

W-대역 Total Power Radiometer 설계 및 제작

Design and Fabrication of a W-band Total Power Radiometer

정명숙*

Jung, Myung-Suk

ABSTRACT

We present a W-band radiometer to detect the metal targets on the ground environment. The type of the designed radiometer is the total power radiometer(TPR) for the simple configuration. The front end of the TPR consists of only the Mixer and LO for miniaturizing the system. Because the radiometer system does not use the low noise amplifier, we use matching circuits and a diode detector configured as a voltage doubler to compensate the degradation of sensitivity. We solve the temperature variation problems by filtering the reference voltages of the radiometer output signals. Through some experiments, we have verified that the designed radiometer system has good performances in detecting metal targets lying at several hundred meters.

주요기술용어(주제어) : Radiometer(레이디오미터), TPR(Total Power Radiometer)

1. 서론

레이디오미터(radiometer)는 방사, 복사의 “radio-”와 측정 장치를 의미하는 “-meter”의 합성어로 복사되는 양을 측정하는 장치를 일컫는 광범위한 용어로서 일반적인 의미에서는 어떠한 피측정물에서 복사되는 에너지의 양을 측정하는 장치이다. 절대 온도 0 K(=-273℃)이상의 모든 물체는 전자파에너지를 방출한다는 양자이론을 통해 물체의 온도와 그에 따라 주파수별 복사에너지의 양이 규명되었으며, 이는 레이디오미터의 동작에 기본이 된다. 이를 이용하여 어떤 일정 부분으로부터 방사되는 에너지의 양을 일정 주파수

대역에 대해 측정하여 피 측정체의 특성을 파악하는 원격 감지에 레이디오미터가 폭 넓게 사용되고 있다.

본 논문에서는 그 중 소형 시스템 구현에 유리한 W-대역에서 지상에 위치한 금속 표적(target)을 감지하는 레이디오미터 설계에 대한 내용을 다룬다.

설계하고자 하는 레이디오미터는 구조가 간단하여 저가의 소형 시스템에 적합한 TPR(total power radiometer) 방식이며, 지면과 금속 표적의 상대적 구분을 그 목적으로 한다. 그리고 소형 시스템에 맞도록 시스템 전단부를 최소화하였으며, 이로 인해 시스템 잡음지수가 높아져 레이디오미터 감도가 저하되는 문제는 고감도 detector를 사용하여 보상하였다. TPR의 단점인 출력 기준전압이 시스템 온도에 따라 변하는 문제는 HPF를 사용하여 기준전압은 제거하고 신호의 변화만을 추출하여 이를 해결하였다.

본 논문에서는 먼저 레이디오미터의 원리를 살펴보고

† 2005년 11월 5일 접수~2006년 3월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : mungdol@add.re.kr

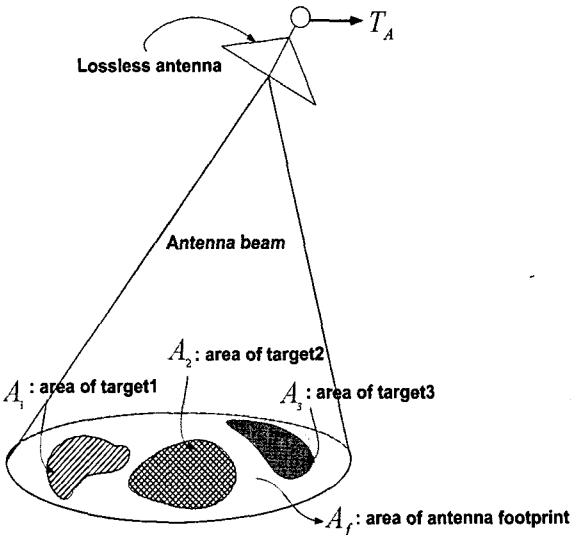
이를 바탕으로 TPR 레디오미터를 분석 및 설계/제작 한 후 제작된 레디오미터를 사용하여 지상 환경에서 금속 표적 감지실험을 실시한 내용을 다룬다.

