

논문 2012-49TC-1-11

밀리미터파 탐색기를 위한 Ka-대역 수신기 모듈의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of the Ka-Band Receive Module for Millimeter Wave Seeker)

양 승 식*, 임 주 현**, 송 성 찬**

(Seong Sik Yang, Ju Hyun Lim, and Sung Chan Song)

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기에 사용되는 Ka-대역 수신기 모듈 설계 및 제작 기법을 제시하였다. 수신기 모듈은 안테나 연결을 위한 도파관, 순환기(Circulator) 및 모드 변환기, 수신기 보호를 위한 리미터 및 이득 제어 증폭기를 포함한다. 또한 모노 펄스 수신을 위한 합, 고각 및 방위각 채널로 구성되며 재밍 신호 확인을 위한 SLB(Sidelobe Blankin) 채널로 구성된다. 본 논문에서는 ADC(Analog to Digital Converter)의 비선형 특성에 따른 수신기 이득 및 이득 제어 범위를 분석하고, 넓은 수신기 동작 영역을 가지도록 설계되었다. 제작된 Ka-대역 수신기 측정 결과, 주파수 대역은 1 GHz, 잡음 지수는 8.2 dB 이하, 이득은 56 ± 2 dB, 동적 영역은 135 dB, 이득 제어 86 dB 이상, 채널간 격리도 35 dB 이상이다.

Abstract

In this paper, we introduced the design technique about a Ka band receive module for millimeter wave seekers. The receiver module consists of a waveguide, circulator and transition for antenna connection, and a limiter and gain control amplifier for receiver protection. This module is comprised of a sum, azimuth and elevation channel for receiving monopoles signal, and a SLB channel for the acquisition of jamming signal. In this paper, receiver gain and range of gain control dependent on ADC nonlinear characteristic was analyzed and designed for wide dynamic range receive. In the test result of the fabricated Ka-band receive, the frequency band is 1 GHz, the noise figure is as low as 8.2 dB, the gain is 56 ± 2 dB, the dynamic range is 135 dB, the gain control is more than 86 dB, the channel isolation is more than 35 dB

Keywords: Receive, Ka band, Millimeter wave, RF seeker, ADC

I. 서 론

밀리미터파는 30 ~ 300 GHz의 주파수를 의미한다. 밀리미터파를 이용하는 송수신 시스템은 마이크로파를 이용한 송수신 시스템보다 소형이며 넓은 대역으로 구현할 수 있는 장점을 가지나 사용되는 RF(Radio Frequency)부품이 고가이며 성능이 낮은 단점을 가지고 있다. 그러나 일정한 크기의 유도무기에 사용되는

RF 탐색기에서 밀리미터파 탐색기는 높은 안테나 이득, 좁은 안테나 빔폭, 작은 클러터 및 ECM(Electronic Countermeasures) 영향 때문에 많이 연구되고 있다^[1~2]. 특히 모노 펄스 안테나를 사용하는 RF 탐색기에서 좁은 안테나 빔폭은 표적에 대한 각도 정확도를 높이며 짧은 파장은 도플러 주파수 정확도를 높여, 고속으로 움직이는 항공기나 탄도탄 같은 표적에 대한 요격 정확도를 높일 수 있다. 이러한 특징을 가지는 밀리미터파 대역중 대기 감쇄 특성이 적은 Ka-대역과 W-대역이 탐색기에 주로 응용된다.

RF 탐색기는 표적의 각도 정보를 추출하는 모노 펄

* 정회원-교신저자, ** 정회원, 삼성탈레스
(Samsung Thales)

접수일자: 2011년9월20일, 수정완료일: 2012년1월17일

스 시스템을 사용하며 이를 위해서 수신기는 합, 고각 및 방위각 채널로 구성되어야 한다^[3]. 이와 같은 높은 주파수의 다 채널 수신기는 RF 부품 특성 차이 및 조립 정확도에 따라 채널 간 위상 및 이득 오차가 발생하며 채널 간 보정이 필요하다. 이러한 보정을 위해서는 수신기 입력단에 점검 신호 주입이 필요하다^[5-6].

본 논문은 밀리미터파 대역중 대기 감쇄 특성이 적은 Ka-대역 수신기 설계 및 제작에 대한 논문으로 II장에서 탐색기의 모노 펄스 시스템에 적용하기 위한 다 채널 수신기 구성에 대해 설명한다. 또한 최대 및 최소 표적 거리에서 표적 신호를 하향 변환하기 위한 수신기 설계 방법을 설명하고 시뮬레이션 결과를 보였다. III장에서는 탐색기 형상을 고려한 최적의 수신기 제작 및 시험 결과를 제시하고 IV장에서 결론을 내리도록 한다.

