

S-대역 능동위상배열레이더용 수신전단기 연구

Study on Front-End Receiver for S-band Active Phased Array Radar

김민철* 김완식* 박상현** 정명득**
 Min-Chul Kim Wan-Sik Kim Sang-Hyun Park Myeong-Deuk Jeong

Abstract

In this paper, we described the design and measurement results of a Front-End Receiver for S-band active phased array radar. The Front-End Receiver has input P1dB of -4dBm and IIP3 of 7dBm. The measurement results show that gain is 24 ± 0.7 dB, noise figure are less than 2.3dB over the frequency range of $f_c\pm 0.2$ GHz. The Front-End Receiver can protect the receiver path from large input signals with a maximum peak power of multi-kW and recovery time is less than 0.8us. The measurement results satisfy all specifications.

Keywords : Front-End Receiver(수신전단기), Noise Figure(잡음지수), Recovery Time(회복시간), Active Phased Array Radar(능동위상배열레이더)

1. 서론

최근 레이더 기술 경향은 기계식, 수동형의 단순 기능을 수행하는 레이더(Mechanically Steering or Passive Radar)에서 전기식, 능동형의 다기능을 갖는 레이더(Electronically Steering or Active Radar)로 발전하고 있다^[1,2]. 능동위상배열레이더 시스템에서 송수신부는 송신기를 선형, 평면 또는 곡면 배열하여 송신빔을 형성하여 송신하고, 이를 다중 채널로 수신하는 구조를 갖는다. 각 수신 채널의 경우 대역제한, 전력제한, 저잡음 증폭 기능을 하는 수신전단기와 이 신호를 전달받아 이를 IF 대역으로 하향변환 및 증폭하여 디지털변

환기(ADC)로 전달하는 IF수신기로 구성된다^[3].

수신경로의 초단에 위치한 수신전단기의 중요 성능 항목에는 이득 및 잡음지수, 입력 동적범위, 고전력 입력에 대한 생존성 등이 있다. 이득 및 잡음지수는 레이더의 최대 탐지 거리를 결정하는 중요한 레이더 설계 파라미터이다. 잡음지수의 특성상 초단에 위치한 수신전단기의 이득과 잡음지수가 전체 수신경로의 잡음지수를 결정하게 된다. 입력 동적범위는 레이더 수신 시스템의 최소 입력 신호인 잡음레벨을 최소 신호로 하고, 수신기의 신호 포화레벨을 최대 입력신호로 해서 그 차이가 수신기의 입력 동적범위가 된다^[4]. 낮은 레벨의 표적신호를 탐지하는 능력도 중요하지만 전자전 장비에 의한 외부의 고전력 신호에 대한 수신경로를 보호할 수 있는 성능도 중요하다. 또한 고전력 신호 입력 하에서 근거리의 표적을 탐지하기 위한 짧은 회복시간도 수신전단기의 중요성능 중 하나이다.

† 2011년 7월 11일 접수~2011년 9월 16일 게재승인

* 엘아이지 넥스원(LIG Nex1)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김민철(mckim0829@lignex1.com)

본 논문에서는 능동위상배열레이더용 수신전단기 설계, 제작 및 측정에 관한 내용을 기술하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수신전단기의 목표성능과 이를 구현하기 위한 각 모듈의 설계 및 측정에 관한 내용을 다뤘고, 3장에서는 모듈을 통합하여 수신전단기의 성능을 측정을 통해 검증한 내용을 다뤘다. 그리고 4장에서는 결론을 기술하였다.

2. 수신전단기 개발

수신전단기는 수신전용 채널로써 안테나로부터 인가된 S-대역 수신신호를 입력받아 이를 저 잡음 증폭하는 기능과 외부로부터 인가되는 고전력의 신호를 차단하여 수신경로를 보호하는 기능을 한다. 본 논문에서 설계한 수신전단기의 목표성능은 Table 1과 같다. 이와 같은 수신전단기의 목표성능은 적용할 능동위상배열레이더 시스템의 성능 및 기능 등에 의한 요구 사항에 따라 결정된다.

Table 1. Specifications of the Front-End Receiver

항목	단위	목표성능
대역폭	GHz	$f_c \pm 0.2$
이득	dB	24±1
잡음지수	dB	≤ 2.6
입력 P1dB	dBm	≥ -10
IIP3	dBm	≥ 0
회복시간	us	≤ 1

수신전단기는 4채널로 구성되며 다중 채널의 수신경로가 동일한 성능을 내기 용이하도록 내부 구성을 기능별로 모듈화하여 설계하였다. 주어진 목표성능을 만족하는 수신전단기를 구현하기 위해 각 채널은 Fig. 1과 같이 BPF모듈, Limiter모듈, LNA모듈로 구성된다.

