

지면 클러터 환경에서 금속표적감지를 위한 W-대역 FMCW 레이더의 설계 및 제작

Design and Fabrication of a W-band FMCW Radar for the Metal Target Detection Under the Ground Clutter Environment

박정동*
Park, Jung-Dong

ABSTRACT

In this paper, we describe the design, fabrication, and test results of a W-band FMCW radar for the metal target detection under the ground clutter environment. In order to detect metal targets on the ground, we used a single cassegrain antenna with the beamwidth of 1.45° which forms pencil-beam footprint on the ground. A log envelope detector was applied to improve radar performance in the severe ground clutter known as Weibull and log normal clutter. The designed FMCW radar can acquire altitude information from the ground clutter with $\sigma_0 = -23\text{dB}$ at the height of 160m. The fabricated W-band FMCW radar transmits 11 dBm power and the dynamic range of the receiver is from -106dBm to -30dBm . The performances of the fabricated sensors were tested out in the fields and detected a car target of 200m apart on the grass.

주요기술용어(주제어) : FMCW(주파수변조연속파형), Radar(레이더), Ground Clutter(지면 클러터)

1. 서론

FMCW 레이더는 연속파형 신호를 주파수 변조하여 안테나를 통해 표적에 방사한 후, 표적에서 반사된 신호를 수신하여 전파의 시간지연에 따른 송신신호와 수신신호의 주파수 차이를 이용함으로써 표적과의 거리를 측정하고, 수신되는 전력을 비교하여 표적의 유무를 감지한다.

단일안테나를 사용한 호모다인 FMCW 레이더는 구조가 간단하므로, 저비용으로 소형화된 근거리 감지용 능동 센서를 구현할 수 있다. 본 방식을 응용한 장치로는 군수 분야에서 다양한 신관(fuze)용 근거리 감지센서 및 전파 고도계, 근거리용 레이더 시스템 등이 있으며 민수 분야에서는 최근 대두 되고 있는 차량용 충돌방지장치 등, 그 사용 범위가 광범위하다.

본 논문은 장갑 상부 표적을 감지하는 신관에 적용할 수 있는 소형의 W-대역 능동센서를 단일안테나를 이용한 호모다인 방식의 FMCW 레이더로 구현하기 위한 설계 및 제작과 이의 야외 시험 결과를 기술한다.

† 2004년 8월 5일 접수~2004년 9월 17일 심사완료
* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
주저자 이메일 : topstory@add.re.kr

2. W-대역 FMCW 레이더의 설계

가. 동작주파수의 결정

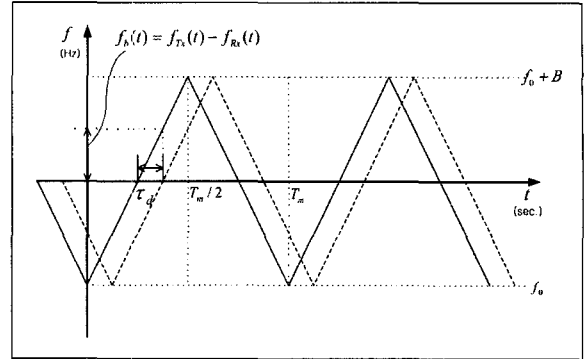
그림 1은 주파수에 따른 대기 중 전자파의 감쇄특성이다. 밀리미터파는 초고주파 대역에 비해서 대기 환경에서 감쇄가 크지만, 35GHz와 94GHz 대역에서 양호한 전파전파 특성을 보인다^[1].

지상에 기동중인 전차 표적의 감지와 같이, 지면 클러터가 매우 큰 감지환경에서 금속표적을 감지하기 위해서는 안테나의 빔폭이 매우 좁아야 하기 때문에 구현될 안테나의 크기를 고려할 때 94GHz 대역이 레이더의 중심주파수로 적합하다.

나. FMCW 레이더의 원리

FMCW 레이더는 송신신호와 표적에서 반사되어 입력되는 수신신호의 시간 차이를 비교할 수 있도록 시간에 대한 연속파형 신호를 선형 주파수 변조한 후 표적에 방사하여 반사된 신호를 수신하게 되면 전파의 시간지연에 비례하는 주파수차가 발생하는데, 이러한 차주파수를 추출하는 방식으로 표적간의 거리정보를 얻는다. 또한 표적의 유무는 포락선검파기(envelope detector)를 통해서 수신 전력의 크기를 감지하여 판별한다.

