수면 기름 유출 원격 탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발

Development of a Microwave Radiometer for Remote Sensing of Oil Spills on the Water Surface

손 홍 민 · 박 진 우

Hong-Min Son · Jin-Woo Park

요 약

본 논문은 수면의 기름 유출 유무, 유출된 기름의 분포 및 확산에 관한 정보를 실시간 원격으로 수집할 수 있는 마이크로파 라디오미터의 개발에 관한 연구 내용을 기술한다. 먼저 수면에 유출된 두께 0~4 mm 범위의 기름층을 0.2 mm 이내의 오차로 원격 측정이 가능한 마이크로파 라디오미터의 개발 목표 성능을 달성하기 위해 요구되는 목표 사양을 도출하였으며, 이를 토대로 라디오미터 수신기를 설계하였다. 설계된 수신기의 시스템 이득과 잡음 지수의 budget 분석을 통해 설계의 적절성을 점검하였으며, 이 결과를 활용하여 수신 주파수 10.65 GHz, 대역폭 58 MHz로 47.3 dB의 시스템 이득과 0.46 K 이내의 수신 감도를 갖는 고이득, 고감도 수신기를 제작하였다. 제작된 수신기와 표준 혼 안테나로 구성된 마이크로파 라디오미터로 실제 수면 유막을 대상으로 실험한 결과, 0.13 mm 이내의 오차로 0~5 mm 범위의 유막 두께를 측정하는데 성공하여 목표 성능이 만족함을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a microwave radiometer for remote sensing of oil spills on the water surface. In order to achieve the development aim of the measurement accuracy within 0.2 mm for oil slicks of 0~4 mm thickness, the requirements of the microwave radiometer and the specifications of its receiver are drawn. From these requirements and specifications, the receiver with high gain, high sensitivity is designed and implemented. The receiver has the bandwidth of 58 MHz, the system gain of 47.3 dB and the sensitivity of 0.46 K at 10.65 GHz. The processes of design and implementation of the receiver are described in this paper. The effectiveness of the proposed microwave radiometer in the measurement of oil slicks is demonstrated experimentally. The results show the microwave radiometer can detect the oil slicks for 0~5 mm thickness within the accuracy of 0.13 mm successfully.

Key words : Microwave Remote Sensing, Microwave Radiometer, Brightness Temperature of Water Surface Covered with Oil, Oil Spills, Oil Thickness Detection

I. 서 론

태안 앞바다 및 멕시코만 기름 유출 사고에서 나타났듯이 해양이나 하천, 담수 등의 기름 유출로 인한 피해는 단시간에 광범위한 지역에 걸쳐 수질 환

경 및 생태계를 파괴하여 사람 및 동식물들의 생존을 위협하는 대재앙을 초래한다^{[1],[2]}. 기름 유출에 의한 피해를 줄이기 위해서는 해양, 하천, 댐, 호수 등 광범위한 지역을 대상으로 유류 오염의 발생 유무, 분포 및 확산 상태에 관한 정보를 실시간, 원격으로

호남대학교 전파이동통신공학과(Department of Radio Mobile Communications Engineering, Honam University)

· 논문 번호 : 20110527-14S

· 교신저자 : 손홍민(e-mail : hmson@honam.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 9월 5일

수집할 수 있는 기술 개발이 시급하다.

수면의 기름 유출을 원격으로 모니터링할 수 있는 센서로 적외선 센서, 마이크로파 산란계 및 SAR (합성 개구 레이더), 그리고 마이크로파 라디오미터 등이 이용된다^{[3][4]}. 적외선 센서는 기상 및 대기 상태에 크게 영향을 받아 구름, 비, 눈이나 안개, 수증기, 황사 등이 존재할 경우 측정이 불가능하다. 마이크로파 산란계나 SAR의 경우 전파 대역을 사용함으로써 전천후로 관측이 가능하나, 능동형으로 송신기와 수신기 모두가 필요하여 시스템이 복잡하며 전력 소모가 크다. 또한, 관측 대상에 랜덤(random)하게 분포되어 있는 수많은 산란점으로부터 산란파가 수신되므로 처리해야할 데이터량이 많고, 랜덤한 표면 상태와 매질 특성에 의한 산란과 그 위에 마이크로파와의 상호 작용이라는 복잡한 물리적 과정이 개재되어 있어 측정치로부터 특정한 물리적 파라미터에 대한 정보를 추출하는 것이 쉽지 않다^[5].

