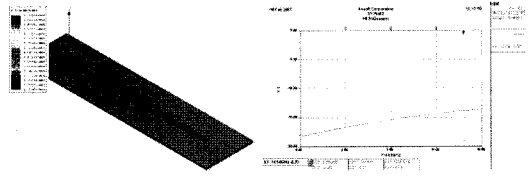


그림 4. Wire bonding에 의한 손실
Fig. 4. Insertion loss of wire bonding.

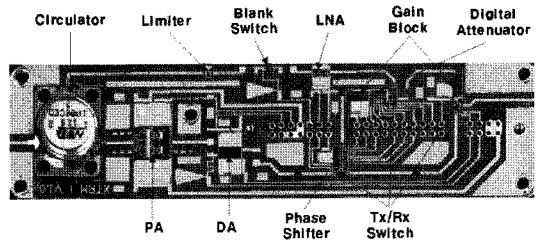


그림 5. 단일 채널 T/R 모듈(MCM)
Fig. 5. Single channel T/R module(Multi Chip Module).

T/R 모듈은 MCM(Multi Chip Module)으로 구현되며, Duroid 5880 ($\epsilon=2.2, h=5$ mil)을 substrate로 사용하였고 carrier 기구에 장착하여 단일 채널을 구성한다. 전체 T/R 모듈은 한 몸체에 4개의 채널을 구성하고 단일 채널은 교체가 용이하도록 되어 있다. 각각의 채널에 전원 및 제어를 위하여 수직 구조의 커넥터를 사용하여 MCM의 뒤쪽에서 공급할 수 있도록 하였다. 제작된 단일 채널은 그림 5와 같다.

전체적인 모듈의 구조는 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 제어 및 전원 bias를 위한 회로 기판은 기구 뒷면에 위치하여 MCM 모듈이 수직 커넥터를 사용하여 장착을 할 수 있게 구성되었다.

MCM 모듈에서 RF 신호 입출력은 microstrip line으로 연결되어 GPO 커넥터를 사용하여 외부와 연결된다.

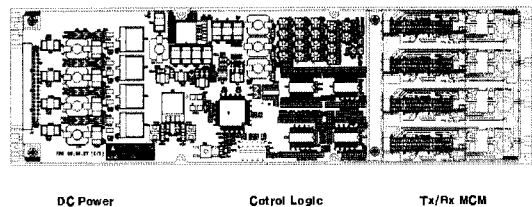


그림 6. 전체 모듈 구성
Fig. 6. Layout of T/R module.

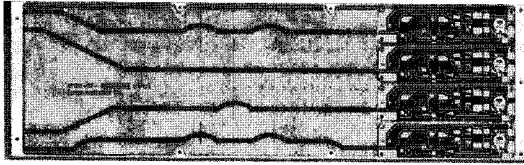


그림 7. 4채널 T/R 모듈
Fig. 7. Four channel T/R module.

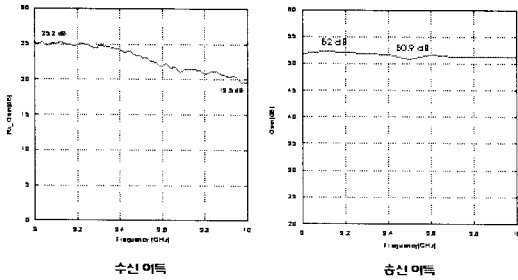


그림 8. 송신 및 수신 이득 측정 결과
Fig. 8. The result of gain for Tx & Rx.

2-3 시험 결과

T/R 모듈의 전기적 특성 측정은 목표 성능을 기준으로 측정되었다.

송신 경로와 수신 경로의 이득은 목표 성능 대비하여 높게 측정이 되었으나, 이는 경로 상에 있는 고정 Attenuator를 사용하여 조정이 가능하므로 목표 성능을 맞추는 데는 문제가 없다.

수신 noise figure는 3.837 dB 이하로 목표 성능을 충족하고, 출력은 38.9 dBm 이상이 측정되었다.

