

정밀 거리-속도 모사 기능을 갖는 레이더 반사 신호 모의장치

Radar Echo Signal Simulation Equipment with a Precise Range-velocity Control Capability

한 일 탁*	김 중 만*	김 완 규*	이 민 준*
Il-Tak Han	Jong-Mann Kim	Wan-Kyu Kim	Min-Joon Lee

Abstract

Simulated target generators are used to evaluate the various radar performance. Using the radar parameters such as target range(time delay), doppler frequency, target RCS, simulated target generator can be developed. Especially moving targets are simulated by control time delay and update target signal intensive for target range. Base on this concepts, in this paper, simulated target generators are designed and developed for X-band Radar performance test. Developed equipment is evaluated its performance and then tested with X-band Radar. This paper presents these design, development, and test results of developed target generator.

Keywords : Target Signal(표적신호), Time Delay(시간지연), Doppler Frequency(도플러 주파수), Radar Integration Test (레이더 연동시험)

1. 서론

레이더의 기능 및 성능 시험에 있어 중요한 것 중 하나가 표적의 탐지 및 추적 시험으로, 실제 환경에서 조우표적을 대상으로 시험을 수행하는 데는 많은 비용과 시간이 소요된다. 이에 레이더의 기능 및 성능시험에는 표적모사장치가 사용된다^[1].

그러나 기존의 구현된 장비의 경우 레이더의 성능평가 보다는 고정된 위치에 설치되어 레이더 보정을 위

해 사용되거나, 성능시험에 사용되어도 고정된 위치 표적만을 모사하며, 레이더의 선택된 한 주파수에서 사용해야 되는 제약점이 있다^[2,3].

표적의 탐지 및 추적은 레이더에서 송신한 빔이 표적에 맞고 돌아오는 신호를 기준으로 이루어진다. 이때 레이더에서는 표적에 의해 반사되어 돌아오는 신호의 지연시간 및 도플러 주파수 정보를 이용하여 표적에 대한 위치, 속도 등의 정보를 알아낸다. 따라서 레이더로부터 송신된 신호를 수신하여 일정한 지연시간 및 도플러 정보를 추가한 후 레이더로 송신하면 레이더의 탐지/추적 시험을 위한 가상의 모의표적을 구현할 수 있으며, 이때 표적의 거리에 따른 지연시간을 지속적으로 달리함으로써 이동하는 표적을 구현할

† 2010년 7월 23일 접수~2010년 11월 19일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 한일탁(ithan@add.re.kr)

수 있다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 레이더로부터 방사된 신호를 수신 한 후 지연시간 및 도플러 정보를 추가 하여 모의표적을 생성할 수 있는 X-밴드 대역 레이더의 탐지/추적 시험을 위한 표적모사장치를 설계 및 제작하였다. 또한 제작한 표적모사장치와 X-밴드 펄스 도플러 레이더의 시험 및 시험 결과에 대하여 기술하였다.

2. 기본설계 개념

레이더에서 수신되는 표적에 의한 반사 신호 레벨은 다음과 같이 결정된다^[4].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

위 식에서 P_t 는 레이더의 송신 전력이며, G_t , G_r 은 레이더의 송수신 안테나 이득[dB], σ 는 표적의 RCS [m^2], R 은 표적의 거리[m]이며, λ 는 레이더 송신 주파수에 따른 파장[m]을 나타낸다.

이 중 P_t , G_t , G_r 은 레이더의 성능과 관련된 파라미터로 표적으로부터 반사되어 수신되는 신호는 레이더의 송신 신호 레벨에 의존함을 알 수 있다. 따라서 보다 현실적인 표적을 모사하기 위해서는 표적모사장치도 레이더의 송신 레벨에 따라 표적에 의한 반사 신호를 모사하여야 하며 식 (1)을 이용한 표적모사장치에서의 출력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ERP_{tk} [dB] = P_r [dB] + FSL_{setup} [dB] - G_r [dB] \quad (2)$$

