쿼드팩을 이용한 소형 Ka 대역 송수신(T/R) 모듈의 설계 및 제작

A Design and Fabrication of a Compact Ka Band Transmit/Receive Module Using a Quad-Pack

오현석 · 염경환 · 정민길* · 나형기* · 이상주* · 이기원** · 남병창**

Hyun-Seok Oh · Kyung-Whan Yeom · Min-Kil Chong* · Hyung-Gi Na* · Sang-Joo Lee* · Ki-Won Lee** · Byung Chang Nam**

요 약

본 논문에서는 Ka 대역 위상 배열 레이더용 송수신(T/R: Transmit/Receive) 모듈의 설계 및 제작을 보였다. Ka 대역 송수신 모듈 구성 시 Ka 대역의 특수성을 고려하여 5비트(bit) 위상천이기와 5 비트 30 dB 디지털 가변감쇠기를 송수신 공통으로 사용하였으며, 서큘레이터는 T/R 모듈 외부에 부착되는 형태로 구성하였다. 단위 안테나 당 송신 출력은 1 W 이상 잡음 지수는 8 dB 미만으로 설정하였으며, 설계된 T/R 모듈의 RF부의 크기는 5 mm×4 mm×57 mm로 소형화를 달성하였다. 설계된 T/R 모듈을 구현하기 위하여 T/R 모듈에 소요되는 개별 MMIC 검증 후 단위 T/R 모듈을 검증하는 방법을 사용하였다. 제작된 T/R 모듈은 설계 시 예측한 바와 같이 단위 T/R 모듈의 입력 5 dBm에서 출력 30 dBm 이상을 보였으며, 수신부는 잡음 지수 8 dB 미만, 이득 20 dB 이상을 얻었다.

Abstract

In this paper, the design and fabrication of a transmit/receive(T/R) module for Ka-band phased array radar is presented. A 5bit digital phase shifter and digital attenuator were used in common for both transmitter and receiver considering unique Ka-band characteristic. The circulator was excluded in the T/R module and was placed outside T/R module. The transmitting power per element antenna is designed to be about 1 W and the noise figure is designed to be below 8 dB. The designed T/R module RF part has a compact size of 5 mm×4 mm×57 mm. In order to implement the T/R module, MMICs used in T/R module was separately assessed before assembly of the designed T/R module. The transmitter of the fabricated T/R module shows about 1 W at 5 dBm unit module input power and the receiver shows a gain of about 20 dB and a noise figure of below 8 dB as expected in the design stage.

Key words : Ka-Band T/R Module, Transmit/Receive Module, Active Phased Array Radar

I. 서 론

일반적으로 파장이 짧아질수록, 같은 안테나 크기

를 갖더라도, 지향성(directionality)이 개선되며, 이로 인해 목표물(target)에 대한 분해능(resolution)은 향상되게 된다. 또한, 짧아진 파장으로 인해, 소형 송수신

「이 연구는 2010년도 (주)유텔의 “Ka 대역 송수신 모듈개발” 연구과제 수행으로 연구되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*LIG넥스원(LIG Nex1)

** (주)유텔 기술연구소(U-tel Research and Development Center)

· 논 문 번 호 : 20110121-009

· 교 신 저 자 : 염경환(e-mail : khyeom@cnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 3월 3일

시스템을 구축하는 것이 용이해진다. 따라서 밀리미터파를 이용한 레이더(radar)는 밀리미터파 부품 제작 기술의 발전과 더불어 많은 관심을 받고 있다. 특히 Ka 대역은 대기 중에서의 감쇄가 작아^[1] 이러한 응용에 가장 관심을 받는 대역이 되고 있다.

이러한 시스템 구성 시, 기계식에 의한 방법보다, 위상 배열 안테나에 의한 시스템 구성은 신속한 빔 조향(beam forming)과 신속한 목표물 탐지 정보를 제공해, 최근 뛰어난 성능을 요구하는 군용 시스템은 대부분 능동 위상 배열에 의한 방법을 사용하고 있다. 특히 과거의 TWT(Travelling Wave Tube)와 같은 진공관을 사용하고, 이를 분기하여 구성하는 수동형 위상 배열 안테나 시스템과 달리, 반도체를 사용한 소형 송수신(T/R: Transmit/Receive) 모듈을 직접 배열 안테나의 소자에 부착해 구성하는 능동형 위상 배열 안테나(AESA: Active Electronic Steering Array) 시스템은 진공관으로 구성시 필요한 진공관의 예열, 신뢰성 문제를 제거함으로써, 많은 관심을 끌고 있고, 최근의 시스템은 대부분 이러한 구성을 선호하고 있다^{[2],[3]}.