2. 레디오미터의 원리

일반적으로 레디오미터의 입력신호는 안테나 빔이 조사하고 있는 영역에 존재하는 다양한 복사체 및 클러터들의 복사에너지(P)로서 수식 (1)과 같이 잡음 신호의 형태로 표현된다^[1-3].

$$P = kT_A B \tag{1}$$

여기서, k 는 Boltzmann 상수, B 는 시스템 대역폭을 말한다. 이때 등가적으로 나타나는 잡음온도 T_A 는 안테나 주빔에 의해 형성되는 footprint내에 존재하는 여러 표적(target)들의 T_{AP} (apparent brightness temperature)로 표현된다. 그림 1과 같이 안테나 주빔의 footprint 면적 A_f 내에 여러 가지 표적들이 존재하고 각각의 표적들이 차지하는 등가면적을 A_n 이라고 할 때, 각각의 η_{BFF} (beam fill factor)값은 다음 수식 (2)와 같이 정의된다^[4].



[그림 1] η_{BFF} 의 개념도

$$\eta_{BFF(n)} = \frac{A_n}{A_f} \tag{2}$$

즉, M 개의 표적들이 주빔 footprint내에 차지하는 비율인 $\eta_{BFF(n)}$ 값을 이용하여 안테나 온도를 표현하면 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_A = \eta_l \left\{ \sum_{n=1}^M \eta_{BFF(n)} T_{AP(n)} + \left(1 - \sum_{n=1}^M \eta_{BFF(n)} \right) T_{AP(f)} \right\} + (1 - \eta_l) T_{A0} \tag{3}$$

여기서, $\eta_{BFF(n)}$ 은 n 번째 표적의 beam-fill factor, $T_{AP(n)}$ 은 n 번째 표적의 T_{AP} , $T_{AP(f)}$ 은 주빔 영역 내 배경의 T_{AP} , η_l 은 안테나 효율, T_{A0} 은 안테나의 물리적 온도이다.

이때, 각 복사체의 T_{AP} 는 수백미터 이내의 거리에서 감지하는 레디오미터 시스템에서는 식 (4)와 같이 간단히 나타낼 수 있다^[4].

$$T_{AP} \approx \frac{T_B + \Gamma_i T_{SKY}}{L_a} \tag{4}$$

여기서, L_a 는 대기 감쇠량을 말하며, W-대역에서는 그림 2와 표 1과 같으며^[5], Γ_i 는 표적의 반사계수, T_{SKY} 는 하늘온도이다. 이때, 천정각에 따른 T_{SKY} 는

[표 1] 기상상태에 따른 대기 감쇠량(@ W-대역)

기상상태		대기감쇠[dB/km]
맑음		0.40
비 [mm/hr]	0.25	0.57
	1.0	1.00
	4.0	3.40
	16.0	8.40
안개 [g/M ³]	0.01	0.435
	0.1	0.75
	1.0	3.9

그림 3과 같이 상대습도 및 대기상태에 따라 변화가 큼을 알 수 있다^[5,6].

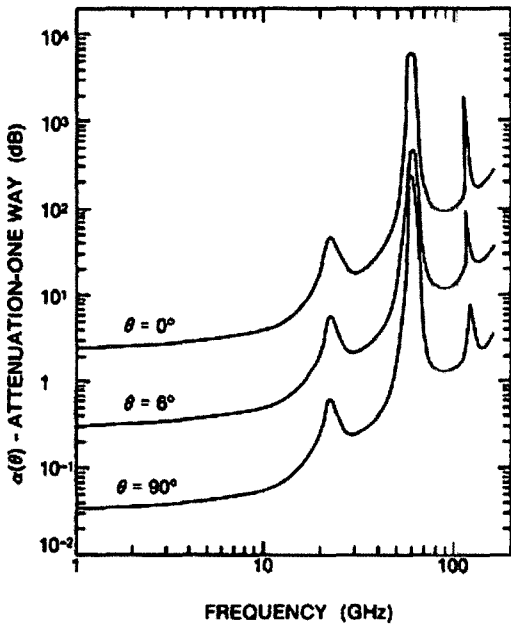
또한, T_B 는 표적의 brightness temperature이며

$$T_B = e T_{T0} \quad (5)$$

이다. 여기서, T_{T0} 는 표적의 물리적 온도이고, e 는 방

사율(emissivity)로 표적에 입사된 에너지에 대해 반사되거나 투과하지 않고 흡수되는 에너지의 비로 식 (6)과 같이 나타난다.