여기서 FSL_{setup} 은 표적모사장치의 설치위치와 레이더 사이의 거리에 따른 자유공간 손실[dB]로 설치 거리에 따른 손실 값을 보상해 주기 위한 값이다. 실제 표적모사장치의 구현에 있어 표적모사장치의 최대 출력은 H/W의 특성 상 유한할 수밖에 없다. 따라서 식 (2)를 이용하면 설계 사양에 따른 표적모사장치에서 모사해야 될 최대 송신 전력레벨을 알 수 있고, 이를 기준[감쇄값 0dB]으로 다음 식 (3)과 같이 거리 R 에 따른 송신 전력 감쇄 값을 송신출력에 반영하면 거리에 따른 표적 신호의 크기를 구현 할 수 있다.

$$ATT(R)[dB] = ERP_{br,MAX} [dB] - ERP_{br}(R)[dB] \quad (3)$$

또한 식 (2)로부터 구현하고자 하는 표적의 RCS (Swerling Case 0)에 따라 표적모사장치의 ERP_{tk} 를 달리함으로써 표적의 RCS가 다르면서 거리에 따른 표적 신호의 크기를 구현 할 수 있음을 알 수 있으며 거리에 따른 감쇄값은 다음과 같다.

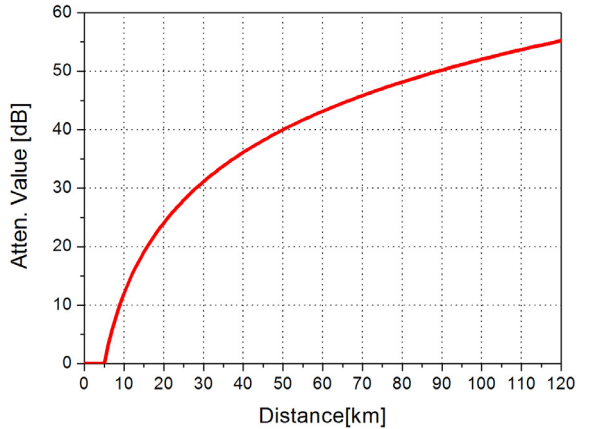


Fig. 1. 거리에 따른 감쇄값(RCS 4m²)

가상의 표적을 모사하기 위해서는 표적의 거리에 따른 반사 신호 레벨과 더불어 표적의 거리에 대한 모사도 이루어져야 하며 다음의 수식과 같이 거리 지연 시간을 구 할 수 있다.

$$T_d = \frac{2(R-r)}{C} \quad (4)$$

위 식에서 R 은 표적의 거리[m], C 는 광속[m/s]이며, r 은 표적모사장치의 설치 거리[m]로, 보다 정확한 거리 모사를 위해 표적모사장치의 설치위치에 따른 거리오차를 보상하기 위한 값이다. 식 (4)를 바탕으로 레이더로부터 수신된 신호를 표적모사장치에서 자체 지연시켜 표적의 거리에 따른 신호 지연을 구현할 수 있다.

이동표적의 경우 표적의 이동속도에 따라 도플러 주파수가 생성되며 이에 대한 모사는 표적모사장치에서의 다음의 수식을 바탕으로 구현될 수 있다.

$$F_d = \frac{2V}{\lambda} \quad (5)$$

위 식에서 V 는 표적의 이동 속도[m/s]이며, λ 는 레이더 송신 주파수에 따른 파장[m]을 나타낸다.

3. 시스템 설계 및 제작

본 논문에서는 앞서 기술한 설계 개념을 바탕으로 X-밴드 레이더용 표적모사장치를 설계, 제작 하였다. 본 논문에서 설계된 표적모사장치는 5개의 sub-band와 각 sub-band 내의 10개 주파수 밴드를 가지는 X-밴드 레이더의 시험을 목표로 설계가 이루어 졌으며 가상의 표적 모사에 필요한 표적거리에 따른 시간지연, 신호크기 및 표적의 속도에 따른 도플러 주파수 모사 기능을 구현하였다.

