

Ka 대역 도로 감시 레이더를 위한 송수신 시스템 연구

정회원 신승하*^o, 종신회원 전계석**

A Study of Transceiver System for Ka-band Road Watch Radar

Seung-ha Shin*^o Regular Member, Gye-suk Jun** Lifelong Member

요약

본 논문에서는 도로 장애물 감시 레이더용 Ka 대역 송수신기를 설계 및 제작하였다. 도로 장애물 감시 레이더용 송수신기는 파형발생기, 주파수발생기, IF 송수신기, RF 상하향 변환기로 구성되어 있다. 송수신기는 탐지 거리별로 모드를 3가지로 구분하여 운용되며 이 때 Ka 대역에서 150MHz의 대역폭을 유지한다. 송신 출력은 22dBm 이상이며, 수신 이득은 30dB, 잡음 지수는 6dB인 성능을 얻었다. 수신 동적 범위는 63.28dB 이며, 수신 I/Q 채널 간 진폭 오차는 0.3dB, 위상 오차는 1.74도를 보였다. 시험 결과, 송수신기는 펄스 도플러 형태의 도로 감시 레이더에서 요구되는 전기적인 성능을 만족하였음을 확인하였다.

Key Words : Transceiver, Radar, Waveform, LFM, Doppler Effect

ABSTRACT

In this paper, Ka-band transceiver for road watch radar system is designed and fabricated. The transceiver for road watch radar system is composed of waveform generator, frequency generator, IF transceiver and RF up/down converter. The transceiver especially has 3 different waveform mode for target detection range. The transceiver had over 150 MHz bandwidth in Ka-band and 22 dBm output power. The receiver gain and noise figure was 30 dB and 4 dB respectively. The receive dynamic range was 63.28dB and amplitude imbalance and phase imbalance of I/Q channel was 0.3 dB and 1.8 degree respectively. The transceiver meets the required electrical performances through the individual tests.

I. 서론

도로 감시 레이더는 도로상에 전자파를 송신한 후 장애물로부터 반사되어 돌아오는 전자파를 측정하여 도로상에 출현한 장애물을 탐지하고 이를 감지할 수 있도록 하는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 차량용 전방감시 레이더나 도로 상태 감시용 레이더가 FMCW(Frequency Modulated Continuous-wave)나 CW를 이용한 단순한 도로상의 차량 이동량 감시 및 속도 측정에 국한되었던 것을 펄스 도플러 형태의 레이더를 사용하여 도로상에서 안전을 위협하는 장애물

의 출현을 감시하고, 뿐만 아니라 이동 차량에 대한 감시 및 노면의 상태 등을 탐지할 수 있다^{[1][2]}. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 기존의 CW 방식의 레이더와는 다른 설계 접근이 필요하다. 근거리에서 작은 표적들을 지상의 클러터들과 구분하여 정지 및 움직이는 상태에 대해서 정보를 얻기 위해서는 밀리미터파 주파수대를 사용한 펄스 도플러 방식의 레이더의 운용이 필요하다^[4]. 또한 제한된 송신 전력 내에서 거리 분해능을 높이기 위해서는 광대역 선형 첩변조 파형을 발생하고 이를 송수신할 수 있어야 한다^[5].

본 논문에서는 Ka 대역 도로 감시 레이더용 송

* 본 연구는 2011년도 스마트 하이웨이 사업단으로부터 지원받아 수행된 연구임

* 경희대학교 전자공학과(franksab@hanmail.net), (° : 교신저자)

** 경희대학교 전자전파공학과(gsjun@khu.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-09-390, 접수일자 : 2011년 9월 6일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 14일

수신기를 설계하고 제작하였다. 본문의 II장에서는 송수신기의 전반적인 설계에 대해 기술하였고, III장에서는 송수신기의 제작 및 시험 결과를 제시하였다.

