능동 위상 배열 레이더용 X-대역 T/R 모듈 개발

T/R Module Development for X-Band Active Phased-Array Radar

김동윤 · 정민길 · 김상근 · 전상미 · 나형기 · 백승훈 · 안창수* · 김선주*

Dong-Yoon Kim · Min-Kil Chong · Sang-Keun Kim · Sang-Mi Chon · Hyung-Gi Na · Seung-Hun Baik · Chang-Soo Ahn* · Seon-Joo Kim*

요 약

본 논문에서는 능동 위상 배열 레이더에 사용되는 X-밴드 송수신 모듈의 설계와 측정 결과에 대해 기술한다. 일반적으로 능동 위상 배열 레이더는 고출력, 낮은 잡음 지수, 높은 TOI(Third Order Intercept), 송수신에서의 충분한 이득을 갖는 반도체 송수신 모듈을 요구한다. 송수신 모듈은 광대역에서 9 W의 출력 특성을 나타낸다. 잡음 지수는 2.8 dB로 낮다. 위상과 이득은 각각 6비트 위상 변위기와 5비트 감쇄기로 조정된다. LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)을 사용하여 높은 집적도를 갖는 송수신 모듈을 구현하였다. 모듈은 디지털 인터페이스를 통합하고 3개의 전원을 사용한다.

Abstract

This paper presents design and test results of X-Band Transmit/Receive(T/R) module for active phased-array radar. Active phased array radars typically require solid state T/R modules with high output power, low noise figure, high Third Order Intercept(TOI), and sufficient gain in both transmit and receive. The output power of the module is 9 watts over a wide bandwidth. The noise figure is as low as 2.8 dB. Phase and amplitude are controlled by the 6-bit phase shifter and 5-bit attenuator, respectively. Highly integrated T/R module is achieved by using LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) multiple layer substrate. The module incorporates a compact digital interface, requires only three supply voltages.

Key words : T/R Module, Common Leg, LTCC

Ⅰ. 서 론

레이더 성능의 발전과 여러 위협 환경에 대한 대응의 필요성이 요구되어짐에 따라 지상, 해상, 항공용 레이더 시스템용 능동 위상 배열 기술의 발전을 가져왔다.

T/R 모듈은 AESA(Active Electronically Scanning Array) 레이더의 핵심 소자이다. 특히, AESA 레이더의 위상 배열 안테나 빔은 T/R 모듈 출력들의 합으로써 형성되고, 각각의 개별적 모듈의 위상과 크기를 조절하여 빔 스캔을 한다. T/R 모듈은 작고 복잡하게 집적되어 있는 구성품이고, 모듈화된 기본 안테나 상에서 발생할 수 있는 오류들을 줄일 수 있도록 요구되어지는 시스템 성능을 구현하는데 있어서 핵심적인 부품이다[1].

AESA 레이더들은 일반적으로 높은 출력을 갖는 반도체형 송수신 모듈로써, 낮은 잡음 지수, 높은 TOI(Third Order Intercept), 그리고 송수신기에서의

「본 과제는 국방과학연구소 지원으로 수행되었음.」

LIG넥스원(LIG Nex1)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논 문 번 호 : 20090715-068

· 수정완료일자 : 2009년 12월 2일

충분한 이득을 요구한다. T/R 모듈 가격이 AESA 레이더용 안테나 가격의 40~60 %이기 때문에, 적은 수의 MMIC 칩들을 사용하면서 모든 요구 사항을 만족시키는 설계를 하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 논문에서는 성능 파라미터 간의 trade-off 관계를 분석하고, 주어진 요구 사항에 대해 만족하는 구조를 확정하여 T/R 모듈 설계에 반영하였다[2].

T/R 모듈은 다음의 그림과 같이 크게 4가지 부분으로 구성되어 있다.

① 송신단 고출력 증폭기 기능
② 수신 전단기 기능
③ 이득/위상 제어 기능
④ 제어 기능

T/R 모듈의 네 가지 부분 중 첫 번째 송신단 고출력 증폭기 기능의 HPA(High Power Amplifier) 소자는 송신 신호를 고출력으로 증폭하는 소자이며, 회전결합기(circulator)는 송신 채널과 수신 채널을 구분하여 형성하는 기능을 하고, 저잡음 증폭기는 수신 신호를 저 잡음으로 증폭하는 기능을 한다. 또한 위상변위기(phase shifter)와 디지털 감쇄기는 송신/수신 때에 신호의 위상과 크기를 조절하여 안테나 빔의 송수신 방향을 조정하고, 안테나 패턴의 SLL(SideLobe Level: 부엽 수준)을 제어하는 기능을 한다. 마지막 제어 기능은 T/R 모듈에 필요한 많은 제어 신호들을 serial로 전송하여 parallel로 변환하여 운용하는 방식으로 제어 신호들에 대한 인터페이스를 간소화하는 역할을 한다.