위상 변화는 6 bit phase shifter의 64 state에 대한 측정을 하였다. 주파수별로 위상 오차는 state별로 차이가 있으나, 심한 경우 약 10° 정도 차이가 나며, 특정 state 변경에서 5.6° 차이가 아닌 10°의 변화를 보여

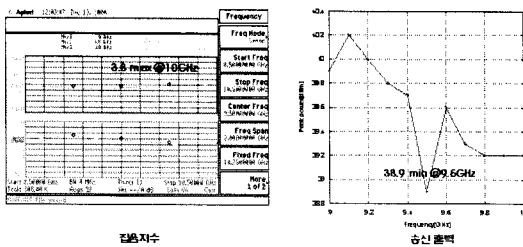


그림 9. NF 및 송신 출력 측정 결과
Fig. 9. The result of noise figure and output power.

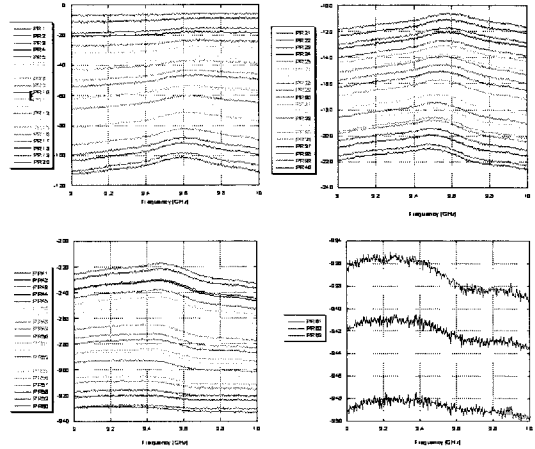


그림 10. 위상 제어에 따른 위상 변화 측정 결과
Fig. 10. The result of phase control.

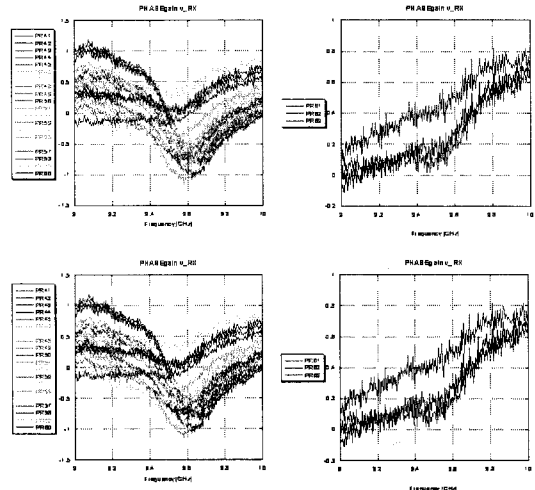


그림 11. 위상 제어에 따른 이득 변화 측정 결과
Fig. 11. The gain variation with phase control.

주는 구간이 있었다. 이는 실제 시스템에서 T/R 모듈이 운용될 경우, 위상 정확도를 위해 보정 과정이 필요함을 보여준다.

Phase shifter의 위상 변화 시 자체 삽입 손실에 대한 변화로 인하여 모듈 전체 이득에 대한 변화가 측정되었다. 이 경우 역시 실제 모듈 운용 시에 보정 과정이 필요하다.

위상 제어에 따른 이득 변화는 약 ±1.5 dB 내에서 변화하는 것을 측정 결과로부터 알 수 있었다.

이득 제어의 경우, 주파수별로 약 1.5 dB 정도의 오차를 나타내었으며, 이득 변화에 따른 위상 변화는

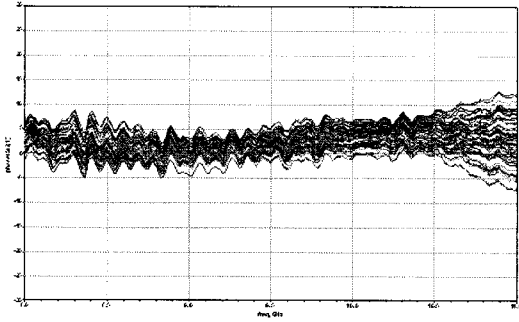


그림 12. 이득 제어에 따른 위상 변화
Fig. 12. The phase variation with gain control.