본 방식의 레이더는 송수신장치의 구조가 간단하여 소형화가 용이할 뿐만 아니라 연속파형을 송신신호로 사용하기 때문에 비교적 저출력의 송신전력으로 운용



[그림 2] 호모다인 FMCW 레이더의 원리

되며, 송신신호의 주파수 대역폭이 넓기 때문에 외부의 재밍에 강한 특성을 가진다. 따라서 수백 미터 내에 존재하는 근거리 표적 감지 신관용 능동센서로 적합하다.

변조 주기가 T_m 인 삼각파신호의 선형 FM 신호는 다음과 같이 표현된다^[2].

$$f(t) = f_0 + \alpha t, \quad 0 \leq t \leq T_m/2 \quad (1)$$

이때, α 는 지연시간에 대한 비트주파수의 크기를 대응 시켜주는 상수로 수식 (2)와 같다.

$$\alpha = \frac{f(t) - f_0}{t} = \frac{2B}{T_m} = \frac{f_b}{\tau_d} \quad (2)$$

여기서,

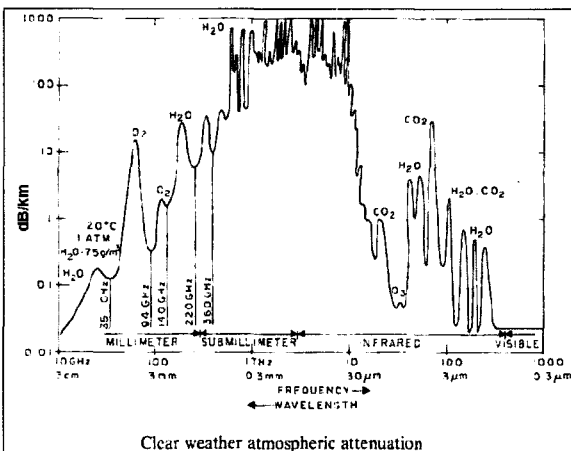
B 는 VCO의 주파수 변조 대역폭

f_b 는 IF단의 비트주파수

τ_d 는 거리에 따른 송수신신호의 지연시간

변조 주파수가 f_m 인 삼각파 신호를 변조 대역폭 B 로 주파수 변조할 때, FMCW 레이더의 비트 주파수 (f_b)는 표적의 감지 거리(R)와 수식 (3)과 같은 관계에 있다.

$$f_b = \frac{4Bf_m R}{c} \quad (3)$$



[그림 1] 대기 중 전자파의 감쇄특성

다. 지상 표적감지용 FMCW 레이더 사양결정

FMCW 레이더를 이용하여 능동센서의 고도정보를 획득하기 위해서는 지면의 비트신호를 감지하여야 한다. 따라서 지면 클러터의 RCS에 대한 분석은 레이더의 감도를 결정하는데 중요한 요소이다. 지면의 RCS는 안테나의 footprint 크기와 지면 클러터의 반사도(σ_0)에 의해 다음과 같다.

$$\sigma_g = \sigma_0 A_{foot} \quad (4)$$

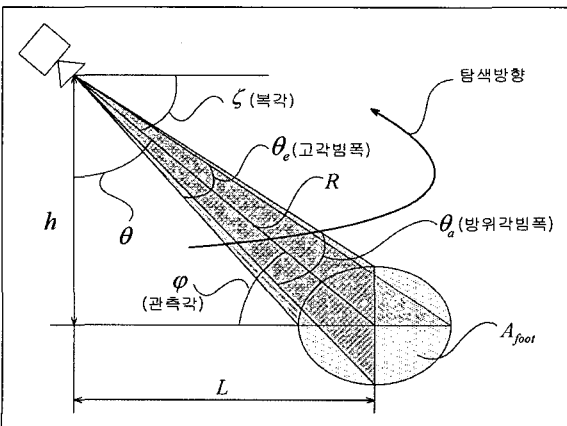
여기서, A_{foot} 은 지면에 조사되는 footprint 크기

그림 3은 안테나 빔 형성에 대한 기하학적 구조를 도시한 것이다. 사용된 안테나는 카세그레인 안테나로, 고각의 3dB 빔폭(θ_e)과 방위각의 빔폭(θ_a)이 동일하다. 탐색고도(h)와 탐색반경(L)에 따라 지상에서 발생하는 안테나의 footprint(A_{foot})는 다음과 같이 계산할 수 있다^[3].

$$A_{foot} = \frac{2h^2 \tan(\theta_e/2)}{\cos\theta} \left\{ \tan\left(\theta + \frac{1}{2}\theta_e\right) - \tan\left(\theta - \frac{1}{2}\theta_e\right) \right\} \quad (5)$$