AESA 레이더용 T/R 모듈의 주요 전기적 설계 파라미터는 다음과 같다.

- 수신단의 낮은 잡음 지수
- 낮은 이득/위상 rms 오차
- 수신단 spurious-free dynamic range(SFDR)
- 동작 대역폭(광대역 특성)
- 송신단 고전력 출력(모듈당 10 W 이상)
- 전력 소모
- 송신 펄스 폭, 송신 반복 주기(duty cycle)

전기적 사양뿐만 아니라 동시에 다음의 요구 조건들도 필히 고려하여야 한다.

- 무게, 크기
- 방열
- 가격

T/R 모듈 설계는 상관 관계를 가지면서 서로 상호 충돌하는 설계 목표들을 trade-off하는 것이 중요하다. 주요 trade-off 관계를 가지는 사항은 다음과 같다.

- 수신단 잡음 지수, 이득 그리고, TOI(Third Order Intercept point)
- 이득 제어 시 위상 변화 및 위상 제어 시 이득 변화와 같은 상호 왜곡 감쇄
- 부품 수 및 크기

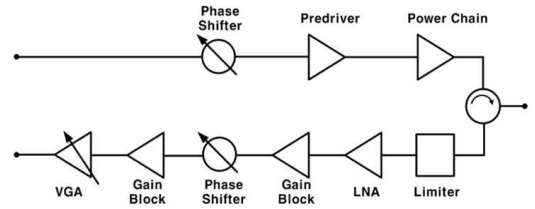
일반적으로 사용되는 AESA 레이더를 위한 T/R 모듈 설계 기술은 새로운 한계점들을 해결해야 한다. 이것은 기본적인 성능 파라미터들(고전력 출력, 잡음 지수, TOI 등)에 필요한 것은 아니지만, 주요 급전과 방열에 대한 요구를 줄이기 위한 전력 효율과 모듈 가격에 대해서는 필요하다.

AESA 레이더들은 송수신 간의 분배 회로에서 손실을 줄이고, 안테나 개구면에 분배되는 전력과 낮은 잡음 특성을 가진다. 이러한 모든 이득을 취하기 위해 T/R 모듈 성능은 몇 가지 주요 분야에 대해서 최적화 되어야 한다. 송신기에서 효율, 출력 그리고 전력 소모는 매우 중요하다. 수신기에서는 이득, 잡음 지수, TOI, 동적 영역(dynamic range), 그리고 이득과 위상 정확도 등이 주요 설계 요소이다. 이러한 파라미터들의 요구 사항들은 안테나 요구 사항들과 구조적 고려사항들에 영향을 받는다.

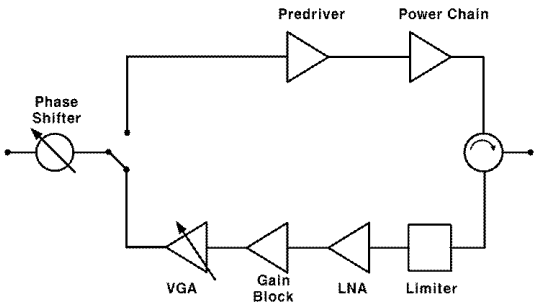
수신기에서, 첫 번째 저잡음 증폭기단의 낮은 잡음 지수와 높은 이득은 수신단의 잡음 지수을 낮출 수 있게 한다. 동시에, 모듈은 동적 영역(dynamic range) 요구 사항에 맞게 높은 TOI를 제공해야 하고, 재밍과 같은 간섭 환경에 대해 레이더 성능을 유지할 수 있어야 한다. 또한 T/R 모듈은 낮은 오차를 제공하고, 낮은 부엽 빔 스캔을 구현하기 위해서는 5~6 비트의 MMIC 위상변위기와 디지털 감쇄기들의 정확도 높은 위상과 진폭 제어를 제공해야 한다. 선택된 T/R 모듈 구조는 동시에 이와 같은 요구 사항들과 상관 관계되는 것들을 만족시켜야 한다. 특히, 수신 이득과 잡음 지수와 TOI 간의 trade-off는 모