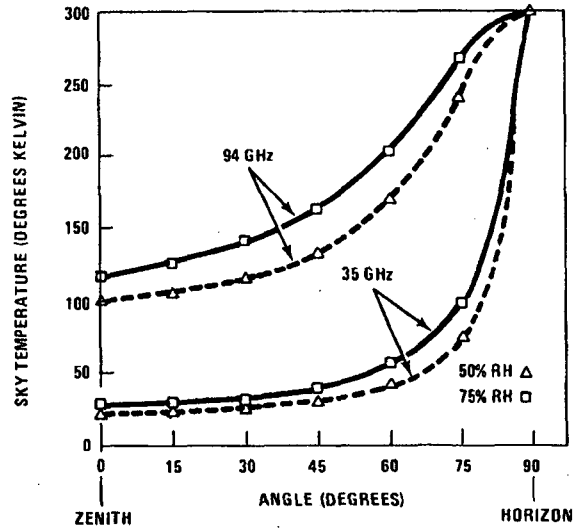
$$e = 1 - \Gamma - t \quad (6)$$



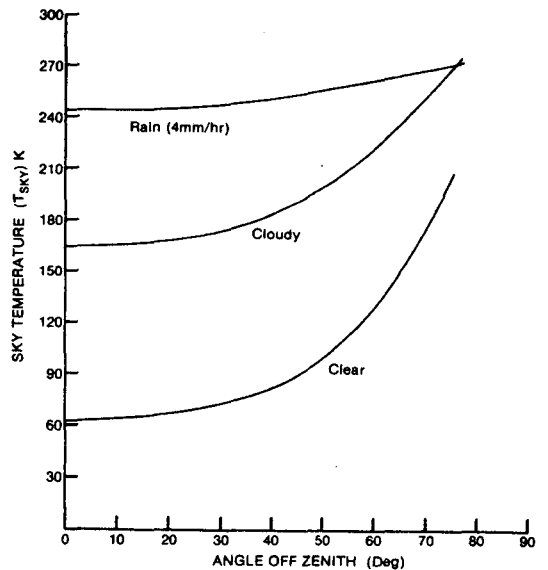
[그림 2] 대기 감쇠량

[표 2] 대표적인 방사율($\theta_{zenith} = 0^\circ$, @ W-대역)

지상표적	e
모래	0.9
아스팔트	0.83
거친 자갈	0.84
매끈한 바위	0.75
콘크리트	0.76
우거진 초목	0.93
잔디밭	0.92
금속	0.1



(a) 상대습도에 따라



(b) 대기상태에 따라

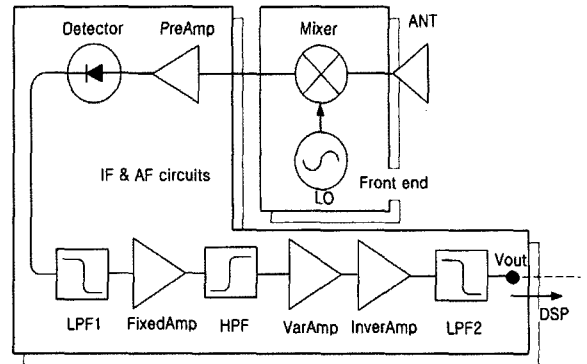
[그림 3] 천정각에 따른 T_{SKY} (@ W-대역)

이때, I 는 표적의 반사율, t 는 표적의 투과율이다. 반사율과 투과율은 물체에 따라 각기 고유한 값인 유전율과 투자율에 의해 결정되는 값이므로 방사율 또한 물체에 따라 고유한 값을 가짐을 알 수 있다. W-대역에서의 지상표적의 대표적인 방사율^[7]은 표 2와 같다.