II. 수신기 모듈 설계

본 논문에서 제안한 밀리미터파 탐색기 수신기는 -125 ~ 10 dBm의 수신신호를 안전하게 주파수 하향 변환하며, 20 ~ 45 dBm의 비 수신신호(송신 누설 전력 및 ECC)에 대한 수신기 보호가 가능하여야 한다. 또한 탐색기의 모노펄스 안테나로부터 수신된 1개의 합 채널(Σ)과 2개의 차 채널(Δ_a, Δ_e) 및 SLB 안테나로부터 수신한 1개의 SLB 채널이 구현되어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위한 밀리미터파 탐색기 수신기의 구조는 그림 1과 같다.

모노펄스 안테나의 비교기를 통하여 1개의 합 채널과 2개의 차 채널이 수신기로 입력된다. 합 채널은 도파관 순환기를 통해서 송신신호와 수신신호가 분리된다. 합 채널은 도파관을 통해서 수신된 신호를 평판형 수신기로 전환하기 위한 모드 변환기와 안테나를 통해서 반사되어 들어오는 높은 전력으로부터 수신기를 보호하기 위한 리미터를 포함한다. 넓은 수신기 동적 영역 확보를 위해 2개의 스위치와 1개의 이득제어 증폭기가 사용되며, 2단의 주파수 하향 변환을 통해 원하는 RF 주파수를 IF 주파수로 변환한다. 2개의 차 채널은 순환기와 리미터를 제외하고 합 채널과 같은 구조와 성능을 가진다. SLB 채널은 SLB 안테나로부터 수신한 신호를 다른 채널과 같은 방법으로 주파수 하향 변환한다.

채널간 위상 정합 및 위상 추적 오차를 보상하기 위해서 각 수신기 앞단에 점검(Cal) 신호를 주입하여야 한다. 본 수신기에서는 주파수 합성기로부터 인가된 점검 신호를 SLB 채널의 전단부에 전력 분배기와 방향성 결합기를 통해서 SLB 채널과 모노펄스 안테나의 비교기로 인가하였다. 또한 주파수 합성기로부터 인가받은 2개의 LO신호는 수신기의 4 방향 전력 분배기를 통해서 동일한 신호가 각 채널에 인가되도록 하였다.

