

# 마이크로파 원격 탐사 기술

吳 二 錫  
弘益大學校 電波工學科

## 1. 서론

최근에 전자파 센서를 이용하여 지표면 및 대기권 변화 등을 감시하는 원격탐사(remote sensing) 기술에 대한 관심이 고조되고 있다. 1960년대 이후 새로운 과학 분야로 부상한 지구 원격 탐사 기술은 전자파 산란(scattering) 및 복사(emission)를 연구하고 전자파 센서를 제작하고 운용하는 전파공학 기술자 뿐만 아니라 반도체, 통신 및 컴퓨터 공학 기술자들과 지구학에 관련 된 각계 각층의 과학자들이 협력해야 하는 학문 분야이다.

본 논문에서는 전자파 복사 및 산란을 중심으로 마이크로파 센서인 radiometer와 radar의 동작 원리를 설명하고, 그 센서들의 발달과정과 원격탐사 기술의 응용 등을 살펴 보려한다.

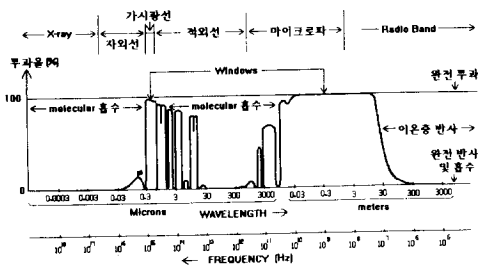


그림 1. 전자파 스펙트럼에 따른 투과율

전자파 스펙트럼 중에서 가시광선, 적외선, 마이크로파 등의 주파수 대역이 원격탐사에 이용 되는데 (그림 1 참조), 이 중에서 대기권의 수증기 및 각종

가스에 의해 흡수(molecular 흡수)되어 대기권을 통과하지 못하는 주파수 대역(적외선과 일부 마이크로파)은 대기권 탐사에 주로 이용되며, 대기권을 통과할 수 있는 대역(그림 1의 'windows': 가시광선, 마이크로파 및 일부 적외선)은 지구 표면 상태를 탐사하는데 주로 활용된다. 원격 탐사용 센서는 송신기 유무에 따라 능동(active) 센서와 수동(passive) 센서로 나눌 수 있고, 주파수 대역에 따라서는 가시광선과 적외선을 포함한 광파와 마이크로파(이 중 일부를 밀리미터파라고도 함) 센서들로 나눌 수 있다. (그림 2 참조)<sup>1)</sup>

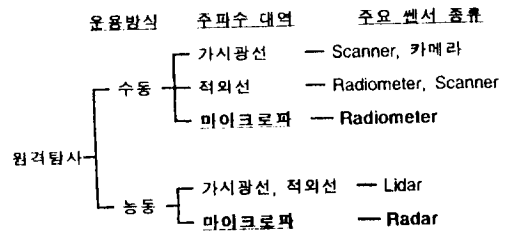


그림 2. 원격탐사용 센서의 작동모드와 주파수에 따른 구분

마이크로파는 광파에 비해 (1) 구름이나 눈, 비등을 통과할 수 있고, (2) 밤에도 탐사할 수 있을 뿐만 아니라 입사파의 각도, 주파수 및 편파성 등을 선택할 수 있고, (3) 지표면 위의 초목 들이나 지표면 밑 까지도 어느 정도 침투하는 등의 장점들을 가지고 있어서<sup>2)</sup> 마치 인공위성에서 '외계인의 눈'으로 보는 것과 같다. 마이크로파 원격 탐사용 센서는 그 운용

방식에 따라 수동 (passive) 센서인 radiometer와 능동(active) 센서인 radar로 나눌 수 있는데, 원격탐사용 레이다에는 SAR(synthetic aperture radar)등의 영상 레이다(imaging radar)와 목표물의 산란 특성을 측정하는 scatterometer 및 지표면에서 센서까지의 높이를 측정하는 altimeter 등이 있다.