듈 구조의 선택 사항을 결정하게 된다. 잡음 지수 최소화를 위한 첫 단에서의 높은 이득은 직접적으로 높은 TOI의 필요성과 상반되게 된다. 이득 증폭기 블럭들은 이러한 모든 파라미터들을 최적화하기 위해 명확하게 T/R 모듈 상에 고루 분배되어져야 한다.

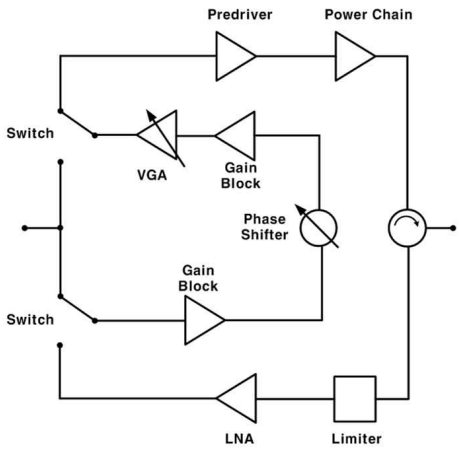
Ⅱ. 본 론



(a) Separate 구조
(a) Separate structure



(b) Shared 구조
(b) Shared structure



(c) Common leg 구조
(c) Common leg structure

그림 1. T/R 모듈 구조
Fig. 1. T/R module structure.

2-1 T/R 모듈 구조

능동 위상 배열 레이더 설계 시 빔 패턴의 grating lobe를 피하면서 원하는 빔 패턴을 효율적으로 방사하기 위해서는 먼저 안테나 소자의 배열 구조 및 간격을 설정해야 한다. 배열 구조 중에는 삼각형 구조와 사각형 구조가 있는데, 사각형 구조가 파워 밀도를 높일 수 있는 반면, 삼각형 구조는 배열을 경제적으로 구성할 수 있다. 삼각형 구조가 사각형 구조에 비해서 grating lobe 특성이 훨씬 우수하다. 능동 위상 배열 레이더의 일반적인 빔 커버리지가 방위각/고각을 감안하여 grating lobe가 생기지 않는 배열 간격을 하고, T/R 모듈 크기도 여기에 준하도록 한다.

T/R 모듈 구조는 그림 1과 같이 크게 separate, shared, common leg 구조로 나눌 수 있다.

일반적으로 separate 구조는 TOI 특성이 우수하나 모듈 구현이 복잡하고 비용이 많이 들며, shared 구조는 잡음 지수 특성이 우수하나 TOI 특성이 나쁘다. Common leg 구조의 경우 잡음 지수와 TOI의 trade-off를 고려했을 때 적당한 편이며, 공간 활용도와 비용면에서도 우수하다.

T/R 모듈은 고속 송신 경로/수신 경로 스위칭 기능과 송신 펄스 변조 기능이 요구되어져 펄스 레이다 응용에 필요되어지도록 설계되어졌다. 특히 T/R 모듈은 고출력 증폭기의 DC 전력 소모를 최소화하기 위해 고출력 증폭기에 소모되는 전원을 on/off하는 스위칭 회로를 갖는다.

T/R 모듈의 설계 파라미터 분석하여 주요 성능 trade-off를 통해 common-leg T/R 모듈 구조를 확정하였다. T/R 모듈 블록도는 그림 2와 같다.

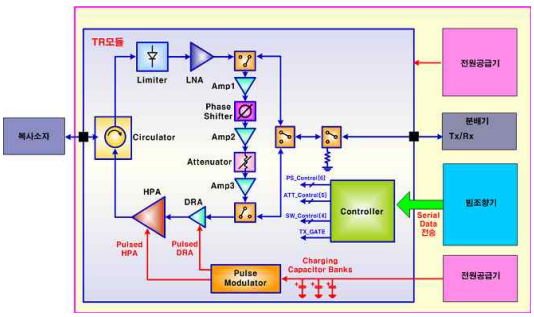


그림 2. T/R 모듈 블록도
Fig. 2. Block diagram of the T/R module.

