

# X 대역 타일형 능동 송수신 모듈 설계

## A Design of X-Band Tile Type Active Transmit/Receive Module

하정현 · 문주영 · 이기원\* · 남병창\* · 윤상원

Jung-Hyen Ha · Ju-Young Moon · Ki-Won Lee\* · Byung-Chang Nam\* · Sang-Won Yun

### 요 약

X 대역에서 능동 위상 배열 레이더에 적용할 수 있는 타일형 능동 송수신 모듈을 구현하였다. 제안한 타일형 구조의 구현을 위한 수직 연결은 fuzz button을 이용한 solderless 방식으로 삽입 손실은 0.6 dB, 반사 손실의 VSWR은 1.7 이하를 만족하며 X 대역에서 약 30 %의 대역폭을 가지는 광대역 특성을 가진다. 광대역 특성을 가지는 수직 연결 구조를 이용하면 수직 연결 시에 발생할 수 있는 부정합을 최소한으로 하여 우수한 이득 평탄도를 가지는 타일형 구조의 송수신 모듈을 구현할 수 있다.

### Abstract

A tile type active T/R(Transmit/Receive) module for X-band active array radar is demonstrated in this paper. Proposed tile type structure based on fuzz button solderless vertical interconnection shows wide band characteristic of about 30 % bandwidth in X-band with insertion loss of below 0.6 dB and input and output VSWR of less than 1.7. Moreover, the mismatching generally appeared in the vertical interconnection which shown wide band characteristic can also be minimized and, therefore, good gain flatness can be achieved.

Key words : Tile Type T/R Module, Solderless Interconnection, Vertical Interconnection, Stack Structure

### I. 서 론

현재의 레이더 시스템은 다수의 기능이 복합되어 있기 때문에 하나의 무기 체계로 인식하고 있다. 따라서 다양한 기능을 하나의 레이더 시스템에서 구현하기 위하여 레이더 시스템은 고집적화, 소형화 되고 있다. 이와 같은 레이더 시스템의 추세에 따라 레이더 시스템의 핵심 구성 요소인 송수신 모듈도 고집적화, 소형화, 경량화 되고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

송수신 모듈이 소형화됨에 따라 송수신 모듈의 방식 또한 변화되고 있다. 과거의 TWT, Klystron 등을 사용하여 다수의 방사 소자에서 방출되는 출력 전력을 하나의 고출력 트랜스미터로 구동하던 수동

송수신 모듈은 점차 반도체 증폭기 등을 사용하여 각각의 방사 소자마다 송수신 모듈을 연결하여 구동하는 능동 송수신 모듈 형태로 진화되고 있다. 수동 송수신 모듈에 비하여 능동 송수신 모듈은 물리적인 장점뿐만 아니라 저 전력으로 구동할 수 있어 더욱 각광받고 있다<sup>[3]</sup>.

일반적인 능동 배열 레이더는 수백~수천 개의 송수신 모듈로 구성되어 있다<sup>[4]</sup>. 송수신 모듈의 가격, 무게, 부피 등은 전체 레이더 시스템을 구성하는데 중요한 요소로서, 이런 지표들을 줄이면서 송수신 모듈의 출력 전력을 증가시키고, 잡음 지수를 줄이는 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 송수신 모듈의 패키징 개념은 이 세 가지 인자를

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

\*(주)유텐(U-Tel Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20101102-155

· 교신저자 : 문주영(e-mail : dialect@sogang.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 12월 8일

줄이는 가장 결정적인 요소로서 특히 무게, 부피 등의 물리적인 제약이 심한 에어본용 레이더의 경우에는 곡선 형태의 표면에 적용할 수 있는 타일형의 송수신 모듈 구조가 기존의 브릭형 구조보다 각광받고 있다<sup>[5],[6]</sup>.

본 논문에서는 타일형 구조의 능동 송수신 모듈을 제안하고 타일형 구조를 구현하는데 필요한 핵심 소요 기술인 수직 연결 기술을 연구하였다. 이를 기반으로 타일형 능동 송수신 모듈을 설계, 구현하였다.