II. 송수신기 설계

2.1 송수신기 구조 및 개발 목표 규격

본 논문에서 제안하는 Ka 대역 송수신기가 적용될 도로 장애물 감지 레이더 시스템은 그림 1과 같이 안테나, 송수신기, 그리고 신호처리기로 구성된다. 안테나는 웨이브가이드 슬롯 어레이 방식으로 Ka 대역 레이더 신호를 방사하고, 장애물과 같은 표적에 맞고 돌아오는 반사 신호를 수신하며 신호 처리기는 송수신기로부터 전달된 I 및 Q 신호를 AD 변환하고 신호 처리하는 역할을 수행한다.

거리 30m~1km 까지를 기준으로 식 (1)의 레이더 방정식으로부터 레이더 구성품들에 대한 사양을 도출하여 그 중 송수신기에 대한 목표사양을 표 1에 나타내었다.

$$R_{max} = \left[\frac{P_{av} \lambda^2 G^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}} \right]^{1/4} \quad (1)$$

여기서 G 는 $4\pi A/\lambda^2$ 이며, A 는 안테나의 단면적, σ 는 표적단면적, S_{min} 은 최소 탐지레벨로 $kT_o B_n F_n (S_o/N_o)_{min}$, B_n 은 대역폭, F_n 은 잡음지수이다³⁾.

이 때 안테나는 이득이 32~37dBi 이상이고 신호 처리기에서의 신호대 잡음비는 12dB 이상인 경우에

표 1. 도로 감지 송수신기 개발 목표 사양
Table 1. The specification of transceiver

| 순위 | 항목 | 목표 사양 |
|----|--------------------|--------------------|
| 1 | RF Frequency | Ka-band (34.5 GHz) |
| 2 | Bandwidth | 150 MHz |
| 3 | 송신 이득 | 30 ± 1.5dB |
| 4 | 수신 이득 | 30 ± 1.5dB |
| 5 | P1dB | 20 dBm 이상 |
| 6 | VSWR | 2.0 : 1 |
| 7 | Tx to Rx Isolation | 50 dBc |
| 8 | Noise Figure | 6 dB |
| 9 | Spurious | -40 dBc |
| 10 | Dynamic Range | 50 dB |
| 11 | 출력 파형 | 칩, (3 mode) |
| 12 | 채널 밸런스(진폭, 위상) | 2dB 이하, 5deg 이하 |

전체적인 레이더의 요구조건을 만족하는 것을 기준으로 하였다.

이와 같은 기능을 수행하는 송수신기의 개발 목표 규격을 표 1에 나타내었다.

송수신기 출력은 20dBm 이상이고 송신 및 수신 이득은 각각 30±1.5dB, 잡음 지수는 6dB 이하이며, 수신 동적 범위는 50dB 이상, 수신 I 및 Q 채널의 밸런스는 진폭, 위상이 각각 2dB 및 5deg 이하이다. 출력 파형은 관심 탐지거리에 따라 다르게 운용될 수 있도록 각기 다른 3개 모드의 칩 변조 파형을 발생할 수 있어야 한다.

위와 같은 요구조건을 만족하기 위하여 송수신기의 내부 구성을 그림 2와 같이 구현하였다.