1. 수신기 이득 설정

수신기 설계에 필요한 수신기 이득(G_r), 이득 제어 범위는 수신기 뒷단에 위치하는 ADC의 SNR(Signal to

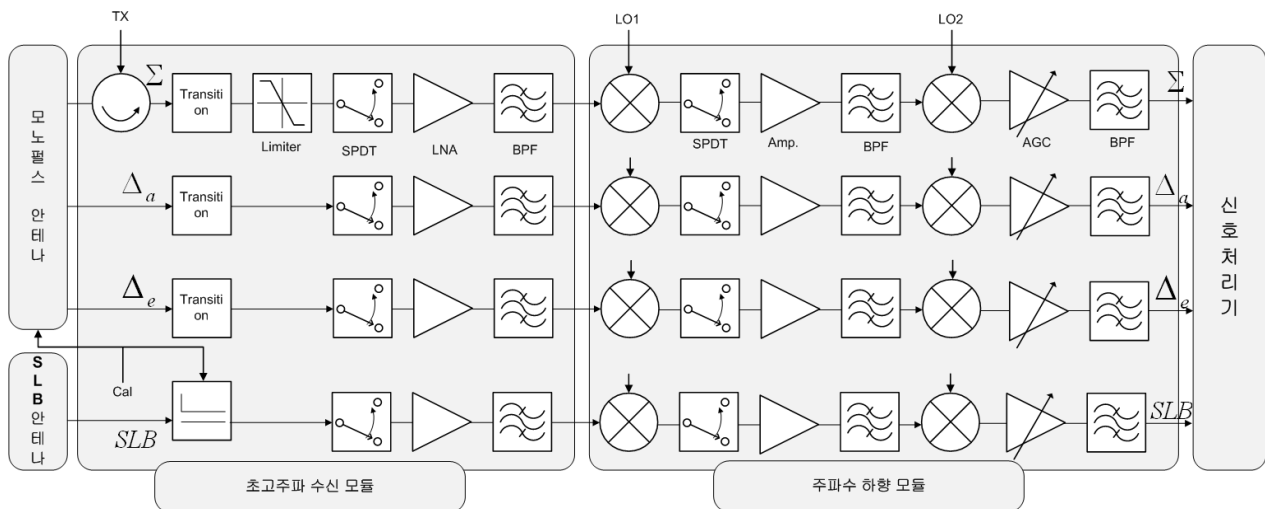


그림 1. 밀리미터파 탐색기용 Ka-대역 수신기 블록도

Fig. 1. Block diagram of Ka-band receiver for millimeter wave seeker.

Noise Ratio) 및 -1dBFS(-1dB Full Scale)등의 특성을 고려하여 설정해야 한다^[7]. 참고 논문^[7]에 의하면 ADC 동적 영역(D_{ADC})은 아래와 같이 표현된다.

$$D_{ADC} = 20 \cdot \log\left(\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}\alpha}\right) - 1 \quad (1)$$

여기서 N는 ADC 비트 수, α 는 ADC 입력 잡음 전압(σ)과 양자화 간격(h)의 비이다. 또한 ADC SNR 손실(L_{ADC})은 다음과 같이 관계를 가진다.

$$L_{ADC} = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{\left(\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-\frac{SNR_{ADC}}{20}}\right)^2}{\alpha^2}\right) \quad (2)$$

여기서 SNR_{ADC} 는 ADC의 신호대 잡음비이다.

이 두식을 α (ADC 입력 잡음 전압과 양자화 간격)에 따른 특성을 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 이때 ADC는 Analog Device사의 AD6645를 선택하였고 그 특성은 표 1과 같다.

이 그래프는 ADC 동적 영역을 크게 선택하면 ADC

표 1. AD6645 ADC의 특성
Table 1. Characteristics of AD6645 ADC.

| 항목 | 단위 | 특성 |
|----------------------------|----------|-----|
| N (ADC 비트 수) | bit | 14 |
| A_{FS} (ADC 풀 스케일 전압) | V_{pp} | 2.2 |
| SNR_{ADC} (ADC SNR) | dB | 76 |

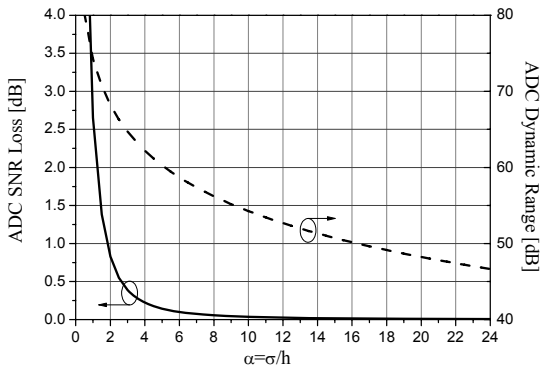


그림 2. α 에 따른 ADC SNR 손실 및 동적 영역
Fig. 2. ADC SNR Loss and Dynamic Range vs α .

표 2. 시스템 파라미터
Table 2. System Parameters.

| 항목 | 단위 | 특성 |
|--------------------------|-----|--------|
| RF 주파수 | GHz | XX±0.5 |
| IF 주파수 | MHz | 100 |
| 샘플링 주파수 | MHz | 80 |
| 최소 탐지 SNR(SNR_{min}) | dB | 13.8 |
| 디지털 처리 이득 | dB | 22.8 |
| IF 필터 대역폭 | kHz | 100 |
| 잡음 지수 | dB | ≤ 8 |
| 수신기 이득 | dB | 56±2 |
| 이득 제어 | dB | ≥ 61 |