본 논문에서의 표적모사장치는 X-밴드에서 동작 가능하도록 설계가 이루어 졌다. 표적의 거리는 2km에서 Xkm 범위에서 2m 단위로 거리 모사가 될 수 있게 구현되었으며, 거리모사 정확도는 2m 이내가 되도록 설계가 이루어 졌다. 표적의 속도 모사를 위한 도플러 주파수는 속도가 없는 표적에서부터 최고 3000m/s로 이동하는 표적에 대하여 5m/s 모사 할 수 있도록 설계 되었으며, 속도 모사 정확도는 도플러 주파수의 오차 범위가 $\pm 1\%$ 가 되도록 설계하였다. 본 논문에서 설계한 표적모사장치의 주요 사양은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. 표적모사장치 주요 설계 사양

항 목	사 양
동작 주파수	X-밴드
표적 거리 모사	2 ~ Xkm
표적 거리 모사 단위	2m 이하
표적 거리 모사 정확도	2m 이하
표적 속도 모사	0 ~ 300 m/s
표적 속도 모사 단위	5m/s 이하
표적 속도 모사 정확도	$\pm 0.01 * F_d$

표적의 거리에 따른 반사 신호크기는 디지털 감쇄기를 이용하여 감쇄 값을 제어함으로써 모사하고자 하는 출력 신호의 크기가 조절 되도록 설계가 이루어졌다. 표적거리에 따른 시간지연 모사는 3단 슈퍼헤테로다인 방식을 이용하여 X 밴드 신호를 기저대역(baseband) 신

호로 하향변환 한 후 ADC를 이용하여 디지털 신호로 바꾸어 주고 바뀐 신호를 메모리에 저장 및 일정 시간 뒤에 읽어 들이는 방법으로 구현하였다. 표적의 속도 모사는 DDS(Direct Digital Synthesizer)를 사용하여 믹서의 로컬 신호로 사용될 주파수를 제어함으로써 구현하였다. 또한 본 논문에서 설계, 제작한 장치를 사용하여 시험을 수행할 레이더 주파수 밴드 내의 임의 주파수에 대하여 주파수 정보를 입력 받지 않고 자체적인 주파수 분석을 통하여 표적의 모사기능을 수행할 수 있도록 설계하여 레이더의 주파수 agility 기능 하에서의 표적 탐지/추적 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 다음 Fig. 1은 이와 같은 기능 구현을 위해 설계된 표적 모사장치의 구성도를 보여준다.

가. 1차 주파수 변환부

1차 주파수 변환기는 수신 안테나로부터 수신한 X대역 신호와 360~540MHz 신호 간의 1차 주파수 상, 하향 변환을 수행하며, 변환에 필요한 국부발진 주파수를 생성 한다. 1차 주파수 변환부에서 사용되는 로컬 신호는 5개의 sub-band를 가지는 레이더의 시험을 위해 제어부의 명령에 따라 5개의 국부신호가 발생될 수 있도록 하여 1차 변환된 주파수가 레이더의 sub-band와 관계없이 360~540MHz가 되도록 하였다. 이를 위하여 1차 국부 발진기는 기준 주파수(100MHz) 발생기와 주파수 합성기(frequency synthesizer)를 이용하여 운용자의 선택에 따라 국부 신호가 생성되도록 하였다. 1차 주파수 변환 모듈은 표적 모사에 필요한 정보 중 표적의 거리에 따른 신호크기를 60dB 가변 범위를

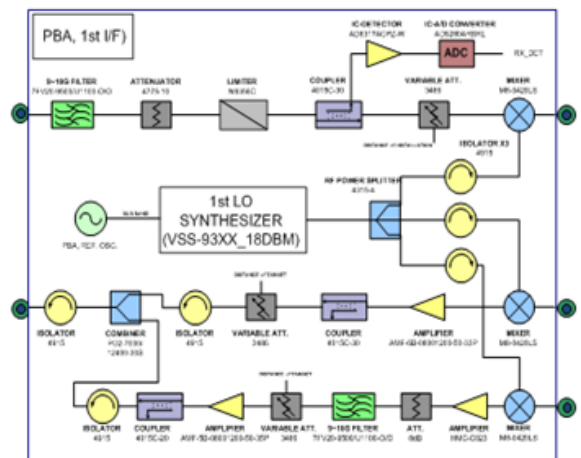


Fig. 2. 1차 주파수 변환 모듈 블럭도

가지는 디지털 감쇄기를 이용하여 식 (3)으로부터 구한 감쇄 값에 대한 제어부의 제어 명령에 따라 구현하도록 설계가 되었다. 또한 레이더의 송신전력과 모사장치에서의 송신전력 상태 확인을 위해 송수신 신호를 coupling하여 1차 인터페이스보드에서 로그 검출기(log detector)를 이용하여 레벨 감지 및 A/D 변환 및 제어부에 전송하여 GUI상에 $\pm 1\text{dB}$ 오차 범위에서 0.5dB 간격으로 전시될 수 있게 하였다. 설계된 1차 주파수 변환부는 다음과 같다.