T/R 모듈 동작은 송신시 입력된 신호가 스위치를 통과하여 common leg으로 입력되며, DRA와 HPA, circulator을 거쳐 복사 소자에 전달된다. 복사 소자를 통해 수신된 신호는 circulator를 통과하여 limiter, LNA에 입력되며 common leg을 거쳐 분배기로 입력된다. 송/수신시 빔 조향기로부터 위상천이기와 가변 감쇄기의 제어 명령을 받아 위상과 크기를 조정한다.

2-2 Budget 설계

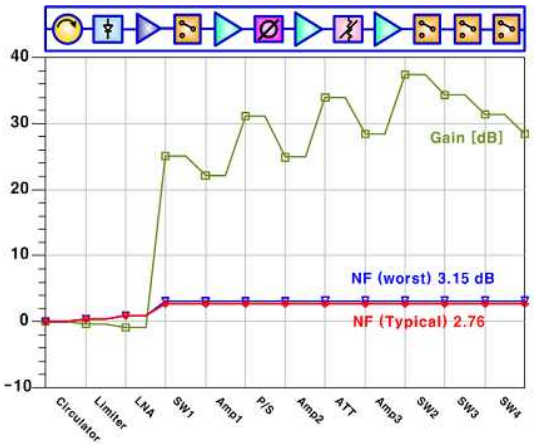
주요 설계 파라미터 trade-off을 통해 설계된 수신단의 주요 budget은 그림 3과 같다.

각 단에서의 잡음 지수는 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$F_0 = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{F_M - 1}{G_1 G_2 \cdots G_{M-1}} \quad (1)$$

누적 잡음 지수 : 2.76 dB(Typ.) / 3.15 dB(max.)
누적 이득 : 28.4 dB

T/R 모듈의 송신단 이득과 출력 전력 레벨은 그림 4와 같다.

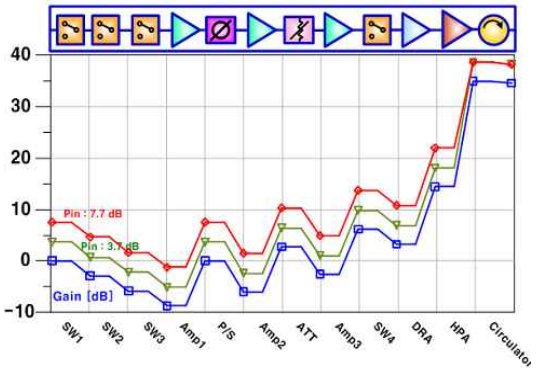


(a) 이득 및 잡음지수
(a) Gain/Noise figure

항목	Single		Cumulative	
	Gain [dB]	NF (worst) [dB]	Gain [dB]	NF (worst) [dB]
Circulator	-0.4	0.4	-0.4	0.4
Limiter	-0.5	0.5	-0.9	0.9
LNA	26	1.8(2.2)	25.1	2.7(3.1)
SW1	-3	3	22.1	2.7(3.12)
Amp1	9	4	31.1	2.73(3.13)
P/S	-6.2	6.2	24.9	2.74(3.13)
Amp2	9	4	33.9	2.75(3.14)
ATT	-5.5	5.5	28.4	2.75(3.14)
Amp3	9	4	37.4	2.75(3.15)
SW2	-3	3	34.4	2.75(3.15)
SW3	-3	3	31.4	2.76(3.15)
SW4	-3	3	28.4	2.76(3.15)

(b) 수신단 budget
(b) Budget of the receiver

그림 3. 수신단 이득 및 잡음지수 budget
Fig. 3. Budget of the receiver gain and noise figure.



(a) 송신 이득 및 출력 전력
(a) The transmit gain and output power

Channel Element	Single	Cumulative		
	Gain [dB]	Gain [dB]	Pout [dBm]	
Tx input	-	-	3.7	7.7
SW1	-3	-3	0.7	4.7
SW2	-3	-6	-2.3	1.7
SW3	-3	-9	-5.3	-1.3
Amp1	9	0	3.7	7.7
P/S	-6.2	-6.2	-2.5	1.5
Amp2	9	2.8	6.5	10.5
ATT	-5.5	-2.7	1	5
Amp3	9	6.3	10	14
SW4	-3	3.3	7	11
DRA	11.5	14.8	18.5	22.5
HPA	21	35.8	39.5(40)	39.5(40)
Circulator	-0.4	35.4	39.1(39.6)	39.1(39.6)

(b) 송신단 budget
(b) Budget of the transmitter

그림 4. 송신 이득 및 출력 전력레벨 budget
Fig. 4. Budget of the transmit gain and output power.