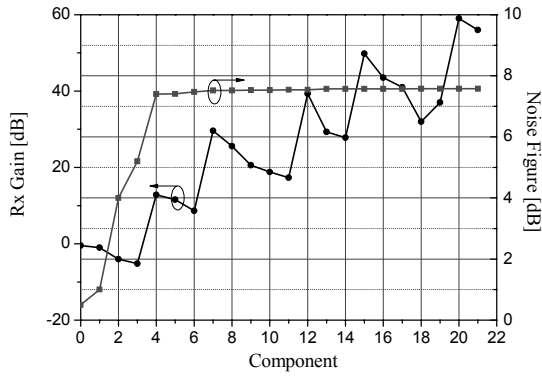
SNR 손실이 커지고 ADC 동적 영역을 작게 선택하면 ADC SNR 손실이 작아짐을 보여준다. 보통 넓은 수신기 동적 영역 확보를 위해서 넓은 ADC 동적 영역을 선택하는데 이것은 큰 ADC SNR 손실을 야기하며 시스템 전반의 성능 열화를 가져온다. 반면 ADC 동적 영역을 작게 선택하면 ADC SNR 손실은 작아지나, 본 수신기와 같이 넓은 수신기 동적 영역이 필요한 시스템에서는 높은 수신기 이득과 넓은 이득 제어가 필요하여 구조가 복잡해지는 단점을 가진다. 여기서는 시스템 성능을 고려하여 ADC SNR 손실이 0.5 dB이하로 선택하고 최대의 ADC 동적 영역은 66 dB로 결정하였다.

ADC의 풀 스케일 전압이 2.2 V_{pp} 이고 datasheet에서 권장하는 1:4 임피던스 변환기를 고려하면 ADC의 입력 FS(Full Scale) 4.8 dBm임을 알 수 있다.

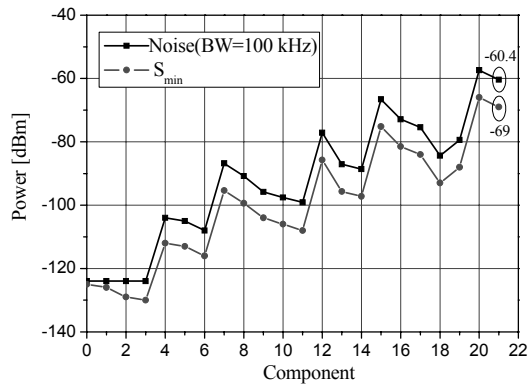
표 2에 있는 시스템 파라미터인 최소 탐지 SNR, 디지털 처리 이득, IF 필터 대역폭 및 잡음 지수를 고려하면, 최소 수신기 입력 신호(-125dBm)를 신호처리하기 위한 수신기 이득은 54 dB 이상임을 알 수 있다. 또한 계산된 수신기 이득 및 ADC의 입력 -1dBFS를 고려하면 최대 수신기 입력 신호(10 dBm)를 신호처리하기 위해서는 수신기 이득 제어가 61 dB 이상이어야 한다. 밀리미터파 탐색기용 수신기 모듈은 표 2와 같이 수신기 이득과 이득 제어값을 결정하였다.

2. 수신기 버짓 설계

위에서 결정된 수신기 주요 파라미터를 만족하는 밀



(a) 이득과 잡음 지수
(a) Gain and Noise Figure.



(b) 잡음 및 신호 레벨
(b) Noise and signal level.

그림 3. 수신기 경로 버짓(최소 입력 신호 S_{min})
Fig. 3. Budget of receive path(minimum signal input).

리미터와 수신기 버짓은 그림 3과 같다. 이득을 만족하기 위한 증폭기 및 감쇄기와 초고주파 수신 모듈과 주파수 하향 모듈간 연결을 위한 케이블을 포함하였다. 또한 MMIC 부품 조립시 예상되는 손실과 커넥터 손실을 포함하여 ADS 시뮬레이션한 결과이다. 수신기 버짓 해석 결과는 그림 3. (a)과 같이 이득 56 dB, 잡음 지수 7.6 이다. 또한 그림 3. (b)는 열 잡음에 의한 ADC 입력 잡음(대역폭 100 kHz)과 최소 수신 입력(-125 dBm)에 대한 ADC 입력 신호를 보여준다. ADC 입력 레벨로 보면 잡음이 수신 신호보다 8.6 dB 크다. 그러나, 디지털 신호 처리 이득 22.8 dB를 감안하면 SNR은 14.2 dB로 시스템에서 요구하는 충분한 SNR를 확보하였다. ~

이와 같은 버짓은 ADC -1 dBFS(-3.8 dBm)를 고려하면 수신기 입력 신호가 -125 ~ -53 dBm까지 가능하다. 그 이상의 입력 신호는 수신기 이득을 제어하여야