## II. 타일형 능동 송수신 모듈 설계

일반적인 능동 송수신 모듈의 구조는 방사 소자 포트 쪽은 송신 경로와 수신 경로를 격리시키고, 송신경로의 누설되는 전력으로부터 수신 경로를 보호하기 위하여 서클레이터를 사용한다. 하지만 상용 제품으로 나오는 서클레이터의 크기가 타일형 송수신 모듈 내부의 공간보다 크기 때문에 내부에 붙이지 못하여 서클레이터 대신 스위치를 사용한다. 제안하는 타일형 능동 송수신 모듈은 그림 1과 같다.

또한 능동 위상 배열 레이더 시스템에 적용함에 있어서 각각의 송수신 모듈은 서로 이웃하는 송수신 모듈에 열적, 전기적인 영향을 끼치게 되어 최소한의 영향을 알 수 있도록 2x2 서브 배열의 형태로 타일형 능동 송수신 모듈을 구현한다. 제안한 송수신 모듈은 그림 2와 같다.

제안한 타일형 능동 송수신 모듈은 세 층의 레이어 기판과 두 층의 프레임 기판으로 구성된다. 레이어 기판에는 MMIC 소자가 장착되고 전송 선로가 구현되어 있고, 프레임 기판은 레이어 기판에 장착된 MMIC를 보호할 수 있는 높이를 유지하면서 수직 연결을 할 수 있게 해주는 역할을 한다.

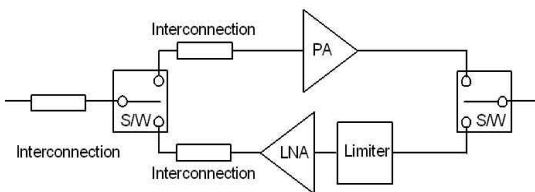


그림 1. 제안한 타일형 능동 송수신 모듈 구조  
Fig. 1. Schematic of proposed tile type active t/r(transmit/receive) module.

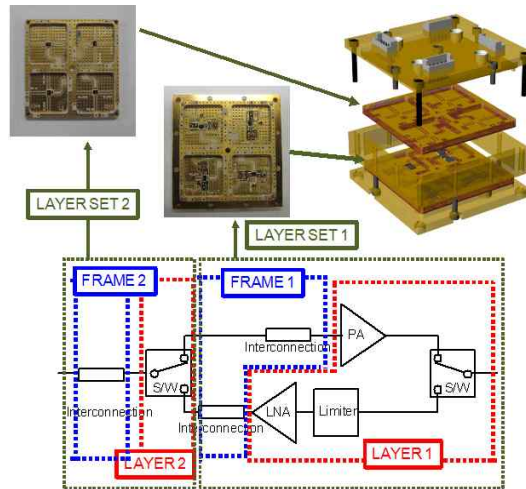


그림 2. 제안한 타일형 능동 송수신 모듈  
Fig. 2. Proposed tile type active t/r module.

### 2-1 수직 연결

송수신 모듈의 구조가 브릭형 구조에서 타일형 구조로 발전하면서 적층된 각 기판을 연결하는 수직 연결은 타일형 송수신 모듈을 구현하는데 있어 필수 소요 기술이다. 수직 연결 기술에는 기판을 접착하여 적층하는 soldering 방식과 접착하지 않고 적층하는 solderless 방식이 있다. 본 논문에서는 수직 연결 방식으로 구현과 시험, 검증 시에 편리하고 문제점을 쉽게 찾을 수 있는 solderless 방식을 결정하였다<sup>[7]</sup>. Solderless 방식은 적층되는 기판을 접착하지 않는 방법이므로 적층되는 기판을 접촉할 수 있는 매개체를 사용한다.

본 논문에서는 그림 3과 같이 fuzz button을 사용하여 solderless 방식의 수직 연결을 사용하였다. Fuzz button은 Be-Cu 합금에 금도금을 한 와이어를 원통형 모양으로 뭉쳐서 탄성에 의하여 접촉을 한다. 사용한 fuzz button은 X 대역에서의 삽입 손실은 약 0.3

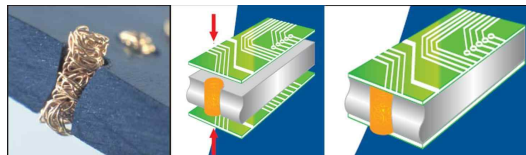


그림 3. Solderless 방식의 수직 연결  
Fig. 3. Solderless type vertical interconnection.