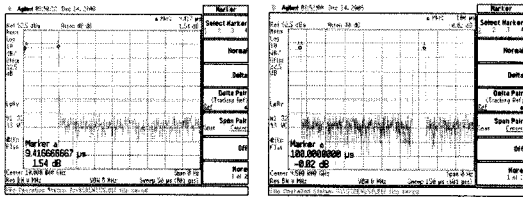


그림 13. Pulse shape 측정 결과
Fig. 13. The result of phase shape.

+9° ~ -5° 정도의 변화하고 있으며, 역시 보정 과정이 필요하다.

PRF 10 kHz, Duty 10 % 제어에 의한 pulse shape 측정 결과는 그림 11에서 확인할 수 있다. Pulse width 가 전체적으로 약 1 usec 정도 줄어든 것을 볼 수 있는데, 이는 falling time이 약 500 nsec, rising time이 약 480 nsec로 지연되어 발생하는 것으로 향후 개선이 되어야 할 것으로 보인다. 이처럼 falling 및 rising time이 오래 걸리는 것을 개선하기 위해서는 power amplifier의 drain 전압을 on/off 하여 pulse shape을 하는 sequence bias 회로의 조정이 필요하다. 그러나 근본적으로 power amplifier의 drain의 큰 전류량으로 인하여 falling/rising time을 줄이는 것은 한계가 있을 것으로 판단되어지며, 시스템 운용 조건을 만족할 수 없을 시에는 gate 전원을 제어하여 pulse shaping을 하는 방안도 검토되어야 할 것이다.

III. 결 론

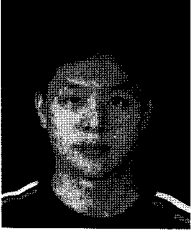
본 논문에서는 능동 위상 배열 레이더에 적용 가능한 T/R 모듈을 구현하여 측정하였다. 성능 측정을

통하여 pulse shaping에 대한 문제점과 위상 제어에 따른 이득 변화 및 이득 제어에 따른 위상 변화가 측정되었다. 이와 같은 T/R 모듈이 실제 시스템에 적용되기 위해서는 pulse의 rising/falling time을 줄이기 위한 방안 및 위상 제어/이득 제어에 따른 비선형 특성에 대한 보정 방안이 향후 검토되어야 한다. 또한, 최근 출시되고 있는 MFC(Multi Function Chip)을 적용할 경우 소요 MMIC 수를 줄일 수 있으며, T/R 모듈의 크기 또한 상당히 줄일 수 있을 것으로 예상되어진다. 본 논문을 통하여 T/R 모듈 제작 구현 시 고려하여야 할 특성에 대해 살펴볼 수 있었으며, 향후 시스템 차원에서의 추가적인 연구를 통한다면 최적화된 T/R 모듈의 설계/제작이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] George W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, SciTech Publishing Inc., 1998.
- [2] David N. mcquiddy, Ronald L. Gassner, Porter Hull, and James S. Mason, "Transmit/receive module technology for X-Band active array radar", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 3, Mar. 1991.
- [3] Brue A. Kopp, Michael Borkowski, and George Jerinic, "Transmit/receive modules", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, Mar. 2002.
- [4] Mark S. Hauhe, John J. Wooldridge, "High density packaging of X-Band active array modules", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B*, vol. 20, no. 3, Aug. 1997.
- [5] Edward C. Niehenke, Robert A. Pucel, and Inder J. Bahl, "Microwave and millimeter-wave integrated circuits", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, Mar. 2002.
- [6] M. Stangl, R. Werninghaus, B. Schweizer, C. Fischer M. Brandfass, J. Mittermayer, and H. Bretil, "TerraSAR-X technologies and first results", *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 153, no. 2, Apr. 2006.

박 성 균



1997년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 3월~현재: 삼성탈레스 기술연구소 책임연구원

[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로설계, 군 무선통신 시스템, 레이더 시스템