다음은 제작된 1차 주파수 변환 모듈의 형상이다.

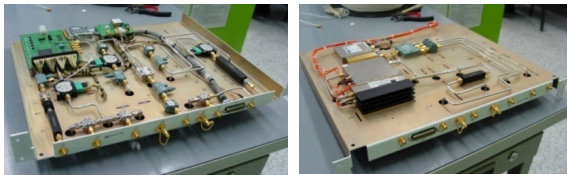


Fig. 3. 1차 주파수 변환 모듈 형상

나. 2차 주파수 변환 부

2차 주파수 변환부는 1차 변환된 신호와 215MHz 신호와의 상·하향 변환을 수행하며 자체적인 주파수 분석을 통한 표적모사 기능 구현을 위해 수신 주파수를 분석 및 분석된 주파수 정보를 제어부로 전송한다. 본 논문에서 설계한 표적모사장치는 각 sub-band 내의 10개 주파수에 대하여 분석을 수행할 수 있도록 설계 하였으며, 이를 위하여 10개의 국부 발진기와 comparator를 사용하였다. 1차 변환된 신호는 2차 주파수 변환부에서 전압 분배기를 통과하면서 10개의 신호로 나뉘진 후 10개의 국부 신호와 각각 혼합되어 10개의 215MHz 단일 주파수 신호로 하향변환 되고 combiner를 거치면서 하나의 215MHz 신호로 출력되게 된다. Combiner를 사용한 이유는 주파수 분석된 정보를 바탕으로 한 제어부의 제어에 따른 스위칭을 이용하여 2차 주파수 변환의 출력을 결정할 경우 레이더에서 빠른 PRF의 PT 파형을 사용하여 탐지/추적을 수행할 경우 신호의 왜곡이 생길 수 있기 때문이다. 즉 2차 변환부에서 분석된 주파수 정보가 제어부로 전송 및 제어부에서 2차 주파수로 제어 명령을 전송하는 시간 동안에는 레이더의 송신 정보가 누락되어 파형의 왜곡이 생길 수 있기 때문이다.

주파수 분석 방법은 변환된 10개의 신호를 coupling하여 comparator에서 비교하여 10개의 신호 중 신호크기가 존재하는 주파수를 분석하도록 하였으며 분석된

주파수 정보는 제어부로 전송되도록 하였다. 전송된 주파수 정보는 다시 2차 주파수 상향변환에서 스위칭을 통해 10개의 국부신호 중 필요한 것을 선택하기 위한 제어 정보로 사용되며, 제어부에서 GUI로 전송하여 주파수 정보를 전시하게 된다. 설계된 2차주파수 변환부는 다음과 같다.

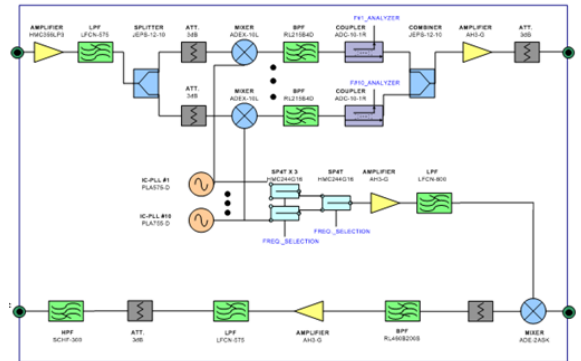


Fig. 4. 2차 주파수 변환 모듈 블록도

다음은 제작된 2차 주파수 변환부의 형상이다.