마이크로파 라디오미터는 물체 자체로부터 복사되는 전파 대역의 열잡음 에너지를 안테나를 통해 고이득, 고감도, 광대역 수신기로 수신하여, 그 출력으로부터 물체의 복사 전력을 휘도 온도^[6]로 측정하는 대표적인 수동형 원격 탐사 센서이다. 특히, 적외선 센서나 마이크로파 능동형 센서가 물체의 표면 정보를 주로 수집하는데 비해 관측 대상의 표면 정보뿐만 아니라 내부 정보도 수집이 가능하다. 따라서 수면에 유출된 기름의 확산 분포뿐만 아니라 유막의 두께도 측정할 수 있어 측정 데이터로부터 유출된 기름량을 산출할 수 있다^{[3][7]}. 또한, 수동형 방식으로 송신기가 필요 없어 소형 경량 저소비 전력으로 구현이 가능해 선진국에서는 이미 기상 및 해양 관측, 환경 감시, 보안, 군용 등에 폭넓게 사용되고 있으며, 새로운 응용 분야의 개척 및 관측 정밀도 향상을 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있으나^{[8][9]}, 국내에서는 마이크로파 라디오미터의 설계, 제작 및 측정 기술의 확보가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 수면의 유류 오염 유무, 기름의 두께 등 분포 및 확산 상태를 실시간, 전천후로 모니터링하기 위한 원격 탐사 센서로 10 GHz 대역의 마이크로파 라디오미터의 시스템 개발에 관해 기술한다. 먼저 개발 목표 성능을 제시하고, 요구되는 목표 사양의 도출, 수신기의 설계, 제작 및 측정 과정과 결

과를 소개한다. 이어 실제 수면에 형성된 유막의 두께 변화에 대한 라디오미터의 검출 성능을 평가한다.

II. 마이크로파 대역에서 수면 유막에 의한 복사 특성

유막이 없는 경우 수면에서의 마이크로파 복사 특성은 그림 1과 같이 공기와 물의 경계면에서 물 내부로부터 입사하는 복사 휘도 온도 T_w 에 대해 반사 이론을 적용하여 해석할 수 있어 수면의 복사율 e_w 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$e_w = 1 - \Gamma_w^{sp} \quad (1)$$

식 (1)에서 Γ_w^{sp} 는 경계면에서의 specular 반사계수로 식 (2a), (2b)와 같다.

$$\Gamma_w^{sp}(\nu, \theta_1, h) = \left| \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_1}} \right|^2 \quad (2a)$$

$$\Gamma_w^{sp}(\nu, \theta_1, v) = \left| \frac{\epsilon_w \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_1}}{\epsilon_w \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_1}} \right|^2 \quad (2b)$$

식 (2a)와 (2b)에서 ν 는 주파수, θ_1 은 굴절각, h 와 v 는 수평 및 수직 편파를 각각 나타내며, ϵ_w 는 물의 복소 유전율로 주파수, 편파, 염분 농도 등에 의존한다.

수면 위에 유막이 있는 경우 서로 다른 유전율을 가진 3개의 매질 층(공기, 기름, 물)이 형성되어 두 개의 경계면이 나타나 그림 2와 같이 유막 층에서 다중 반사가 일어난다. 이때 유막으로부터의 복사 휘도 온도 T_B 는 유막층 내부에서 발생한 복사와 T_o 중 공기와 기름의 경계면에서 굴절한 파에 의한 성분 T_1 과 유막층 내부를 관통하여 상기의 경계면을 투과한 두 종류의 굴절파에 의한 성분인 T_2 와 T_3 의 합성으로 이루어진다. 따라서, 기름이 유출되지 않은 경우의 수면 복사 전력보다 증가하므로 휘도 온도가 높게 측정된다. 유막의 형성 유무에 따른 휘도 온도의 차 ΔT_B 는 식 (3)과 같으며, 식 (3)에서 e_{oil} 은 유막의 복사율로 식 (4)와 같이 주어진다^{[10]~[12]}.

$$\Delta T_B = (e_{oil} - e_w) T_s \quad (3)$$

그림 1. 유막이 없을 때 수면에서의 복사 개념도
Fig. 1. Geometry of the water surface T_B without oil layer.

그림 2. 유막이 형성된 경우의 복사 특성 개념도
Fig. 2. Geometry of the surface T_B covered with oil layer of thickness d .