Ka 대역에서의 이러한 T/R 모듈은 짧은 파장으로 인해, T/R 모듈 구현에 많은 문제점을 발생시킨다. 이미 국내에서 개발되어 발표된 바 있는 X-대역의 T/R 모듈^[4]에 비해 Ka 대역은 파장이 1/3~1/4배 정도 짧아져, 이에 따른 배열 안테나 소자간 간격은 4~5 mm 정도로 대폭 축소된다. 현재 발표되고 있는 첨단 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)을 활용하더라도, T/R 모듈 구성에 상당히 많은 문제점을 발생시킨다. 특히 T/R 모듈의 송출 전력 커질수록 상호 간섭 등의 문제도 심각해진다. 이들을 해결하기 위한 바람직한 방법은 T/R 모듈을 직접 MMIC 형태로 구현하여, T/R 모듈의 크기를 대폭 줄이는 것을 고려하는 것이다. 그러나 MMIC 형태의 T/R 모듈은 안테나와 연결과, 이러한 T/R 모듈에 소요되는 pHEMT, PIN 다이오드 등 다양한 반도체 소자들을 포함하여 집적하는 데는 현재의 국내 기술로는 많은 어려움이 있다. 따라서 T/R 모듈은 현재로서는 하이브리드 형태로 구현하는 것이 최선이다.

본 논문에서는 국내에서 처음으로 단위 안테나 당 1 W의 송출 전력을 제공하는 T/R 모듈의 설계 및

제작을 보였으며, 앞서 언급한 소형화 문제를 극복하기 위하여, LTCC(Low Temperature Cofired Ceramics) 기판을 사용한 집적을 보였다. 이를 통해 T/R 모듈의 소형화를 기하였으며, 배열 안테나 수직, 수평거리의 간격 제한을 극복하기 위하여 부족한 공간을 길이 방향으로 해결하여 설계하였다. 제작된 T/R 모듈의 크기는 4개 안테나 묶음으로 19.9 mm×4.0 mm×57 mm의 소형 크기를 가지며(이는 단위 안테나 당 단위 T/R 모듈(unit T/R module)은 약 5 mm×4.0 mm×57 mm의 크기를 갖는 것이 된다.), 이의 체계적인 실험을 통한 구축 방법 및 시험 방법을 보였다.

II. 송수신 모듈 설계 규격 및 구성

그림 1은 단위 T/R 모듈의 블록도를 보였다. 구조는 안테나의 빔 조향을 위한 위상 천이기(PS: Phase Shifter) 및 디지털 감쇠기(VVA: Voltage Variable Attenuator)를 송수신 공통(common) 채널로 사용하는 구조^[5]이다. 그리고 표 1에는 목표로 하는 T/R 모듈의 목표 규격을 보였다. 수신 잡음 지수와 출력은 T/R 모듈의 목표물 탐지 거리와 밀접한 관계가 있는데, 같은 출력에서 잡음 지수가 낮을수록 장거리 목표물을 탐색할 수 있게 된다. 그러나 현재 상황에서 Ka

그림 1. 단위 T/R 모듈의 블록도

Fig. 1. Block-diagram for an unit T/R module.

표 1. Ka 대역 단위 T/R 모듈의 요구 규격

Table 1. Ka band unit T/R module specification.