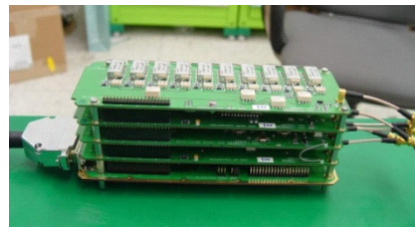


Fig. 5. 2차 주파수 변환 모듈 형상

다. 3차 주파수 변환 부

3차 주파수 변환부는 2차 변환된 215MHz 중간 주파수 신호와 3차 중간 주파수 신호 20MHz와의 상/하향 주파수 변환을 수행하며, 상향 변환 시 속도에 따른 도플러 주파수를 모사한다.

표적 속도 모사를 위한 도플러 주파수 모사를 위해 3차 국부 주파수 발진부는 4채널의 DDS(Direct Digital Synthesizer)소자를 사용한다. DDS를 이용하여 3차 주파수 하향에 필요한 195MHz 주파수 신호와 3차 주파수 상향에 필요한 $195 \pm F_d$ MHz의 주파수 신호를 발생시킨다. 여기서 F_d 주파수 성분은 모사하고자 하는 표적 속도에 따른 도플러 주파수 성분으로 식 (4)에 의해 결정되는 값이다. 또한 3차 주파수 상향 변환 과정

에서는 식 (2)에서 표적모사장치의 설치 위치에 따른 자유공간손실 FSL_{setup} 을 보상하기 위하여 가변감쇄기를 이용, 제어부로부터의 설치거리 정보를 바탕으로 3차 상향 신호 레벨을 조절한다. 다음은 3차 주파수 변환부의 설계된 1차주파수 변환부는 다음과 같다.

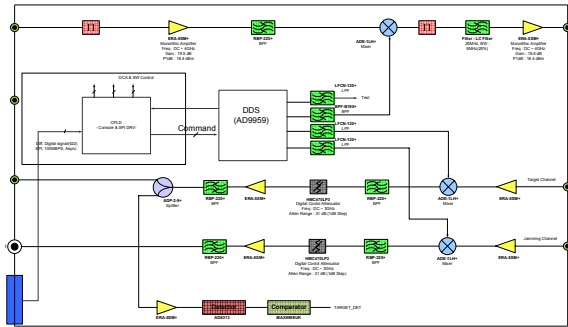


Fig. 6. 3차 주파수 변환 모듈 블록도

다음은 제작된 3차 주파수 변환부의 형상이다.

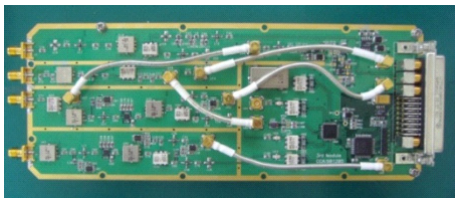


Fig. 7. 3차 주파수 변환 모듈 형상

라. 디지털시간지연 부

디지털 시간지연 부는 3차 변환된 20MHz의 신호에 대하여 표적의 거리에 따른 시간지연을 모사함으로써 기동 및 고정표적을 모사한다. 시간지연 모사는 20 MHz 신호를 ADC를 이용하여 디지털 신호로 변환한 후 메모리에 저장(write) 및 일정 시간 뒤에 읽어(read) 들이는 방법으로 구현하였다. 이때 디지털 신호를 메모리에 저장 및 읽어 들이기 위한 메모리 관리(memory management)는 FPGA를 이용하였으며 FPGA의 기준 clock을 제공하기 위하여 100MHz의 clock을 입력으로 하여 200MHz clock을 생성하는 clock distributor를 사용하였다.

본 논문에서 설계된 디지털 시간지연 부는 Table 1에서 설계사항인 표적모사단위 2m를 만족시키기 위해 100MHz 샘플링 성능을 갖는 ADC를 이용하여 10ns 단위로 시간지연이 가능하도록 하였다. 또한 메모리로

부터 읽어 들이는 시간을 가변 시킬 수 있도록 하여 고정 및 이동하는 표적에 대한 시간지연 모사도 가능하도록 구현하였다. 다음은 디지털 시간지연부에 대한 블록도이다.