T_s : physical temperature of both the oil and water

$$e_{oil} = (1 - \Gamma_1) \left(1 - \frac{\Gamma_2}{L_2^2} \right) \left[1 + \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{L_2^2} + \frac{2\sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2}}{L_2} \cos(2\beta_2 d) \right]^{-1} \quad (4)$$

식 (4)의 Γ_1 과 Γ_2 는 경계면 1(공기와 기름)과 경계면 2(기름과 물)에서 각각의 specular 반사계수를 나타내며, L_2 는 유막층의 손실인자(loss factor), d 는 유막의 두께를 나타낸다. 또한, β_2 는 유막층 내에서 파의 위상 정수로 " $\frac{2\pi}{\lambda_2}$ "이며, λ_2 는 파장으로 식 (5)와 같다.

$$\lambda_2 = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon'_{oil}} \quad (5)$$

λ_0 : free-space wavelength

ϵ'_{oil} : real part of dielectric constant of oil

식 (1)~(4)로부터 알 수 있듯이 유막이 없는 수면에서의 복사 휘도 온도는 " $T_B = e_w T_s$ "로 e_w 와 T_s

그림 3. 유막 두께의 변화에 의한 T_B 의 변화 특성
Fig. 3. Variation of the T_B for the change of oil layer thickness.

에 의해 결정되는 어떤 특정값을 가지나, 유막이 형성된 경우 $T_B (= e_{oil} T_s)$ 는 유막의 두께와 파장을 변수로 하는 cosine파의 형태로 진동하는 특성을 가진다. 그림 3은 주파수 40 GHz 및 10 GHz에서 중유에 의해 형성된 유막의 두께 변화에 따른 T_B 의 특성^{[4],[7]}을 나타낸 것으로 각각 반 파장($\lambda_2/2$)의 주기로 진동함을 알 수 있다. 따라서, 어떤 하나의 특정 관측 주파수를 이용 유막이 없는 수면($d=0$)과 있는 경우의 휘도 온도의 변화를 마이크로파 라디오미터로 측정하여 그 출력 데이터로부터 수면의 기름 유출 유무 및 두께에 관한 정보를 수집할 수 있다. 관측 주파수의 선정은 유막 두께의 측정 범위, 다른 물리량이나 대기의 영향, RFI 등을 고려하여 결정한다. 이에 대해서는 III장에서 자세히 논한다.

III. 개발 목표 성능의 달성을 위한 사양 도출

3-1 관측 파라미터의 결정

사고 관련 자료 및 외국의 연구 개발, 실험 사례 문헌 등을 참고로 하여^{[3],[4],[7],[10],[11]} 빈번하게 일어나는 중유, 등유, 휘발류 등 석유 계통의 기름 유출로 인한 오염을 초기 단계에 발견할 수 있도록 마이크로파 라디오미터의 1차 개발 성능을 검출 가능한 유막의 두께 범위는 0~4 mm, 측정 오차는 0.2 mm 이내로 목표를 두었다.

상기의 목표 성능을 만족하는 라디오미터 시스템

을 개발하기 위해 먼저 유막의 두께 변화에 대해 복사 휘도 온도 T_B 의 변화가 큰 주파수, 편파, 입사각 등 관측 파라미터에 대한 고려가 필요하다. 유막의 T_B 는 그림 3과 같이 두께에 의해 진동하는 특성을 가지므로, 따라서 복소 유전율의 실수부가 2부근인 일반적인 석유 계통 기름^{[4],[10]}을 대상으로 0~4 mm의 검출 두께 범위를 만족하기 위해서는 관측 주파수는 10 GHz 대역 이하로 선택해야 한다. 전파의 기상의 영향 및 대기의 투과성^[6], RFI, 안테나 및 시스템의 사이즈, 소자 구매의 용이성 및 가격, 제작의 난이도 등을 고려하여 수동 원격 탐사용으로 분배된 주파수 대역^[13]으로 선택하였다. 결정된 관측 주파수 대역은 중심 주파수 10.65 GHz, 대역폭은 58 MHz이다.

수면 유막의 관측 편파 및 입사각에 대한 복사 특성^{[10],[12]}은 수평 편파가 수직 편파보다 T_B 가 크며, 유막의 두께 변화에 대한 변화도 크게 나타난다. 입사각에 대해서는 수평 편파일 경우 0~50° 범위에서 입사각이 증가할수록 T_B 의 변화량이 증가하나, 반면에 수직 편파의 경우에는 입사각이 증가할수록 감소하는 등 유막이 없는 수면에서의 복사 특성^[14]과는 반대로 나타난다. 따라서, 관측 편파는 수평 편파를, 입사각은 유막의 T_B 값 및 두께 변화에 대한 변화량이 가장 크게 나타나는 50°에 가까운 45°로 선정하였다.