3. TPR(Total Power Radiometer) 설계

가. 설계된 TPR의 구성

설계된 TPR의 구조는 그림 4와 같다. 표적의 T_{AP} 에 비례하는 복사에너지를 수신하는 안테나 효율 (η_r)이 0.691인 카세그레인 안테나를 사용하였으며, 시스템 전단부는 기준신호원인 국부발진기(LO)와 수신된 잡음신호를 국부발진기 신호와 혼합하여 중간주파수(IF) 대역으로 변환하는 다이오드형 주파수혼합기(Mixer)로 구성하였다. 중간주파수 및 오디오주파수(AF) 회로부는 주파수 혼합기의 출력 신호를 검파기의 동적 입력범위 내의 신호로 증폭하여 주는 PreAmp, 증폭된 잡음신호의 전력에 비례하는 전압신호로 바꾸어주는 검파기(Detector), 출력전압 신호의 잡음을 제거해 신호를 안정화 시켜주는 저역통과필터(LPF1), 원하는 신호 범위로 신호의 크기를 조정하기 위한 증폭단인 FixedAmp와 VarAmp, 시스템 온도에 따라 가변되는 오피셋 전압을 제거하고 신호의 변화만을 검출하기 위한 고역통과필터(HPF), 금속을 감지했을 때 신호가 커지도록 하기 위한 반전 증폭기인 InverAmp 및 디지털 신호 처리시 신호의 왜곡을 막기 위해(anti-aliasing) 필요한 LPF2로 구성된다. 이렇게 구성된 TPR 시스템의 전단부 총 손실 ($L_{receiver}$)은 13.6dB이고, 검파기 전단까지의 총 이득 (G_R)은 40.4dB이며, 시스템 대역폭(B)은 약 1GHz이다. 구성된 TPR은 시스템의 소형화를 위해 시스템 전단부에 저잡음 증폭기를 사용하지 않기 때문에 시스템 잡음지수(NF_R)가 16.6dB로 높게 나타난다. 만일, 주파수 혼합기 전단에 잡음지수가 6dB이고, 이득이 10dB인 저잡음 증폭기를 사용한다면, NF_R 은 약 9.9dB가 되어 성능 향상을 기대할 수 있지만, 단가가



[그림 4] 설계된 TPR 시스템 구성

높아지고 시스템이 커지기 때문에 저가의 소형시스템을 구현하기가 용이하지 않다.

나. 시스템 등가 입력 잡음 전력 및 최소 감지 가능 온도

그림 4에서 레디오미터의 등가 입력 잡음 전력은 식 (7)과 같다.

$$P_{IN} = k T_{SYS} B \quad (7)$$

여기서, T_{SYS} 는 레디오미터의 시스템 온도로서

$$T_{SYS} = T_A + (NF_R - 1) T_0 \quad (8)$$

와 같이 표현되며, 여기서 NF_R 은 시스템 잡음지수, T_0 는 시스템의 물리적 온도이다. 시스템 잡음지수는

$$NF_R = L_{receiver} + NF_{PreAmp} \quad (9)$$

이고, $L_{receiver}$ 는 시스템 전단부의 총 손실이고, NF_{PreAmp} 는 PreAmp의 잡음지수를 말한다.

또한, 레디오미터의 성능지수 중 하나인 최소감지 가능온도(MDT, Minimum Detectable Temperature) 혹은 온도분해능은^[4]

$$\Delta T = \frac{T_{SYS}}{\sqrt{B \tau}} \quad (10)$$

와 같이 표현되며, 여기서 τ 는 저역통과필터(LPF1)에 의해 결정되는 적분시간이다.