II장에서는 이러한 마이크로파 원격 탐사용 센서들의 역사적 발달 과정을 간략히 소개하고, III장에서는 마이크로파 수동 센서인 radiometer와 능동 센서인 radar의 동작 원리를 살핀 후, IV장에서는 이러한 센서들을 어떻게 응용하여 필요한 정보를 얻는지를 알아보고, V장에서는 마이크로파 원격탐사의 향후 발전 추세를 살펴 보았다.

## II. 역사적 발달 과정

1886년에 Heinrich Hertz에 의해 최초로 안테나가 발명된 이래 마이크로파 센서가 날로 발전 되고 그 응용 범위도 점점 넓어져 왔다. Radar는 1903년에 Hulsmeyer에 의해 군함 탐지기로 처음 선을 보인 이래 제2차 세계대전을 전후하여 군사적 포격용 및 적기 추적용 등으로 급격한 발전을 이루었으며, radiometer는 안테나와 저 잡음 수신기를 사용하여 1930년대부터 전파 천문학용으로 이용되기 시작했듯이<sup>[3]</sup> 초기에는 radar와 radiometer가 원격탐사 외의 다른 목적으로 발전 되어 왔다.

군사적 목표물을 radar로 감지할 때 지표면의 클러터(clutter) 때문에 탐지율이 현저히 저하되므로, 이 클러터의 특성을 분석하는 것이 1950년대의 가장 큰 골치거리였고, 지표면의 단위 면적당 radar cross section(RCS)을 체계적으로 연구하기 시작한 것이 마이크로파 원격 탐사의 시작이라 할 수 있다. 이 때부터 지표면에서의 능동적 산란계수(scattering coefficient: 단위 면적당 RCS)의 연구와 함께 지표면에서의 수동적 복사(emissivity)의 연구도 시작되었다.

### 1. Radiometer의 발전

안테나를 하늘로 향하게 하고 천체 관측용으로만 사용되던 radiometer를 1950년대 말에 미국 Texas 대학에서 처음으로 안테나를 밑으로 향하게 하여 몇

개의 지표면 물질에서의 복사 특성을 측정할 것이 radiometer를 이용한 마이크로파 수동 원격 탐사의 시초라 할 수 있다.<sup>[3]</sup> 금성을 탐사하기 위해 1962년에 발사된 우주선 Mariner호의 two-channel radiometer가 우주선에 실린 최초의 마이크로파 원격 탐사 센서라 할 수 있으며, 1968년에 발사된 소련 위성 Cosmos 243호에 실린 마이크로파 radiometer를 이용하여 지구 대기권의 수증기, 남북극의 얼음 상태 및 해양 온도등을 탐사한 것이 위성을 이용한 최초의 지구 원격 탐사라고 할 수 있다.

그 후에 많은 마이크로파 radiometers가 인공위성에 실려 지구 원격 탐사에 이용되어져 왔는데, 이 중 대표적인 인공위성의 예로는 Cosmos-384, Nimbus-5, -6과 -7, Skylab, Tiros, Seasat 등이 있다. 1972년에 발사된 Nimbus-5에는 두개의 radiometer가 실렸는데, 이 중 하나는 Electronically Scanned Microwave Radiometer (ESMR)로써 대기권의 강우량 및 남북극 빙산 등의 탐사에 이용되었고, 다른 하나는 Nimbus-E(5) Microwave Spectrometer (NEMS)로써 대기권의 온도 및 수증기량 등을 측정하는데 이용되었다. 이들 마이크로파 위성 radiometer들의 분해능(resolution)은 대개 몇 십 km이며, 비록 위성 radar의 분해능(몇 십 m)에 비하면 훨씬 거친 영상을 제공하는 것이 큰 단점이지만, 지구 대기권 및 해양을 gloval scale로 관측하기에는 손색이 없는 데이터를 제공한다.