표 1. T/R 모듈 측정치
Table 1. The result of T/R module measurement.

	항 목	설계 목표	측정치	비고
송 신	1. 동작 대역	f_c±5 %	f_c±5 %	-
	2. 송신 출력	39.1 dBm 이상	40.07 dBm 이상	-
	3. 송신 펄스 평탄도	0.6 dB 미만	0.38 dB	-
	4. 송신 펄스 상승/하강 시간	200/200 ns 미만	20/80 ns 미만	-
	5. 송신/수신 변환 시간	200 ns 미만	140 ns 미만	-
	6. Duty	10 %	10 %	-
수 신	1. 잡음 지수	3.15 dB 미만	2.72 dB 미만	-
	2. 수신 이득	28.4±1.5 dB	27.31~28.39 dB	-
	3. RMS phase error	10 도 미만	3.7도 미만	6 Bit(LSB: 5.625도)
	4. RMS attenuation error	1 dB 미만	0.85 dB 미만	5 Bit(LSB: 0.9 dB)

송신 이득 : 35.4 dB
송신 출력 전력 레벨 : 39.6 dBm(Typ.) / 39.1 dBm (Min.)

2-3 T/R 모듈 제작

T/R 모듈은 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)를 이용하였으며, LTCC의 장점인 MCM 기능을 활용하여 T/R 모듈을 소형화하였다. 특히 RF, 제어 및 전원 등을 하나의 다층 기판에 구현하였다. HPA pulse-gating 회로 또한 내장하였으며, controller를 내장하여 serial 인터페이스가 가능하게 하여 간단한 구조로 구현하였다.

조립 제작된 T/R 모듈은 그림 5와 같다.

2-4 측정 및 시험 결과

제작된 T/R 모듈의 설계 목표와 측정치는 표 1과 같다.

그림 6은 T/R 모듈의 송신 출력을 측정한 결과이다. 출력은 10 % 대역폭 안에서 40.07 dBm 이상 측정되어 광대역 특성을 확인하였다. 그림 7은 송신 펄스 평탄도 측정 결과로 중심 주파수에서 0.38 dB

그림 5. 제작된 T/R 모듈
Fig. 5. The fabricated T/R module.

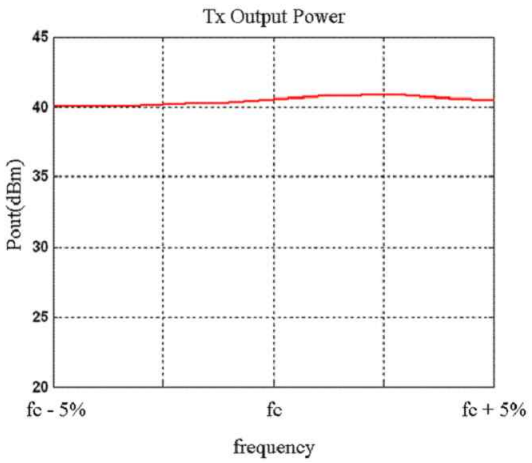


그림 6. 송신 출력
Fig. 6. Transmit power.