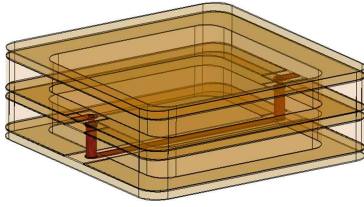


그림 4. 수직 연결 시뮬레이션 구조  
Fig. 4. Structure of vertical interconnection.

표 1. 수직 연결 설계 목표

Table 1. Target of vertical interconnection.

Insertion loss	< 1.2±0.2 dB
Return loss	> 12±1 dB
	< 1.7(VSWR)

dB이고, 반사 손실은 15 dB 이상으로 RF 수직 연결 용으로 충분히 사용할 수 있을 뿐만 아니라 수 암페어의 전류를 수용할 수 있어 DC 바이어스를 위한 수직 연결에도 사용할 수 있다.

수직 연결 시뮬레이션은 Ansoft사의 EM 시뮬레이터인 HFSS V.11을 사용하였다. 적층 시에 발생하는 부정합을 예방하기 위하여 광대역 특성을 가지도록 하고 시험의 편의를 위하여 그림 4와 같이 백투백 형태로 설계하였다. 시뮬레이션을 통하여 설정한 설계 목표는 표 1과 같다.

그림 5는 수직 연결 시험을 위해 제작한 시험 시료이다. 왼쪽 1~5번까지 사진은 시험 시료의 제작 과정이다. 그림 6은 수직 연결을 위하여 fuzz button이 삽입되어 있는 프레임 기판의 절단면이다.

그림 7은 수직 연결 시험 결과로 9.5 GHz 대역의 약 500 MHz 구간에서 삽입 손실이 약 0.5 dB의 추가 손실이 발생하는 부분을 제외하고는 설계 목표를 만족하는 것을 확인하였다.

### 2-2 타일형 능동 송수신 모듈 설계

송수신 모듈의 규격은 레이더 요구 조건과 설계 변수를 바탕으로 전체 레이더 시스템의 규격과 피드백을 이루면서 산출된다. 따라서 임의의 레이더 시스템을 설정해 놓고 레이더 방정식에 의해 송수신 모듈 하나의 규격을 산출한다. 본 논문에서 구현할 타일형 능동 송수신 모듈을 적용할 레이더 시스템은

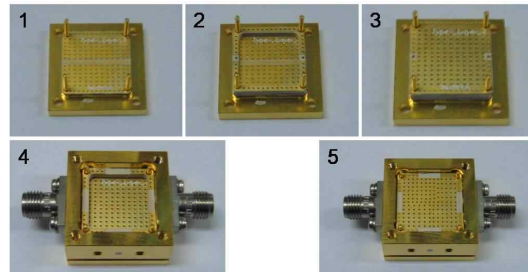


그림 5. Solderless 방식의 수직 연결 시험 시료  
Fig. 5. Solderless type vertical interconnection test fixture.

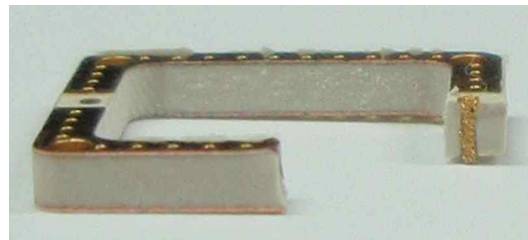


그림 6. 프레임 기판의 수직 단면도  
Fig. 6. Cross section of FRAME PCB.

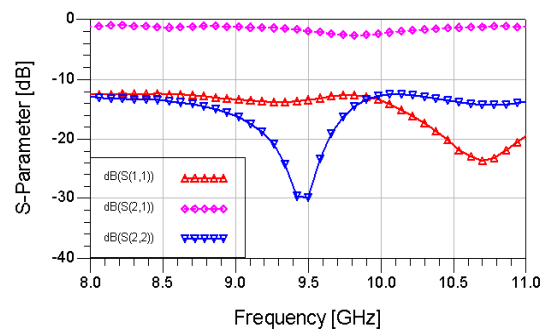


그림 7. 수직 연결 시험 결과  
Fig. 7. Results of vertical interconnection.

표 2. 레이더 요구 조건

Table 2. Radar requirements.