3-2 측정 가능 휘도 온도의 범위 및 감도

상기와 같이 선정한 관측 파라미터로 물의 염분 농도가 0~36 psu 범위의 수면에 형성된 0~4 mm 두께의 유막을 측정할 경우, 유막의 T_B 범위는 약 80~230 K 정도이다^{[10],[14]}. 마이크로파 라디오미터의 감도는 출력 전압으로부터 측정 가능한 최소 휘도 온도의 변화치로, 이는 측정한 휘도 온도의 정밀도, 즉 측정 오차를 의미한다. 그림 3에서 알 수 있듯이 측정 가능한 최소 유막 두께를 0.2 mm로 할 경우, 요구되는 휘도 온도의 측정 가능 변화치는 1 K이다. 성능 목표를 달성하기 위해서 요구되는 라디오미터의 목표 사양 및 관측 파라미터를 표 1에 정리하였다.

표 1. 관측 파라미터 및 목표 설계 사양

Table 1. Observation parameters and design specifications of the radiometer.

항 목	사 양
측정 휘도 온도 범위 T_B	80~230 K
감도 ΔT	1 K 이하
수신 중심 주파수	10.65 GHz
수신 대역폭 B	58 MHz
수신 편파	수평
입사각	45°

IV. 수신기 설계 및 제작

4-1 설계

표 1의 측정 휘도 온도 범위 및 감도를 갖는 라디오미터에 요구되는 수신기의 설계 사양에 대해 검토하였다. 마이크로파 라디오미터의 안테나로 10 GHz 대역의 표준 피라미드 혼 안테나를 사용하여 표 1의 휘도 온도 범위의 T_B 에 의한 안테나 출력, 즉 안테나 온도 T_A 의 범위는 외국의 문헌 및 실험 자료로부터 근사적으로 110~240.5 K로 얻어진다^{[4],[6],[7],[10],[11]}. 안테나 온도 T_A 로부터 식 (6)의 Nyquist noise power 식에 의해 수신기의 입력 전력 범위를 구할 수 있다^[6].

$$P_A = kT_A B \quad (6)$$

식 (6)에서 k 는 볼츠만 상수인 1.38×10^{-23} [J/K]이며, B 는 수신기 대역폭으로 58 MHz이다. 110~240.5 K의 안테나 온도 T_A 에 대한 수신기의 입력 전력은 -100.6~-97.16 dBm로 계산된다.

라디오미터의 수신 감도는 전 전력형(total-power type)인 경우, 식 (7)과 같이 주어진다^[6].

$$\Delta T = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (7)$$

식 (7)에서 τ 는 검파부의 적분 시간이며, T_R 는 수신기 내부의 시스템 잡음 온도로 시스템 잡음 지수 F 와 식 (8)의 관계가 있다. 식 (8)에서 T_o 는 시스템의 물리 온도를 의미한다.

$$T_R = T_o(F - 1) \quad (8)$$

표 2. 수신기의 설계 사양.

Table 2. Design specifications of the microwave radiometer receiver.

항목	설계 사양
수신 중심 주파수	10.65 GHz
대역폭	58 MHz
시스템 이득	46 dB 이상
시스템 잡음 지수	2.8 dB 이하
입력 전력 범위	-100.6 ~ -97.2 dBm

그림 4. 수신기의 시스템 구조

Fig. 4. System block diagram of the receiver.

식 (7)과 (8)로부터 적분 시간 τ 가 5 ms인 경우, $T_0 = 323$ K(50 °C)의 환경에서도 $\Delta T = 1$ K 이하를 만족시키기 위해 시스템 NF는 2.8 dB 이하가 요구된다.

수신기의 종단에 위치하는 검파부는 Analog Device사의 AD8313를 이용하였다. AD8313는 DC~2.5 GHz 대역의 Analog 신호의 입력 전력에 비례하는 전압을 출력한다. AD8313의 동작 입력 전력은 -65~-10 dBm까지로 넓은 입력 전력범위를 가지고 있다. 즉, 수신기는 입력 전력 P_A 가 검파기의 동작 입력 전력의 범위 안에 포함될 수 있도록 증폭시켜야 하며, 최소 입력 전력이 -100.6 dBm이므로 검파부의 최소 요구 입력 전력 범위보다 10 dBm 정도 높게 가져가기 위해서는 46 dB 이상의 시스템 이득이 요구된다. 표 2에 수신기의 설계 사양을 정리하였다.

입력 전력이 -100 dBm 이하의 미약한 잡음 신호를 고감도로 검출하기 위해서는 수신기는 저 손실, 저 잡음, 고이득의 특성을 동시에 추구할 수 있는 구조이어야 한다. 또한, 소형 경량, 저 소비 전력으로 구현이 요구됨으로 본 연구에서는 슈퍼헤테로다인 방식을 채용한 전 전력형 라디오미터로 결정하였다.

표 3. 시스템 이득 및 잡음 지수 budget

Table 3. The budget analysis of the system gain and noise figure.

