

포구 속도 측정을 위한 X-band CW 도플러 레이더 개발

X-band CW Doppler Radar Development for Measurement of Muzzle Velocity

김재현 · 고영목 · 남궁성원 · 장용식* · 박용석* · 나극환** · 최익권***

Jae-Heon Kim · Yeong-Mok Koh · Sung-Won Namgung · Yong-Sik Jang* · Yong-Seok Park* · Keuk-Hwan Ra** · Ik-Kwon Choi***

요 약

본 논문에서는 포구 속도 측정을 위한 X-band CW(Continuous-Wave) 도플러 레이더 구현에 관해 기술하였다. 본 논문에서의 레이더 구성품은 마이크로웨이브 송수신부, 신호 처리부, 전원부이며, 레이더의 운용 및 시험을 위하여 운용/분석 프로그램을 제작하였다. 레이더 송신 주파수는 중심 주파수 f_0 에서 ± 3 MHz step의 5개 채널로 가변되며, 송신 출력은 25 dBm이다. 레이더의 최소 유효 수신 전력은 -117 dBm이다. 이러한 레이더의 기능은 비행 중인 탄자의 도플러 주파수를 획득하고 정밀 속도 점을 계산하여 최초 포구 이탈 순간의 속도를 추정한다. 레이더의 성능 평가는 현재 화포 시험에 적용되는 기준 장비를 사용하여 155 mm 화포 사격 시험을 통해 삼각대 장착, 포신 장착의 두 가지 방법으로 비교 실시하였다. 기준 장비와의 비교 결과, 동등 성능임을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we described the implementation of the X-Band continuous-wave doppler radar for muzzle velocity measurement. The radar is consisted of microwave transceiver, signal processor, power board, and the measuring program was developed for the operating and field test. The operating frequency of doppler radar is able to set ± 3 MHz with 5 channel from the center frequency, and the output power is 25 dBm. The minimum receiving power is -117 dBm. The radar would obtain the doppler frequency from the artillery, and calculate accurate velocity point and then estimate muzzle velocity. The performance test for this radar was done with 155 mm at barrel and tripod mounted, and also compared the performance with the reference radar. As a result, the performance of the our new radar is equal with the reference one.

Key words : Doppler Radar, Muzzle Velocity, Radar System Design, MVRS

I. 서 론

본 논문에서는 도플러 효과를 이용하여 탄자의

포구 이탈 속도를 정확히 측정하는 포구 속도 측정용 도플러 레이더 시스템의 설계 및 제작에 대해 연구하였다.

「이 연구는 2007년도 국방과학연구소 민간겸용기술과제 사업비 지원으로 연구되었음.」

(주)디에스티(Davit System Technology Co., Ltd.)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Kwangwoon University)

***충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(School of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20090302-024

· 수정완료일자 : 2009년 4월 7일

포구 속도 측정의 목적은 포구 속도 측정기에서 획득된 탄의 비행 속도를 이용하여 사격 제원 계산 기에서 정밀사격을 위한 자료로 활용하거나, 각종 포탄, 장약, 포신 등의 개발 성능 평가에 사용하기 위한 것이다. 이러한 포구 속도 측정 방법에는 전자 광학방식, 전자 기계 방식 및 전자기 방식 등이 있으며, 전자기 방식인 도플러 레이더 방식이 최근 널리 사용된다. 현재 전 세계적으로 포구 속도 측정을 위한 CW(Continuous-Wave) 도플러 레이더 개발은 미국, 이스라엘, 덴마크 등 일부 선진국에 국한되어 있으며, 우리나라의 경우 전량 수입에 의존하고 있어, 시스템 구현 및 설계 기술 확보를 통한 국산화 개발이 절실한 상황이다.

포구 속도 측정을 위한 레이더는 CW를 송신하여 비행 중인 탄자에서 반사된 신호로부터 도플러 주파수를 추출, 탄자의 비행 속도를 측정한다. 이러한 방식은 고속 비행중인 탄자와의 물리적인 접촉 없이 연속적으로 속도 측정이 가능해야 할 뿐만 아니라, 높은 정확도, 신뢰성 및 내구성이 요구된다.

이러한 포구 속도 측정용 도플러 레이더는 전자, 함포 등의 포구에서 포탄이 발사되는 순간의 속도를 측정하는 장비로서, 다양한 종류의 비행탄 속도를 측정하는데 매우 적합하다.

본 논문에서는 포구에서 탄이 발사되는 순간의 속도 측정을 목적으로 CW 신호를 이용한 포구 속도 측정용 도플러 레이더를 개발하였으며, 비행중인 탄자에 의해 발생하는 도플러 신호를 검출하여 포구에서의 탄자 초기 속도를 계산하여 기존 장비와 성능 비교를 하였다^[1].

II. 레이더 설계

포구 속도 측정용 도플러 레이더는 비행 탄자에 의해 발생하는 도플러 효과를 이용한다. 그림 1은 도플러 효과의 원리를 보여준다.

식 (1)은 송신 주파수(f_0)와 도플러 효과에 의해 천이된 수신 주파수(f_R)와의 관계식이고, 식 (2)는 탄자의 속도와 도플러 주파수(f_d)와의 관계식이다.

$$f_d = f_0 - f_R = \frac{2v_0}{\lambda} \quad (1)$$

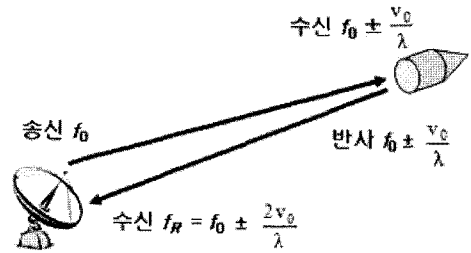


그림 1. 도플러 효과를 이용한 속도 측정 원리
Fig. 1. Velocity measurement theory using Doppler effect.

$$v_0 = \frac{f_d \lambda}{2} \quad (2)$$

여기서, v_0 : 탄자 비행 속도, λ : 송신 주파수 파장이다.