여기서, $\theta = \pi/4 - \zeta$, $\zeta = \tan^{-1}(h/L)$ 는 복각

지면의 반사도(σ_0)는 지면 구성 물질의 분포 및 측정 환경에 따라서 큰 차이를 보인다. 표 1은 95GHz에서 관측각(ϕ)이 30°일 때 지면을 구성하는 요소들



[그림 3] 안테나 footprint에 대한 기하학적 구조

[표 1] 95GHz에서 $\phi=30^\circ$ 일 때 지면에 따른 반사도

Ground Type	Reflectivity (dB)
Ponds, lakes, roads	$\sigma_0 = -25$
Soil and seedlings	$\sigma_0 = -20$ to -12
Crops	$\sigma_0 = -13$ to -9
Trees	$\sigma_0 = -10$ to -5
Urban	$\sigma_0 = -5$ to $+5$

의 전형적인 σ_0 를 정리한 것이다^[4].

지면 클러터는 ϕ 가 커질수록 그 크기가 증가하는 양상을 가진다. 관측각에 따른 지면 클러터의 σ_0 는 다음과 같이 모델링 된다^[5].

$$\sigma_0 = \gamma \sin(\phi) \quad (6)$$

여기서, ϕ 는 지면에 대한 관측각(rad)
 γ 는 지면 산란 효율 파라미터

수식 (6)으로부터, $\phi=60^\circ$ 일 때 σ_0 는 $\phi=30^\circ$ 의 경우보다 약 2.4dB 가량 큰 값을 가진다. 따라서 운용 조건을 고려할 경우, 감지되는 지면의 종류에 따라 σ_0 는 약 -23dB에서 +0dB 사이가 될 것으로 예상된다.

송수신장치를 통해서 중간주파수(IF) 회로부로 입력되는 표적 신호의 크기(P_{IF})는 거리에 따라서 다음과 같은 레이더 방정식으로 계산된다.

$$P_{IF} = \frac{P_{Tx(avg)} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_{RX}} \quad (7)$$

여기서 $P_{tx(avg)}$ 는 송신 출력
 G 는 안테나 이득
 λ 는 송신되는 밀리미터파의 파장
 σ 는 표적의 RCS
 L_{RX} 는 밀리미터파 수신단 손실
 R 은 표적과의 거리($=h/\cos\theta$)

수식 (4) 및 수식 (5)로부터, 고도(h)에 따라서 지면 클러터 $\sigma_g \propto h^2$ 이고 수식 (7)의 레이더 공식으로부터 $P_r \propto 1/h^4$ 이므로, 지면 클러터에 대한 수신 전력은 $P_r \propto 1/h^2$ 의 관계를 가진다.

지상의 금속표적을 탐지하기 위해서는 pencil-beam 형태를 가지는 반사경형 안테나가 적합하다. 반사경형 안테나의 지름(d)에 따라서 예상되는 3dB 빔폭 (θ_{3dB})은 다음과 같은 관계가 있다.

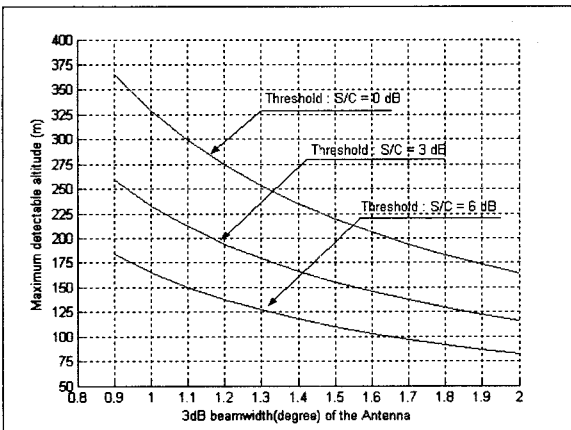
$$d = \frac{1.18 * \lambda_0}{\theta_{3dB(rad)}} \quad (8)$$

여기서, λ_0 는 방사되는 전파의 파장

구현하고자하는 센서의 크기가 xxxmm이므로 필요한 3dB 빔폭은 약 x.xx°가 된다.

그림 4는 $\sigma_0=0dB$ 이고 표적의 RCS가 xxm²일 때, 표적의 유무를 판별하는 임계 조건인 신호 대 클러터 비(S/C)에 따라서 안테나의 빔폭에 대한 최대 감지가능 고도를 계산한 것이다. 감지 가능 고도를 높이기 위해서는 빔폭이 좁은 안테나를 구현해야 하나, 빔폭이 좁을수록 크기가 클 뿐만 아니라 탐색구간의 사각이 발생할 수 있으므로 이를 고려한 설계가 필요하다.