Stage	Function	설계 목표	
		Gain(dB)	NF(dB)
1	2 Stage LNA	23.0	1.3
2	RF BPF	-5.0	5.0
3	RF AMP	11.5	1.0
4	Mixer	-10.0	10.0
5	IF Gain Block	18.0	2.0
6	IF LPF	-1.0	1.0
7	IF Gain Block	18.0	2.0
8	IF BPF	-3.0	3.0
9	Loss	-4.0	0.5
10	Total	47.5	2.1

(Loss: 부정합 및 전송 손실 등을 고려한 마진)

그림 4는 설계한 수신기의 구조를 나타낸 블록도이다. 수신기의 잡음 지수를 낮추기 위해 2 stage LNA를 첫 단에 배치하였으며, 10 GHz 대역만을 통과하는 RF BPF를 사용하였다. 10 GHz 대역의 신호를 1.4 GHz 대역으로 주파수 변환시키기 위한 믹서부와 IF단의 이득을 높여줄 gain block, 시스템 대역폭을 결정할 IF BPF, 그리고 AD8313과 적분기로 구성된 검파부(detector)로 구성되어 있다.

표 3에 수신기를 구성하는 각 단 부품의 설계 목표와 시스템의 이득 및 잡음 지수 budget을 산출한 결과를 나타내었다. 수신기 제작 시 각 부품 간의 부정합 및 전송 손실 등을 고려하여 이득에 대한 마진과 입력단의 커넥터 등에서 발생할 잡음 지수 마진을 고려하였다. 산출 결과, 수신기의 전체 이득은 47.5 dB, 잡음 지수 2.1 dB로 표 2의 수신기 설계 목표 사양을 만족시킴을 알 수 있다.

4-2 제작 및 측정

그림 5는 제작된 10 GHz 대역의 마이크로파 라디오미터의 수신기 내부로, 외부로부터의 간섭이나 부품 상호 간의 영향을 최대한 줄이기 위해 제작된 소요 부품들을 각각 하우징하였으며, 이를 다시 알루미늄으로 제작한 기구물에 고정시켜 봉인하였다. 수신기의 최종 size는 255 mm×200 mm이며, 소비 전력

그림 5. 제작된 수신기

Fig. 5. Photograph of the fabricated receiver.

표 4. 각 부품의 측정 결과를 이용한 시스템 이득 및 잡음 지수 budget 분석

Table 4. The budget analysis of the system gain and noise figure by using measure results of each parts.

Stage	Function	측정 결과	
		Gain(dB)	NF(dB)
1	2 Stage LNA	21.72	1.18
2	RF BPF	-4.00	4.00
3	RF AMP	11.47	1.10
4	Mixer	-11.40	11.40
5	IF Gain Block	17.70	1.40
6	IF LPF	-1.00	1.00
7	IF Gain Block	17.70	1.40
8	IF BPF	-2.30	2.30
9	Total	49.89	1.38

은 2.7 W로 소형 경량 저소비 전력을 추구하였다. 표 4에 제작된 각 부품들의 측정 결과치와 이에 의해 산출된 시스템 이득과 NF를 각각 나타내었다. 제작된 부품들은 표 3의 설계 목표치를 만족하며 시스템 이득과 NF 역시 각각 49.89 dB와 1.38 dB로 표 2의 수신기 설계 목표를 충족시킨다.

제작된 10 GHz 대역 라디오미터의 동작 입력 전력 범위 및 이득을 고주파 신호 발생기와 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정하였다. 측정 방법은 고주파 신호 발생기의 10.65 GHz 신호를 attenuator를 이용하여 -110~-35 dBm까지 가변하여 수신기에 입력, 입력 전력의 변화에 대한 IF부의 출력 전력, 즉 검파

그림 6. 시스템 동작 범위 및 이득 특성

Fig. 6. Dynamic range and system gain.

부의 입력 전력을 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 그림 6은 수신기의 입력 전력의 변화에 대한 출력 전력의 변화 및 시스템 이득 특성을 나타내었다. -107~-39 dBm까지의 입력 범위에서 47.3 dB의 이득을 가지고 선형적으로 동작함을 알 수 있다. 또한, 고주파 잡음 지수 측정기로 측정한 결과, NF는 1.38 dB였다.