Nimbus-7과 Seasat에 실렸던 Scanning Multi-channel Microwave Radiometer (SMMR)로는 해양 온도 및 풍속 등도 측정할 수 있었다.<sup>[2,3]</sup> 인공위성을 이용한 수동 원격탐사외에도 비행기를 이용한 마이크로파 원격탐사가 이루어지고 있으며, 항공기 탑재 radiometer로는 국부적으로 좋은 분해능을 얻을 수 있을 뿐아니라 위성 탐사의 시험대로도 이용되고 있다.<sup>[4]</sup> 1991년 7월에 발사되어 현재 지구 궤도를 돌고 있는 European Space Agency(ESA)의 ERS-1 (European remote sensing satellite-1)에 장착된 ATSR/M (Along Track Scanning Radiometer /Microwave)는 altimeter의 에러 보상용 뿐만 아니라, 대기권의 물 함유량 측정에도 활용되고 있다.<sup>[5]</sup>

### 2. Radar의 발전

1960년대 부터 군사목적이 아닌 지구 탐사의 목적

으로도 마이크로파 센서가 활용되기 시작했으며, 그 대표적인 예가 Westinghouse사에서 제작한 side-looking airborne radar(SLAR)인 AN/APQ-97을 이용하여 1967년에 평소에 구름에 덮여 공중 촬영이 불가능했던 Panama 일부 지역의 레이다 지도를 얻은 것이다. 그 뒤 synthetic aperture radar (SAR)인 Goodyear Electronic Mapping System (GEMS)등이 상업적 목적으로 제작되어 평소에 구름에 가리거나 밀림에 가려 사진 촬영이 불가능했던 아시아, 남아메리카(특히 브라질 일대), 아프리카 일부 지역 등 지구 곳곳의 레이다 지도를 얻을 수 있었다.<sup>2)</sup>

1970년대에는 편파 및 주파수가 다양한 고성능의 항공기 탑재용 SAR가 Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)과 Jet Propulsion Laboratory (JPL)에서 각각 개발되어 원격탐사용 영상 레이다의 발전에 크게 기여 하였다. 최초의 위성용 영상 레이다는 1978년의 원격탐사용 인공위성 Seasat에 실렸던 SAR인데, 이 SAR는 L-밴드(파장이 23cm), hh-편파(h-편파 입사에 h-편파 산란인 편파 조합)와 20°의 고정된 입사각에서 운용되어 해양 및 대륙에 걸쳐 수 백만 평방 킬로미터에 달하는 면적의 영상을 제공해 주었다. 그 뒤 비슷한 특성을 가진 SAR가 1981년에 발사된 우주 왕복선 Columbia호에 실린 Shuttle Imaging Radar-A(SIR-A)로써 47°의 고정된 입사각에서 운용되어 많은 영상 데이터를 제공하였다. 또한 1984년에는 SIR-B가 우주왕복선 Challenger호에 실려(그 몇년 뒤에 Challenger호는 공중 폭발하는 비운을 맞게 됨) L-밴드, hh-편파와 여러 입사각에서 영상을 얻을 수 있었다.

현재 European ERS-1(C-밴드 vv-편파의 SAR가 실려 있음)과 1992년 2월에 발사된 일본의 JERS-1(Japanese earth resources satellite-1: L-밴드 hh-편파의 SAR가 실려 있음)이 지구 궤도를 돌면서 위성 영상 데이터를 제공해 주고 있다. SAR와 함께 scatterometer와 altimeter도 위의 위성들에 장착되어 많은 유용한 데이터를 제공해 주고 있다. 또한 최근에(1994년 4월) NASA에서 개발한 다중 편파(vv, hh, hv/vh 편파 조합), 다중 주파수(L-, C-, X-밴드)의 SAR를 포함한 SIR-C가 운용되어 많은 위성 영상 데이터를 얻었고 그에 따른 분석 결과가 곧 쏟아져 나오리라 기대된다.

### Ⅲ. 마이크로파 원격 탐사의 원리

전파를 발생시켜 송신한 후 목표물에서 반사 혹은 산란된 전파를 수신하도록 설계된 장치를 레이다라고 하며, 이때 전파를 스스로 발생시켜 이용하는 송신기가 있으므로 능동(active) 센서라고 부른다. 반면에 송신기가 없이 외부의 전파 에너지를 수신만 하도록 설계된 장치를 수동(passive) 센서라고 하는데, 가시광선을 외부 에너지로 이용하는 카메라와 지표면이나 대기권에서 자체 복사(radiation)되는 에너지를 수신하는 radiometer 등이 수동 센서에 속한다(그림 2와 3 참조). 본 장에서는 마이크로파 영역에서 수동 센서인 radiometer와 능동 센서인 radar의 동작 원리를 각각 간략히 소개하려 한다.