포구 속도 측정용 도플러 레이더의 기본 요구사항은 직경 155 mm 탄자의 반사 면적(σ : radar cross section)을 기준으로, RCS값 σ 는 $(0.155/2)^2 \times \pi$ (m^2), 유효측정거리 2,000 m, 송신 파장(λ) 0.0285 m, 송신 출력(P_t) 25 dBm 및 송/수신 안테나 이득(G) 21 dBi로 하였다. 식 (3)에 의해 도플러 신호 최소 수신 전력은 -117 dBm이며, 이 경우 포구 속도 측정용 도플러 레이더 신호 처리를 위한 S/N 비는 식 (4)를 이용하여 계산하였다^[2].

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

$$\frac{S}{N} = [A_c + 10 \log(T_b) - 40 \log(R) + \sigma] - L_{loss} \quad (4)$$

여기서, A_c : 안테나 상수, T_b : 샘플링 구간, R : 전파 이동거리, σ : 반사 면적, L_{loss} : 시스템 구현 손실이다. 12 비트 AD 변환기를 이용할 경우 식 (3)과 (4)에 의해 유효 측정거리 2,000 m에서 신호 처리 가능한 S/N비는 10 dB 이상이 요구된다. 따라서, 계산, 도출된 시스템 최소 요구 성능과 현재 포구 속도 측정 및 분석용으로 사용되고 외국 제품 등을 비교하여 본 논문에서는 표 1과 같은 포구 속도 측정용 도플러 레이더 설계 규격을 도출하였다.

표 1의 설계 규격과 속도 측정 데이터 저장성, 운용자 편의성, 자주포, 함포 등의 시스템 취부 성능 등을 고려한 포구 속도 측정용 도플러 레이더 시스템은 그림 2와 같이 안테나를 포함하여 마이크로웨이

표 1. 포구 속도 측정용 도플러 레이더 설계 규격
Table 1. MVR(S(Muzzle Velocity Radar System) design specification.

구분	목표 규격
속도 측정 범위	30 ~ 3,000 m/s
속도 측정 구경	5.56 ~ 406 mm
주파수 선택	5채널
송신 출력	> 300 mW
안테나 종류	마이크로스트립 패치 어레이
안테나 편파	수직 편파
안테나 이득	> 21 dBi
안테나 빔 폭	수평: < 10°, 수직: < 20°
AD 변환기	12 bit AD 변환기
샘플링 시간	500 kHz(2 μs/sample)
디지털 신호 처리	부동소수점 DSP

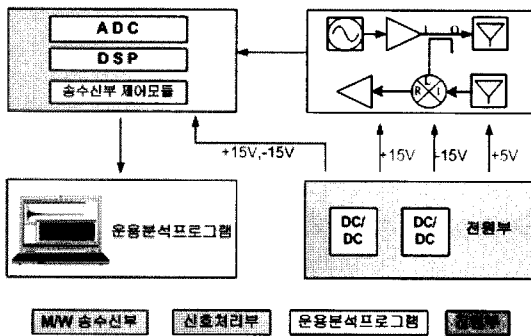


그림 2. 포구 속도 측정용 도플러 레이더 시스템 구성도
Fig. 2. MVR(S design block diagram.

부 송수신부, 신호 처리부, 전원부 및 운용·분석 프로그램 등으로 구성된다.

2-1 마이크로웨이브 송수신부

포구 속도 측정용 도플러 레이더 마이크로웨이브 송수신부는 호모다인(homodyne) 방식을 적용하였으며, 주요 규격은 표 2와 같다. 포구 속도 측정용 도플러 레이더를 탑재한 자주포 등의 야전 운용 시 인접한 레이더 전자파 간섭에 의한 포구 속도 측정 오류를 예방하기 위해 동작 주파수는 X-band에서 3 MHz step으로 5개 채널이 선택 가능하도록 구성하였다.

그림 3은 설계된 포구 속도 측정용 CW 도플러 레이더의 마이크로웨이브 송수신부 구성도이다. 송신

표 2. 포구 속도 측정용 도플러 레이더 M/W 설계 규격

Table 2. Muzzle velocity radar M/W design spec.

항목	규격
송신 주파수	X-대역, 5채널 선택
송신 출력	> 300 mW
안테나 이득	> 22 dBi
빔 폭	< 10°(수평), < 20°(수직)
송신 신호 위상 잡음	< -80 dBc/Hz @ 10 kHz < -110 dBc/Hz @ 100 kHz
시스템 이득	> 50 dB

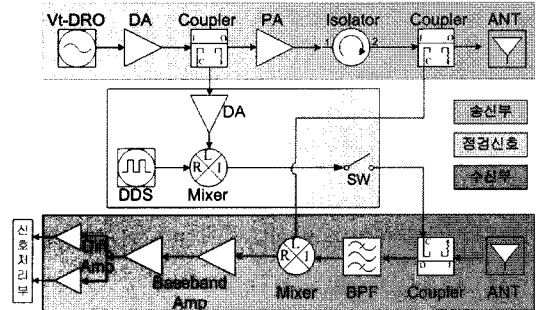


그림 3. 설계된 포구 속도 측정용 도플러 레이더 송수신부 구성도
Fig. 3. Transceiver block diagram of designed MVR(S.