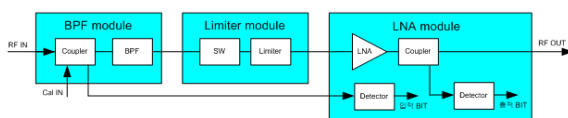


Fig. 1. Block diagram of the Front-End Receiver

BPF모듈은 보정신호를 인가하기 위한 커플러와 S-대역 이외의 수신신호를 대역제한하기 위한 BPF로 구성된다. Limiter모듈은 PIN 다이오드 스위치와 리미터 다이오드로 구성되어 스위치에 의한 누설 차단과 리미터 다이오드에 의한 누설 차단의 이중 효과로 전력 제한하는 구조로 구성된다. LNA모듈은 낮은 전력의 수신신호를 저 잡음 증폭하고 입/출력신호를 점검하는 역할을 담당한다. 수신전단기의 잡음지수를 최소화하기 위하여 보정신호 인가를 위한 커플러와 입력신호 점검을 위한 커플러를 하나의 커플러로 적용하였다.

가. BPF모듈 개발

BPF모듈은 크기와 경로손실을 최소화하기 위해 커플러와 BPF를 한 모듈로 설계하였다. Fig. 2는 BPF모듈의 제작 사진이다. 커플러는 Cal 포트로 보정신호를 인가받아 수신경로에 흘려주는 역할, 커플링 포트를 통해 안테나로 인가되는 수신신호를 커플링하여 Limiter모듈의 바이어스 회로를 컨트롤하는 역할과 입력신호의 상태를 점검하기 위한 역할을 수행한다.

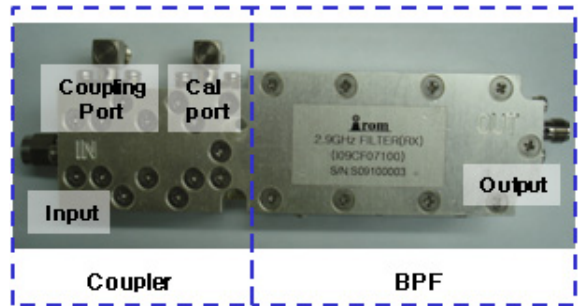


Fig. 2. Picture of BPF module

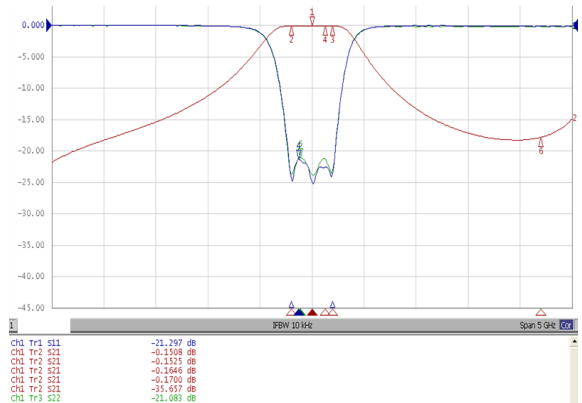


Fig. 3. Measured s-parameter results of BPF module

BPF모듈은 S-대역 이외의 신호를 대역제한하는 역할을 수행한다. 낮은 삽입손실과 30dB이상의 이미지 제거를 위해 5단으로 설계하였다. Fig. 3에 BPF모듈의 삽입손실, 반사손실, 이미지 제거 측정결과를 나타내었다. 또한 Limiter모듈 앞단에 위치하기 때문에 수 kW의 Power rating을 갖도록 설계하였다. Table 2에 BPF 모듈의 목표성능과 측정결과를 정리하였다.