송수신기는 RF 송수신모듈, IF 송수신모듈, 파

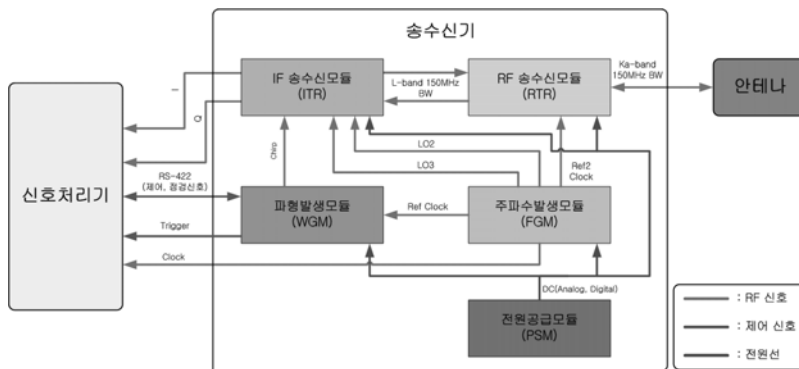


그림 1. 도로 감지 레이더 시스템블록도
Fig. 1. Block diagram of road watch radar system

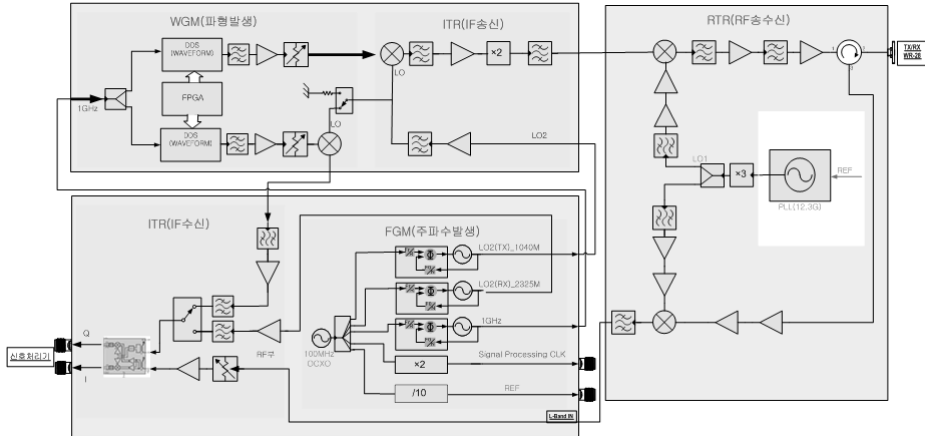


그림 2. 송수신기 구성도
Fig. 2. Configuration of transceiver

형발생모듈 그리고 주파수발생모듈이 주요 구성품이다.

RF 송수신모듈은 IF 송수신모듈로부터 중심주파수 2.4GHz에 대역폭 150MHz의 펄스 신호를 받아 중심주파수 34.5GHz로 상향변환한 후 안테나로 송출하고, 다시 안테나로부터 수신된 반사신호를 중심주파수 2.4GHz로 하향변환하여 IF 송수신모듈로 보내준다. 상향변환을 위하여 12.3GHz 국부발진기를 3체배한 36.9GHz 신호를 혼합기의 국부신호로 사용한다. 또한 송신신호의 수신경로로의 누설을 방지하기 위하여 송신단에 사용된 증폭기의 전원을 송신구간에서만 켜고 수신구간동안에는 동작하지 않도록 한다. IF 송수신모듈은 파형발생모듈로부터 만들어진 기저대역 75MHz 대역폭의 변조 신호를 주파수발생모듈에서 공급된 1040MHz 신호와 혼합한 후 2체배하여 2.4GHz 중심주파수에 대역폭 150MHz의 칩 신호를 생성하여 RF 송수신모듈로 보내준다. 또한 RF 송수신모듈로부터 입력된 수신신호를 주파수발생모듈에서 공급된 2325MHz 신호를 I/Q 복조기와 혼합하여 DC~75MHz 대역의 RF 기저신호를 만들어 신호처리기로 보내준다. 파형발생모듈은 DDS를 이용하여 67ns, 225ns 및 670ns 펄스폭을 가지는 3가지 모드의 하향 칩 형태의 선형변조 파형 (Linear Frequency Modulation)을 발생하며 각각의 출력파형은 중심주파수 160MHz에서 대역폭은 75MHz이다. 이 때 파형발생모듈은 신호처리기로부터 모드선택에 대한 제어신호를 받아 FPGA/MCU를 가지고 DDS를 제어하여 원하는 타이밍의 변조

파형을 생성한다. 주파수발생모듈은 레이더 송수신기 및 신호처리기에서 필요로 하는 국부신호 및 기준신호를 생성하고 이를 각기 공급하여 레이더 전체가 코히어런트 동작을 할 수 있도록 한다.