부는 동작 주파수를 발생시키는 전압 제어 유전체 발진기(voltage-controlled DRO), 전력 증폭을 위한 전력증폭기, 전파 방사를 위한 송신 안테나로 구성되며, 수신부는 탄자로부터 반사된 신호를 수신하여 도플러 주파수를 추출하기 위한 수신 안테나, 대역 통과 여파기 및 혼합기와 추출된 저전력 도플러 신호를 신호 처리부에 내장된 AD 변환기가 충분히 인식할 수 있는 신호로 증폭하는 baseband 증폭기로 구성된다. 송신부와 수신부의 격리도를 높이기 위하여 송신 안테나와 수신 안테나는 별도로 구성하였다.

2-1-1 마이크로스트립 패치 안테나

송수신 안테나는 마이크로스트립 패치 안테나 구조로 제작하였다. 일반적으로 마이크로스트립 패치 안테나는 제작 용이성, 경량화 및 비용 절감 면에서 우수한 장점을 가지고 있다³⁾. 제작된 마이크로스트립 패치 안테나는 inset-fed 급전 방식으로 설계되었으며, 안테나 이득 요구 규격 및 레이더 크기를 고려해

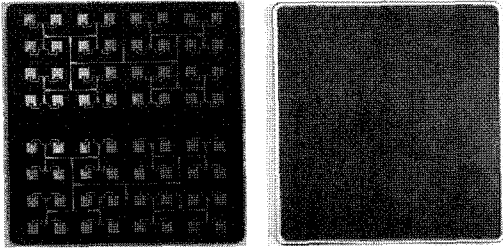


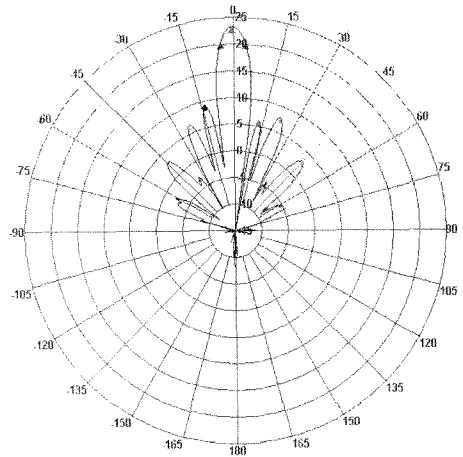
그림 4. 4×8 마이크로스트립 패치 안테나
Fig. 4. Fabricated 4×8 microstrip patch antenna.

서 4×8 array 안테나로 설계 제작하였다.
레이더에서 안테나는 비, 눈, 먼지 및 기타 오염물 질로 인한 산화와 외부 충격 등으로 인한 손상을 예방하고 레이돔 역할을 부여하기 위해 설계된 안테나와 동일한 유전율을 갖는 Teflon 기판을 제작하여 안테나 방사면에 부착하였다. 안테나는 하나의 기판에서 송신부와 수신부를 구현하였으며, 송수신 안테나 간 격리도를 향상시키기 위하여 안테나간 거리를 파장(λ) 이상만큼 이격시켰다^[4].
마이크로스트립 패치 안테나 설계는 EM 설계 툴을 사용하였으며, 안테나 제작은 방사 이득과 구현 손실 등을 고려하여 Taconic사의 TLY-5A 기판을 사용하였다. 제작된 안테나는 전자파 무반사실에서 측정하였으며, 측정 결과 이득 23 dBi, 수평 빔 폭 7.8°, 수직 빔 폭 17.2°을 얻었고, 부엽 레벨은 수평과 수직 일 때 각각 -13.82 dB, -11.9 dB, 반사 손실은 중심 주파수 f_0 에서 -15 dB를 얻었다.

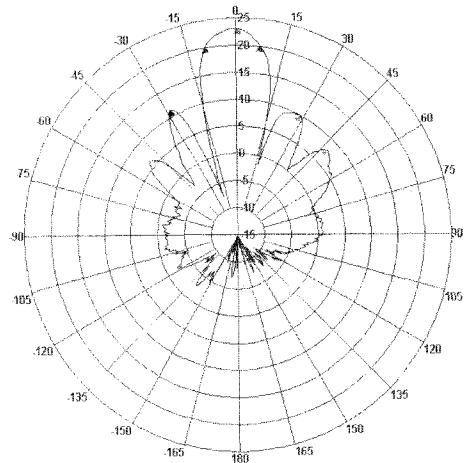
2-1-2 송신부

송수신부는 전압 제어형 유전체 발진기와 전력 증폭기로 구성된다. 수신 신호 S/N비를 개선하기 위해서는 레이더 신호원으로 사용되는 유전체 발진기 위상 잡음과 전력 증폭기에서 증폭되어 안테나로 전달되는 출력 전력 크기가 중요한 파라미터이다.

발진기는 Ring 또는 Hairpin 구조의 마이크로스트립 발진기나 상용 칩 형태의 VCO에 비하여 우수한 위상 잡음 특성을 가지는 전압 제어형 유전체 발진기로 설계하였다. 공진부는 높은 Q값을 갖는 유전체 공진기(dielectric resonator)를 사용하였으며, 발진부 소자는 NEC사의 NE52418 GaAsHBT를 사용하여 병렬 케환형(parallel-feedback) 구조로 설계 제작하였다.



(a) 수평
(a) Azimuth



(b) 수직
(b) Elevation

그림 5. 마이크로스트립 패치 안테나 빔 특성
Fig. 5. Beam pattern of microstrip patch antenna.