Table 2. Specifications and measurement results of BPF module

항목	단위	목표성능	측정결과
대역폭	GHz	$fc \pm 0.2$	$fc \pm 0.2$
삽입손실	dB	≤ 0.3	≤ 0.2
반사손실	dB	≥ 17	≥ 20
리플	dB	≤ 0.6	≤ 0.3
이미지 제거	dBc	≥ 30	≥ 34
커플링	dB	30 ± 0.5	30 ± 0.2

나. Limiter모듈 개발

Limiter모듈은 외부로부터 인가되는 고전력 신호를 차단하여 수신경로의 회로를 보호하는 역할을 수행한다. Limiter모듈은 LNA모듈 앞단에 위치하기 때문에 수신전단기의 낮은 잡음지수를 위해 삽입손실이 적어야 하지만 고전력 신호를 제한하기 위해서는 삽입손실의 증가가 불가피하다. 따라서 삽입손실과 고전력 전력제한의 trade-off가 필요하다. Table 3에 Limiter모듈의 목표성능을 정리하였다. 낮은 잡음지수와 수 kW의 고전력 전력제한을 고려하여 삽입손실은 1dB 이하로 설정하였고 LNA모듈의 보호를 위해 평탄 누설전력 규격은 +20dBm 이하로 설정하였다. 회복시간은 레이더 시스템의 최소탐지거리 확보를 위하여 1us 이하로 주어져야 한다. Table 3에 Limiter모듈의 목표성능을 정리하였다.

Limiter모듈은 PIN 다이오드 스위치와 리미터 다이오드로 구성하였고 스위치에 의한 누설 차단과 리미터 다이오드에 의한 누설 차단의 이중 효과로 전력을 제한하는 구조로 설계하였다. BPF모듈의 커플러를 통해 커플링된 입력신호는 LNA모듈로 전달되고 LNA모듈의 전원 및 제어보드에서 스위치 제어를 위한 바이어스 신호를 생성하여 Limiter모듈의 PIN 다이오드 스위치를 제어 할 수 있도록 설계하였다. 과도한 고전력 신

호가 인가될 시 0.8us 이내에서 PIN 다이오드 스위치가 우선동작하며 그 이후에 리미터 다이오드가 동작하여 신호를 제한하도록 설계하였다. Fig. 4는 Limiter 모듈의 동작 계통도이다.

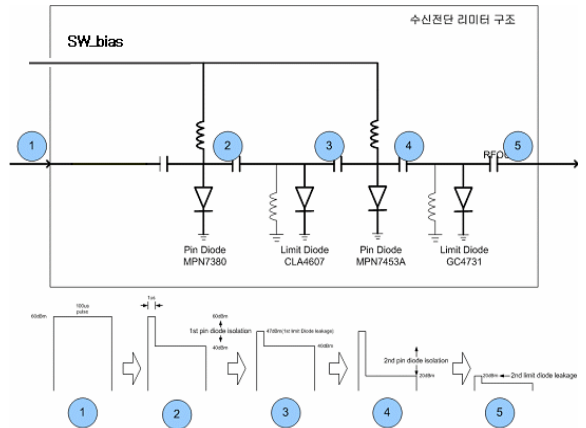


Fig. 4. Operating concept of Limiter module

스위치용 PIN 다이오드는 낮은 삽입손실을 위해 결합 커패시턴스가 낮아야하고, 높은 격리도를 위해 직력 저항 성분이 작아야 한다. 고전력의 신호를 다루기 위해 열저항이 낮고 항복 전압이 높아야 한다^[5,6]. 이러한 조건들은 대부분 서로 간에 trade-off 관계가 있으므로 부품선정 시 모든 규격을 고려하여 선정해야 한다. 본 Limiter모듈에서는 Aeroflex社의 MPN7380을 사용하여 설계하였다. MPN7380은 패키지가 없는 Bare 상태의 칩이므로 패키지에 의해 생기는 기생성분이 적어 삽입손실 면에서 유리하며 병렬구조로 사용 시 금속에 직접 조립되는 구조이기 때문에 방열면에서 매우 우수한 특성을 가진다. 이러한 방열에서의 우수성은 다이오드의 열저항을 낮춰주는 효과가 있어서 고전력의 신호를 인가할 수 있다.

수신전단기로 고전력의 신호가 인가되면 PIN 다이오드 스위치의 격리도만큼 낮아진 신호가 리미터 다이오드에 인가되지만 PIN 다이오드 스위치의 절체시간이 1us이므로 이 시간동안에는 리미터 다이오드에 고전력의 신호가 그대로 인가되게 된다. 따라서 초단의 리미터 다이오드는 고전력 신호를 전력제한 할 수 있는 Skyworks社의 CLA4607을 사용하였다. 다음 단의 리미터 다이오드는 LNA모듈의 최대 입력전력(+25dBm)을 고려하여 평탄 누설전력이 +20dBm 이하인 Microsemi社의 GC4731을 사용하여 설계하였다.