지면 클러터가 있는 레이더 환경에서는 전력에 대한 S/C 뿐만 아니라 클러터의 특성과 표적의 특성 등을 고려한 S/C를 표적 감지의 임계조건으로 정할



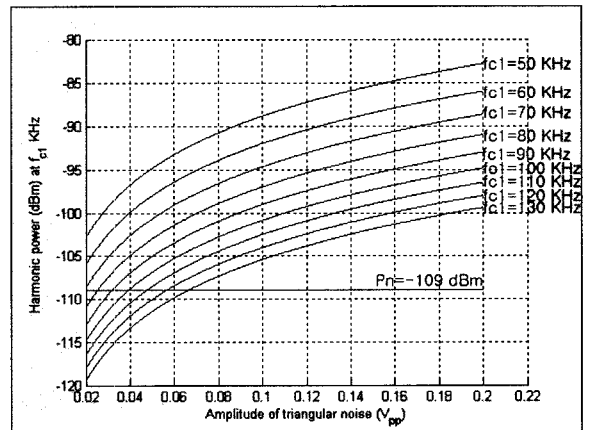
[그림 4] 안테나 빔폭에 따른 임계치에 대한 h_{max}

수 있는데, 여기서는 수신되는 전력에 대한 S/C 만을 고려하여 표적감지의 임계 기준으로 한다. 그림 4로부터, 수신 전력의 S/C가 3dB 일 때, h_{max} 는 160m이다. 이와 같이, 지상 표적감지용 레이더의 최대 감지고도는 S/C에 함수이므로 지면 클러터 특성을 고려한 안테나의 빔폭 결정이 매우 중요하다. 수식 (7)으로부터, 송신전력($P_{Tx(avg)}$)이 10dBm일 때, 고도 $h_{max}=160m$ 에서 $\sigma_0=-23dB$ 에서 0dB인 지면 클러터의 수신전력(P_{Rx})은 -93.5dBm에서 -70.5dBm 사이이다.

라. IF누설신호의 제거방안

밀리미터파 대역의 FMCW 레이더는 높은 동작주파수로 인해서 주파수 변조 대역폭을 넓게 하여 거리 분해능을 개선할 수 있고 파장이 매우 짧기 때문에 고이득 안테나를 소형으로 구현 가능 하지만^[6], 소형화를 위해서 단일안테나를 사용할 경우 밀리미터파 송수신장치에서 IF누설신호를 발생하여 감도가 저하되는 문제점이 있다.

호모다인 송수신장치에서 발생하는 IF누설신호의 전형적인 형태는 $t = nT_m/2$, $n = \dots -1, 0, 1, \dots$ 에서 특이점이 주기적으로 발생하기 때문에 변조신호로 사용된 삼각파와 스펙트럼이 유사하다. 따라서 누설신호와 동일한 크기의 삼각파로 가정하여 분석할 수 있다^[3]. 삼각파의 스펙트럼은 변조주기 f_m 의 고조파성분으로 나타나는데, 통과대역내의 고조파 성분이 시스



[그림 5] IF누설신호크기에 따라 요구되는 f_{c1}

템의 잡음바다 보다 낮아야 한다.

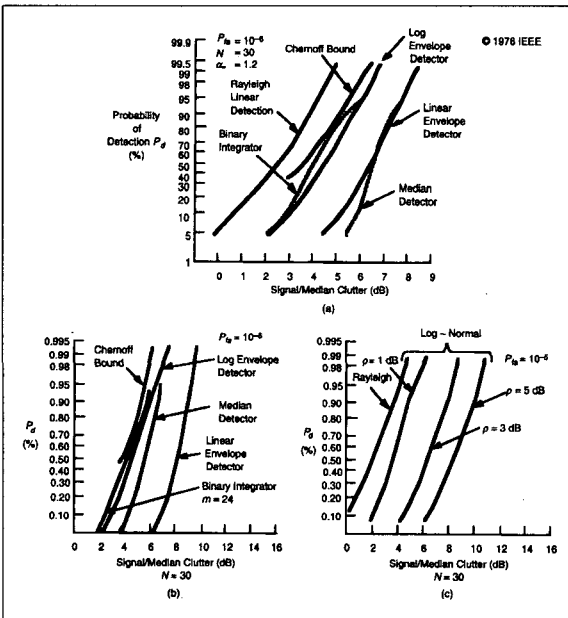
그림 5는 IF누설신호에 의해 통과 대역에서 발생하는 고조파 성분의 전력크기를 대역통과여파기(BPF)의 낮은 차단주파수(f_{cl})에 따라 계산한 것이다.

송수신장치에서 발생할 수 있는 IF누설신호의 최대 크기가 $50mV_{pp}$ 라고 할 때, noise floor(P_n)가 -109 dBm 이하가 되기 위해서는 $f_m=1$ KHz일 때, f_{cl} 가 120KHz 보다 커야 한다.