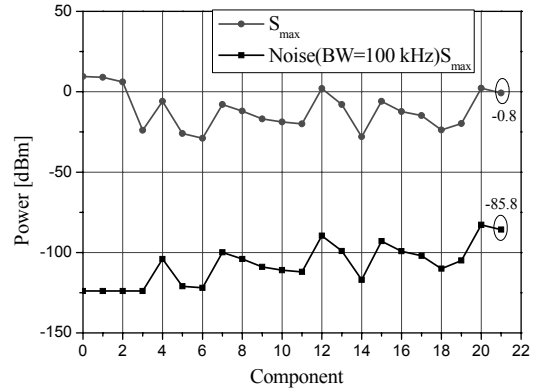


그림 4. 수신기 경로에 대한 잡음 및 신호 레벨 (최대 입력 신호 S_{max})

Fig. 4. Noise and signal level of receive path. (maximum signal input)

한다. 밀리미터파 수신기 모듈에서는 STC용 스위치와 수신기 뒷단의 이득 제어 증폭기를 이용하였다. 그림 4는 최대 입력 신호 S_{max} (10 dBm) 입력 시 이득 제어량 약 67 dB(수신기 이득 약 -11 dB)감쇄한 잡음 및 신호 레벨을 보여준다. 이때 ADC 입력 신호는 약 -0.8 dBm으로 ADC -1 dBFS보다 낮음을 보여주고 있다.

3. Ka 대역 트랜지션 설계

그림 1 수신기 블록에서 Ka 대역 도파관 대 마이크로 스트립 트랜지션 구조는 그림 5 (a)와 같다. 도파관 대 마이크로 스트립 트랜지션은 정합 소자로써 도파관의 높은 임피던스를 낮은 임피던스의 마이크로 스트립 라인 구조로 낮은 손실로 신호 전달하는 것이 목적이다. 특히 탐색기용 트랜지션은 안테나의 회전 반경과 밀접한 관계가 있는 트랜지션 길이가 중요한 파라미터가 된다^[8]. 이 트랜지션 길이를 줄이는 방법으로는 참고 논문^[8]에서 언급한 것과 같이 도파관에 다 단계 릿지 계단을 이용하는 트랜지션이 연구되었고, 이와 같은 구조는 넓은 대역과 낮은 삽입손실의 좋은 특성을 가진다. 그러나 본 과제에서는 구조적 단순함과 제작의 편의성을 위해서 그림 5 (a)와 같이 마이크로 스트립 상에 전통적인 L-C 정합회로로 구성하였다^[9]. 이와 같은 구조는 좁은 대역을 가지나 특별한 트랜지션 길이가 필요 없는 특징을 가진다. 좁은 대역을 극복하기 위한 방법으로 그림에서 보듯 부체 모양의 프로브를 사용하였다^[10]. 측정을 위해 2개의 트랜지션을 8 mm의 50Ω 마이크로 스트립 라인(아답타 크기 고려)과 0.2 mm 간격으로 조립