항 목	요 구 규 격
송신 출력 [dBm]	>30
단위 T/R 모듈 입력 [dBm]	+5
송신 이득 [dB]	>25
최소 감쇠시 수신 이득 [dB]	>20
수신 잡음 지수 [dB]	<8.0
이득 조정 범위 [dB]	>15

대역 최소의 잡음 지수는 소자의 특성과 밀접한 관계가 있으며, 이를 고려하여 우선 최소의 잡음 지수를 갖는 MMIC를 선정하였다. 이와 같이 선정하고 나면, 출력은 목표물의 거리를 고려하여 설정되게 되고, 이러한 출력이 단위 모듈 당 1 W 급으로 설정되었다. 다른 문제점으로는 이보다 출력이 커질 경우 제한된 폭에 실장할 수 없게 되므로, 이 점 또한 고려된 것이다. 주목할 것은 이 때 잡음 지수는 저잡음 증폭기 앞단에 놓이게 되는 수동 소자들의 손실을 고려하였을 때의 잡음 지수가 된다. 이와 같이 기본 소자가 선정되고 나면 나머지 부품들의 수배를 진행할 수 있다.

이를 위해 적절한 부품들을 수배하였다. 위상천이기는 Triquint사의 5비트 위상 천이기^[6]이며, 최소 위상 천이량은 11.25°가 된다. 또한, 이것의 삽입 손실은 대역 내에서 약 8 dB이며, 위상 변화에 따른 진폭 변화의 최대폭은 1 dB 이내이다. 디지털 가변 감쇠기는 최소 손실은 약 6 dB 정도이며, 5 비트 디지털 형이며, 두 개의 제어 전압에 의해 최대 30 dB 정도의 감쇠도를 가지고 이산적으로 가변시킬 수 있으며, GaAs 공정으로 제작된 HMC939를 이용하였다^[7]. 송신 및 수신 채널의 선정은 SPDT(Single Pole Double Throw) 스위치에 의하여 선정하며, 손실이 적은 PIN 다이오드로 제작된 MMIC 스위치를 사용하였다. 이것의 손실은 약 2 dB 이내이다^[8].

수신 채널은 잡음 지수 8 dB 이하, 수신 채널 이득은 전체 이득이 22 dB가 되도록 MMIC 부품을 선정하였다. 이 때 송수신 공통 채널인 위상 천이기와 가변 감쇠기의 손실 전력을 고려하였다. 수신 채널에 이용된 MMIC는 Mimix 사의 GaAs pHEMT로 제작된 20~40 GHz의 주파수 대역을 갖는 XLI000-BD^[9]로, 이것의 이득은 20 dB 잡음 지수는 2 dB 정도이며, 수신 채널 모두 같은 MMIC를 사용하였다. 이때 높은 이득으로 발진 및 부정합에 의한 발진 가능성을 고려하여, 그림 1과 같이 고정 감쇠기(ATT: attenuator)를 수신 채널에 삽입하였다^[10].

수신 채널의 저잡음 증폭기 전단에는 수신부의 보호를 위하여 리미터(limiter)가 필요하게 된다. 이러한 리미터용 다이오드로는 참고문헌 [11]에 근거하여 Si PIN 다이오드를 선정하였다. 가능한 PIN 다이오드의 수명 시간(life time)과 접합 커패시턴스

(junction capacitance)가 이 작은 것으로 선정하였다^[12].

송신 채널은 Ka 대역에서 입력 5 dBm일 때 출력 30 dBm을 출력하도록 부품을 선정하였으며, 이때도 마찬가지로 공통 채널의 감쇠를 고려하였다. 초단으로는 수신단과 같은 Mimix사의 저잡음 증폭기를 사용하였으며, 이것의 1-dB 역압점이 9 dBm으로 낮아, 별도의 구동증폭기 및 출력증폭기를 선정하였다^{[13][14]}. 구동증폭기는 약 20 dBm의 1-dB 역압점, 그리고 출력증폭기는 2W의 출력을 갖는 것을 선택하였다. 수신단과 마찬가지로 이것도 안정화 및 부정합을 고려하여, 수신단에서 사용된 것과 같은 고정감쇠기 MMIC를 삽입하였다. 서큘레이터(circulator)는 최대 출력 5 W로 송신 출력 1 W에 견딜 수 있는 것을 선정하였다^[15].

이상과 같이 선정된 부품들의 사양으로 부터 유도된 송신 및 수신 채널의 이득 및 잡음 지수와 1-dB 역압점이 표 1에 주어진 사양에 적합한지 링크 버짓(link budget)을 수행하였다^[16]. 송신 및 수신 채널의 해석 수행 결과는 표 2 및 3에 나타내었으며, 표 2 및 3에서 볼 수 있듯이 선정된 부품들은 표 1에 주어진 사양의 T/R 모듈을 구현하는 데 적합한 것으로 사료된다.