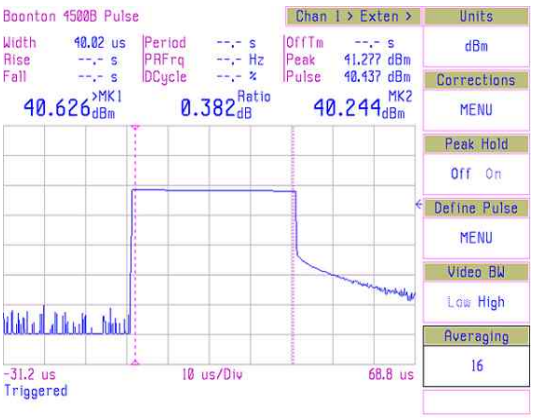
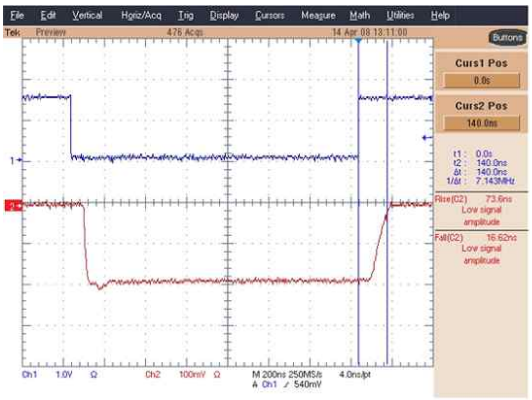
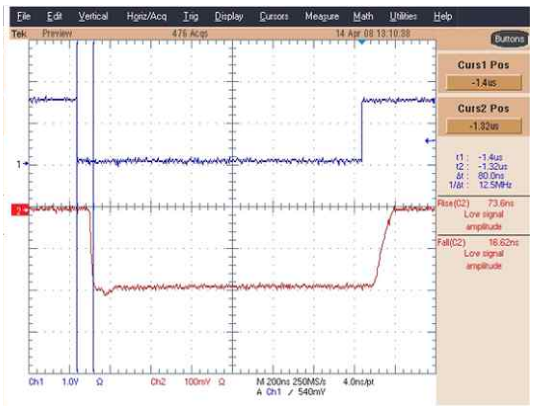


그림 7. 송신 출력 파형
Fig. 7. Waveform of the transmit output.



(a) 하강 시간
(a) Fall time



(b) 상승 시간
(b) Rise time

그림 8. 송/수신 변환 시간
Fig. 8. The conversion time of transmit/receive.

로 측정되었다.

그림 8은 송/수신 변환 시간 측정 결과이다. 송신 후 수신 신호를 정상적으로 받지 못하는 구간에 영향을 주는 송/수신 변환 시간은 140 ns 미만으로 측정되었고, RF pulse의 rise time과 fall time은 각각 20 ns, 80 ns 미만으로 측정되었다.

그림 9는 20 % 대역폭에서 측정한 수신 이득 결과이다. 이득은 27.31~28.39 dB로 측정되어 개발 목표치를 만족하였다. 그림 10은 20 % 대역폭에서 측정한 수신 잡음 지수 결과이다. 측정된 수신 잡음 지수는 최고 2.65 dB로 측정되어 개발 목표치를 만족하였다.

그림 11은 6 bit Phase shifter의 64 state에 대한 주파수별 위상 변화값 측정 결과이다. 20 % 대역폭 안

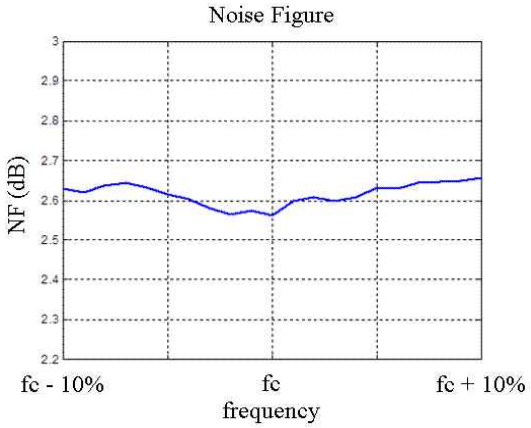


그림 9. 수신 잡음 지수
Fig. 9. Noise figure of the receiver.

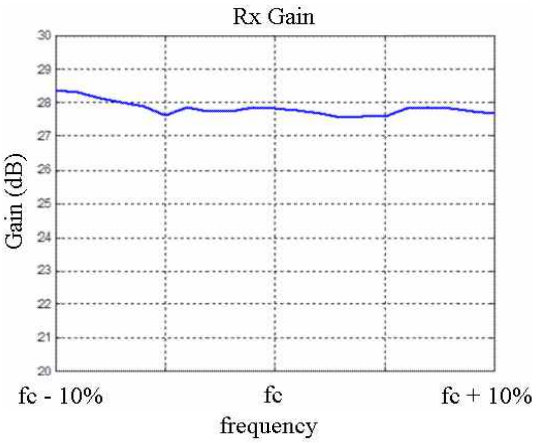


그림 10. 수신 이득
Fig. 10. Gain of the receiver.