그림 6은 제작된 전압 제어형 유전체 발진기로 병렬 케환형 발진기의 단점인 낮은 출력 전력을 보완하기 위해 발진기 출력단에 구동 증폭기를 삽입하여 출력 전력을 증폭시켰다.

그림 6에서 포트 1은 전력 증폭기로 전달되고 포트 2는 레이더의 자체 점검을 위한 LO 신호로 사용된다. 제작된 전압 제어형 유전체 발진기의 중심 주파수 f_0 에서의 측정 결과를 표 3에 정리하였다.

전압 제어 유전체 발진기 측정 결과 출력 전력은 5개 채널에서 평균 10 dBm으로, 위상 잡음은 100 kHz offset에서 평균 -120 dBc/Hz 측정되었다. 그림 7은

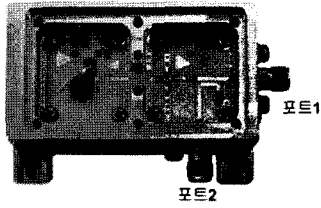


그림 6. 제작된 전압 제어 유전체 발진기
Fig. 6. Fabricated voltage controlled DRO.

표 3. 전압 제어 유전체 발진기 측정 결과
Table 3. Measurement data of VC-DRO.

항목	측정 결과
Pout	10.03 ± 0.1 dB dBm
Phase noise	-67.87 dBc/Hz @ 1 kHz
	-97.30 dBc/Hz @ 10 kHz
	-122.36 dBc/Hz @100 kHz
	-145.54 dBc/Hz @1 MHz
2nd harmonic	-24 dBc
Coupling port pout	-4 dBm
가변 주파수	3 MHz step 5 Ch.(@X-band)
가변 전압	1~10 V

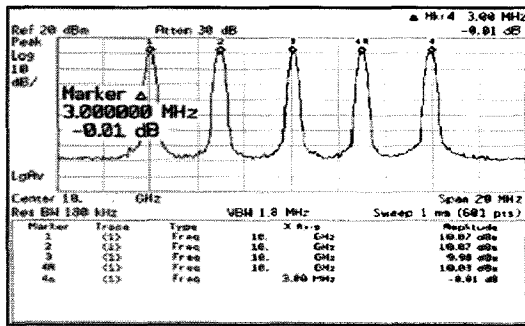


그림 7. VC-DRO 출력 전력 및 5채널 특성
Fig. 7. Output spectrum of VC-DRO.

VC-DRO의 채널별 출력 전력을 나타내고, 그림 8은 중심 주파수 f_0 에서 측정된 위상 잡음을 나타낸다.

전압 제어 유전체 발진기에서 생성된 CW 신호를 송신에 적합한 신호 레벨로 증폭하기 위해 그림 9와 같은 전력 증폭기를 제작하였다. 높은 출력 전력은 표적에 의해 되돌아오는 신호의 수신 감도를 향상시킨다.

제작된 전력증폭기 측정 결과는 출력 전력 26

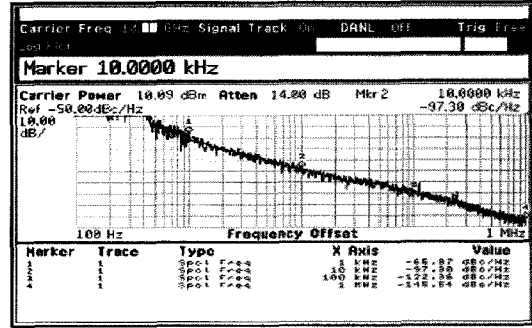


그림 8. VC-DRO 위상 잡음 특성
Fig. 8. Phase noise of VC-DRO.

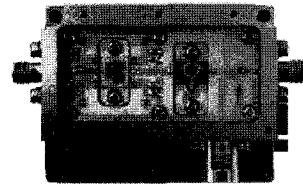


그림 9. 제작된 전력증폭기
Fig. 9. Fabricated power amplifier.

표 4. 전력증폭기 측정 결과
Table 4. Measurement data of power amplifier.

항목	측정 결과
이득	< 15 dB
VSWR	< 1.5:1
P1dB	> 28 dBm
Gain flatness	±0.5 dB
LO coupling ratio	20 dB±1
소비 전류	< 0.7A

dBm, 입출력 VSWR 1.5:1 이하였으며, 상세 측정 결과는 표 4와 같다.

2-1-3 수신부

비행하는 탄자에서 반사되어 수신된 신호는 기준 신호보다 도플러 주파수만큼 천이된 신호로 수신 안테나를 통하여 대역 통과 여파기로 인가된다. 이때 설계 제작된 대역 통과 여파기는 마이크로스트립 coupled line 구조로 구현하였으며, 그림 10과 같이 제작하였다.

대역 통과 여파기의 입출력 VSWR은 1.2:1 이하로 측정되었으며, 동작 주파수 내에서 삽입 손실은 2 dB

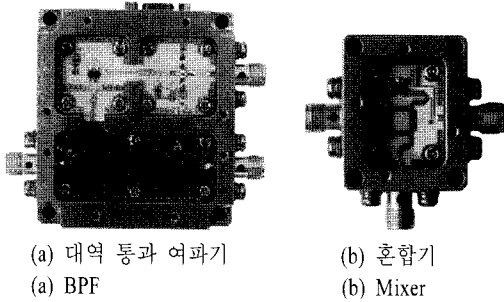


그림 10. 제작된 대역 통과 여파기 및 혼합기
Fig. 10. Fabricated BPF & mixer.