Operating frequency [GHz]	9.5	
Detection range, $R_{max}$ [km]	10	
RCS, $\sigma$ [m <sup>2</sup> ]	1	
Maximum target velocity, $v$ [m/s]	500	
Search coverage [°]	Azimuth	90
	Elevation	90

표 3. 설계 변수

Table 3. Design parameter.

(S/N) [dB] [Target model=SW4, $P_{\bar{a}}=90\%$ , $P_{\bar{a}}=10^{-7}$ ]	14
System loss, $L_s$ [dB]	10
Frame time, $t_f$ [s]	15
누적 error, $E(n)$	1
볼츠만 상수, $k$ [J°/K]	$1.38 \times 10^{-23}$
$T_0$ [°K]	300
Search solid angle, $\Omega$	6.18

표 4. 사용 소자의 특성

Table 4. Characteristics of MMICs.

	모델명 [제조 회사]	전기적 특성
전력 증폭기	CHA5014 [UMS]	Gain: 20 dB P1dB: 29 dBm Input return loss: 12 dB Output return loss: 12 dB
저잡음 증폭기	TGA8399B-SCC [Triquint semiconductors]	Gain: 26 dB Noise figure: 1.8 dB Input return loss: 12 dB Output return loss: 12 dB
스위치	MA4SW210B-1 [M/A COM]	Insertion loss: 1 dB Isolation: 36.2 dB Input return loss: 12 dB
리미터	TGL2201 [Triquint semiconductors]	Insertion loss: 0.5 dB Maximum Pout: 20 dBm Input return loss: 20 dB Output return loss: 20 dB

X 대역에서 약 10%의 대역폭을 가지는 시스템으로 가정하였다. 가정한 레이더 시스템의 요구 조건을 표 2, 설계 변수를 표 3에 정의하였다. 방사 소자의 격자 구조는 정사각형 구조로 설정하였다. 제안한 타일형 능동 송수신 모듈을 구현하는데 사용할 소자

의 특성은 표 4에 정리하였다.

표 2, 표 3에서 가정한 레이더 요구 조건과 설계 변수를 식 (1)의 레이더 방정식에 대입하여 능동 송수신 모듈의 규격을 산출한다<sup>[8]</sup>.

$$R_{max}^4 = \frac{P_{av} \cdot G \cdot A_{effect} \cdot \sigma \cdot E(n)}{(4\pi)^2 \cdot kT_0 \cdot NF \cdot L_s \cdot (S/N)} t_0 \quad (1)$$

이 때,  $P_{av} = P_{ele} \times n$ ,  $A_{effect} = A_{ele} \times n \times \eta_G$  이다.

- $P_{av}$ : 전체 송수신 모듈 출력 전력
- $P_{ele}$ : 개별 송수신 모듈 출력 전력
- $A_{effect}$ : 유효 aperture 면적
- $A_{ele}$ : 개별 aperture 면적
- $\eta_G$ : Antenna efficiency
- $n$ : 배열 개수

식 (1)의 설계 변수 중  $t_0$ 와  $G$ 를  $t_0 = t_f \frac{\Delta\Omega}{\Omega}$ ,  $G = \frac{4\pi}{\Delta\Omega} \cdot \eta_G$ 로 치환하고, 레이더 시스템이 탐지하여야 하는 표적의 속도를 고려하면  $R_{max} = R_{det} + vt_f$ 로 나타낼 수 있고, 안테나 효율인  $\eta_G$ 는 레이더 시스템을 이루는 전체 방사 소자가 갖는 값을 개별 방사 소자가 갖는 값과 같다고 하면 식 (1)은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_{av} \cdot A_{effect}}{NF} = \frac{4\pi \cdot kT_0 \cdot L_s \cdot (S/N) \cdot \Omega}{\sigma \cdot t_f} \cdot (R_{det} + vt_f)^4 \quad (2)$$

표 2, 표 3에서 가정한 레이더 요구 조건과 설계 변수와 전력 규격을 대입하면  $\frac{P_{av} \cdot A_{effect}}{NF} = -2.97$  [dB]이 된다. 식 (1)에서 가정한  $P_{av} = P_{ele} \times n$ ,  $A_{effect} = A_{ele} \times n \times \eta_G$  두 식의 양변을 곱하여  $n$ 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n^2 = \frac{P_{av} \times A_{effect}}{P_{ele} \times A_{ele} \times \eta_G} = \frac{\left(\frac{P_{av} \times A_{effect}}{NF}\right) \cdot NF}{P_{ele} \times A_{ele} \times \eta_G} \quad (3)$$

표 5는 사용 소자의 특성을 바탕으로 산출한 타일형 능동 송수신 모듈의 단위 모듈 단계별 전력 규격이다. 전력 규격에 마진을 두기 위하여 각 소자 사이

표 5. 단위 모듈 전력 규격

Table 5. Power specification of unit module.