고전력 신호를 차단하여 수신경로를 보호하는 것도 중요한 역할이지만 고전력 신호 인가 후 다시 정상적인 수신을 위한 전력제한기의 빠른 회복시간도 중요하다. 회복시간 중에는 전력제한기에 의해 제한되기 때문에 근거리의 표적을 탐지할 수 없게 된다.

Fig. 4에서 차단 PIN 다이오드는 물리적 구조에 따라 고전력용일수록 I-영역이 크고 이에 따라 캐리어 수명 시간이 길어지며 이러한 긴 캐리어 수명 시간은 다이오드의 절체속도 지연을 유발한다. 하지만 절체시간은 PIN 다이오드의 초기 역전류를 증가시킴으로써 줄일 수 있다. 수신전단기의 1us 회복시간 규격을 만족하기 위해서 역바이어스를 -70V로 설정하여 초기 역전류를 증가시켰다. Fig. 5는 Limiter모듈의 제작 사진이다.

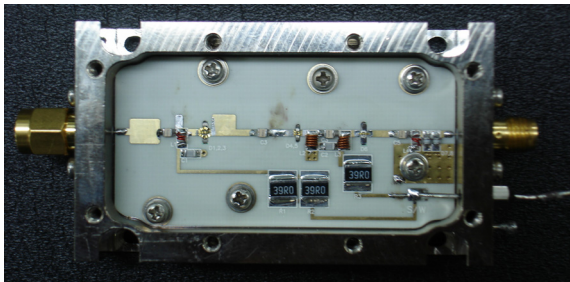


Fig. 5. Picture of Limiter module

Fig. 6은 측정된 Limiter모듈의 S-파라미터 그래프를 보여주고 있다. 동작 주파수 대역에서 0.95dB 이하의 삽입 손실 특성과 20dB 이하의 반사 손실 특성을 가지는 것으로 측정되었다.

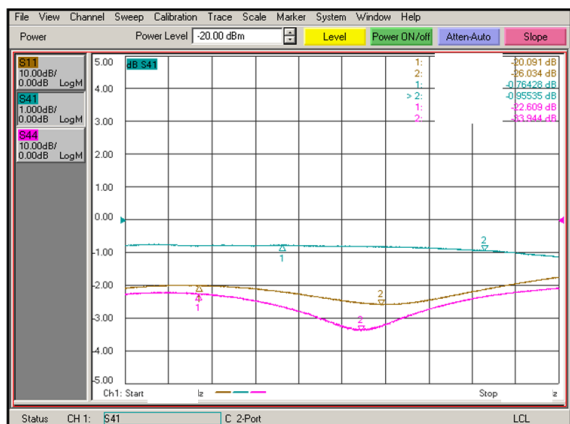


Fig. 6. Measured s-parameter results of Limiter module

Fig. 7은 펄스 모드 수 kW 고전력 입력에서 누설되는 평탄 누설전력 특성의 측정결과를 보여주고 있다. 130us의 펄스 폭을 갖는 펄스 파형이 적용되었고 측정된 평탄 누설전력은 19dBm 이하로 목표성능을 만족하였다. Table 3에 Limiter모듈의 목표성능과 측정결과를 정리하였다.