그림 2는 이와 같이 설계된 T/R 모듈의 구성을 보다 T/R 모듈 묶음(package)에 필요한 외벽의 두께를 최소화하기 위하여, 4개씩 한 묶음으로 구성하였으며, 안테나와 서큘레이터는 T/R 모듈 외부로 분리하

표 2. 송신 채널의 링크 버짓 결과(PS 및 VVA는 입력 P1dB, HPA는 포화전력)

Table 2. Link budget for transmit channel(in case of PS and VVA P1dB and Psat for HPA).

항목	이득[dB]	출력 전력[dBm]	P1dB[dBm]
입력		5.0	
PS*	-8	-3	-
VVA*	-5	-8	20
SW	-3	-11	26
AMP	18	7	9
ATT	-3	4	-
DRA	20	24	21
HPA**	19	34	34
CIR	-2	32	-
출력	36	32	

표 3. 수신 채널의 링크 버짓 결과

Table 3. Link budget of receive channel.

항목	이득[dB]	누적 잡음 지수[dB]
CIR	-2	2
Limiter	-2.5	4
LNA1	18	6.5
ATT	-3	6.54
LNA2	18	6.59
ATT	-3	6.59
LNA3	18	6.6
SW	-3	6.6
VVA	-4	6.6
PS	-8	6.6
총이득/잡음 지수	28.5	6.6

그림 2. 단일 모듈 4개로 구성된 quad-pack T/R 모듈
Fig. 2. Quad-pack T/R module composed of 4 unit T/R modules.

였다. CuW 재질의 캐리어(carrier)를 금도금하여 바닥재로 사용하고, 위에 링 프레임(ring frame)을 이용 뚜껑으로 사용했다. 기판은 DC 바이어스 및 제어 신호 연결 선로는 LTCC로 구성하였고, RF 연결은 5 mil 알루미늄 기판을 사용하였으며, LTCC 위에 RF 연결 선로로 활용하였다. 구성된 T/R 모듈은 총 두께가 4 mm임을 고려하여, 서클레이터의 높이가 4 mm 이하인 Ka 대역 서클레이터를 선택하였다.

이로써 좌우뿐만 아니라 상하로도 4~5 mm를 갖는 배열 안테나에 적층하여 사용할 수 있게 된다.

그림 3은 그림 1의 구성을 갖는 T/R 모듈이 평면 방향으로 전개된 모습의 대각 방향의 입체도이다. 4개의 묶음을 갖는 T/R 모듈의 위 아래로 적층으로 위아래로도 전개될 수 있게 된다. 이와 같이 집적된

그림 3. 4개의 묶음을 갖는 quad-pack의 대각 방향 입체도

Fig. 3. Cross-view of a 4 packs of unit T/R modules.

(a) 대각 방향 입체도

(a) Cross-view

(b) 평면도

(b) Top-view

그림 4. 4개 묶음을 갖는 Quad-pack에 대한 제어 회로 배치

Fig. 4. 4 packs of unit T/R modules with a control circuit.

T/R 모듈을 제어하기 위해서는 제어 회로가 필요하게 되는데, 이는 집적의 편의상 Quad-pack을 기준으로 구성하였다. 그림 4는 이러한 Quad-pack에 대한 제어 회로도 배치를 보여준다. 길이 방향으로로는 집적화에 문제점을 심각하지 않기 때문에, 제어 회로는 그림 4와 같이 T/R 모듈의 길이 방향으로 110 mm로 구성하였다.

Ⅲ. 개별 부품 시험

선정된 부품들을 이용하여 T/R 모듈 구성하기에 앞서, 선정된 개별 부품에 대하여 개별 소자 시험을 수행하였다. 이와 같은 단계를 거치는 이유로는, 우

그림 5. 테플론 기판의 50 옴 선로를 장착한 단위 소자 특성 측정용 모듈
Fig. 5. A module for the measurement of an embedding 50 ohm microstrip on teflon substrate.