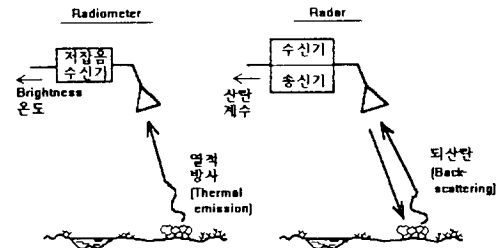


그림 3. 수동 센서인 radiometer와 능동 센서인 radar

#### 1. Radiometer -수동 원격 탐사

##### 1) Brightness 온도

모든 물체는 절대 온도가 0이 아닌 이상 전자와 양자들의 열적 운동에 의해 약한 전자기적 에너지를 복사한다. 이 에너지는 전 주파수 대역에 걸쳐 발생하여 일정한 편파성이 없는 잡음 같은 전자파 형태로 복사되며 이를 '열적 복사(thermal emission or thermal radiation)'라 한다. 태양에서 방출된 에너지가 전자파 형태로 지구에 도달하여 지표면에 부딪히면 일부는 산란되고 일부는 흡수되는데 이때 흡수된 에너지는 열에너지로 바뀌어 지표면이나 대기권의 온도를 높인다. 열 평형을 이루기 위해 흡수되었던 열에너지가 다시 전자파 형태로 방출되는 현상이 바로 열적 복사이며 어떤 물질에서의 열적 복사의 세기를 대변하는 것이 'brightness 온도  $T_b$ '이다.

'흑체(blackbody)'란 이상적인 완전 복사체 또는

완전 흡수체(흡수한 만큼 복사하므로)를 지칭 한다. 이 흑체에서는 brightness 온도가 그 물질의 물리적 절대온도와 같다. 실제 자연 물질들(예를 들면, 지표면, 해양, 대기권 등)의 brightness 온도는 흑체의 brightness 온도보다 낮으며, 흑체와 비교한 각 물질들의 복사 능력을 '복사도(emissivity)'라 한다. 흑체의 복사도는 1이며, 완전 반사체의 복사도는 0이며(완전 반사체는 에너지를 흡수하지 못하므로 열적 복사를 전혀 못한다), 다른 자연 물질들('grey bodies')의 복사도는 1보다 작고 0보다 크다. 복사도,  $e(\theta, \phi)$ ,는 brightness 온도 분포  $T_B(\theta, \phi)$  와 물리적 절대 온도(주위 온도)  $T$  의 비이며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e(\theta, \phi) = \frac{T_B(\theta, \phi)}{T} \quad (1)$$

Brightness 온도를 측정하기 위하여 그림 3처럼 안테나와 저 잡음 수신기로 마이크로파 radiometer를 형성하는데, 안테나는 지표면이나 대기권에서 열적으로 복사되는 잡음파를 수신한다. 안테나에서의 잡음세기 (noise power)는

$$P = kT_A B \quad (2)$$

이며 이 식에서  $k = 1.23 \times 10^{23} \text{JK}^{-1}$  (Boltzmann 상수)이며  $B$ 는 수신기의 주파수 대역이고  $T_A$ 는 '안테나 온도(antenna temperature)'라고 한다. 안테나 온도  $T_A$ 는 안테나로 수신된 열적 복사에 의한 총 잡음세기에 비례하므로, 마이크로파 radiometer의 최종 결과를 안테나 온도  $T_A$ 로 나타낼 수 있다. 이 안테나 온도  $T_A$ 는 안테나 gain 패턴,  $G(\theta, \phi)$ ,과 brightness 온도 분포,  $T_B(\theta, \phi)$ ,를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega, \quad (d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\phi) \quad (3)$$