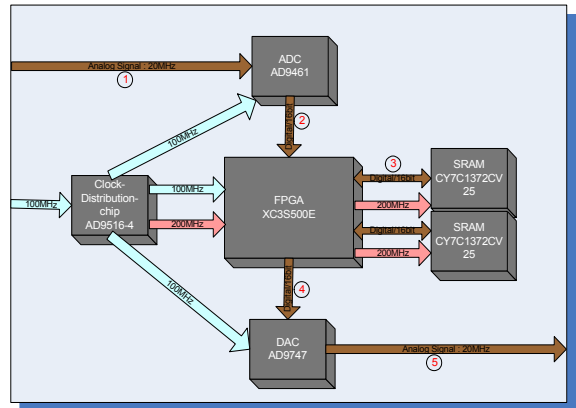


Fig. 8. 디지털시간지연 모듈 블록도

제작된 디지털 시간지연 부에 대한 형상은 다음과 같다.

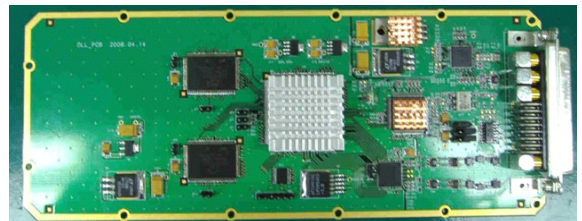


Fig. 9. 디지털 신호지연 모듈

마. 제어부

제어부는 표적모사장치 제어기와의 LAN 기반 인터페이스를 통하여 명령의 수신 및 리포트 송신을 수행한다. 다른 부와의 SPI 통신을 이용, 표적 모사에 필요한 제어 파라미터를 제어하며, 각 부로부터 수신한 리포트를 제어기로 송신하도록 구현하였다.

4. 성능시험 및 결과

가. 자체 성능시험 및 결과

앞서 기술한 각 모듈의 조립을 통하여 최종 표적모사장치를 제작하였으며 Fig. 10은 제작된 표적모사장

치 형상이다.

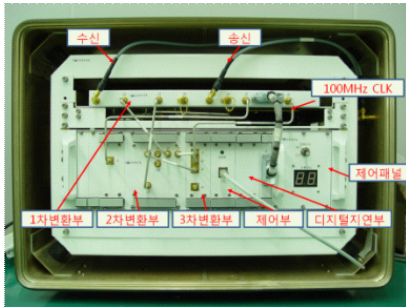


Fig. 10. 표적모사장치 형상

제작된 표적모사장치의 성능 확인을 위하여 두 가지의 시험을 수행하였다. 표적모사장치의 자체 성능 분석을 위한 시험이 수행되었으며, 성능이 입증된 표적모사장치와 X-밴드 레이더와의 연동시험을 통하여 최종 성능 분석이 이루어 졌다.

자체 성능 시험은 시험실 레벨에서 범용 계측기를 이용하여 이루어 졌으며, 다음은 자체 성능 시험을 위한 시험 구성도 이다.

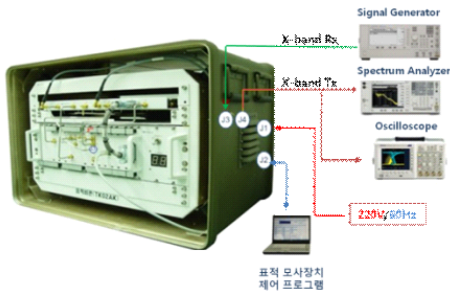


Fig. 11. 자체시험 구성도

자체시험은 RF 특성과 표적모사장치의 성능에 대하여 이루어졌다. RF 특성 시험은 신호발생기를 이용하여 X.00~X.XXGHz 대역의 50개 주파수에 대한 24dBm CW 신호를 입력하고 표적모사장치에서 5km의 표적을 모사한 조건에서 위상잡음, spurious, 출력 flatness를 측정하였다. 측정 결과 표적모사장치는 5kHz에서 98 dBc/Hz, 10kHz에서 100dBc/Hz, 100kHz에서 105dBc/Hz 이하로 위상잡음 특성이 우수함을 알 수 있었다. 또한 spurious 측정결과 -50dBc 이하임을 확인하였으며, RF 출력의 flatness는 X.00~X.XXGHz 대역에서 1dB안에 들어움을 확인하였다.