설계된 각 모듈들을 통합한 송수신기 전체의 송신 경로 버짓은 그림 3과 같다. 선정된 MMIC 및 W/G 부품들의 사양을 바탕으로 송수신기의 송신 경로에 대한 버짓 해석 결과, 이득은 30.6dB이고 출력 P1dB는 20.6dBm이다. 송수신기의 수신 경로 버짓은 그림 4와 같다. 해석 결과, 수신이득은 29.8dB이

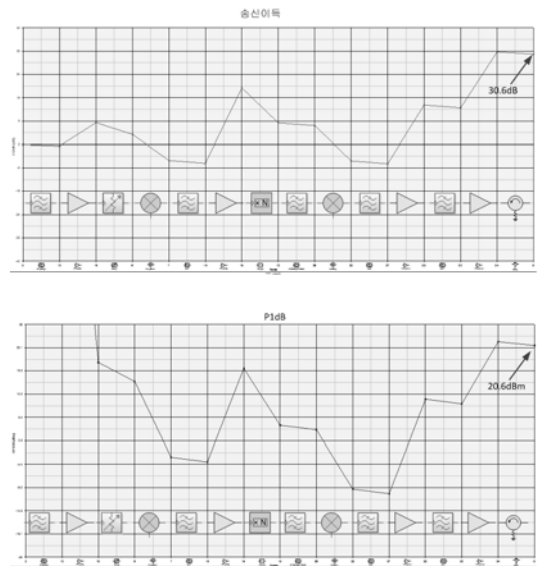


그림 3. 송신 경로에 대한 이득 버짓 및 P1 dB
Fig. 3. Gain budget and P1 dB of transmit path

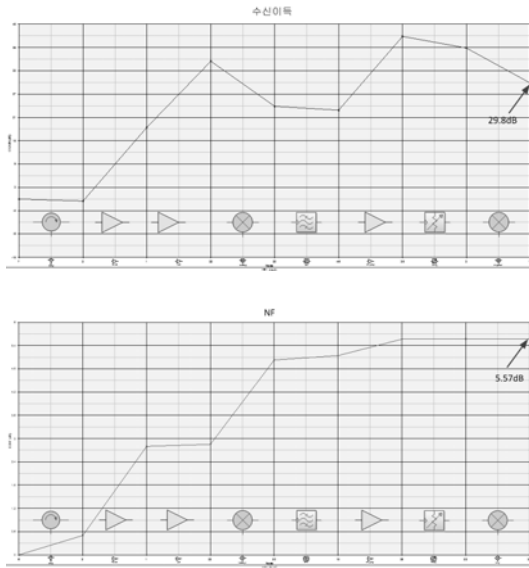


그림 4. 수신 경로에 대한 이득 버짓 및 잡음지수
Fig. 4. Gain budget and NF of receive path

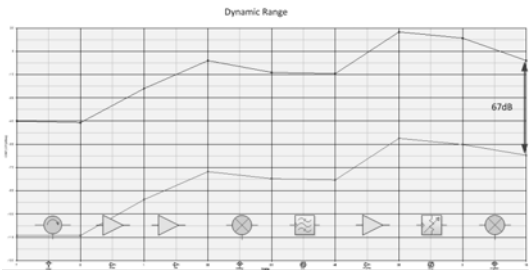


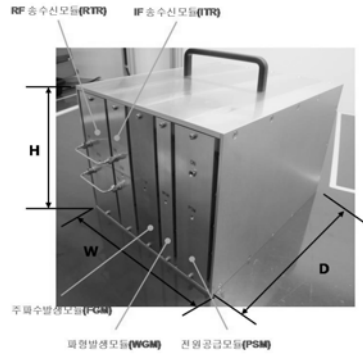
그림 5. 수신 동적 범위
Fig. 5. Dynamic Range of receiver

고, 잡음 지수는 5.57dB이다. 그림 5는 최대 수신 레벨과 수신 잡음 신호 레벨을 나타낸 것으로 수신 잡음 신호 레벨은 대역폭이 150MHz일때로 해석한 것이며 이때 최대 수신 레벨과 잡음 신호 레벨과의 차이를 나타내는 동적범위는 약 67dB 정도가 있음을 알 수 있으며 이러한 해석 결과들을 볼 때 요구되어진 규격을 만족하기 위해 적합한 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