송신 경로 [입력 전력: 15 dBm]						수신 경로					
소자		이득 [dB]		전력 [dBm]		이득 [dB]		잡음 지수 [dB]		소자	
		개별	누적	개별	누적	개별	누적	개별	누적		
1	전송 선로	-0.5	-0.5	-	14.5	-0.5	-0.5	0.5	0.50	전송 선로	1
2	수직 연결	-0.5	-1.0	-	14.0	-1.0	-1.5	1.0	1.00	스위치	2
3	스위치	-1.0	-2.0	-	13.0	-0.5	-2.0	0.5	2.00	리미터	3
4	수직 연결	-0.5	-2.5	-	12.5	26.0	24.0	1.8	3.80	LNA	4
5	HPA	17.0	14.5	30.0	29.5	-0.5	23.5	0.5	3.81	수직 연결	5
6	스위치	-1.0	13.5	-	29.0	-1.0	22.5	1.0	3.81	스위치	6
7	전송 선로	-0.5	13.0	-	28.5	-0.5	22.0	0.5	3.81	수직 연결	7
						-0.5	21.5	0.5	3.82	전송 선로	8
전체 경로											
			13.0		28.5				3.81	전체 경로	

의 전송 선로와 수직 연결은 일괄적으로 0.5 dB 손실을 적용하였다. 식 (3)에서 안테나 효율  $\eta_G$ 는 Taylor weighting 40 dB/5에 의해  $\eta_G=0.588$ 이라 하면 개별 능동 송수신 모듈의 규격인 방사 소자의 면적( $A_{ele}$ ), 출력 전력( $P_{ele}$ )와 잡음 지수(NF)로부터 배열 개수 ( $n$ )을 구할 수 있다<sup>[8]</sup>. 이 때 중심 주파수 9.5 GHz에 대한 파장의 길이는  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{9.5 \times 10^9} = 0.0316$  (m) 이므로 방사 소자의 면적( $A_{ele}$ )은  $A_{ele} = \left( \frac{\lambda}{1 + SIN\frac{\pi}{2}} \right)^2 = \left( \frac{0.0316}{1+1} \right)^2 = 0.000249$  (m<sup>2</sup>)이 되고, 표 5에 의하여 출력 전력( $P_{ele}$ )은 28.5 dBm이고, 잡음 지수(NF)는 3.82 dB가 된다. 이를 식 (3)에 대입하면 가정된 레이더 시스템의 전체적인 규격이 된다. 제안한 타일형 능동 송수신 모듈이 적용될 가상의 레이더 시스템의 전체적인 규격은 표 6과 같다.

사용 소자의 단품 측정 결과와 수직 연결 측정 결과를 사용하여 Agilent사의 ADS2008로 설계 목표 규

격이 만족하는 것을 모듈 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

### III. 타일형 능동 송수신 모듈 시험

그림 8은 제작한 2x2 배열 타일형 능동 송수신 모듈이다. 시험에는 Agilent사의 PNA 네트워크 분석기 E8363B, P 시리즈 싱글 채널 파워 미터 N1911A, 노이즈피겨 분석기 N8975A를 사용하였다.

제작한 타일형 능동 송수신 모듈의 네 개의 채널 중 임의의 두 개의 채널에 대한 시험 결과이다. 그림 9는 송신 경로의 경로 이득과 반사 손실을 측정 한 결과이고, 그림 10은 두 개 채널의 출력 전력을 측정 한 결과로 표 6의 목표 규격을 만족하였다.

그림 11은 수신 경로의 경로 이득과 반사 손실을 측정 한 것이고, 그림 12는 네 개의 채널에 대한 잡음 지수를 측정 한 것이다. 잡음 지수 항목은 목표 규격을 만족하였고, 반사 손실은 8.5 GHz를 중심으로 약 500 MHz 대역에서 2.5의 VSWR 값을 가지는 부분은

표 6. 타일형 능동 송수신 모듈 목표 규격

Table 6. Target power spec. of t/r module.