표적모사장치의 성능 측정은 표적 거리에 따른 신호크기 변화, 시간지연 및 속도에 따른 도플러 주파수에 대하여 수행하였다. 시험은 5km에서 Xkm까지 0~3,000m/s의 속도로 진입(inbound) 및 퇴각(outbound) 하는 RCS 4m²의 표적에 대하여 50개의 주파수에 대하여 수행하였다. 시험 결과 X-밴드 대역에서 표적의 거리에 따른 신호크기, 시간지연, 속도에 따른 도플러 주파수, 표적의 RCS에 따른 출력신호 크기 변화에 대한 모사가 잘 구현되었음을 확인 하였다. 또한 표적의 거리 모사단위는 2m, 속도 가변단위는 1m/s로 표적모사가 가능하였으며, Table 1의 설계 사양을 만족함을 확인하였다. 다음 그림은 시험 항목 중 거리 10km 지점에서 150m/s의 속도로 진입하는 표적에 대한 결과를 보여준다.

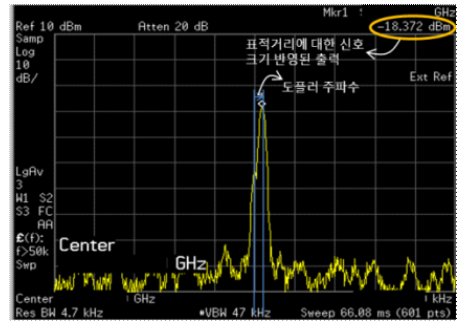


Fig. 12. 표적모사장치 성능측정 결과

나. 레이더 연동 시험 및 결과

자체시험과 더불어 X-밴드 레이더와의 연동시험을 통하여 표적모사장치의 성능 분석이 이루어 졌다. 시험을 위하여 표적모사장치용 안테나 조립체를 제작하였다. 안테나 조립체는 수신 10dB, 송신 22dB의 이득을 가지는 표준 혼 안테나를 사용하여 구성하였다. 연동시험은 안테나 조립체를 포함한 표적모사장치를 레이더의 far-field 조건을 만족하는 거리 Xkm 떨어진 지점의 20m 높이 타워에 표적모사장치를 설치한 후 이루어 졌으며, 시험 구성도는 다음 Fig. 13과 같다.

시험은 표적모사장치에서 다양한 속도 및 RCS, 거리에 대한 진입 및 퇴각하는 표적을 모사한 후 레이더에서 신호를 송신 및 수신하여 표적의 탐지/추적 결과를 분석하였다. 다음 Fig. 14에서 Fig. 16은 시험 결과 중 표적모사장치에서 모사한 100km에서 5km까지 300m/s의속도로 진입(inbound) 하는 RCS 4m²의 표적에 대한 시험 결과를 보여준다.

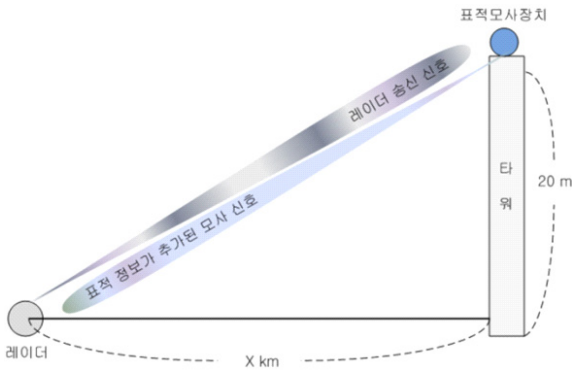


Fig. 13. 연동시험장치 구성도

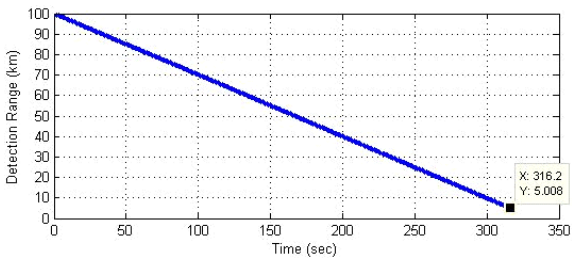


Fig. 14. 연동시험 결과(거리 모사)

위 그림으로부터 100km에서 5km까지 진입하는 표적이 모사된 것을 확인할 수 있다. 또한 표적의 위치가 5km에 도달한 시간이 316초인 것으로부터 표적의 이동속도가 300m/s임을 알 수 있으며, 레이더와의 연동시험 결과 측정된 모사표적의 속도는 다음과 같다.