설계된 TPR의 레디오미터의 등가 입력 잡음 전력을 식 (11)과 같다.

$$T_{SYS} = \eta_l T_{AP} + (1 - \eta_l) T_{A0} + (NF_R - 1) T_{S0} = 13,255.56 \text{ K} \quad (11)$$

여기서, 시스템 잡음지수(NF_R)는 16.6dB이고, 안테나 효율 η_l 은 0.691이며, 안테나의 물리적 온도 T_{A0} 와 시스템의 물리적 온도 T_{S0} 및 T_{AP} 는 290K로 가정하였다.

따라서 시스템 대역폭 B 가 1GHz이므로, 레디오미터 등가 입력 잡음 전력(P_{IN})을 계산하면 -67.38dBm이 된다.

또한, 식 (10)으로부터 시스템의 MDT를 5K 이하로 할 경우 $\tau \approx 1/B_{LPF1} = 8\text{ms}$ 이상이 되도록 저역통과필터(LPF1)를 구현하여야 하며, 이때 τ 가 8ms이면 시스템의 MDT는 약 4.7K가 된다.

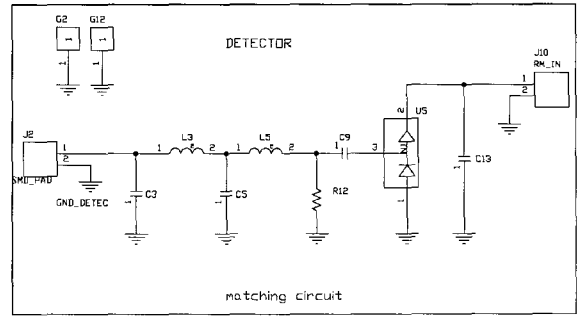
다. 고감도 검파기 설계

시스템 감도를 높이기 위해 고감도의 검파기를 설계하였다. 그림 5와 같이 2개의 다이오드와 C9 및 C13의 캐패시터를 사용하여 전압체배기가 되도록 하였다. 또한, 다이오드의 입력 임피던스가 매우 크기 때문에 병렬 저항을 사용한 뒤 다시 LC 매칭을 하였다.

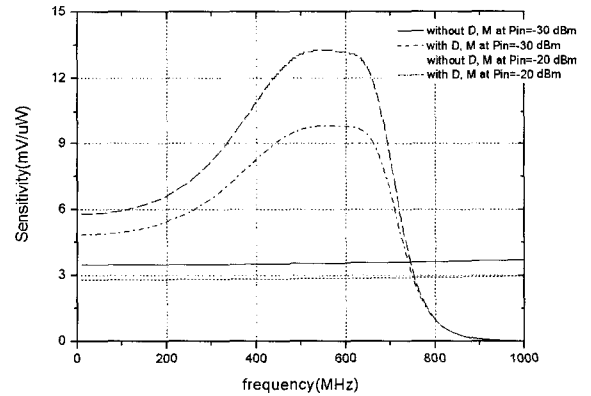
검파기는 전력검파기 형태의 HP사의 HSMS2850 다이오드를 사용하여 약 400MHz~750MHz대역에서 감도 약 10mV/ μ W가 되도록 설계하였다. 설계에 사용된 다이오드의 동적입력범위가 -50dBm~-20dBm이고, 검파기 감도가 10mV/ μ W이므로, 검파기의 출력이 수 mV 이상이라면 입력은 -40dBm 이상이어야 한다. 따라서 수신단 총 이득은 약 30dB~50dB 정도이어야 한다.

검파기의 감도 특성 및 반사계수를 시뮬레이션 한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6-(a)에서 입력전력이 약 -20dBm이고, 주파수가 약 600MHz 일 때 전압체배기와 매칭회로를 사용하지 않은 경우에는 감도가 약 2.87mV/ μ W이고, 전압체배기와 매칭회로를 사용한

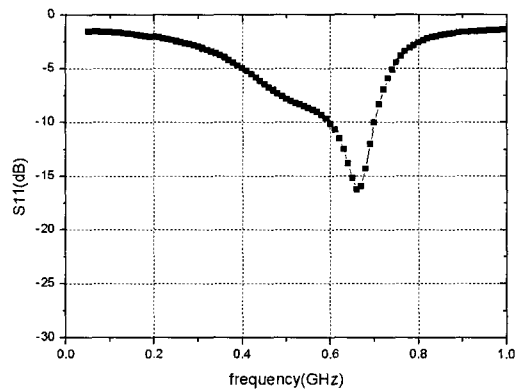
경우에는 감도가 9.77mV/ μ W로 약 3.4배 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 6-(b)의 반사계수 특성에서 -4dB 대역이 약 360~755MHz임을 알 수 있다.