선 선정된 Ka 대역 개별 부품의 제시된 규격이 환경이나 구성에 따라 상당한 변화를 가지고 있어 이의 검증이 필요하며, 두 번째는 이들의 제시된 결과들은 온 웨이퍼(on-wafer) 측정 결과인데, 외부 회로와 부품을 연결하거나 장착 시 와이어 본딩(wire bonding)이 요구되어 이로 인한 성능 열화 정도를 예측을 위해 필요하다.

개별 부품의 측정시 동축 커넥터를 이용하여 측정하게 되므로, 이의 손실 및 부정합 정도를 우선 측정하였다. 사용된 기판은 두께가 5 mil인 TLY-5 기판을 사용하였다. 그림 5는 50 ohm 선로 측정 사진이며, 시험 결과 동축 커넥터에 의한 손실은 개당 약 -1.3 dB의 손실을 가지고 있음을 파악하였다. 또한, 정합 정도는 약 16 dB의 반사 손실을 보임을 확인하

그림 6. 단위 소자 측정용 모듈 내 출력 증폭기 조립
Fig. 6. Power amplifier assembly in the coaxial component measurement module.

그림 7. 단위 소자 측정용 모듈 내 구동 증폭기 조립
Fig. 7. Driver amplifier assembly in the coaxial component measurement module.

였다.

이를 이용하여 출력증폭기를 측정하였다. 그림 6에는 이것의 조립 사진을 보여주며, 칩(chip)의 RF 연결 시 손실을 줄이기 위해 CPW 형태로 조립하였으며, 신호 선로에는 4개를, 접지 선로에는 2개를 이용하였다. DC 패드간 연결에는 3 mil 리본(gold ribbon)을 사용하였다. 측정 시 출력증폭기는 CW 동작 시 많은 전력을 소모하여 방열이 필요하므로 펄스 조건에서 측정하였다. 펄스는 PRF(Pulse Repetition Frequency) 25 kHz, 듀티 사이클(duty cycle) 10 %로 두고, 입력 전력은 -10~15 dBm으로 출력 전력을 측정하였다. 측정 결과, 이것의 전력 이득은 약 17 dB, 출력 전력은 15 dBm, 입력시 출력은 주파수 대역 내에서 32.25~36.88 dBm의 출력 변화를 보였다. 이것은 앞서의 커넥터로 인한 손실을 보상한 결과로 원하는 1 W 출력 이상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7은 구동증폭기의 조립 사진이다. 입력을 -10~10 dBm으로 두고 동일한 펄스 조건에서 출력은 대역 내에서 25.28~27.28.70 dBm을 얻을 수 있었으며 이 또한, 동축 커넥터의 손실을 보상한 값이며, 충분히 출력증폭기를 구동할 수 있음을 확인하였다.

수신 채널의 단품 시험은 리미터, 저잡음 증폭기에 대하여 시행하였다. 그림 8은 리미터의 회로도를 보였다. 송신 출력이 높은 편은 아니어서 리미터는 1단(single stage)으로 구성하였다. 시험 결과, 삽입 손실은 -2.7~-2.6 dB의 손실을 보였다. 이때 송출 전력 30 dBm 입력시 서클레이터의 손실을 고려하

그림 8. (a) 리미터 회로도, (b) 누설 출력 특성
Fig. 8. (a) Limiter circuit, (b) limiter output leakage power.

면, 전반사되어 수신부로 입력되는 최대 전력은 26 dBm으로 계산되어, 26 dBm 입력시까지 특성을 측정하였다. 결과, 누설 전력은 약 11.8 dBm 정도이며, 이것은 저잡음 증폭기의 최대 입력 전력보다 작은 값이어서 저잡음 증폭기 보호에 적절할 것으로 사료된다.

그림 9는 저잡음 증폭기를 조립한 사진이다. 측정 결과, 이득은 대역 내에서 약 19 dB로 평탄하였으며, 잡음 지수는 1.78 dB를 얻었다. 이 또한 커넥터 손실

그림 9. 저잡음 증폭기 조립 사진
Fig. 9. A photograph of assembled LNA.

표 4. 중심 주파수에서 비트당 감쇄 상태 측정
Table 4. Result of relative attenuation per bit at the center frequency.