마. 표적의 검파 방식의 결정

밀리미터파 능동센서는 지면 클러터가 매우 큰 환경 하에서 표적을 구별하여야 한다. 지면 클러터는 Weibull이나 log normal 분포의 확률밀도 함수를 통해서 모델링한다^[1].

그림 6은 S/C에 따른 감지확률(P_d)을 각 검파기의 종류에 따라서 도시한 그래프이다. 로그 포락선 검파기를 사용할 경우, 동일한 S/C를 가지는 Weibull 클러터와 log normal 클러터 하에서 표적을 감지할 수 있는 확률이 선형포락선 검파기에 비해서 크게 증가함을 알 수 있다.



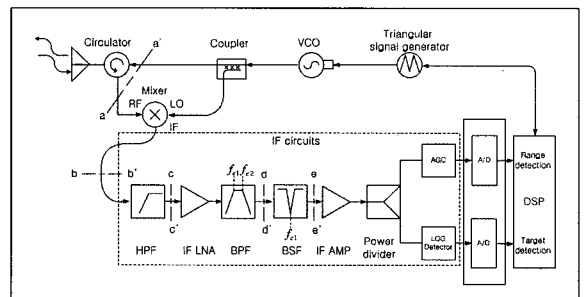
[그림 6] 검파기의 종류 및 S/C 비에 따른 감지확률 (P_d)

바. W-대역 FMCW 레이더의 설계

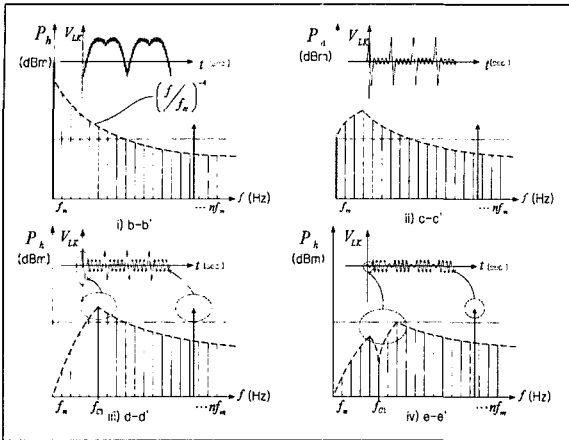
그림 7은 설계된 W-대역 호모다인 FMCW 레이더의 블록도이다. 송수신장치는 FM 신호원으로 사용된 전압조정발진기(VCO), 안테나로부터 수신된 신호를 기준 신호인 국부 발진기(LO) 신호와 혼합하여 비트신호를 발생하는 주파수혼합기, 그리고 VCO 발생한 송신신호의 일부를 LO 신호로 이용하도록 하는 방향성 결합기로 구성되어 있으며, 단일 반사형 안테나를 통해서 송수신 기능을 담당하게 할 수 있도록 서큘레이터를 송수 절환기로 사용하였다. 밀리미터파 송수신장치는 W-대역의 삽입손실 특성을 고려해서 구형 도파관(WR-10) 형태로 구현 되었다. 단일 안테나를 사용한 호모다인 송수신장치에서 발생하는 큰 IF누설신호에 따른 감도 저하문제를 해결하기 위해서, 중간주파수(IF) 회로부는 대역통과여파기(BPF)와 대역저지여파기(BSF)를 사용하였다^[3]. 여파기를 통해서 누설신호가 제거된 신호는 전력분배기를 통해서 자동이득조절회로와 로그 포락선 검파기로 입력된다.

자동이득조절회로(AGC)는 신호처리부에서 비트주파수를 실시간 신호처리를 할 수 있도록 수신 전력에 무관한 일정한 출력 신호를 발생시키는 역할을 하고, 로그 포락선 검파기는 수신된 신호의 크기에 로그적으로 비례하는 신호를 출력한다. 따라서 안테나 pencil-beam이 형성하는 footprint가 지면을 탐색하면서 발생하는 수신신호의 크기 변화를 로그 포락선 검파기를 통해 관찰함으로써 지상에 있는 표적의 유무를 감별한다.

그림 8은 IF누설신호를 제거하기 위해서 구현된 IF회로부에서 각 구간별로 나타나는 누설신호의 스펙트럼을 개념적으로 도시한 그래프이다.