[그림 5] 설계된 검파기



(a) 감도 특성



(b) 반사계수 특성

[그림 6] 검파기의 시뮬레이션 결과

라. HPF를 사용한 옴셋 전압 제거
수신단 총 이득을 G_R , 검파기의 감도를 $S_{mV/\mu W}$ 라고 할 때 검파기의 출력 $V_{detector\ out}$ 은 그림 4와 같은 구성에서 다음의 수식 (12)와 같다.

$$V_{detector\ out} = S \times G_R \times P_{IN} \quad (12)$$

수식 (3) 및 (7)과 (8)로부터

$$V_{detector\ out} = V_1(T_{AP}) + V_2(T_{A0}) + V_3(T_{S0}) \quad (13)$$

이고, 여기서

$$V_1(T_{AP}) = S G_R (k \eta_1 T_{AP} B) \quad (14)$$

$$V_2(T_{A0}) = S G_R (k(1 - \eta_1) T_{A0} B) \quad (15)$$

$$V_3(T_{S0}) = S G_R (k(NF_R - 1) T_{S0} B) \quad (16)$$

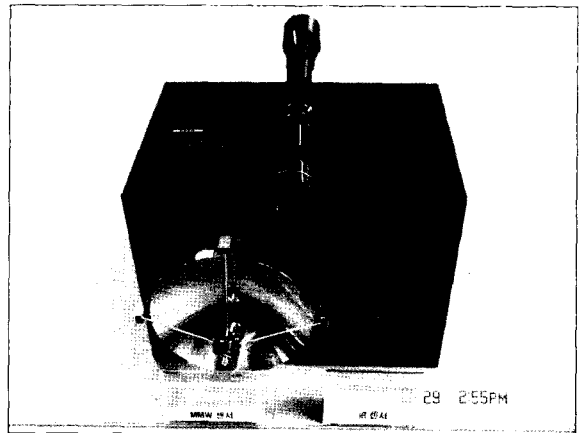
와 같다. 이때 식 (14)의 $V_1(T_{AP})$ 전압은 표적에 의해 나타나는 T_{AP} 에 따라 변화하는 출력 전압이고, 식 (15)의 $V_2(T_{A0})$ 와 식 (16)의 $V_3(T_{S0})$ 는 표적과 무관하게 시스템 파라미터에 의해 나타나는 출력전압으로 안테나와 시스템의 물리적 온도에 비례하여 나타난다.

이때, $V_2(T_{A0})$ 와 $V_3(T_{S0})$ 는 안테나와 시스템의 물리적 온도에 비례하여 나타나기 때문에 원하는 신호인 $V_1(T_{AP})$ 의 변화가 없더라도 물리적 온도 변화에 의한 $V_2(T_{A0})$ 와 $V_3(T_{S0})$ 에 의해 검파기 출력에서 신호의 변화가 발생할 수 있다. 일반적인 TPR 시스템에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 별도의 온도보상용 기법으로 기준잡음부하를 사용하여 주기적으로 출력 전압을 보정하는 방법을 사용하지만^[8], 이는 시스템을 복잡하게 하여 소형시스템에는 부적합하다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 고역통과필터를 사용하여 레디오미터 운용 중에 시스템 온도변화에 따라 달라지는 옴셋 전압은 제거하고 신호의 변화만을 검출할 수 있도록 하였다.