비트	목표 감쇄[dB]	측정 감쇄[dB]
0	0	0.0
bit 1	1	1.2
bit 2	2	2.0
bit 3	4	3.8
bit 4	8	8.2
bit 5	16	16.3

을 보상한 값이다.

그림 10(a) 및 (b)는 공통 채널로 사용되는 SPDT 및 5 비트 가변감쇠기에 대한 조립도이다. SPDT의 경우 삽입 손실은 송신 및 수신 채널로 선정될 경우, 거의 같은 3.3 dB보다 적은 삽입 손실을 보였으며, 격리도는 모두 45 dB 이상을 보였다. 가변감쇠기는

(a) SPDT
(a) SPDT

(b) 5 비트 가변감쇠기
(b) 5 bit variable attenuator

그림 10. 공통 채널로 사용되는 개별 소자 조립도
Fig. 10. Discrete component in a common channel.

표 5. 목표 규격과 개별 부품 측정으로 도출된 T/R 모듈 예상 규격 비교

Table 5. Comparison of desired specification and expected specification calculated from the measured results of Ka band unit T/R module.

항목	목표 규격	단품 측정 결과
송신 출력[dBm]	>30	>32 dBm
송신 이득[dB]	20	17+17=34 dB>20 dB
최소 감쇠시 수신 이득 [dB]	>20	~37 dB
잡음 지수[dB]	<8	6.75dB
이득 조정 범위[dB]	15	>30 dB

그림 10(b)와 같이 조립하였으며, 비트 당 상대 감쇄를 중심 주파수에서 측정하였다 측정 결과, 목표치와 같은 감쇄를 보이며, 따라서 총감쇄는 30 dB 이상으로 표 1에 주어진 감쇄량을 만족하는 것을 알 수 있었다. 이것 또한 커넥터 손실을 보상한 결과이다.

공통 채널에 사용되는 위상천이기의 경우, 개별 부품 시험을 수행하지 않았다. 공통 채널의 위상천이기의 단품 위상 변화보다 전체 송수신 채널의 위상 변화가 중요하므로, T/R 모듈의 채널 시험 항목으로 고려하여 수행하였다.

이상의 결과를 바탕으로 목표 규격과 개별 측정 결과를 바탕으로 계산된 수신 채널 및 송신 채널의 T/R 모듈 구성 시 예상 규격을 정리하였다. 이것을 표 5에 나타내었으며, 개별 부품 측정 결과는 전체 T/R 모듈 구성 시, 원하는 T/R 모듈을 구성할 수 있음을 알 수 있다.

IV. T/R 모듈 구성 및 시험

앞서 개별 부품 시험 결과를 바탕으로 4개가 묶인 T/R 모듈의 조립된 사진을 그림 11에 보였다. T/R 모듈 폭의 제한으로 인해 MMIC 부품의 T/R 모듈 내 배치하는 모듈의 폭을 최소화하기 위해 길이가 길어지는 배치가 된다. 이와 같이 조립된 4개의 묶음으로 송수신 채널을 가지는 T/R 모듈의 단일 모듈의 송신 채널에 대하여 출력 전력을 시험하였다. 본 논문의 응용이 요구하는 펄스 구동은 중심 주파수에서 25 kHz PRF의 듀티 사이클 10 % 및 833 kHz PRF의 듀

그림 11. (a) 단위 모듈로 조립된 quad-pack T/R 모듈 사진, (b) RF 부

Fig. 11. (a) A photograph of quad-pack T/R module assembled using unit modules, (b) RF part.

티 사이클 33 %의 펄스들로 이에 대한 출력 전력을 시험하였다. 각 PRF에 대하여 출력 전력을 표 6의 행에 나타내었다. 이 때 가변감쇠기는 최소 손실을 갖도록 설정하고, 위상천이기는 모든 위상천이 비트를 0로 설정하고, 입력 전력은 5 dBm으로 하였다. 예상한 바와 같이 출력은 1 W를 상회하는 32 dBm을 얻었다. 또한, 각 PRF에서 중심 주파수에서 0.5 GHz로 상측과 하측으로 떨어진 주파수에서의 결과를 표 6의 열에 나타내었다. 높은 주파수에서 보다 큰 전력 값을 가지나, 대역 내에서 거의 균일한 31 dBm 이상의 출력을 얻는 것을 알 수 있다. 또한, 출력은 PRF에 관계없이, 또한 듀티 사이클 변화에 관계없이 같은 출력 전력을 보이는 것을 알 수 있다.