III. 송수신기 제작 및 시험

3.1 송수신기 제작 형상

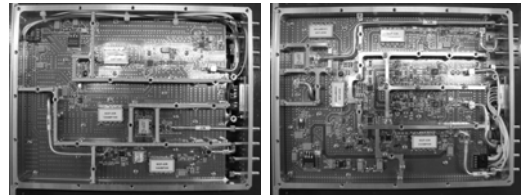
설계된 송수신 버짓을 바탕으로 제작된 송수신기의 형상은 그림 6과 같다. 크기는 236 mm × 296 mm × 191 mm이며, 왼쪽부터 순서대로 RF 송수신모듈,



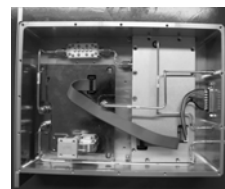
(a) 송수신기 형상
(a) Figure of transceiver



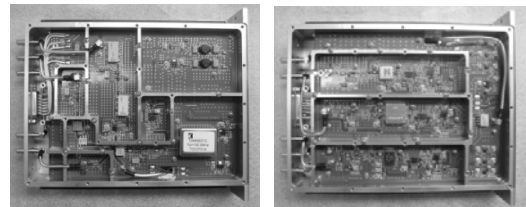
(b) 파형발생모듈 형상
(b) Figure of waveform generator module



(c) IF 송수신모듈 형상
(c) Figure of IF transceiver module



(d) RF 송수신모듈 형상
(d) Figure of RF transceiver module



(e) 주파수합성모듈 형상
(e) Figure of Frequency generator module

그림 6. 제작된 송수신기
Fig. 6. Fabricated transceiver

IF 송수신모듈, 주파수발생모듈 그리고 과형발생모듈로 구성되고 각 모듈에서 필요로 하는 DC 전원 공급을 위하여 AC/DC 변환 전원공급모듈을 추가로 장착하여 구성하였다.

3.2 시험 결과

송수신기의 송신 대역폭은 67ns, 225ns 및 670ns 3종류의 운용 모드에서 출력 스펙트럼 및 타이밍을 점검하였으며, 그림 7은 670ns 펄스폭에 대한 송수신기의 송신 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 8에서 펄스폭 측정을 위하여 송신신호를 자체 루프백(loop back)시켜 수신단에서 측정된 결과 펄스폭이 설계치인 670ns를 유지하고 있음을 볼 수 있다.

그림 9는 송수신기의 송신 출력 레벨 시험 결과를 나타낸 것으로 11dB에서 출력값은 22.84dBm이며 개발 목표 규격을 만족한다. 그림 10은 수신 이득을 측정한 결과로 안테나 연결부에 신호발생기로 -30dBm을 인가하고 이때의 수신신호를 스펙트럼 분석기로 측정하였으며 28.65~31.43dB의 값(평균 30dB)을 얻었다. 수신 잡음 시험은 잡음지수에