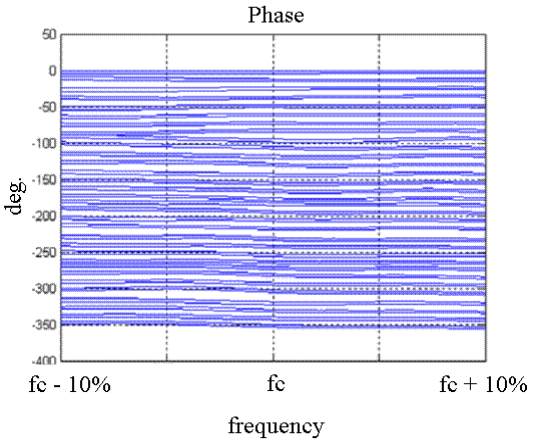


그림 11. T/R 모듈 위상 제어(64-state)
Fig. 11. Phase control of the T/R module(64-state).

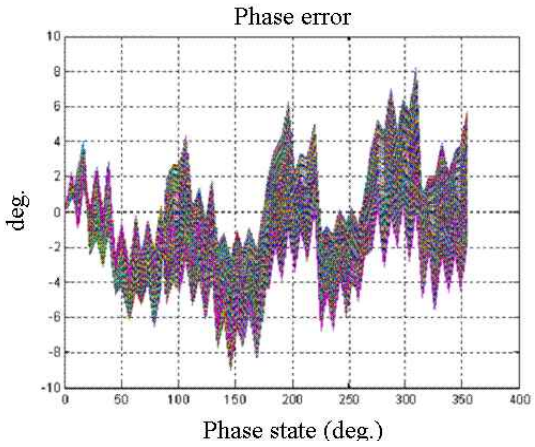


그림 12. 위상 제어 오차
Fig. 12. Phase error.

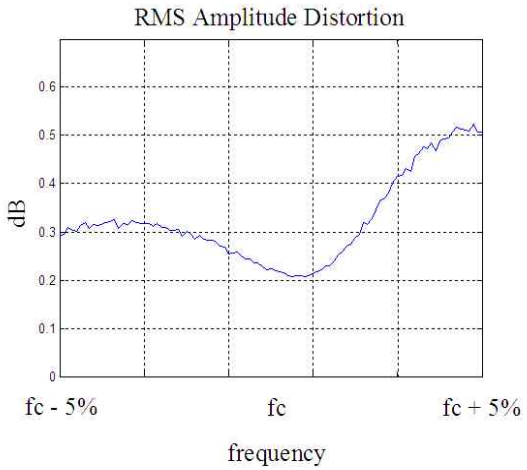


그림 13. 위상 제어에 따른 이득 오차(rms)
Fig. 13. rms amplitude distortion.

에서 제어값에 따라 위상이 일정하게 변함을 알 수 있었다. 그림 12는 위상 제어에 따른 위상 오차를 나타냈다. 측정된 결과는 20 % 대역폭에서 최대 ±9도이다. 그림 13은 위상 변화에 따른 이득 변화를 64 state에 대해 rms 값으로 표시하였다. 측정 결과, 위상 변화시 이득 변화는 10 % 대역폭 안에서 최대 0.5 dB이다.

그림 14은 5 bit digital attenuator의 32 state에 대한 주파수별 이득 변화값 측정 결과이다. 20 % 대역폭 안에서 제어값에 따라 이득이 일정하게 변함을 확인하였다. 그림 15는 이득 제어에 따른 감쇄 오차를 나타냈다. 측정된 결과는 20 % 대역폭에서 +1.3～−0.2

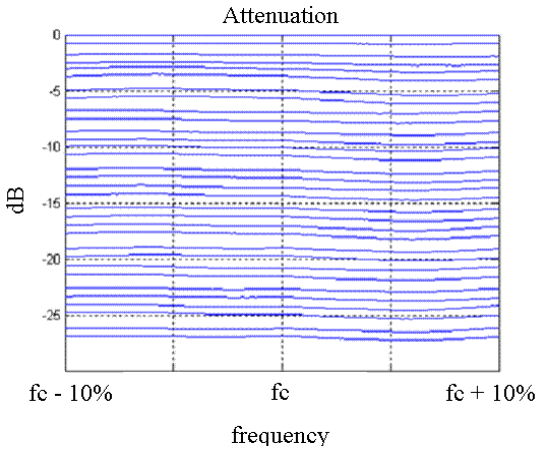


그림 14. T/R 모듈 이득 제어(32-state)
Fig. 14. Attenuation control of the T/R module(32-state).