배열 개수(n)		384개
송신 경로	경로 이득	13±1 dB
	출력 전력	28.5±1 dBm
	출력 반사 손실(VSWR)	< 2.0
수신 경로	경로 이득	21.5±1 dB
	잡음 지수	< 3.82 dB
	입력 반사 손실(VSWR)	< 2.0

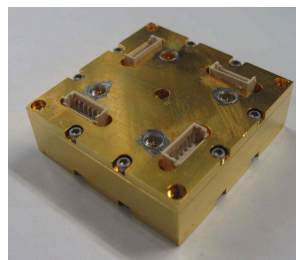


그림 8. 2x2 배열 타일형 능동 송수신 모듈  
Fig. 8. 2x2 array tile type active t/r module.

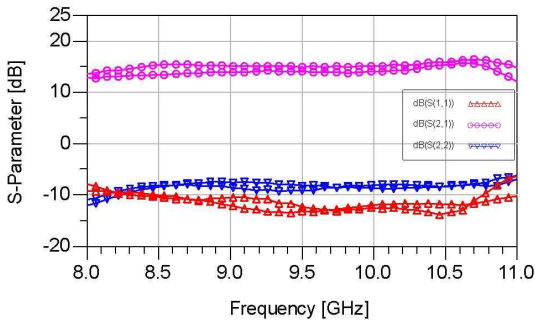


그림 9. 송신 경로 시험 결과[이득, 반사 손실]  
Fig. 9. Results of transmit path[gain, return loss].

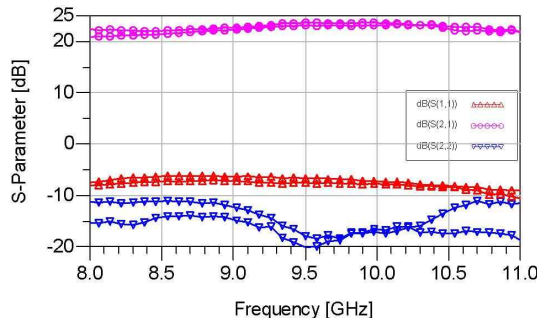
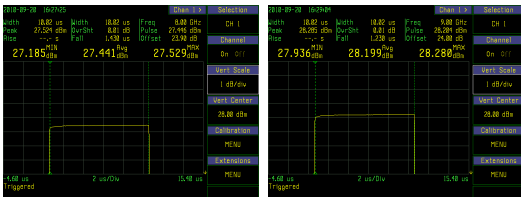
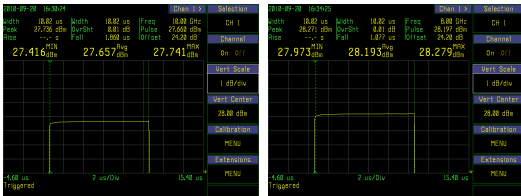


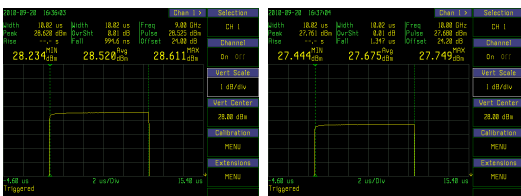
그림 11. 수신 경로 시험 결과[이득, 반사 손실]  
Fig. 11. Result of receive path[gain, return loss].



(a) 8.0 GHz[채널 1]      (b) 9.0 GHz[채널 1]  
(a) 8.0 GHz[channel 1]      (b) 9.0 GHz[channel 1]



(c) 10.0 GHz[채널 1]      (d) 8.0 GHz[채널 2]  
(c) 10.0 GHz[channel 1]      (d) 8.0 GHz[channel 2]



(e) 9.0 GHz[채널 2]      (f) 10.0 GHz[채널 2]  
(e) 9.0 GHz[channel 2]      (f) 10.0 GHz[channel 2]

그림 10. 송신 경로 시험 결과[출력 전력]  
Fig. 10. Results of transmit path[output power].

제외하고 목표 규격을 만족하였다.