표 5. 대역 통과 여파기 & 혼합기 측정 결과
Table 5. Measurement data of BPF & mixer.

항목		측정 결과
대역 통과 여파기	VSWR	< 1.2:1
	삽입 손실	< 2 dB
	대역폭	< 500 MHz
혼합기	변환 손실	< 6 dB
	LO 구동 전력	3~7 dBm
	LO/RF 격리도	> 20 dB
	LO/IF 격리도	> 30 dB

이하, 대역폭은 500 MHz 이하로 측정되었다. 대역 통과 여파기의 전단에 방향성 결합기를 삽입하여 레이다 자체에서 발생하는 DDS(Direct Digital Synthesis) 신호와 기준주파수를 혼합하여 이를 수신부에 인가하는 방법으로 자체 점검 회로를 구현하였다.

그림 10의 (b)는 수신 신호와 기준 신호를 혼합하여 도플러 신호를 검출해 내기 위하여 제작된 혼합기이다. 호모다인 방식의 수신부에서 저잡음 증폭기를 사용하지 않는 경우 혼합기의 변환 손실을 최대한 작게 하는 것이 그만큼의 잡음지수를 줄여 S/N비를 높일 수 있다. 또한, LO 포트에서 RF 포트에 누설되는 전력 또한 S/N 비에 영향을 미치기 때문에 가능한 높은 LO/RF 포트간 격리도가 요구된다¹⁾.

제작된 혼합기는 180° 하이브리드 결합기를 이용하여 LO 포트와 RF 포트간의 높은 격리도를 갖도록 하였고, 믹서 다이오드의 입출력 임피던스 정합을 통하여 낮은 변환 손실을 얻었다.

2-2 신호 처리부

신호 처리부는 DSP, A/D 변환기(ADC #1, #2), 주변

포구 속도 측정을 위한 X-band CW 도플러 레이더 개발

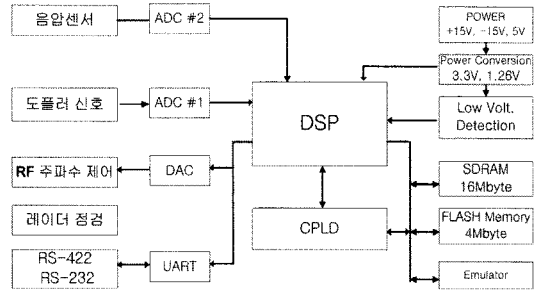


그림 11. 신호 처리부 구성도
Fig. 11. Block diagram of digital signal processor.

장치 제어용 CPLD(Complex Programmable Logic Device), RF 주파수 제어부, 속도 측정 시점 인식을 위한 음압·충격 센서, 외부 통신 회로(RS-422, RS-232), 데이터 저장용 RAM, 플래시 메모리 등으로 구성된다.

신호 처리부는 직렬(inter IC control) 버스 방식과 CPLD를 이용하여 필요 기능을 구현, 최소 부품으로 제작하였다. DSP 는 1,600 MIPS 이상의 부동소수점 연산이 가능하며, 연산 프로그램은 4 메가바이트 크기의 플래시 메모리에 내장되어 16 메가바이트 크기의 외부 RAM으로 로딩되어 동작한다.

2-2-1 도플러 신호 처리

포구 속도 측정 소프트웨어는 이벤트 방식으로 수행되는 구조로서 기존의 순차 루프웨어 구조보다 서브 프로그램이 단순하면서 구조적으로 되어 있으며, 속도 연산 및 운용을 위해 운용 시스템(OS)이 이식된 구조로 설계하였다⁶⁾.

그림 12에 포구 속도 산출 과정을 도시하였다. 이

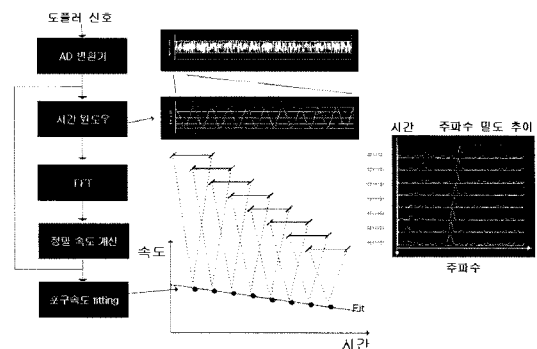


그림 12. 도플러 신호 처리 과정
Fig. 12. Doppler signal processing in the DSP.

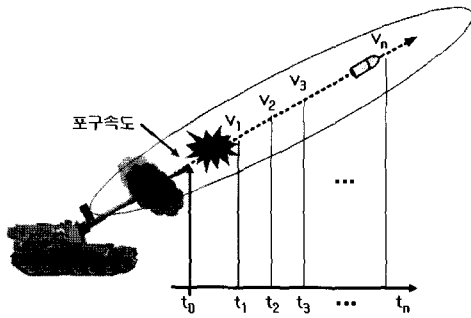


그림 13. 포구 속도 추정을 위한 샘플링 시간 구간
Fig. 13. Sampling time duration at artillery for MV estimation.

동 탄자 속도가 20~3,000 m/s이면 도플러 주파수는 식 (1)에 의해 1.4~215 kHz에 해당되며, 3배의 샘플링 속도로 각각 1,024개의 샘플링 데이터를 얻고, 디지털 필터링과 고속 푸리에 변환을 실시한다.

속도 연산 프로그램은 예상 도플러 주파수를 A/D 변환기로 샘플링한 후, 디지털 변환된 도플러 신호를 디지털 신호 처리기에서 연산 알고리즘에 의해 속도 연산을 실시한다.