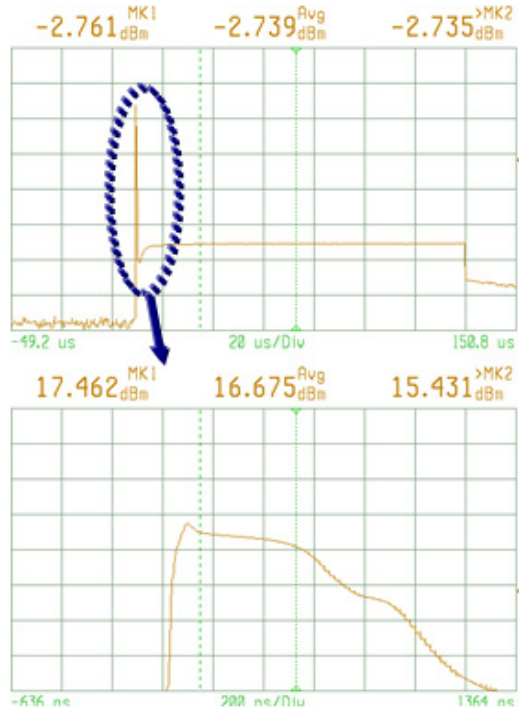


Fig. 7. Measured flat leakage results of Limiter module

Table 3. Specifications and measurement results of Limiter module

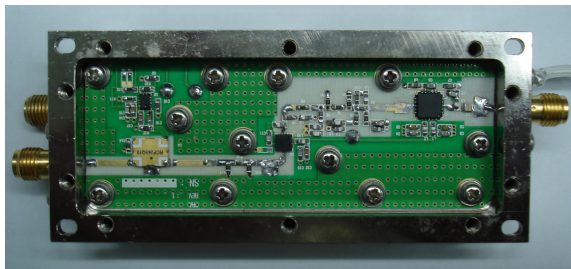
항목	단위	목표성능	측정결과
대역폭	GHz	$f_c \pm 0.2$	$f_c \pm 0.2$
삽입손실	dB	≤ 1	≤ 0.95
반사손실	dB	≥ 17	≥ 20
평탄 누설전력	dBm	$\leq +20$	$\leq +19$
회복시간	us	≤ 1	≤ 0.8

다. LNA모듈 개발

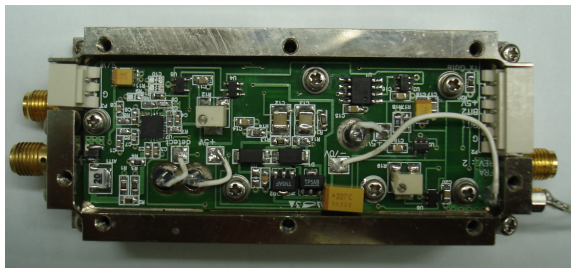
수신전단기는 수신경로의 차단 장비로써 수신전단기의 이득과 잡음지수가 수신경로의 전체 잡음지수를 결

정하게 된다. 따라서 레이더 시스템의 규격으로부터 수신전단기의 이득과 잡음지수의 목표성능이 도출되었고 이를 만족하기 위해 LNA모듈은 26dB의 이득과 1.1dB 이하의 잡음지수를 가져야한다. 또한 LNA모듈 전단의 Limiter모듈의 평탄 누설전력 규격이 +20dBm 이하이기 때문에 LNA모듈의 최대 입력전력은 +25dBm 이상을 만족하도록 설계하였다.

LNA모듈의 낮은 잡음지수를 위해 모듈내 초단 증폭기는 잡음지수 특성을 최우선으로 고려하였다. 잡음지수 특성이 우수한 부품으로는 저 잡음 FET가 있지만 저 잡음 FET는 최대 입력전력이 낮아서 사용에 제약이 있다. 여기서는 초단 증폭기로 RFMD社의 RF3866을 사용하였다. 또한 중단 증폭기로는 이득과 P1dB특성을 고려하여 RF3863을 사용하여 설계하였다. Fig. 8은 LNA모듈의 제작사진이다.



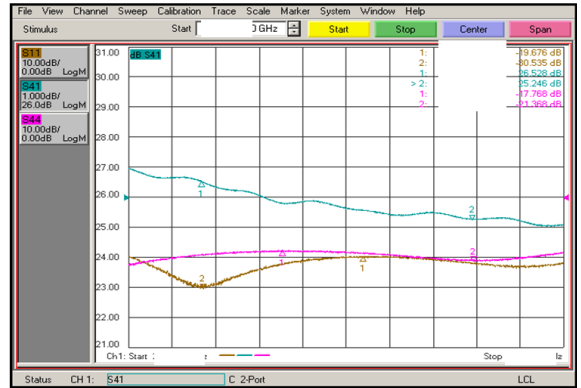
(a)



(b)

Fig. 8. Picture of LNA module (a) front side (b) back side

Fig. 9(a)는 측정된 소신호 S-파라미터 결과를 보여주고 있으며, 동작 주파수 대역에서 26±0.6dB 이득과 17dB 이하의 반사손실 특성을 가지는 것으로 측정되었다. Fig. 9(b)는 측정된 잡음지수 결과이고, 1dB 이하의 잡음지수 특성을 갖는다. Table 4에 LNA모듈의 목표성능과 측정결과를 정리하였다.