단위 모듈의 위상 천이 변화 결과를 측정하였다. 이는 표 7에 나타내었다. 이 결과로부터 비트당 위상천이기가 발생시키는 위상천이량과 거의 같은 크

표 6. 동작 대역 내 듀티 사이클에 따른 평균 출력
Table 6. Output power for duty cycle change in the operation frequency bandwidth.

Duty cycle	10 % (PRF 25 kHz)	33 % (PRF 833 kHz)
$f_c - 0.5$ GHz	31.2 dBm	30.7 dBm
f_c	31.4 dBm	31.0 dBm
$f_c + 0.5$ GHz	32.2 dBm	31.8 dBm

표 7. 중심 주파수에서 송신 채널의 비트에 따른 위상 변화

Table 7. A change in phase per bit of transmit channel at the center frequency.

bit	목표위상[deg]	측정위상[deg]	상대위상[deg]
0	0	-102.8	0
bit 1	11.25	-110.3	7.5
bit 2	22.5	-128.0	25.2
bit 3	45	-144.6	41.8
bit 4	90	175.1	82.1
bit 5	180	71.1	186.1

표 8. 중심 주파수에서 가변감쇠기에 따른 수신 채널 이득 및 잡음 지수

Table 8. Receive channel gain and noise figure for attenuation change of variable attenuator.

VVA bit	수신 이득[dB]	잡음 지수[dB]
0	22.16	5.75
bit 1	17.00	5.95
bit 2	12.33	6.42
bit 3	7.05	7.66

표 9. 목표 규격과 TR 모듈 측정 결과 비교

Table 9. Comparison of specifications and measurement results.

항목	목표 규격	측정 결과
송신 출력[dBm]	>30	>30
송신 이득[dB]	25	>25
최소 감쇠시 수신 이득[dB]	20	>20
잡음 지수[dB]	<8	7.66
이득 조정 범위[dB]	15	>15
전력 효율[%] @Duty 33 %	-	6.7

기의 위상천이를 주는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 종합하면 총 360°의 위상을 약 11.25°의 정확도로 증감할 수 있다. T/R 모듈의 위상 변화는 공통 채널에 있는 위상 천이기 MMIC의 위상 변화에 따라 결정됨을 확인하였다.

송신 채널의 시험을 완료 후 수신 채널의 이득을 측정하였다. 이 결과를 표 8에 나타내었다. 표 8의 결과는 공통 채널에 있는 가변감쇠기의 전압을 바꿔가면서 이득 및 잡음 지수를 측정한 결과이다. 표 8

에서 전체 수신 이득은 감쇠가 없을 때 최대값을 보이며, 그 값은 22.16 dB로 목표 이득 20 dB 이상임을 알 수 있다. 또한, 채널에서의 이득의 가변폭은 약 30 dB이지만 15 dB 까지 시험하였을 경우, 가변 이득 목표 규격을 만족함을 확인하였다. 또한, 동시에 이에 따른 잡음 지수의 변화를 보였다. 표 8에서 가변감쇠기의 이득이 나빠질수록 잡음 지수는 다소 나빠지지만 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이는 가변감쇠기의 이득이 나빠지더라도 초단 저잡음 증폭기의 이득이 충분하여 이의 효과가 거의 나타나지 않기 때문으로 사료된다.

이상과 같이 시험한 결과를 목표 사양과 같이 비교하여 표 9에 정리하여 나타내었다. 결과를 보면 제작된 T/R 모듈은 목표를 달성했음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ka 대역 위상 배열 레이더용 송수신 모듈의 설계 및 제작을 보였다. Ka 대역 T/R 모듈 구성시, Ka 대역의 특수성을 고려하여 5 비트 위상 천이기와 30 dB 디지털 가변감쇠기는 송수신 공통으로 사용하였으며, 서큘레이터는 T/R 모듈의 외부에 부착되는 형태로 구성하였다. 단위 안테나 당 송신 출력은 1 W, 잡음 지수는 8 dB로 설정하였다, 이와 같이 설계된 T/R 모듈 RF부의 크기는 5 mm×4 mm×57 mm이며, 이는 국내에서 제작된 T/R 모듈 중 가장 소형인 T/R 모듈로 예상된다.