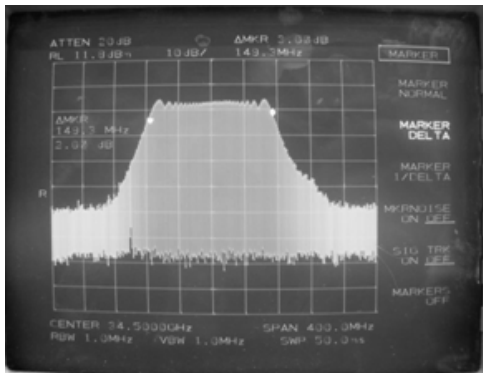


그림 7. 송신 출력 주파수 및 대역폭
Fig. 7. Transmit frequency and bandwidth

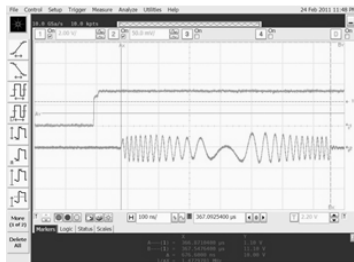


그림 8. 과형 펄스폭
Fig. 8. Waveform pulsewidth

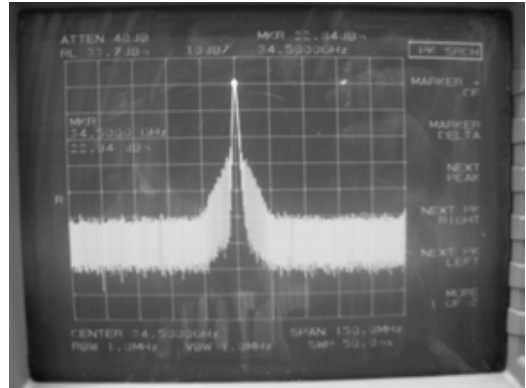


그림 9. 송신 출력 레벨
Fig. 9. Transmit power level

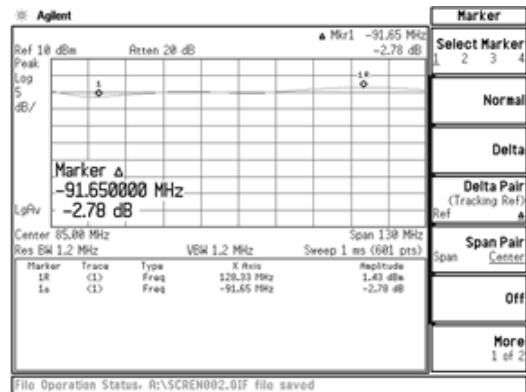


그림 10. 수신 이득
Fig. 10. Receive Gain

대부분의 영향을 주는 RF 송수신모듈에서 측정하였으며 시험결과 6.0dB의 잡음지수를 얻었으며 그림 11에서 그 결과를 볼 수 있다. 그림 12는 수신 동적 범위를 얻기 위해 최대 입력레벨 때의 값을 측

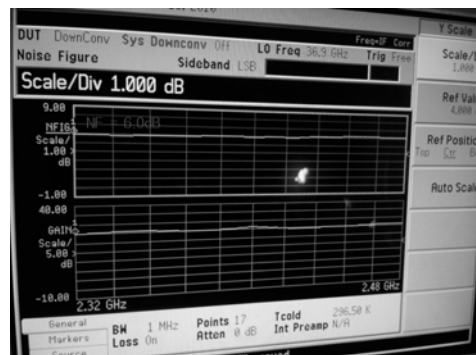


그림 11. 잡음 지수
Fig. 11. Noise Figure

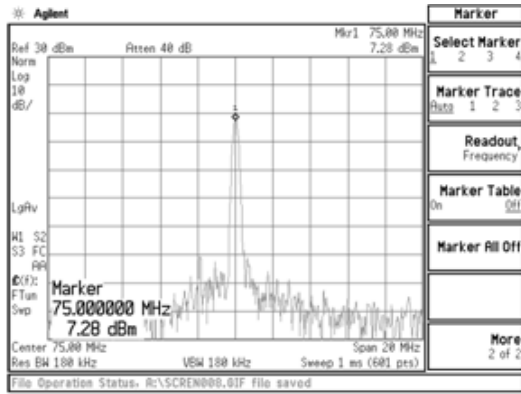


그림 12. 동적 범위
Fig. 12. Dynamic Range

정한 것이며 이 때 7.28dBm의 값을 얻었다. 이를 바탕으로 수신기 이득, 잡음지수 및 수신 대역폭에서의 바닥 잡음레벨을 더하여 동적레벨을 계산해보면 63.28dB의 값을 얻을 수 있다. 그림 13 및 14는 수신기 출력 주파수에 대한 수신기의 I/Q 채널 간 이득 및 위상차를 나타낸 것으로 채널 간 이득차는 최대 0.3dB이 위상차는 1.74도 이었다.

$$\begin{aligned} \text{Noise floor} &= -174\text{dBm/Hz} + 82\text{dB}(150\text{MHz BW}) \\ &+ 30\text{dB}(\text{Gain}) + 6\text{dB}(\text{NF}) \\ &= -56\text{dBm/Hz} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{DR} &= 7.28\text{dBm}(\text{max input}) - (-56\text{dBm}) \\ &= 63.28\text{dB} \end{aligned} \quad (3)$$

표 2는 송수신기 시험결과에 대한 요약이다.