(a)

Freq	NoiseFig dB	Gain dB
GHz	1.032	26.572
GHz	0.982	26.501
GHz	0.983	26.315
GHz	1.004	26.098
GHz	0.950	25.984
GHz	0.963	25.813
GHz	0.950	25.737
GHz	0.972	25.746
GHz	0.927	25.756
GHz	0.951	25.753
GHz	0.963	25.719

(b)

Fig. 9. Measured results of LNA module (a) s-parameter results (b) noise figure results

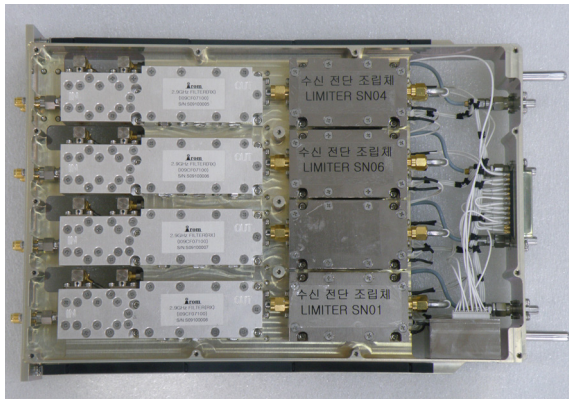
Table 4. Specifications and measurement results of LNA module

항목	단위	목표성능	측정결과
대역폭	GHz	fc±0.2	fc±0.2
잡음지수	dB	≤ 1.1	≤ 1.0
이득	dB	26±1	26±0.6
평탄도	dB	≤ 1.5	≤ 0.9
최대 입력전력	dBm	≥ +25	≥ +25
반사손실	dB	≥ 17	≥ 17

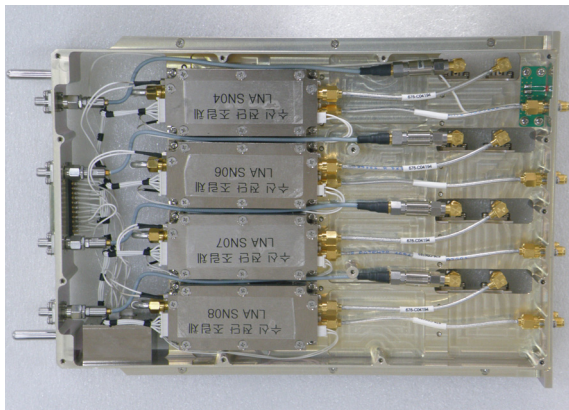
3. 수신전단기 측정결과

Fig. 10은 수신전단기의 제작사진이다. 제작된 수신전단기의 성능 확인을 위하여 이득 및 잡음지수 측정,

상호 혼변조 왜곡 특성 시험, 고전력 입력 시험 등이 수행되었다.



(a)

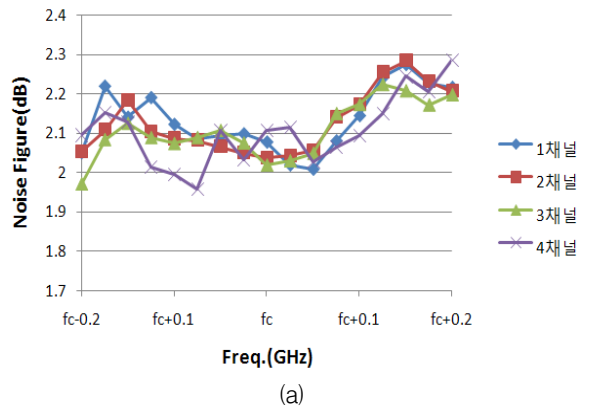


(b)

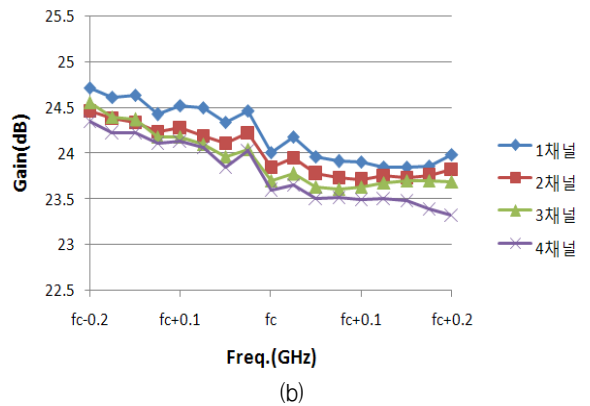
Fig. 10. Picture of Front-End Receiver (a) front side (b) back side

Fig. 11(a)는 채널별 측정된 잡음지수를 나타내고 있다. 2.3dB 이하의 잡음지수 특성을 가지고 주파수에 의한 채널간 편차도 0.2dB 이하의 특성을 가지므로 측정되었다. Fig. 11(b)는 채널별 측정된 이득을 보여주고 있다. 동작 주파수 대역에서 24±0.7dB로 채널간/주파수간 목표성능을 만족한다.