설계된 T/R 모듈을 구현하기 위하여 T/R 모듈의 개별 MMIC 검증 후, 단위 T/R 모듈을 검증하였다. 송신부는 입력 5 dBm에서 출력 >30 dBm을 보였으며, 수신부는 잡음 지수 <8 dB, 이득 >20 dB를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd Edition, pp. 685-689, John Wiley & Sons Inc., NewYork, 1998.
- [2] B. A. Kopp, M. Borkowski, and G. Jerinic, "Transmit/receive module", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 827-834, Mar. 2002.
- [3] J. C. Rock, J. H. Mullines, J. P. Booth, and T. Hud-

- son, "The past, present, and future of electronically steerable phased arrays in defense applications", *Aerospace Conference 2008*, pp. 1-7, Mar. 2008.
- [4] 김동윤, 정민길, 김상근, 전상미, 나형기, 백승훈, 안창수, 김선주, "능동위상 배열 레이더용 X-대역 T/R 모듈 개발", *한국전자과학회논문지*, 20 (12), pp. 1243-1251, 2009년 12월.
- [5] L. P. Cecchini, E. Pizzin Grilli, S. Russo, and U. F. D'Elia, "mmw Active phased array seeker project for hit to kill engagement", *Radar Conference 2008*, pp. 1-6, May 2008.
- [6] Triquint datasheet, *35 GHz Phase Shifter TGP2102*, Aug. 2008.
- [7] Hittite Microwave Corporation, HMC939, 1 dB LSB GaAs MMIC 5-bit digital attenuator, 0.1~40 GHz, Oct. 2010.
- [8] Triquint datasheet, *Wideband mmWave VPIN SPDT Switch, TGS4301*, Aug. 2008.
- [9] Mimix Broadband Inc., "20~40 GHz GaAs MMIC low noise amplifier", *XLI000-BD*, Jul. 2007.
- [10] Hittite Microwave Corporation, "Wideband fixed attenuator family, DC-50 GHz", *HMC650-658*, Dec. 2009.
- [11] S. S. Yang, T. Y. Kim, D. K. Kong, S. S. Kim, and K. W. Yeom, "A novel analysis of a Ku band planar p-i-n diode limiter", *IEEE Trans.*, vol. 57, no. 6, pp. 1447-1460, Jun. 2009.
- [12] Skyworks Solutions, Inc., *CLA Series: Silicon Limiter Diodes, Packaged and Bondable Chips*, Sep., 2009.
- [13] Triquint Semiconductor, *19~38 GHz Medium Power Amplifier, TGA4036*, May 2009.
- [14] Triquint Semiconductor, *Ka Band 2 W Power Amplifier, TGA4516*, May 2009.
- [15] Raditek International Inc., *Microstrip Drop-in Circulators*, Oct. 2009. <http://www.raditek.com/>.
- [16] 엄경환, 능동초고주파회로설계입문(개정판), 홍릉과학출판사, 2008년 6월.

오 현 석

계

2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 설계

엄 경 환

1976년~1980년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)
 1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)
 1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 선임연구원 (MIC팀 팀장)
 1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원
 1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원
 1991년 8월: (주)LTI
 1995년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계

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

이 기 원

2007년 8월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2009년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2009년 9월~현재: (주)유텔 기술연구소
 [주 관심분야] 밀리미터파 회로, 마이크로파 능동 및 수동소자 설계 및 해석

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 능동위상 배열 레이더

남 병 창

1999년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)
 2000년 5월~2001년 4월: (주)케이엠더블유 기술본부 주임연구원
 2001년 6월~2004년 4월: (주)코스페이스 통신연구소 주임연구원
 2004년 11월~현재: (주)유텔 기술

연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 위성통신 및 레이더 송수신기 설계

이 상 주

1986년 3월: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 3월: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
 1990년 4월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 레이더, 안테나 및 송수신기