탄자에서 반사된 전파는, 포구 이탈시 발생하는 화염 및 고온의 이온화된 플라즈마 등에 의하여 수신 안테나에 도달하는 도플러 신호는 S/N비가 낮아 속도 데이터는 많은 오차를 포함한다. 그림 13은 포구에서 탄의 이탈 순간을 표현한 것으로 속도 측정 구간을 시간별로 표시하였다.

그림 14에서 포구 근처 속도 분포를 보면 0~55 ms구간에서 많은 오차를 포함하고 있으며, 정확도를 높이기 위하여 도플러 신호를 A/D 변환한 후, 주파

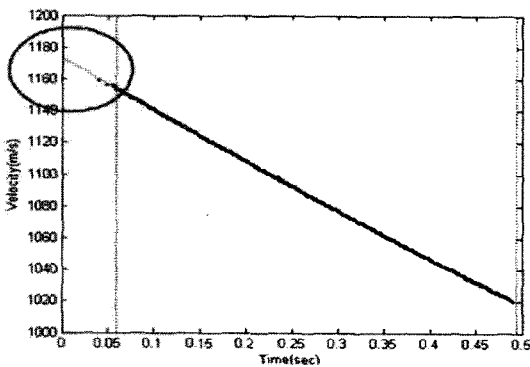


그림 14. 포구로부터 t시간 동안의 탄자 속도 궤적
Fig. 14. Velocity trajectory v.s. measurement time.

수 추정 방법을 이용하여 획득된 신호 샘플 구간마다 속도 분포를 구한 다음 최소 자승 곡선 적합(least square curve fitting)을 이용하여 t=0에서의 포구 초기 이탈 속도를 연산한다^{[7]~[9]}.

2-2-2 블랙만-해리스 윈도우 설계

Base-band 증폭기에서 출력된 아날로그 도플러 신호는 신호 처리기 내에서 3배 주파수로 샘플링 된 후 비행 탄자의 동적 변화를 고려하여 N개 샘플에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform) 변환을 하여 주파수 영역에서 속도 연산을 위한 도플러 주파수를 추정 한다. 이 경우 DFT는 고속 연산 처리를 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 사용한다. FFT 변환된 도플러 신호 주파수는 DC를 중심으로 대칭인 $-f_s/2 \sim f_s/2$ Hz로서, 실제 $0 \sim f_s/2$ Hz 주파수에서만 도플러 주파수 추정에 이용된다. 즉, 신호 처리를 위한 샘플링 도플러 주파수는 $0 \sim f_s/2$ 에서 N/2개가 나타나고, 주파수 간격은 f_s/N 가 된다.

높은 S/N 비를 얻기 위해, 주엽 레벨과 부엽 레벨 차이가 큰 윈도우를 사용하여야 한다^[7]. 본 논문에서는 4-term 블랙만-해리스 윈도우(Blackmann-Harris Window)를 사용하였으며, 그림 15에서 주엽 레벨과 가장 큰 부엽(side lobe) 레벨 차이가 약 -92 dB로서, 구형 윈도우(rectangular window)보다 신호를 주엽(main lobe) 내에 잘 한정시킨다.

시간 영역에서, 4-term 블랙만-해리스 윈도우는 코사인 윈도우 합으로 표현된다.

$$w(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{N}\right) (-1)^k \quad (5)$$

식 (5)를 주파수 영역으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$W(f) = \frac{Nf}{\pi} \sin(\pi f N) \sum_{k=0}^N \frac{a_k (-1)^k}{f^2 N^2 - k^2} \quad (6)$$

n이 정수일 경우 식 (7)과 같다.

$$W\left(f = \frac{n}{N}\right) = \begin{cases} a_0 & \text{if } n=0 \\ \frac{a_1}{2} & \text{if } n=\pm 1 \\ \frac{a_2}{2} & \text{if } n=\pm 2 \\ \frac{a_3}{2} & \text{if } n=\pm 3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

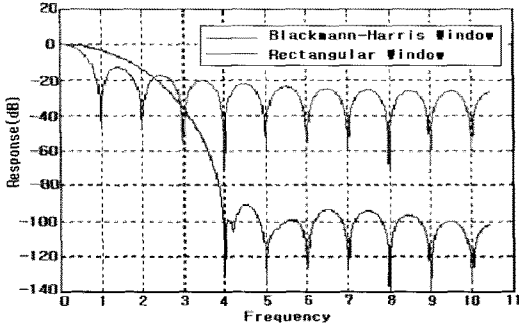


그림 15. 블랙만-해리스, 구형 윈도우 성능 비교
Fig. 15. Compare with 4-term Blackmann-Harris window and rectangular window.

2-3 운용/분석 프로그램

운용/분석 프로그램은 개발된 포구 속도 측정용 도플러 레이더가 외부 컴퓨터와의 통신 기능을 수행하고, 신호 처리기에서 연산 처리된 속도 데이터를 분석하기 위한 프로그램으로서, 탄자가 비행하는 순간의 데이터를 파일로 저장하고, 내부 설정값을 GUI 환경으로 설정할 수 있도록 제작하였으며, 프로그램 기능은 다음과 같다.