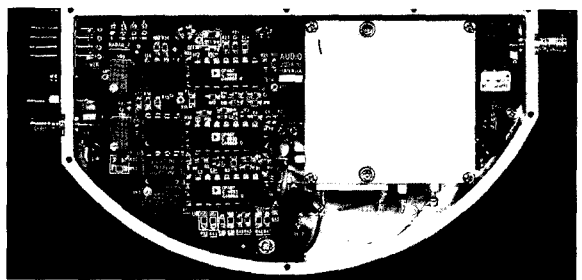
4. TPR 제작 및 특성 실험

가. TPR 제작

제작된 W-대역 TPR은 그림 7과 같다. 안테나는 카세그레인 안테나를 사용하고 MMW 모듈은 도파관 형태의 소자들을 사용하였으며^[9] 전체 외형은 그림 7-(a)와 같다. 레디오미터 IF부 및 AF부는 FR4 기판을 사용하여 제작하였으며, 제작된 모습은 그림 7-(b)와 같다.



(a) 제작된 TPR 외형

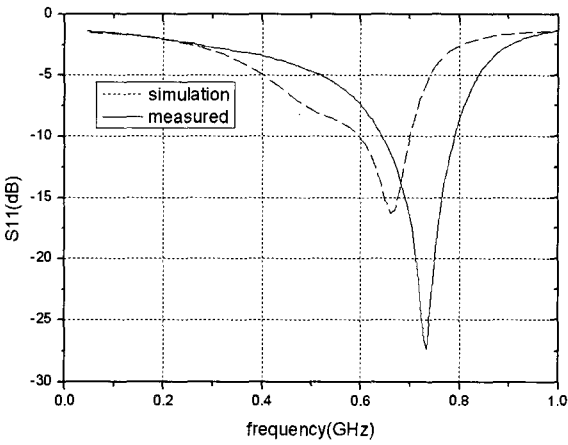


(b) 제작된 TRP IF부 및 AF부

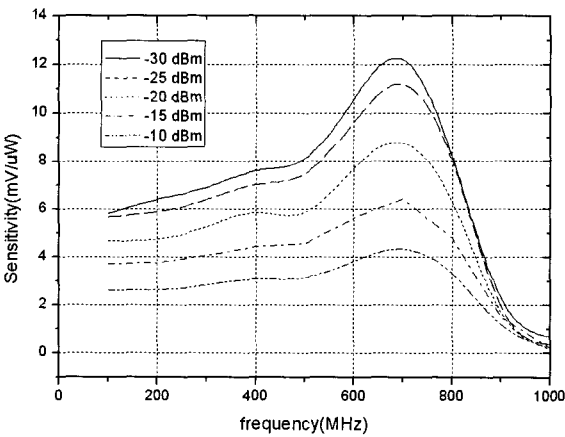
[그림 7] 제작된 TPR 시스템

나. 제작된 검파기 특성

고감도 검파기의 반사계수 측정결과는 그림 8-(a)와 같으며, -4dB 대역폭이 401~862MHz로 설계와 유사하다. 또한, 검파기의 감도 특성은 그림 8-(b)와 같으며 공진점에서 검파기 입력전력이 -20dBm일 때 감도가 약 9.8mV/ μ W로 설계와 유사하다.