마이크로파 라디오미터는 열잡음 전파를 수신함으로써 수신기의 열잡음 입력 전력의 변화에 대한 최종 출력 전압의 변화 특성 및 수신 감도에 대한 성능 평가 측정이 필요하다. 측정 방법^{[6],[15]}은 수신기의 입력단에 연결된 안테나를 정합 저항으로 대체하고 물리 온도 TK로 밀폐된 항온조 내에 설치했을 때, 정합 저항에 의해 입력단에 전달되는 잡음 전력 P_n 은 식 (6)에 의해 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_n = KTB[W] \quad (9)$$

잡음 전력 P_n 은 온도 T 의 함수로 나타나며, 식 (6)의 안테나에 의해 수신된 전력 P_A 와 정합 저항에 의해 전달된 잡음 전력 P_n 이 같을 경우, 식 (9)의 온도 T 는 안테나 온도 T_A 로 식 (10)이 성립하며, 수신기의 출력 전압 V_{out} 은 입력 전력 $P_A(=P_n)$ 에 비례하므로 결국 식 (11)과 같이 V_{out} 은 안테나 온도, 즉 항온조 온도 T 에 비례한다.

$$P_n = P_A = KT_A B \quad (10)$$

$$V_{out} = aT_A + b \quad (11)$$

(a) $T_A - V_{out}$ 환산 그래프
(a) $T_A - V_{out}$ calibration graph

(b) 수신기 출력 전압 데이터의 표준 편차
(b) Standard deviation of the voltage data

그림 7. 10 GHz 수신기의 입력 잡음 온도에 대한 출력 전압 특성 및 표준 편차

Fig. 7. $T_A - V_{out}$ calibration graph and standard deviation.

항온조의 내부 온도를 198~324 K(−75~51 °C) 까지 3 K씩 변화시켜 입력 잡음 전력의 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 수신기의 출력 전압은 멀티미터를 PC에 연결하여 실시간으로 각 온도 당 0.5 초 간격으로 100개의 샘플을 측정하였다. 그림 7에 측정된 출력 전압 데이터의 평균값과 표준 편차를 나타낸 것으로 온도 변화에 대해 출력 전압이 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그림 7(a)는 $T_A - V_{out}$ 환산 그래프로 식 (11)과 같이 항온조 온도(안테나 온도) 대 출력 전압, 즉 입력 잡음 전력 대 출력 전압 간의 환산식을 도출하였다. 도출된 식 (11)의 기울기 a 와 절편 b 는 표 5와 같다. 그림 7(b)는 측정된 수신

표 5. 10 GHz 라디오미터 수신기의 환산식

Table 5. Calibration equation.

$V_{out} = aT_A + b$	
a (온도 1K당 출력 전압 변화량)	450(μ V)
b (Reference voltage)	2.6(V)

표 6. 수신기의 측정 결과

Table 6. The measurement results of the receiver.

항 목	설계 사양	측정 결과
중심 주파수	10.65 [GHz]	10.65 [GHz]
대역폭	58 [MHz]	58 [MHz]
시스템 이득	46.0 [dB] 이상	47.3 [dB]
시스템 잡음 지수	2.80 [dB] 이하	1.38 [dB]
입력 전력 범위	−100.6 ~ −97.2 [dBm]	−107.0 ~ −39.0 [dBm]
적분 시간	5 [ms]	5 [ms]
수신 감도	평균 최대	0.23 [K] 0.46 [K]
	1 [K] 이하	

기의 출력 전압 데이터의 표준 편차를 나타낸 것으로 표준 편차(ΔV)와 수신 감도(ΔT)의 관계식은 $T_A - V_{out}$ 환산식으로부터 식 (12)와 같이 구해진다.

$$\Delta V = a \Delta T \quad (12)$$

그림 7(b)의 측정된 표준 편차와 표 5 및 식 (12)에 의해 산출된 수신 감도를 표 6에 각각 나타내었다.

수신 감도는 평균 0.23 K, 최대 0.46 K로 1 K 이내의 목표 성능을 만족하였다. 제작된 수신기의 측정 결과를 표 6에 정리하였다. 제작된 수신기는 설계 목표 사양을 모두 만족함을 알 수 있다.

V. 수면 유막의 검출 성능 실험 및 평가

5-1 실험 방법

제작된 수신기와 FMI사의 표준 피라미드 혼 안테나로 구성된 마이크로파 라디오미터로 실제 수면에 유막을 형성하여 유막 두께의 변화에 대한 검출 성능을 실험하였다. 초기 단계의 성능실험으로 그림 8과 같이 안테나와 수면 사이의 거리는 70 cm, 입사 각 45°로 수면 유막으로부터 복사되는 전력을 측정하였다. 유막은 실험용 수조에 물을 약 30 cm 채워

그림 8. 유막 검출 실험 구성도

Fig. 8. Geometry of the measurement set-up for the oil detection.

그림 9. 유막 검출 실험 사진

Fig. 9. Photograph of the measurement for the oil detection.