- 포구 속도 측정기 설정값 제어 및 모니터링
- 샘플링된 도플러 디지털 RAW 데이터 파일 저장
- 도플러 주파수 스펙트럼 표시
- 저장된 데이터 파일의 포구 속도 계산
- 속도점 데이터 표시

그림 16은 운용/분석 프로그램 구조로서, 포구 속도 측정기와 연동하여 포구 속도 측정을 위한 파라미터 입력, 운용 및 분석 목적으로 사용된다. 그림 17은 비행 탄자에 대한 A/D 변환된 도플러 RAW 데이터, 전력 밀도, 속도 궤적을 시간축에 대한 진폭 및

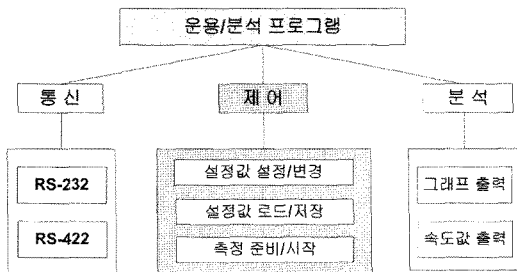


그림 16. 운용/분석 프로그램 구조
Fig. 16. Operation & analysis program structure.

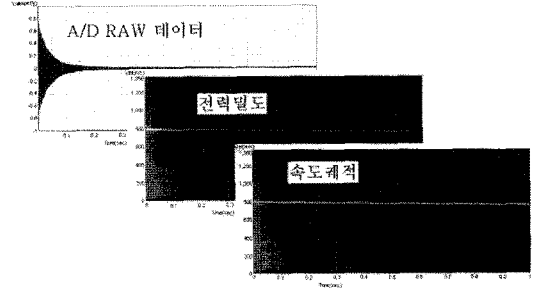


그림 17. 운용/분석 프로그램을 이용한 처리 데이터 화면 표시
Fig. 17. Processed data display using operation and analysis program.

속도 그래프로 나타낸 것이다.

운용/분석 프로그램은 시간에 대한 비행 탄자의 S/W 비를 GUI로 표현할 수 있으며, 정확한 포구 속도 산출을 위한 최적 측정 구간과 비행 탄 특성에 대하여 분석 및 검증이 가능하다.

Ⅲ. 포구 속도 측정실험

포구 속도 측정용 도플러 레이더의 최종 성능 확인을 위하여 안흥 소재 국방과학연구소 종합시험장에서 실 사격을 실시하였다. 비교 대상 장비는 성능이 입증되어 현재 포탄의 시험 평가 목적으로 운용 중인 외산 장비를 기준으로 하였다. 측정 방법은 각각의 장비를 삼각대에 장착하여 포구 속도를 측정하는 방법과 개발 장비를 자주포 등의 포신에 장착하고 기존 장비를 삼각대에 장착하여 측정하는 두 가지 방법으로 진행하였다.

삼각대 장착 시험은 그림 18과 같이 포구가 향하는 방향과 동일하게 기존 장비와 개발 장비의 방향이 일치되도록 삼각대에 장착하고 실험을 실시하였다.

삼각대에 장착하여 포구 속도를 측정할 때에는 포구와 장비간의 x, y, z 방향의 거리를 운용 프로그램에 사전에 입력하여 포탄이 발사되는 시점으로부터 레이더에 충격 음압이 전달되는 시간을 계산하여 포구와의 이격거리에 의한 계산 속도 오차를 보정하였다.

삼각대에 장착하여 시험한 방법 외에 개발 장비를 포신에 장착하고 기존 장비를 삼각대에 장착하여 포구 속도 측정 비교 시험을 실시하였다.

구현된 포구 속도 측정 장비를 표 6, 7과 같이 기



그림 18. 포구 속도 측정시험(삼각대 장착)
Fig. 18. Measurement set-up for muzzle velocity(on tripod mounting).

표 6. 155 mm 탄자 속도 측정 시험 결과(삼각대 장착)
Table 6. Measurement data of muzzle velocity with 155 mm(ot tripod mounting).

순번	포구 속도[m/s]		A - B [m/s]	백분율 오차(%)
	기준 장비 (A)	개발 장비 (B)		
1	686.59	686.56	0.03	0.00
2	687.21	687.12	0.09	0.01
3	688.41	688.26	0.15	0.02
4	673.65	673.60	0.05	0.01
5	674.01	673.86	0.15	0.02
6	673.52	673.49	0.03	0.00
7	678.64	678.61	0.03	0.00
8	678.29	678.28	0.01	0.00
9	677.13	677.15	0.02	0.00
10	687.57	687.42	0.15	0.02



그림 19. 포구 속도 측정 시험(포신 장착)
Fig. 19. Measurement set-up for muzzle velocity(on gun barrel mounting).

표 7. 155 mm 탄자 속도 측정 시험 결과(포신 장착)
Table 7. Measurement data of muzzle velocity with 155 mm(on gun barrel mounting).

순번	포구 속도[m/s]		A - B [m/s]	백분율 오차(%)
	기준 장비 (A)	개발 장비 (B)		
1	791.13	790.73	0.40	0.05
2	797.30	796.88	0.42	0.05
3	799.22	798.90	0.32	0.04
4	799.99	799.64	0.35	0.04
5	807.82	807.49	0.33	0.04
6	807.03	806.67	0.36	0.04
7	918.30	918.02	0.28	0.03
8	918.49	918.10	0.39	0.04
9	921.88	921.60	0.28	0.03
10	918.69	918.34	0.35	0.04