위 식들 (1-3)에서 볼 수 있듯이, 안테나 gain 패턴을 알고 있으면 안테나 온도  $T_A$ 를 통하여 brightness 온도  $T_B$ 를 얻을 수 있고, 또한 복사도(emissivity)도 구할 수 있다. 이러한 복사도(혹은 brightness 온도)는 복사체의 물질 특성이나 모양에 따라 그 값이 결정되며, 마이크로파 radiometer의

주파수나 편파 특성에 따라서도 변한다.<sup>[6]</sup>

### 2) Radiometer의 동작 원리

다른 수신기와는 달리 radiometer의 수신기는 고도의 정밀도로 세기가 아주 작은 신호(때로는 수신기 잡음 수준보다 약한 신호)를 측정할 수 있어야 한다. 간단한 구조의 total-power radiometer 시스템은 안테나를 앞단에 둔 대역폭이  $B$ 이고, 총 power gain이  $G$ 인 superheterodyne 수신기에 square-law detector와 low-pass filter를 차례로 연결시켜 형성될 수 있다. Superheterodyne 수신기를 입력 잡음 source와 무잡음 수신기로 된 등가회로로 대체하면 총 시스템 입력 잡음 세기(power)  $P_{SYS}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} P_{SYS} &= kB(T_A + T'_{REC}), \\ T'_A &= \eta_l T_A + (1 - \eta_l) T_p, \\ T'_{REC} &= (L - 1)T_p + LT_{REC}. \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서  $\eta_l$ 는 안테나 복사 효율,  $T_A$ 는 안테나 온도(식 3 참조),  $T_p$ 는 주위 온도,  $L (=1/G)$ 는 loss factor,  $T_{REC}$ 는 수신기 입력 잡음 온도이다. Square-law detector 출력 전압은 수신기 내의 IF 증폭기 하단 power( $P_{IF}$ )에 비례하므로 low-pass filter(또는 integrator)를 통과한 직류 출력 전압은 평균 입력 power,  $P_{SYS}$ ,(식 4)에 비례한다.

$$\begin{aligned} \overline{V_{out}} &= G_S(T'_A + T'_{REC}), \\ G_S &= g_{LF} C_d G k B \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $g_{LF}$ 는 low-pass filter의 전압 손실이며,  $C_d$ 는 square-law detector의 power-sensitivity 상수(volts per watt)이다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 radiometer의 출력 전압은 안테나 온도  $T'_A$ 의 선형함수이며, 이미 알고 있는 두개의 잡음 sources( $T_{CAL}$ )를 이용하여 출력 전압과 안테나 온도의 관계를 나타내는 calibration line을 얻으면 radiometer의 출력 전압을 측정할 때마다 목표물의 brightness 온도를 알아 낼 수 있다.

정밀도를 증가시키기 위해 변조기 및 복조기를 추가하여 시스템의 불필요한 이득 변동을 줄이거나(unbalanced Dicke radiometer), 갖가지 balancing 기술을 이용하여 아예 이득 변동 영향을 없애는(balanced Dicke radiometer) 등의 운용

방식들을 도입하여 고도로 향상된 radiometer를 제작하고 있으며 기계적 또는 전기적으로 빔을 scan하여 영상(image)을 얻도록 radiometer를 설계하기도 한다.

2. Radar 능동 원격 탐사

1) 산란 계수

산란계수,  $\sigma^0_n$ ,는 분포된 목표물의 단위 면적당 radar cross section(RCS)으로 정의할 수 있으며, 아래첨자 r과 t는 각각 안테나에서 수신되고 송신되는 전파의 편파를 나타내는데 원격 탐사에서는 주로 hh, vv, hv/vh의 선형 편파 조합을 이용한다. 그림 4에 보여진 것처럼 scatterometer는 송신기와 수신기가 circulator (또는 T/R 스위치)를 통하여 안테나에 연결되어 있고, 데이터 처리 및 저장을 위한 컴퓨터 시스템을 연결하여, calibration 과정을 거쳐 관측지역의 산란계수를 측정하도록 설계된 레이더 시스템이다.