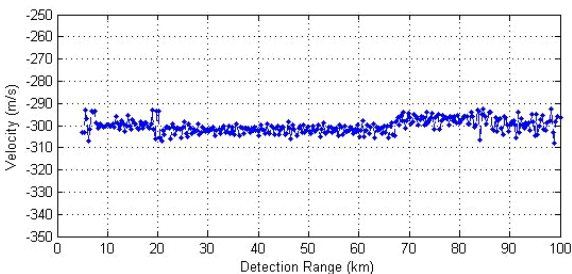


Fig. 15. 연동시험 결과(속도 모사)

위 시험 결과로부터 표적의 속도가 300m/s로 진입하는 표적이 모사됨을 확인할 수 있으며, 레이더에서 측정된 표적의 속도가 $\pm 10\text{m/s}$ 이내임을 확인할 수 있다. 레이더에서 측정된 표적의 SNR은 다음과 같다.

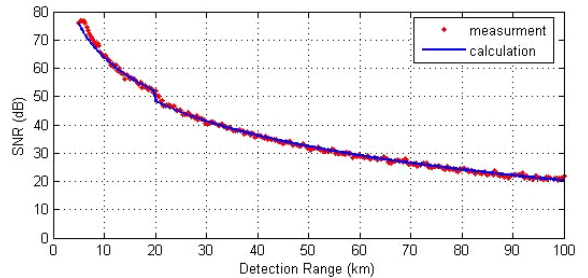


Fig. 16. 연동시험 결과(SNR 모사)

시험 결과 거리에 따라 SNR의 크기가 변하고 있음을 알 수 있으며 레이더의 시스템 파라미터 및 표적 정보를 고려하여 레이더 방정식으로부터 계산한 SNR과 레이더에서 측정된 값이 일치함을 확인할 수 있다 [5]. 이로부터 표적 모사장치에서 거리에 따른 표적의 크기 모사가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 Fig. 14, 15, 16으로부터 표적모사장치에서 표적의 거리에 따른 지연 시간, 신호 크기 및 속도 모사가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 레이더의 성능평가를 위해 개발된 표적 모의장치에 대하여 기술하였다. 개발된 표적 모의장치는 고정표적에 대한 모의뿐만 아니라 이동표적 모사도 가능하도록 개발하였으며 자체 성능 시험을 통해 모의가 잘 이루어짐을 확인하였다. 또한 이동표적에 대한 모사에서 표적의 이동 속도 및 표적과 레이더간의 거리에 따른 신호크기 변화가 잘 모의되었는지도 확인하였다. 더불어 일정 주파수 대역 내에서 레이더의 파형 및 주파수와 관계없이 레이더 신호를 수신하여 표적을 모사가 됨을 확인하였다.

자체시험결과와 더불어 실 레이더와의 연동시험을 수행하여 개발된 모의표적장치의 성능을 시험하였다. 레이더와의 연동시험결과 모사하고자 하는 표적에 대하여 모의 표적장치가 잘 모사함을 확인 하였다.

Reference

[1] M. Skolnik. Radar Handbook, 3rd Ed. McGraw-Hill Chapter 24.7, 2008.

- [2] David R. Brunfeldt, Fawwaz T. Ulaby, “Active Reflector for Radar Calibration”, Trans on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Vol. GE-22, No. 2, pp. 165~169, March 1984.
- [3] 양진모, 이민준, 김환우, “레이더 시스템 성능평가용 가상 레이더 표적신호 발생장치”, 한국군사과학기술학회지, 제11권 제8호, pp. 40~49, 2008년 6월.
- [4] Bassem R. Mahafza, Simulation for Radar Systems Design, Chapman&Hall/CRC Inc., Chater 1, 2004.
- [5] M. Skolnik., Introduction to Radar Systems, 3rd Ed. McGraw-Hill., pp. 88~89, 2001.