준 장비와 개발 장비에 대하여 10발의 사격 결과를 비교하였다. 측정된 각 장비의 속도차를 계산하여 이를 백분율로 환산하여 기록하였고 장비 간 속도 오차는 두 가지 시험 방법에서 0.05 % 이내였다. 개발 장비를 포신에 장착하여 측정하였을 때 외산 장비와의 오차가 미세하게 증가하는 이유는 포신에서의 음압 트리거와 삼각대에서의 음압 트리거 환경에 의한 오차로 볼 수 있다. 위와 같은 측정 결과에 의해 제작된 포구 속도 측정 장비는 기준 장비와 동등한 성능을 발휘한다고 평가할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 포구 속도를 산출하기 위해 도플러 주파수를 이용한 포구 속도 측정용 도플러 레이더 장비를 개발하였다. 포구 속도 측정용 도플러 레이더를 구성하는 마이크로웨이브 송수신부, 안테나, 신호 처리부, 전원변환부 등을 설계/제작하였으며, 야전에서의 장비 운용 편리성과 각종 포탄 및 자주포, 함포 등, 포구에서의 비행 탄자 초기 이탈 속도 정밀 분석을 위해 운용/분석 프로그램을 개발하여, 포탄, 장약 및 포신 개발 시 시험장비로도 사용이 가능하다. 제작된 포구 속도 측정용 도플러 레이더는 부분적인 기술 변경을 통해 고속도로 과속 단속용 도플러 레이더, 선박 충돌 방지용 레이더 등의 민간

산업용으로도 응용이 가능할 뿐만 아니라, 우주정거장에서 우주왕복선 정밀 도킹 시 유도 레이더로도 변용이 가능하다.

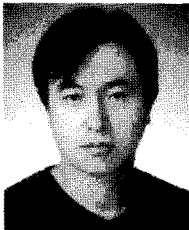
포구 속도 측정용 도플러 레이더는 순수 국내 기술로 개발된 것으로서 기존 장비와 비교하였을 때 백분율 오차 0.05 % 미만으로 동등한 성능을 나타내었으며, 지금까지의 도플러 레이더를 이용한 계측 기술의 연구 개발 및 해외 기술 의존을 탈피하고, 외화지출 및 정비 문제를 해결하며, 나아가 민수 분야까지 응용 영역을 확대시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Merrill Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill, pp. 35-44, 1990.
 [2] D. S. Banks, "Continuous Wave(CW) Radar", *Electronic Progress*, vol. 18, no. 11, pp. 34-41, 1975.

[3] Y. T. Lo, S. W. Lee, *Antenna Handbook*, Van Nostrand Reinhold, pp. 10.5-10.7, 1995.
 [4] Mikhail Cherniakov, *Bistatic Radar Principles and Practice*, Willy, pp. 90-96, 2006.
 [5] 한석균, "차량 감지용 FMCW 레이더의 단일평형 다이오드 주파수 혼합기 설계 및 제작", 한국전자학회논문지, 14(12), pp. 1335-1340, 2003년 12월.
 [6] Chassaing, Rulph., *DSP Applications Using C and the TMS320C6X DSK*, Wiley, pp. 104-116, 2002.
 [7] 박용석, 장용식, "CW 도플러 레이더를 이용한 정밀속도 계측기법 보고서", 국방과학연구소, 2004.
 [8] "AN/UPQ-6 MK V velocimeter Operation and maintenance instructions with repair parts list", manual, Lear Astronics Corp., 1992.
 [9] 최주호, 황의성, 박원우, 홍성수, 유준, "포구 속도 계측 시스템의 정확도 분석", 제어자동화시스템 공학 논문지, 5(1), pp. 88-94, 1999년 1월.

김 재 현



2001년 8월: 충북대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2003년 8월: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
 2006년 11월~현재: (주)디에스티 [주 관심분야] Radar System, 초고주파 회로설계, Antenna

남궁 성 원



1998년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년 7월~현재: (주)디에스티 [주 관심분야] Radar System, 신호처리

고 영 목



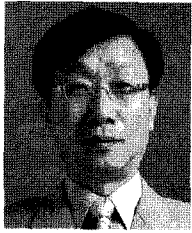
1991년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 9월~현재: (주)디에스티 [주 관심분야] Radar System, 초고주파 회로설계

장 용 식



2002년 2월: 금오공과대학교 전자제어공학과 (공학사)
 2002년 2월~현재: 국방과학연구소 [주 관심분야] Radar System, 속도계측기법

박 용 석



1978년 2월: 서울대학교 미생물학과 (공학사)
1982년 9월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 전자공학 제어계측 (공학석사)
1982년 9월~현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] Radar System, 속도계측기법

최 익 권



1974년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사)
1976년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학석사)
1986년 8월: 미국 오하이오 주립대학교 전자공학과 (공학박사)
1975년 3월~1979년 6월: 육군 3사

관학교 교수부 물리학 교관

1982년 10월~1986년 8월: 미국 오하이오 주립대학교 ElecElector Science Laboratory 연구 조교

1986년 9월~1987년 8월: 미국 메사츄세츠 주립대학교 Antenna Laboratory 연구원

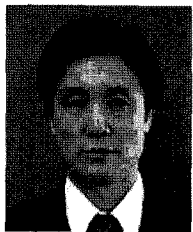
1987년 9월~1993년 8월: 한국전자통신연구원 이동통신연구단 전파공학연구실 실장

1993년 9월~1994년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 조교수

1994년 3월~현재: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] DBF 배열안테나, 위상배열안테나, 휴대단말용 소형안테나

나 극 환



1981년 7월: 프랑스 ENSEEIHT 국립 종합과학대학 (공학박사)
1981년 9월~1986년 12월: 광운대학교 전자공학과 부교수
1987년 1월~1988년 1월: 미국 COS-MST 연구소 객원연구원
1988년 2월~현재: 광운대학교 전자

공학과 교수

[주 관심분야] RF 및 마이크로파 통신시스템, 밀리미터파 통신시스템, 수치해석