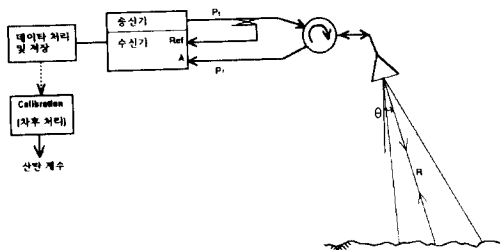


그림 4. Scatterometer를 이용한 산란계수 측정의 한 예

대부분의 레이더는 그림 4처럼 한개의 안테나를 이용하여 송, 수신을 겸하므로 되산란 (backscattering) 계수를 얻는데,  $\sigma^0_n$ 가 안테나 빔폭 내에서 일정하다고 가정하면 되산란되어 수신된 전파 세기  $P_r$ 와 분포된 목표물에 입사된 전파의 세기  $P_i$ 의 관계를 레이더 공식식을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_r = \left[ P_i \frac{G_a^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} I \right] \sigma^0_n, \quad I \equiv \int_A \frac{g(\theta, \phi)^2}{R(\theta, \phi)^4} dA \quad (6)$$

위 식에서  $\lambda$ 는 파장, R은 안테나에서 목표물까지의 거리,  $A_i$ 는 전파가 비추진 면적,  $G_a$ 는 안테나 최고

이득,  $g(\theta, \psi)$ 는 안테나 normalized radiation pattern을 각각 가리킨다. 위 식의 I를 'illumination integral'이라고 하며<sup>[7]</sup> 이는 안테나의 radiation 패턴과 측정시의 안테나 위치만 알면 쉽게 구할 수 있다. 식 (6)의 대괄호 안의 값은 레이더 시스템이나 안테나 위치에 따른 편 전파에 비추진 목표물의 산란 특성과는 무관하므로 산란계수는 수신된 전파 세기에 비례한다. 따라서 이미 RCS를 알고 있는 물체의 수신파 세기  $P_r$ 를 측정하고 어떤 목표물의  $P_r$  측정치와 비교하면 calibration 과정을 통하여 그 목표물의 산란계수를 얻을 수 있다.<sup>[8]</sup> 산란계수의 정확한 phase도 구하려면 식 (6)의 illumination integral을 이용하지 않고 미분형 Mueller matrix를 이용하여 calibration하면 된다.<sup>[9]</sup>

산란계수는 그림 5에서 보여진 것처럼 레이더 시스템과 목표물의 특성에 따라 달라지므로 이미 특성을 알고 있는 레이더로 측정된 산란계수를 분석하면 그 목표물의 특성을 알아 낼 수 있으며 따라서 레이더를 이용하면 원하는 목표물을 원격 탐사할 수 있다. 영상 레이더의 경우도 결국은 각 pixel 마다 산란계수를 측정하는 것이며, 영상의 밝기가 산란계수 값에 비례하게 된다.

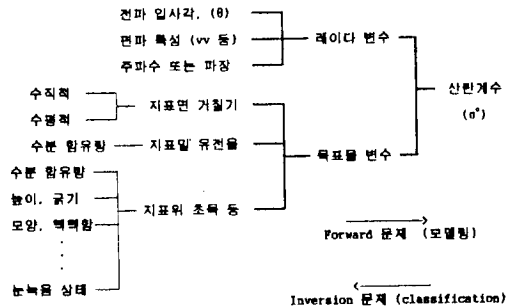


그림 5. 지표면의 산란계수를 결정하는 요소들

2) Scatterometer 및 altimeter의 동작 원리

원격 탐사용 레이더 시스템을 영상용과 비영상용으로 나눌 수 있는데, 비영상용으로는 지형지 물같은 분포된 목표물의 산란 특성을 측정하는 scatterometer와 지상으로 부터의 레이더 높이를 측정하는 altimeter로 다시 구분할 수 있다. Scatterometer는 목표물의 산란계수를 정확히 측정할 수 있도록 calibrate된 레이더 시스템이며, 그림 5에 보인 것처럼