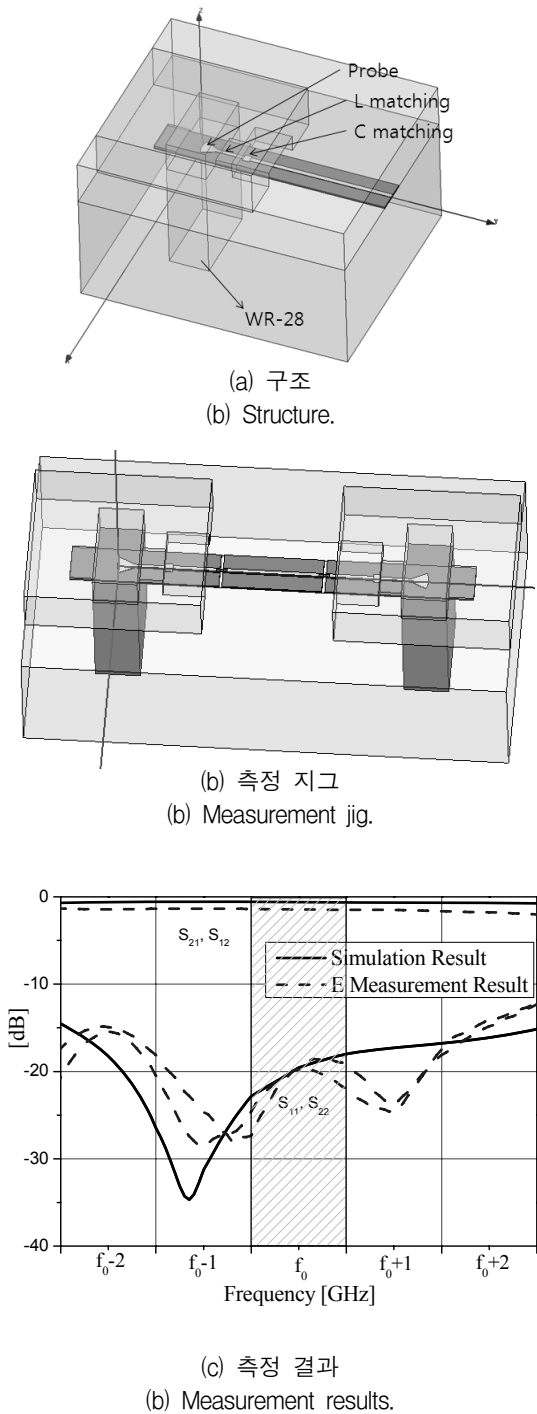


그림 5. Ka 대역 도파관 대 마이크로스트립 트랜지션
Fig. 5. A Ka-band Waveguide to Microstrip Transition.

하고 리본 본딩으로 그림 5 (b)와 같이 연결하였다. 측정 결과 대역내에서 삽입 손실은 약 1.5 dB 미만, 반사파는 약 18 dB 이상임을 알 수 있다. 측정을 위한 연결 부분의 손실이 EM 시뮬레이션 결과 약 0.6 dB임을 가만하면 한 개의 Ka 대역 도파관 대 마이크로스트립 트랜지션은 약 0.5 dB 이하 이다. 사용된 기판은 Rogers

사의 duroid 5880으로 유전율 ϵ_r 은 2.2, 높이 h 는 5 mil 를 사용하였다.

III. 제작 및 측정

그림 6은 제작된 밀리미터파 탐색기용 수신기 모듈이다. 그림 6 (a) 밀리미터파 수신 모듈은 안테나와 수신기간 손실을 줄이기 위해서 도파관으로 직접 연결되었고, 그 형상도 탐색기 안테나와 안테나 구동을 위한 서보를 고려하여 C자 형태로 제작되었다. 또한 채널간 격리도를 높이기 위해서 각각의 채널을 분리하여 위치시키고 격벽을 사용하였다. RF 기관은 MMIC 조립을 위한 V-cut된 5 mil duroid 5880을 사용하였고 대역 통과 여파기 및 전력 분배기는 정밀 가공을 위해서 5 mil

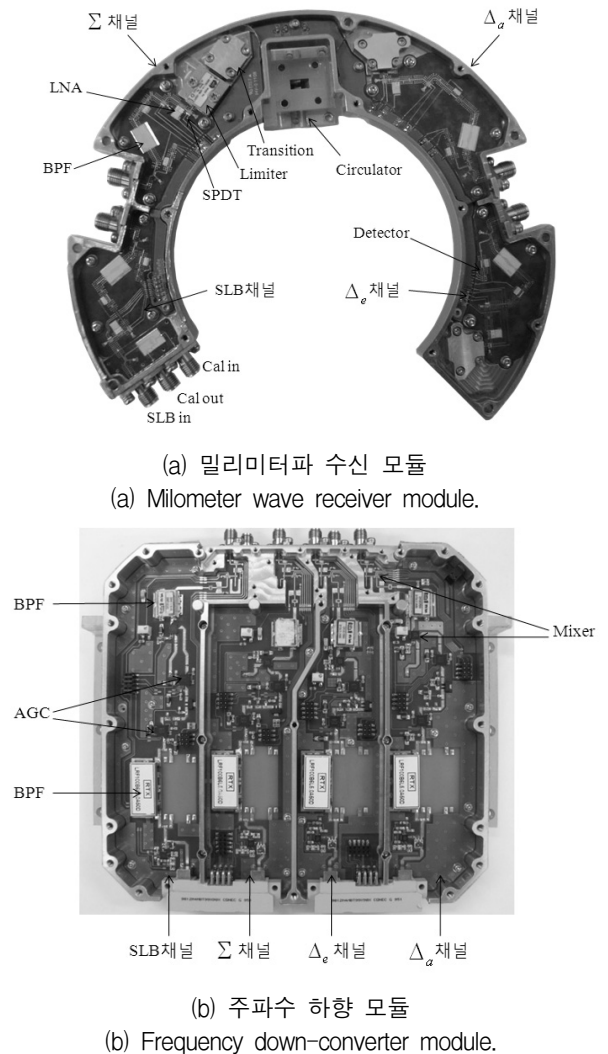
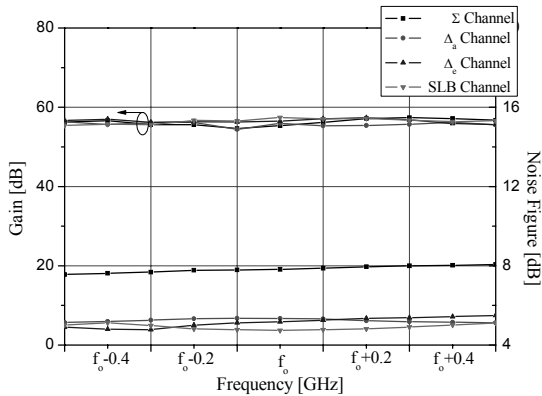
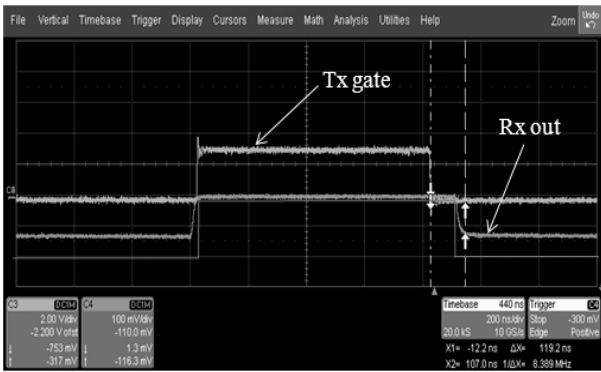