Fig. 12(a)는 1채널의 입력 P1dB 특성을 측정된 결과이다. 이득이 1dB 낮아졌을 때 출력 전력이 18.57dBm, 입력 전력이 -4.05dBm이므로 입력 P1dB는 -4.05dBm이고 Table 1의 목표성능을 만족한다. 나머지 채널에서도 -4.05dBm이상의 입력 P1dB 특성을 갖는다.



(a)

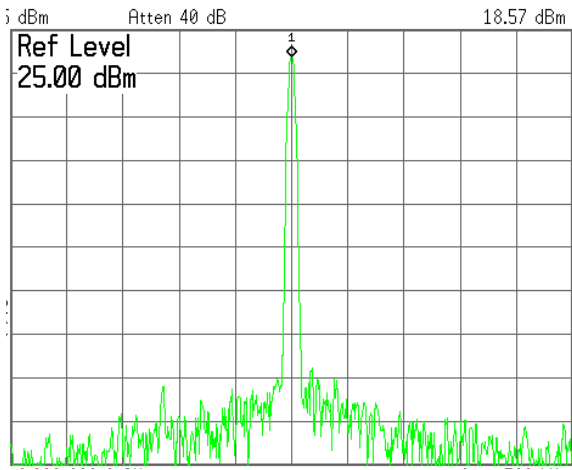


(b)

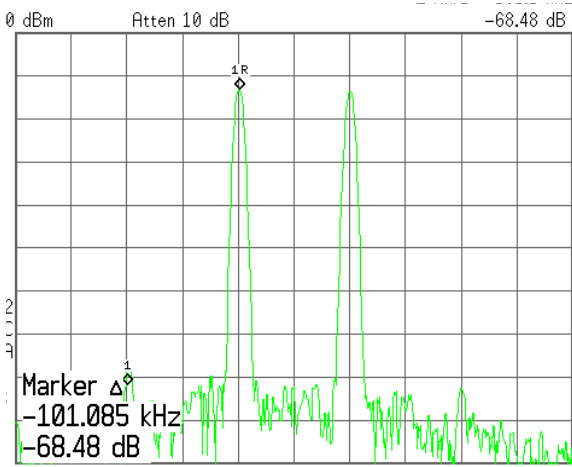
Fig. 11. Measured results of Front-End Receiver (a) noise figure results (b) gain results

Fig. 12(b)는 1채널의 상호 혼변조 왜곡 특성을 측정된 결과이다. 출력 전력은 -3.08dBm, IMD는 -68.48dBc, 이득은 24.01dB로 측정되었다. 따라서 IIP3는 7.15dBm 이므로 Table 1의 목표성능을 잘 만족하였다. 나머지 채널에서도 7.15dBm이상의 IIP3 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 고전력 입력에서 수신경로를 보호하는 기능과 회복시간을 측정하기 위한 시험구성도이다. 주어진 최대 입력전력에 대한 목표성능은 펄스모드 수 kW이다. 회복시간 측정을 위해 펄스모드 수 kW의 출력을 낼 수 있는 고출력 펄스 증폭기가 필요하다. 수 kW 출력에 커플러를 이용하여 연속파 신호를 인가하였다. 펄스모드 수 kW 신호는 수신경로 보호를 위해 전력제한해야 하는 고전력 입력신호를 모사하고 연속파 신호는 정상적으로 수신해야 하는 입력신호를 모사한다.



(a)



(b)

Fig. 12. Measured results of Front-End Receiver
(a) input P1dB result (b) IIP3 result

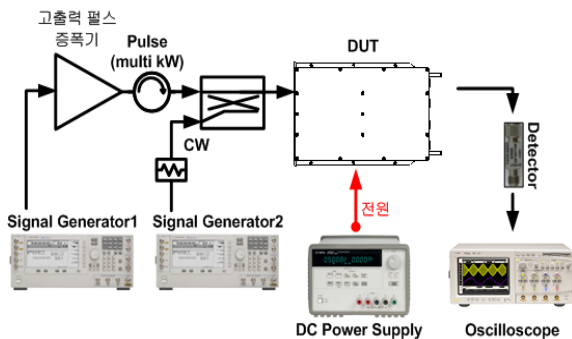


Fig. 13. Measurement set-up of recovery time

Fig. 14는 회복시간 측정결과이다. 펄스모드 수 kW 고전력 입력신호가 인가된 상태에서 수신경로를 보호하는 전력제한 기능을 확인함과 동시에 고전력 입력신호 이후 정상적인 수신이득으로 회복되는데 0.8us의 짧은 회복시간 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Table 5에 본 수신전단기의 측정결과를 나타내었다. S-대역 능동위상배열레이더 시스템에 적용하기 위한 모든 목표성능을 만족하였다.