[그림 7] W-대역 FMCW 레이더의 블록도



[그림 8] 설계된 레이더센서의 구간별 IF누설신호

송신 누설신호에 의해서 송수신장치에서 발생하는 IF누설신호의 스펙트럼은 그림 8-i)와 같이, $(f/f_m)^{-4}$ 의 특성을 가진다. IF LNA의 앞단에는 저주파 성분을 제거하기 위해서 HPF가 사용된다. IF LNA를 통해서 증폭된 IF 신호는 그림 8-ii)와 같이 통과대역 근방의 고주파 성분으로 인해서 $t = nT_m/2$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 에서 스파이크 형태의 잡음을 만든다.

BPF를 통과한 누설신호의 주파수 스펙트럼과 시간축에 대한 파형은 그림 8-iii)과 같다. BPF는 f_{cl} 근방의 고주파성분을 충분히 제거할 수 없기 때문에 스파이크 잡음이 수신신호보다 커져서 로그 포락선 검파기의 출력신호를 왜곡하게 된다. 이를 제거하기 위해서 BPF 뒷단에 차단 주파수가 f_{cl} 인 BSF를 사용한다. 그림 8-iv)는 제거된 스펙트럼과 파형도를 도시하고 있다.

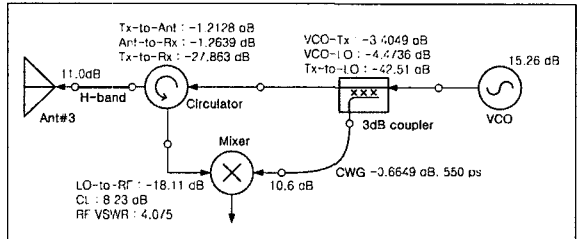
설계된 FMCW 레이더는 IF누설신호 및 시스템의 잡음온도에 의한 잡음 바닥이 -106dBm 가량으로 예상된다.

사. W-대역 FMCW 레이더의 제작

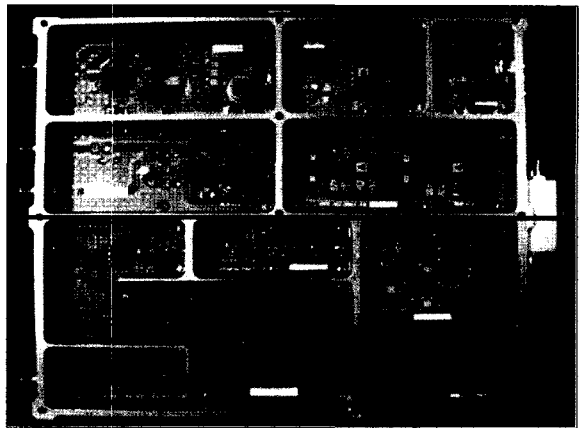
그림 9-a)는 W-대역 송수신장치의 각 부분에 대한 전력을 측정하여 도시한 것이고, 그림 9-b)는 레이더의 IF 회로부, 그림 9-c)는 제작된 W-대역 FMCW 레이더이다. 송신 출력 전력은 11dBm 이고 송수신장치의 수신단 손실은 약 12dB 이다.

센서의 고도정보는 AGC에서 DSP로 입력된 비트

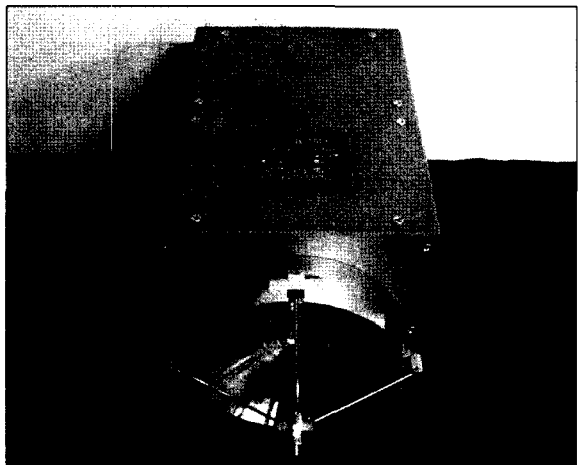
신호를 고속후리에 변환(FFT)을 통해서 수집된 비트주파수로 산출한다. 따라서 FFT를 취하는 시구간이 T_s 일 때, 시스템의 잡음대역폭 $B_n \approx 1/T_s$ 가 된다.



a) W-대역 송수신장치의 전력 특성 분석



b) 레이더 중간주파수 회로



c) 제작된 FMCW 레이더의 외형

[그림 9] 제작된 W-대역 FMCW 레이더

시스템의 잡음지수(NF_{sys})는 수신단의 잡음 바닥(N_{floor})과 다음과 같은 관계가 있다.