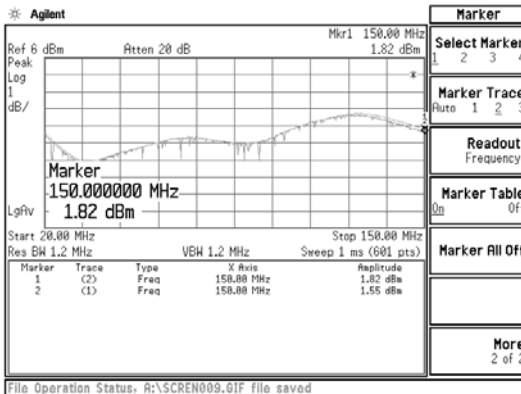


그림 13. 진폭 오차
Fig. 13. Amplitude imbalance

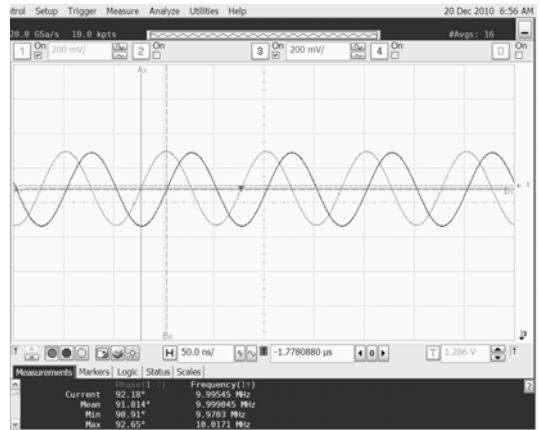
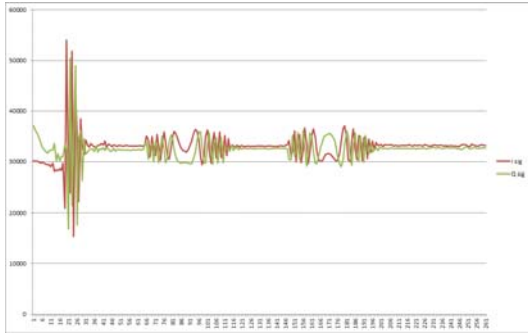


그림 14. 위상 오차
Fig. 14. Phase imbalance

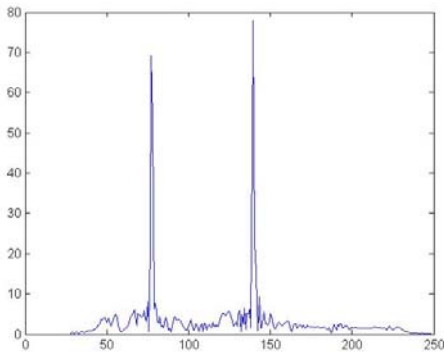
표 2. 송수신기 시험결과 요약
Table 2. The test result of transceiver.

| 순위 | 항목 | 목표 사양 | 시험 결과 |
|----|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 1 | RF Frequency | Ka-band (34.5 GHz) | 34.5 GHz |
| 2 | Bandwidth | 150 MHz | 150 MHz |
| 3 | 송신 이득 | 30 ± 1.5 dB | 28.80~31.40 dB |
| 4 | 수신 이득 | 30 ± 1.5 dB | 28.65~31.43 dB |
| 5 | P1dB | 20 dBm 이상 | +22.84 dBm |
| 6 | VSWR | 2.0 : 1 | 1.9 : 1 |
| 7 | Tx to Rx Isolation | 50 dBc | 50 dBc |
| 8 | Noise Figure | 6 dB | 6 dB |
| 9 | Spurious | -40 dBc | -49.5 dBc |
| 10 | Dynamic Range | 50 dB | 63.28 dB |
| 11 | 출력 파형 | 침, (3 mode) | 67 ns, 225 ns, 670 ns |
| 12 | 채널 밸런스 (진폭, 위상) | 2 dB 이하, 5 deg 이하 | 0.3 dB, 1.74 deg |