그림 6. 밀리미터파 탐색기용 수신기 모듈
Fig. 6. Receive Module for millimeter wave seeker.



(a) 이득 및 잡은 지수
(b) Gain and noise figure.



(c) 스위칭 타임
(b) Switching time.

그림 7. 수신기 측정 결과
Fig. 7. Measurement results of receive module.

Alumina 기판을 사용하였다. 전원 및 제어 신호의 입력과 검출기를 통한 각 채널 점검 신호 출력은 Hirose사의 보드간 커넥터를 사용하여 아랫면에 위치한 FR4 보드와 연결하였다. 그림 6 (b) 주파수 하향 모듈은 RF 단(입력단)은 5 mil duroid 5880을 사용하고 IF 단은 FR4 기판을 사용하였다. 믹서에 공급하는 LO1 및 LO2는 주파수 합성기로부터 공급받아 주파수 하향 모듈 아랫 면에서 증폭, 4방향으로 분배되고 50 ohm feedthru를 이용하여 위 면에 공급된다^[11]. 또한 주파수 하향 변환된 각 채널 신호는 마더 보드를 통해 신호 처리기로 전달된다.

이와 같은 방법으로 밀리미터파 탐색기용 수신기 모듈의 측정 결과는 그림 7과 같다. 우선 이득은 그림 7 (a)와 같이 55.9 ± 1.4 dB를 만족하였고 잡음 지수는 합 채널은 8.2 dB 이하 나머지 채널은 5.5 dB 이하로 측정되었다. 채널간 격리도는 35 dB 이상으로 측정되었으

며, 신호가 상대적은 큰 합 채널에서 다른 채널로 인가되는 신호는 42 dB 이상으로 측정되었다. 스위치에 의한 이득 제어는 52 dB 이상이며 이득 제어 증폭기를 이용한 이득 제어는 1 dB 간격으로 34 dB까지 제어가 가능하므로 총 이득 제어 구간은 86 dB 이상이다. 합채널의 잡음 지수가 시뮬레이션 결과 보다 다소 높은 것은 drop-in 타입의 리미터 조립이 그 원인으로 파악되며 특히 높은 주파수에서 높은 손실을 야기한다. drop-in 타입을 평판형 캐리어 구조의 리미터로 교체하면 이러한 문제를 줄일 수 있다.