넣은 후 그 위에 기름을 부어 두께를 0~15 mm까지 증가시켜 측정하였다. 사용된 유류는 중유를 사용하였다. 10 GHz 대역에서 중유의 유전율은 $2+j0.1$ 이며, 수면의 유전율은 $47.55+j37.25$ 이다^{[4],[10]}. 그림 9는 마이크로파 라디오미터로 수면 유막을 측정하는 모습을 보여주고 있다. 수조의 크기는 57 cm×87 cm이고, 안테나의 3 dB 빔 폭은 $\phi(x\text{-z평면})=19^\circ$, $\theta(y\text{-z평면})=21^\circ$, 6 dB 빔 폭은 $\phi=27^\circ$, $\theta=28^\circ$ 로 70 cm의 관측거리에서 주 빔에 의한 관측 면적(footprint)이 수조 내부로 형성될 수 있도록, 즉 수조 내부만을 바라볼 수 있도록 설치되었으며, 측정 출력 전압은 디지털 멀티미터를 통하여 PC로 전송된다.

5-2 결과 및 평가

(a) 라디오미터의 출력 전압

(a) The output voltage data of the radiometer

(b) 출력 전압의 표준 편차

(b) Standard deviations of the out voltages

그림 10. 수면 유막 두께 변화에 대한 마이크로파 라디오미터의 출력 전압 및 표준 편차

Fig. 10. The output voltage data and standard deviations of the radiometer for the change of the oil layer thickness.

그림 10(a)는 수면에 유막이 없는 경우부터 유막의 두께를 1 mm씩 증가시켜 15 mm까지 변화시켰을 때 각각의 유막 두께에 대해 측정된 100개의 출력 전압 데이터의 평균치를 나타낸 것으로 5 mm까지는 유막의 두께가 증가할수록 출력 전압이 증가하다가 6 mm 이상부터는 다시 감소하면서 cosine파의 형태로 약 11 mm를 주기로 진동함을 볼 수 있다. 따라서, 0~5 mm까지의 유막 두께의 변화를 검출할 수 있음을 알 수 있다. 그림 10(b)는 각 유류 두께에 대해 측정된 출력 전압 데이터의 표준 편차를 나타낸 것으로 식 (12)를 이용하여 감도, 즉 측정 오차를 구할 수 있다. 표 7에 유막의 두께 변화에 따른 출력 전압의 변화량, 표준 편차 및 측정 오차를 나타낸 것으로

표 7. 유막 두께의 측정 오차 분석

Table. 7. Measurement error analysis.

유막 두께 [mm]	전압 변화량[uV]	평균 표준 편차 [uV]	측정 오차 [mm]
0~1	606.3	78.9	0.13
1~2	1,381.4	81.1	0.06
2~3	3,190.5	78.6	0.025
3~4	3,030.7	87.9	0.03
4~5	2,079.1	85.7	0.04

유막 두께 0~1 mm 사이의 전압 변화량은 606.3 uV이며, 이 구간의 두께 변화에 대한 전압 변화를 거의 선형으로 근사시켜 생각하면 0.2 mm의 두께에 대한 전압 변화량은 121.3 uV이다. 이 구간의 표준 편차는 78.9 uV로 121.3 uV보다 훨씬 작으므로 0.2 mm 이내의 오차로 검출이 가능하다. 표준 편차 78.9 uV는 0.13 mm의 변화에 해당하는 것으로 따라서, 0~1 mm 구간에서는 0.13 mm의 오차로 검출이 가능함을 의미한다. 그림 10과 표 7을 통해 제작된 마이크로파 라디오미터는 0~5 mm까지의 유막 두께를 0.13 mm 이내의 오차로 검출이 가능하여 목표 성능이 충족되었음을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 수면 기름 유출로 인한 피해를 최소화하기 위해 유출된 기름을 조기에 실시간 원격으로 모니터링할 수 있는 10 GHz 대역의 마이크로파 라디오미터의 개발에 관해 기술하였다. 먼저, 수면에 유막이 형성되었을 경우 마이크로파 대역의 복사 특성의 변화를 분석하였고, 이를 토대로 1차 개발 성능 목표를 검출 가능 유막 두께 0~4 mm, 측정 오차 0.2 mm 이내로 결정하였으며, 목표 성능의 달성에 요구되는 라디오미터의 사양 및 수신기의 설계 사양을 도출하였다. 도출된 사양을 만족하는 수신기를 설계 제작하였다. 제작된 수신기는 주파수 10.65 GHz, 대역폭 58 MHz로 47.3 dB의 시스템 이득과 NF 1.38 dB의 고이득, 고감도 특성을 가지며, size는 255 mm×200 mm이고, 소비 전력은 2.7 W로 소형 경량 저소비 전력으로 구현하였다.