그림 15는 위와 같이 제작된 송수신기를 안테나 및 신호처리기와 연동하여 시험한 결과이다. 도로상에 2개의 표적(30cm * 30cm, 코너리플렉터)을 각각 80m 및 140m에 위치하여 시험하였으며 그림 15(a)는 신호처리기로 들어가기 전 RF 상태의 I/Q 신호를 나타낸다. 앞쪽의 큰 신호는 송신신호가 누설된 것이며 이는 신호처리기에서 탐지불가영역으로 처리하는 영역이다. 송신신호 누설을 최소화하기 위해 송신경로상의 증폭기의 전원을 제어하였지만 제



(a) 표적 2개에 대한 수신 원시 데이터
(a) Receiving row data of 2 targets



(b) 표적 2개에 대한 펄스압축후 데이터
(b) Pulse compressed data of 2 targets

그림 15. 표적 2개에 대한 레이더 검출 신호
Fig. 15. Radar detection signal of 2 targets

어기에 사용된 스위치 등의 반응속도가 제한적이어서 일부신호가 전원이 완전히 꺼지기 전까지 수신 경로로 누설되었다. 이로 인하여 거리로 환산했을 때 약 30m 정도의 거리가 탐지 불가 영역이 되며 이는 송신되는 펄스폭에 따라 달라진다. 표적으로부터 반사된 2개의 복조된 칩 신호를 볼 수 있으며 이 신호를 펄스 압축하여 신호처리하면 그림 15(b)에서와 같은 데이터를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 도로 감시 레이더용 송수신기를 설계 및 제작하였고 그 성능을 검증하였다. 제작된 송수신기는 전기적 개발 목표를 충족 하였으며 안테나 및 신호처리기와 연동하여 도로상의 표적에 대한 검출을 수행할 수 있었다.

이는 이동 표적에 대한 도플러 주파수를 탐지하는 CW 방식의 기존 레이더와 달리 이동 및 정지

표적 모두를 탐지할 수 있는 펄스 도플러 방식을 운용할 수 있는 레이더 송수신기로서 특히 거리별 다양한 모드의 펄스폭을 운용할 수 있도록 하였으며, 근거리에서의 운용을 위해 최소한의 펄스폭 내에서 광대역의 변조신호를 발생할 수 있도록 하였다. 본 논문에서 설계 제작한 송수신기를 모노펄스 형태로 발전시킬 경우 도로상의 장애물 등의 표적에 대한 좀 더 정확한 좌표를 얻을 수 있을 것이다. 그러기 위해서는 송수신기 측면에서는 수신 채널을 증가시키고 안테나 및 신호처리기 관점에서도 이를 위해 모노펄스 채널 증가에 따른 하드웨어 증가가 예상된다. 향후 이러한 연구가 발전되어 도로상의 안전을 위협하는 장애물을 실시간으로 감시하고 이를 운전자 등 사용자에게 정보를 제공하는 통합 시스템과의 연동이 이루어질 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] 김동호, 조평동, “차량용 레이더 응용 기술 및 발전 방향”, 전자통신동향분석, 제18권, 1호, pp.33-41, 2월, 2003년.
- [2] S.J. Park, T.Y. Kim, S.M. Kang, K.H. Koo, “A novel signal processing technique for vehicle detection radar”, Microwave Symposium Digest, IEE MTT-S International, Vol.1, pp.607-610 (2003).
- [3] I. Skolnik, Radar Handbook, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc. 2008.
- [4] Kai Chang, RF and Microwave Wireless Systems, John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- [5] 광영길, 조호신, “고해상도 영상 레이더의 광대역 칩 신호 파형 설계”, 전자공학회논문지 TC편, 제 40권, 1호, pp.1-7, 1월, 2003년.

신 승 하 (Seung-ha Shin)

정회원

1992년 2월 경희대학교 전자공학과 공학사

1994년 2월 경희대학교 전자공학과 공학석사

2002년 3월~현재 경희대학교 전자공학과 박사과정

2011년 현재 TLC-tech 수석연구원

<관심분야> 광대역회로설계, 레이더송수신기



전 계 석 (Gye-Suk Jun)

중신회원



1983년 2월 연세대학교 전자공
학과 공학박사

2002년 한국통신학회 회장

1979년 3월~현재 경희대학교
전자·전파공학과 교수

<관심분야> 초음파 및 마이크
로파 통신시스템, 초음파 및
마이크로파 영상시스템