그림 7 (b)는 수신기 스위칭 타임을 측정된 결과이다. 수신기 gate 신호는 송신기 gate 신호보다 회복시간을 고려하여 펄스 폭을 100 ns 넓게 하였다. 수신기 입력에 일정 크기의 연속 신호를 인가하고 출력에 검출기를 이용하여 측정하였고, 측정 결과 상승 시간은 약 10 ns, 하강 시간은 약 20 ns가 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기용 Ka-대역 수신기를 설계 및 제작하고 측정 하였다. 탐색기용 수신기에 필요한 넓은 동적 영역을 확보하기 위해서 ADC 특성을 이용한 수신기 성능을 정의하고 4 채널 모노펄스용 수신기를 제작하였다. Ka-대역 수신기 시험 결과 잡음 지수가 8.2 dB 미만이며 수신기 이득은 55.9 ± 1.4 dB, 이득 제어는 82 dB 이상으로 우수한 성능을 확인하였다. 수신기 보호를 위한 수신기 on-off 제어 시 제어 펄스 신호와 비교하여 약 20 ns이내의 빠른 스위칭 타임을 보였다.

향후 밀리미터파의 수신기 동적 영역과 감도를 높일 수 있는 연구로써 평판형 캐리어 구조의 리미터를 제작하여 수신기의 조립 의존성을 줄이는 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Osman Yildirim, "Millimeter Wave Radar Design Considerations," Journal of Electrical & Electronics Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 983-986, 2003.
[2] 공덕규, 김소수, 이웅철, 유영준, "밀리미터파 소형 레이더의 송수신 성능에 관한 연구," 한국군사과학기술학회 2009년 종합학술대회, 1133-1136쪽, 2009

년 8월

- [3] A. I. Leonav, K. I. Fomichev, Translated by William F. Barton, Monopulse Radar, Artech House, 1986.
- [4] 양성욱, 박동민, 나영진, “추적 레이다용 Dual-band 모노펄스 수신기,” 한국전자과학회논문지, 제17권, 제8호, 767-772쪽, 2006년 8월
- [5] 김소수, 염경환, “주파수 가변 비동기 모노펄스 시스템의 모노펄스 기술기 교정,” 한국전자과학회논문지, 제18권, 제11호, 1299-1308쪽, 2007년 11월
- [6] B. Brautigam, M. Schwerdt, M. Bachmann, and M. Stangl, “Individual T/R module characterization of the TerraSAR-X active phased array antenna by calibration pulse sequences with orthogonal codes,” in Proc. IGARSS Conf., pp. 5202-5205, 2007.
- [7] 김태환, 최병관, 이희영, 조준식, “ADC 특성에 따른 능동 위상 배열 레이더 수신기의 이득 설정 방법.” 한국전자과학회논문지, 제20권, 제1호, 56-61쪽, 2009년 1월
- [8] 오현석, 염경환, “짧은 천이길이를 갖는 Ku-대역 감소단축도파관 대 마이크로스트립 모드 변환기.” 한국전자과학회논문지, 제19권, 제12호, 1435-1444쪽, 2008년 12월
- [9] 권혁자, 이성주, 장호준, “프로브 구조를 이용한 Ka 대역 도파관-마이크로스트립 트랜지션의 설계 및 제작,” 전자공학회논문지, 제45권 TC편, 제7호, 67-71쪽, 2008년 7월
- [10] B. D. Nguyen, C. Migliaccio, Ch. Pichot, and Nathalie Rolland, “Design of Microstrip to Waveguide Transition in the W Band Suitable Antenna or Integrated Circuits Connections,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 47, no. 6, pp. 518-520, Dec. 2005.
- [11] 김현미, 양승식, 염경환, “소형화된 Ka-대역 주파수 합성기 모듈 설계 및 제작.” 한국전자과학회논문지, 제18권, 제5호, 511-521쪽, 2007년 5월

저 자 소 개



양 승 식(정회원)-교신저자
2003년 충남대학교 전파공학과
학사 졸업.
2005년 충남대학교 전파공학과
석사 졸업.
2009년 충남대학교 전파공학과
박사 졸업.

2009년~현재 삼성탈레스(주) 레이더연구소
전문연구원

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계 및 해석, 레이
더 시스템>



송 성 찬(정회원)
2001년 한국항공대학교 항공전자
공학과 학사 졸업.
2003년 한국항공대학교 항공전자
공학과 석사 졸업.
2002년~현재 삼성탈레스(주)
레이더연구소 전문연구원.

<주관심분야 : 레이더 시스템 및 송수신기 설계,
전자파 수치해석>



임 주 현(정회원)
2005년 충남대학교 전기전자전파
공학과 학사 졸업.
2007년 충남대학교 전파공학과
석사 졸업

2006년~현재 삼성탈레스(주)
레이더연구소 선임연구원

<주관심분야 : 레이더 시스템 및 송수신기>