송신 경로와 수신 경로 상에는 두 번의 수직 연결이 포함되어 있지만, 광대역 특성을 갖는 수직 연결로 인하여  $\pm 1$  dB 이내의 경로 이득 평탄도를 갖는 것을 확인하였다.

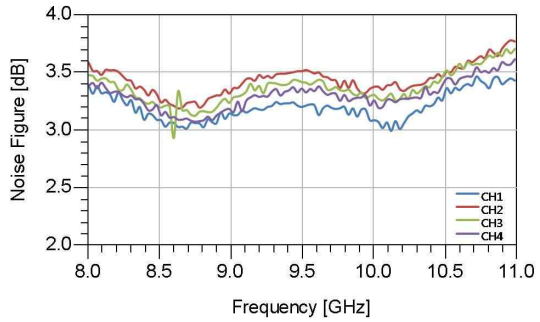


그림 12. 잡음 지수 시험 결과  
Fig. 12. Result of noise figure.

#### IV. 결 론

레이더 시스템의 다기능화, 고집적화 및 소형화 추세에 따라 레이더 시스템의 필수 구성 요소인 송수신 모듈도 고집적화, 소형화가 절실히 요구되면서 물리적인 제약을 해결할 수 있는 방법으로 타일형 능동 송수신 모듈이 대두되고 있다. 본 논문에서는 타일형 구조를 구현하기 위한 수직 연결에 대한 연구를 하고, 이를 바탕으로 X 대역의 타일형 능동 송수신 모듈을 구현하였다. 광대역 특성을 가지는 수직 연결 구조는 경로 상에서 적층 시 발생할 수 있는 부정합을 최소화 하여 우수한 경로 이득의 평탄도 특성을 유지할 수 있다. 이러한 타일형 구조는 비단 레이더 시스템뿐만 아니라 민수용 송수신기에 적용하여 시스템의 소형화, 고집적화시킬 수 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] Eli Brookner, "Phased array for the new milleni-



um", *Chinese Institute of Electronics International Conference on Radar*, pp. 34-41, Oct. 2001.

[2] John Wooldridge, "High density microwave packaging for t/r modules", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 181-184, Jun. 1995.

[3] D. N. Mcquiddy Jr., R. L. Gassner, P. Hull, S. Mason, and J. M. Bedinger, "Transmit/receive module technology for x-band active array radar", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, pp. 308-341, Mar. 1991.

[4] Bruce A. Kopp, Craig R. Moore, and Robert V. Coffman, "Transmit/receive module packaging: electrical design issues", *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, vol. 20, no. 1, pp. 70-80, 1999.

[5] Mark S. Hauhe, John J. Wooldridge, "High density packaging of x-band active array modules", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - PART B*, vol. 20, no. 3, pp. 279-291, Aug. 1997.

[6] Y Mancuso, "Thales components and technologies for T/R modules", *Microwave Integrated Circuits Conference 2008. EuMIC 2008*, pp. 270-273, 2008.

[7] John Wooldridge, "Solderless interconnects for 3-D microwave packaging", *Electrical Performance of Electronic Packaging*, pp. 181-182, 1995.

[8] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems 3Ed.*, McGraw Hill, pp. 30-94, pp. 620-646, 2001.

### 하 정 현



2009년 2월: 순천향대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF 시스템 설계

### 이 기 원



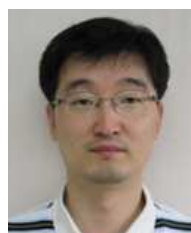
2007년 8월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2009년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2009년 9월~현재: (주)유텔기술연구소  
 [주 관심분야] 밀리미터파 회로, 마이크로파 능동 및 수동 소자 설계 및 해석

### 문 주 영



2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 2003년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2003년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 밀리미터파 회로 및 시스템 설계, 레이더 송수신기 설계

### 남 병 창



1999년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)  
 2000년 5월~2001년 4월: (주)케이엠펙스 기술본부 주임연구원  
 2001년 6월~2004년 4월: (주)코스페이스통신연구소 주임연구원  
 2004년 11월~현재: (주)유텔기술연구소 책임연구원  
 [주 관심분야] 위성 통신 및 레이더 송수신기 설계

윤 상 원



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1984년 2월: University of Texas at Austin (공학박사)

1984년 9월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계, RF 시스템