$$NF_{sys} = NF_{sys} - 174(\text{dBm/Hz}) + 10\log B_n \quad (9)$$

여기서 NF_{sys} 는 시스템의 잡음지수

$B_n (\approx 1/T_s)$ 는 FFT에 의한 잡음 대역폭

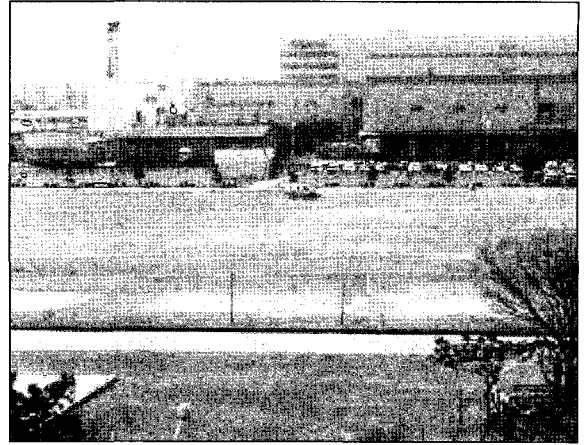
잡음지수를 개선하기 위해서는 송수신장치의 수신단에 저잡음증폭기(LNA)를 사용해야 하나, 단일 안테나를 사용하는 경우 안테나의 부정합에 의한 반사 신호가 저잡음 증폭기를 통해서 증폭되어 매우 큰 IF 누설신호를 발생하거나 심할 경우 주파수혼합기를 포화시키기 때문에 밀리미터파 송수신장치의 수신단은 혼합기뿐만 구현하였다. 혼합기의 IF포트에서 발생한 IF누설신호의 크기는 약 30mV_{pp} 이다.

제작된 레이더는 $T_s > 25\mu\text{s}$ 에서 $B_{n(\text{max})} = 40\text{KHz}$ 이고, $NF_{sys} = 19\text{dB}$ 이다. 따라서 시스템의 잡음 바닥은 $N_{floor} \approx -108.9\text{dBm}$ 이다. AGC의 출력은 4V , 로그 포락선 검파기의 감도는 50mV/dB 이다.

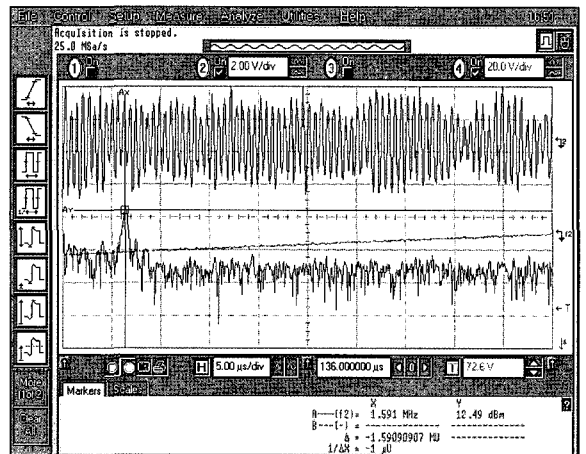
3. 야외 표적 감지 시험

구현된 W-대역 레이더는 그림 10과 같이, 전방 $L = 100\text{m}, 150\text{m}, 200\text{m}$ 거리의 잔디위에 있는 차량에 대하여 거리 감지 및 검파기 신호 추출 시험을 수행하였다. 본 시험은 관측각(ϕ)이 6° 이하에서 풀발에서 차량에 대한 비트신호와 검파기 신호를 추출하는 것으로, 수식 (6)의 관계로부터, 표 1에 언급된 $\phi = 30^\circ$ 일 때의 σ_0 에 비해서 6dB 가량 낮아질 것으로 보인다. 그러나 A_{foot} 은 11.44dBsm 증가하기 때문에 로그 검파기에 대한 지면 클러터의 영향이 커질 것으로 예상된다. 그림 11은 제작된 W-대역 FMCW 레이더를 이용하여 거리 200m 전방 차량을 측정할 결과이다.

$f_b = 1591\text{KHz}$ 인 표적의 비트신호를 중심으로 지면의 클러터신호가 넓은 주파수 범위에서 나타나고 있다. 이러한 넓은 범위의 클러터 신호는 낮은 관측각으로 인해서 안테나의 빔이 지면을 매우 넓게 조영하