(a) 반사계수 특성



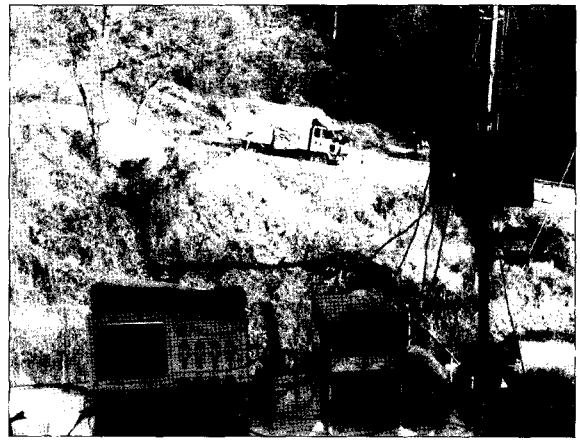
(b) 감도 특성

[그림 8] 제작된 검파기의 특성

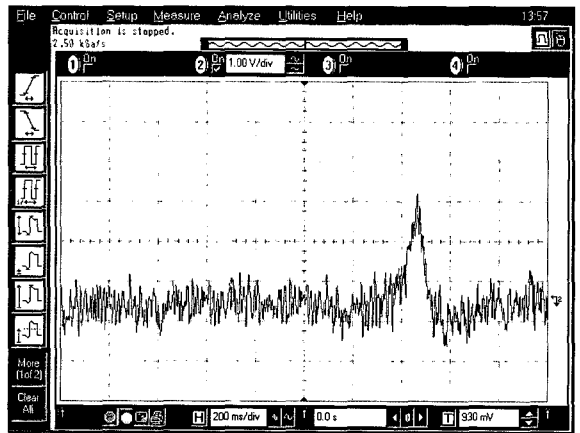
다. 금속 표적 감지 실험 및 결과

제작된 W-대역 레디오미터의 금속 표적 감지 성능을 확인하기 위해 그림 9와 같이 높이 10m의 건물 옥상에 제작된 TPR 센서를 설치하고, 센서로부터 거리 100m인 지점에 금속표적(트럭)을 위치시킨 후 수동으로 좌우로 스캔하면서 금속 표적을 감지하는 실험을 하였다.

실험 결과 오실로스코프로 검출한 레디오미터 출력 신호는 그림 10과 같다. 트럭표적에 대해 레디오미터 출력 신호의 변화량은 지면에 대해 약 2.4V 정도임을 알 수 있다.



[그림 9] 실험 장면



[그림 10] 실험 결과

5. 결론

본 논문에서는 지면과 금속 표적의 상대적 구분을 목적으로 하는 W-대역 레디오미터의 설계, 제작 및 측정 결과를 기술하였다. 소형시스템에 적합하도록 구조가 간단한 TPR(total power radiometer) 방식을 취하였고, 시스템 전단부는 Mixer와 LO만으로 구성하였다. 저잡음 증폭기를 사용하지 않기 때문에 높아진 시스템 잡음지수로 인해 저하되는 시스템 감도를 전압배배기와 매칭회로를 적용한 고감도 검파기를 사용하여 저하된 감도를 보상하였다. 또한, 레디오미터 운용 중에 시스템 온도변화에 따라 오피셋 전압이 달라

지는 현상은 HPF를 적용하여 옴셋 전압은 제거하고 원하는 신호의 변화만을 추출하였다. 구현된 W-대역 레디오미터를 사용하여 거리 100m에 위치한 금속표적(트럭)을 감지하는 실험을 수행하였으며, 실험 결과 지면에 대해 약 2.4V의 변화를 가지며 금속표적을 성공적으로 감지하였다.

참 고 문 헌

- [1] F. T. Ulaby et. al., Microwave Remote Sensing, vol. 1, Addison-Wesley, 1981.
- [2] Neils Skou, Microwave Radiometer Systems: Design & Analysis, Artech House, 1989.
- [3] G. Evans, C. W. McLeish, RF Radiometer Handbook, Artech House, 1977.
- [4] L. A. Klein, Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing, Artech House, 1997.
- [5] C. R. Seashore, "Millimeter Wave Guidance Application : An Overview", Proceedings of SPIE, vol. 423, pp.66~73.
- [6] Bartia, Bahl, Millimeter Wave Engineering and Applications, Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [7] Thomas Kaiser, Thorsten Kempka, "Is Microwave radiation useful for fire detection?", AUBE'01 12th International Conference on Automatic Fire Detection.
- [8] David A. Thompson, Robert L. Rogers, and John H. Davis, "Temperature Compensation of Total Power Radiometers", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, no. 10, Oct. 2003. pp.2073~2078.
- [9] 정명숙, 이석우, 김완주, "W-대역 Radiometer 기본 설계 및 제작", ADD 기술보고서, TEDC-519-031235, 12. 2003.