향온조를 이용하여 입력 잡음 전력의 변화에 대

한 출력 전압의 변화를 측정하여 안테나 온도-출력 전압의 환산 그래프와 환산식, 수신 감도를 구하였다. 제작된 수신기는 -107~-39 dBm의 입력 전력에 대해 0.46 K 이내의 감도로 선형적으로 동작함을 확인하였다. 제작된 수신기에 표준 피라미드 혼 안테나를 연결하여 깊이 30 cm의 수면 위에 두께 0~15 mm의 중류 유막을 형성하여 검출 성능 실험을 하였다. 실험 결과, 0~5 mm 범위의 유막 두께를 0.13 mm 이내의 오차로 검출이 가능함을 확인하였다.

보다 정밀한 검출을 위해서는 현재의 10 GHz 대역에 20 GHz 이상의 주파수를 추가로 채용, 복수 개의 주파수 대역에 의한 관측이 필요하며, 파도 등 표면 상태 및 해수면 유막 등 여러 종류의 시료 및 환경을 대상으로 한 실험이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 황기영, "미국 멕시코만 유류유출 사고의 진행상황과 예상 파장", 한국해양수산개발원(KMI), 해양산업동향(e-journal Marine Industry Trend), 제 21, pp. 1-5, 2010년 5월.
- [2] Oil Spill, Wikipedia the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_spill, 2010. 7.
- [3] S. P. Fondecarr, L. V. Gangadhara Rao, "Remote sensing of oil slicks", *Current Science*, vol. 60, no. 11, pp. 636-639, Jun. 1991.
- [4] N. Bartsch, K. Gruner, W. Keydel, and F. Witte, "Contribution to oil-spill detection and analysis with radar and microwave radiometry : Results of the archimedes II campaign", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-25, no. 6, pp. 677-689, Nov. 1987.
- [5] Haruto Hirosawa, "Studies on microwave signatures", *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, vol. 6, no. 3, pp. 17-26, Sep. 1986.
- [6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume I : Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Artech House Inc., 1981.
- [7] K. P. Gaikovich, L. M. Snopik, and A. V. Troitsky, "Helicopter radiometer measurements of thin lake

- ice and oil spills on lakes and soil", *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 38, no. 11, pp. 719-726, Nov. 1995.
- [8] D. M. Le Vine, T. T. Wilheit, R. E. Murphy and C. T. Swift, "A multifrequency microwave radiometer of the future", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-27, no. 2, pp. 193-199, Mar. 1989.
- [9] J. Lahtinen, J. Pihlflyckt, I. Mononen, S. J. Tauriainen, M. Kemppinen, and M. T. Hallikainen, "Fully polarimetric microwave radiometer for remote sensing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-41, no. 8, pp. 1869-1878, Aug. 2003.
- [10] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, "Microwave remote sensing active and passive volume III", *From Theory and Applications*, Artech House Inc., 1986.
- [11] H. -J. C. Blume, H. Huhnerfuss, and W. Alpers, "Variation of the microwave brightness temperature of sea surface covered with mineral and monomolecular oil films", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-21, no. 3, pp. 295-299, Jul. 1983.
- [12] 박진우, 윤정범, 손홍민, "유막에 의한 마이크로파 대역에서의 수면 복사 특성의 변화", 한국전자과학회 전자과학기술학계학술대회 논문집, 14(1), p. 69, 2010년 7월.
- [13] 국내 주파수 분배표, [http://: www.spectrum.or.kr](http://www.spectrum.or.kr), 2010년.
- [14] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, "Microwave remote sensing active and passive volume II", *Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Addison-Wesley Pub. Co., 1982.
- [15] 박진우, 최연웅, 조홍렬, 손홍민, "태양 위치 측정용 전파센서 수신기의 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 20(9), pp. 943-953, 2009년 9월.

손 홍 민

1985년 2월: 울산공과대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 3월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 9월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학박사)
 1984년 11월~1986년 8월: (주)신도

리코 기술연구소 연구원
 1995년 9월~1997년 2월: 삼성전자(주) 정보통신연구소 선임연구원
 1997년 3월~현재: 호남대학교 이동통신공학과 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사 시스템, 신호처리 안테나 시스템, 고감도 수신기, 광대역 무선 통신 시스템

박 진 우

2009년 2월: 호남대학교 전파이동통신공학과 (공학사)
 2011년 2월: 호남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2011년 7월~현재: (주)와이즈오토모티브 연구원
 [주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 마이크로파 원격 탐사 시스템, 무선 통신