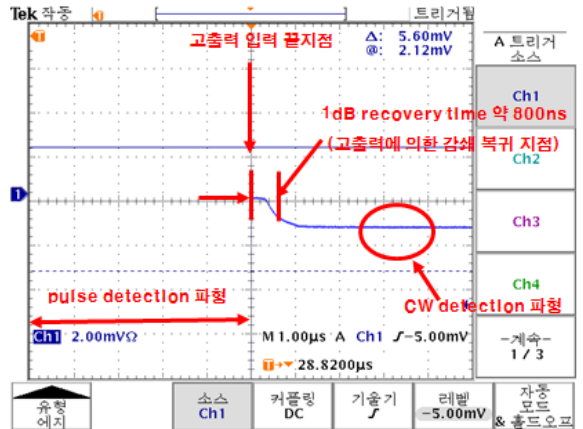


Fig. 14. Measured recovery time result of Front-End Receiver

Table 5. Specifications and measurement results of Front-End Receiver

항목	단위	목표성능	측정결과
대역폭	GHz	$f_c \pm 0.2$	$f_c \pm 0.2$
이득	dB	24 ± 1	24 ± 0.7
잡음지수	dB	≤ 2.6	≤ 2.3
입력 P1dB	dBm	≥ -10	≥ -4.05
IIP3	dBm	≥ 0	≥ 7.15
회복시간	us	≤ 1	≤ 0.8

4. 결론

본 논문에서는 능동위상배열레이더 시스템에 적합한 수신전단기를 설계 및 제작하고 측정을 통해 성능을 검증하였다. 레이더 시스템의 성능을 위한 수신전

단기의 목표성능을 분석하였고 이를 만족하기 위한 모듈단위의 목표성능 및 측정결과를 분석하였다. 각 모듈을 통합하여 구성한 수신전단기의 성능을 측정하였고, 그 결과 이득 및 잡음지수 성능, 비선형 성능, 고전력 입력에 대한 성능을 비롯한 모든 성능을 만족함을 확인할 수 있었다.

S-대역의 동작 주파수에서 24dB의 높은 이득과 2.3dB 이하로 우수한 잡음특성을 나타내었고, -4dB의 입력 P1dB와 7dB의 IIP3 특성을 가지고 있다. 또한, 수 kW의 고전력 입력에 수신경로를 보호함과 동시에 800ns의 짧은 회복시간 특성을 갖는다.

본 수신전단기는 우수한 저 잡음 증폭특성과 외부로부터 인가되는 고전력의 신호를 차단하여 수신경로를 보호하는 우수한 성능을 가지고 있으므로, S-대역 능동위상배열레이더 또는 안테나에 적합하다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Mark E. Russell, "Future of RF Technology and Radars", 2007 IEEE Radar Conference, pp. 11~16, 2007. 10.
- [2] H.-P. Feldle, "State of the Active Phased Array Technology", in Proc. 2nd Int. ITG Conf. Antennas, pp. 241~245, Mar. 2007.
- [3] Merrill L. Skolnik, Introduction to Radar Systems 3rd Edition, Mc Graw Hill, 2001.
- [4] Harker, B. J. Dobrosavljevic, Z. Craney, E. P. Tubb, C. M., Harris, G. L., "Dynamic Range Improvements and Measurements in Radar Systems", Radar, Sonar & Navigation, IET, pp. 398~406, Dec. 2007.
- [5] Martin Caulton. Arye Rosen. Paul J. Stabile and Anna Gombar, "p-i-n Diodes for Low-frequency High-power Switching Applications", IEEE MTT Vol. 30. No. 6, pp. 875~882, June 1982.
- [6] R. Tenholtz, "A 2000 Watt CW MIC 20-500MHz SPDT PIN Diode Switch Module", IEEE International Microwave Symposium Digest, Vol. 81, pp. 252~254, June 1981.