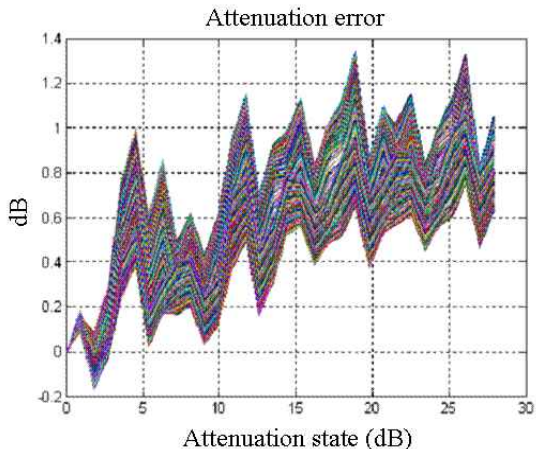


그림 15. 이득 제어 오차
Fig. 15. Attenuation error.

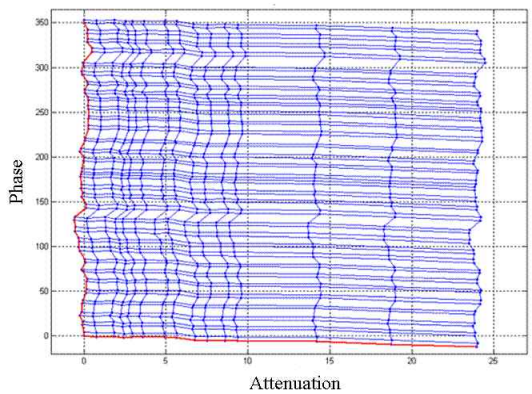


그림 16. T/R 모듈 이득/위상 제어
Fig. 16. Attenuation/phase control of the T/R module.

dB이다.

그림 16은 T/R 모듈의 이득과 위상을 동시에 제어했을 때 변화하는 이득 위상 측정값이다. T/R 모듈을 시스템에 적용할 경우 측정된 결과를 바탕으로 원하는 이득, 위상 변화값에 맞는 적절한 제어 비트를 선택해야 한다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 능동 위상 배열 레이더용 X-대역 T/R 모듈을 설계, 제작하였다. 실험 결과, 모든 대역에서 40.07 dBm(10 watt) 이상의 송신 출력, 수신 잡음 지수 2.72 dB로 설계 목표치를 모두 만족하였다. 그리고, 위상 및 이득 오차는 상용 부품 data sheet 수준 정도로 측정되었다. 또한, 레이더 시스템에서 중요하게 요구되어지는 고속 송신/수신 변환 시간 특성도 만족하였다. 특히 LTCC 다층 기판을 적용하여 제작된 T/R 모듈의 재현성 및 안정성을 확인할 수 있었다. 제작된 T/R 모듈은 능동 위상 배열 레이더에 필요로 하는 모든 사양들을 만족하였다.

참 고 문 헌

[1] H. P. Feldle, A. D. McLachlan, and Y. Mancuso, "Transmit/receive module for X-band airborne radar", *Radar 97 Conf. Publ.*, no. 449, pp. 391-395, Oct. 1997

[2] Ashok Agrawal, Richard Clark, "T/R module architecture tradeoffs for phased array antennas", *IEEE MTT-S Digest*, 1996.

김 동 윤

2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: LIG넥스원(주) 주임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈, 능동 위상 배열 레이더

김 상 근

2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2007년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년 2월~현재: LIG넥스원(주) 주임연구원
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 설계, 초고주파 송수신

정 민 길

1994년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 7월~현재: LIG넥스원(주) 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 능동 위상 배열 레이더

전 상 미

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2006년 5월~현재: LIG넥스원(주) 선임연구원
[주 관심분야] 안테나 및 능동 위상 배열 레이더

나 형 기

1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1996년 1월~현재: LIG넥스원(주) 선임연구원, 책임연구원, 수석연구원
[주 관심분야] 안테나 및 능동 위상 배열 레이더

안 창 수

2002년 8월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2005년 2월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
2005년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 레이더 자원 관리 및 임무 스케줄링, 능동 위상배열 레이더 시스템 설계

백 승 훈

1985년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1987년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원 초고주파연구센터장
[주 관심분야] 능동위상 배열 레이더

김 선 주

1986년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더