[그림 10] 200m 전방 차량에 대한 야외표적감지 시험

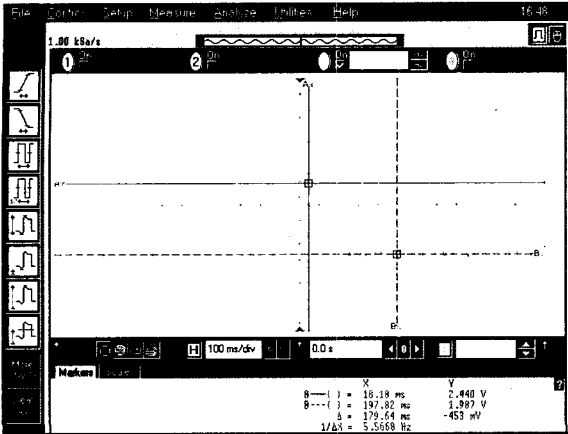


[그림 11] 200m 전방 차량에 대한 비트신호

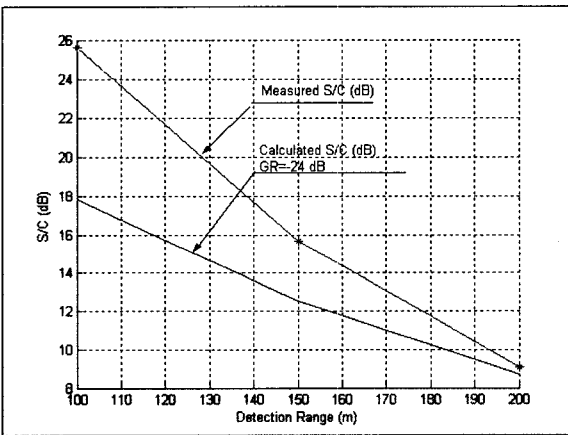
였기 때문이다.

그림 12는 전방 200m 차량에 대해서 측정된 로그 포락선 검파기의 출력신호이다. 200m 전방 지상에 있는 차량 표적에 대해서 검출된 신호대 클러터비(S/C)는 9.06dB 이다.

그림 13은 거리에 따라서 측정된 표적과 지면 클러터의 S/C와 표적의 RCS가 10m^2 이고, $\sigma_0 = -24\text{dB}$ 라고 가정하여 감지 거리에 따라서 계산한 S/C 비를 도시한 그래프이다. 감지 거리가 멀수록 A_{foot} 이 급격히 증가하기 때문에 지면 클러터가 크게 발생하고, 이로 인해서 S/C가 저하된다. 측정된 S/C는 거리 200m 에



[그림 12] 200m 전방 지상 차량에 대한 로그 포락선 검파기 신호



[그림 13] 감지 거리에 따라 측정 및 계산된 S/C 비

서는 계산된 S/C와 거의 일치 하였으나 감지 거리가 100m 일 때 약 8dB 차이가 났다. 이는 안테나에 대한 표적의 fill factor가 감지 거리가 가까워지면서 증가하여 표적의 RCS가 증가한 것에 원인이 있다.

4. 결론

지면 클러터가 존재하는 환경에서 금속표적을 감지할 수 있는 W-대역의 호모다인 FMCW 레이더를

단일안테나를 사용하여 설계/제작하였다. 지상에 존재하는 금속표적을 감지하기 위해서 탐색 구간과 감지 고도를 고려하여 빔폭이 매우 좁은 카세그레인 안테나를 송수신 공용으로 사용하였다. 제작된 FMCW 레이더는 비트주파수로 고도를 산출하면서 로그 포락선 검파기를 통해서 표적을 감지하도록 구현하였다. 제작된 FMCW 레이더를 이용해서 풀밭 위에 위치한 차량을 대상으로 비트신호 및 로그포락선 검파기출력 신호를 추출하였다. 구현된 센서는 지면 클러터 환경에서 전방 200m에 위치한 표적의 비트신호를 감지하여 거리정보를 획득하였으며, 지면 클러터에서 표적 신호를 구분하였다.

본 논문에서 연구된 단일안테나를 이용한 호모다인 FMCW 레이더의 설계 기술은 차세대 지능형 표적 감지용 신관 및 각종 능동센서 개발에 유용하게 응용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Lawrence A. Klein, Millimeter-Wave and infrared Multisensor Design and Signal Processing, Artech House, 1997, pp.59, pp.164 ~188, pp.117.
- [2] A. G. Stove, "Linear FMCW radar techniques", IEE PROCEEDINGS-F, Vol. 139, No. 5, October, 1992.
- [3] 박정동, 정명숙, 김완주, "W-대역 FMCW 레이더 IF보완설계 및 제작", 기술보고서, TEDC-517-040399, 국방과학연구소, April, 2004.
- [4] Nicholas C. Currie, Robert D. Hayes, Robert N. Trebits, Millimeter-wave Radar Clutter, Artech House, 1992, pp.198.
- [5] Barton, David K., Radar technology encyclopedia, Artech House, 1998, pp.94.
- [6] N. C. Currie, Principles and Applications of Millimeter-wave Radar, Artech House, 1987, pp.22~28.