럼 산란 모델 및 inversion 알고리즘 개발에 중추적 역할을 하며<sup>[10]</sup> 위성의 scatterometer를 이용하여 해양 위 바람 속도를 측정하기도 한다.<sup>[11]</sup> Altimeter는 밑으로 똑바로 향하고 있는 안테나를 통하여 짧은 펄스를 내보낸 다음 되돌아 오는 시간을 측정하여 지표면의 높이 분포를 알아 내도록 설계된 레이더 시스템이며 위성의 altimeter를 이용하여 해양 표면의 topography 및 밀셀물 상태 등을 측정하는데 사용되는데 10cm 이내의 수직 정밀도를 얻을 수 있다.<sup>[12]</sup>

3) Synthetic aperture radar(SAR)의 동작 원리  
 영상 레이더는 크게 real aperture radar(RAR)와 synthetic aperture radar(SAR)로 나눌 수 있다. Side-looking airborne radar(SLAR)처럼 비행기가 진행하는 방향으로 길이가 긴 안테나로 얻어지는 좁은 안테나 빔폭을 이용하여 azimuth 방향으로의 분해능(방위 해상도)을 얻고, 비행기 진행 방향과 직각인 range 방향으로의 분해능(거리 해상도)은 폭이 좁은 펄스를 이용하여 얻는 레이더 시스템을 RAR이라 한다. RAR의 along-track (azimuth) 분해능(방위 해상도)  $r_a$ 는 수평적 안테나 빔폭  $\beta_h$ 과 안테나와 목표물 사이의 거리 R에 의해 결정되며 이때 안테나 빔폭  $\beta_h$ (radian 단위)는 대략 전파 파장 단위로 주어진 안테나 크기 L의 역수와 같다.

$$r_a(RAR) \equiv \beta_h R \equiv \frac{\lambda}{L} R \quad (7)$$

비행기 높이에서는 RAR로도 분해능이 좋은 영상을 얻을 수 있으나, 위성에서는 안테나의 길이 L이 제한되어 있는 반면 slant range R의 값이 크기 때문에 높은 분해능을 얻을 수 없다.

위성에서처럼 range R이 큰 경우에도 좋은 방위 해상도를 얻도록 연속적인 데이터 저장 및 처리 기술에 의해 합성적으로 (synthetically) 긴 선형 array를 이루어 마치 개구면(aperture)이 아주 긴 안테나를 사용하는 것같은 효과를 발생하는 레이더 시스템이 SAR이다. 안테나의 움직임에 따라 형성된 Doppler-주파수 변화에 의해서 빔이 잘게 쪼개진다고 생각할 수도 있으므로 초기에는 'Doppler beam-sharpening 시스템'이라고 부르기도 했다. Focused SAR에서는 방위 해상도가 거리 R이나 전파 파장  $\lambda$ 에 관계없이 실제 안테나 길이의 반과 같다.

$$r_a(SAR) \equiv \frac{L}{2} \quad (8)$$

SAR 신호처리 과정에서 실제 안테나 방위 방향 개구면과 같은 길이의 합성 개구면에서의 모든 수신된 전파의 위상을 저장 및 처리하고, 또한 합성 개구면 상의 각기 다른 점에서 수신된 전파에 위상 보상을 해줄 때 'focus 되었다'고 말한다. Across-track (range) 분해능(거리 해상도)은 펄스 폭  $\tau$ 와 입사각  $\theta$ 에 따라 결정되며, slant-거리 해상도와 ground-거리 해상도로 구별하여 적을 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$r_r = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{slant-거리해상도}) \quad (9)$$

$$r_r = \frac{c\tau}{2\sin\theta} \quad (\text{ground-거리해상도}) \quad (10)$$

SAR에서는 peak power를 높이지 않고도 좋은 거리 해상도를 얻기 위하여 주파수 변조(chirp)된 펄스를 이용한다. 거리 모호성(range ambiguity)를 방지하기 위하여 펄스간의 거리가 충분히 커야 하므로 pulse repetition frequency(PRF)가 충분히 작아야 하며, Doppler ambiguity를 방지하기 위해서는 aliasing이 없이 Doppler bandwidth를 sampling 해야 하므로 PRF가 충분히 커야 하는데, 이 요구 사항을 식으로 표시하면 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$\frac{2u}{\lambda} \beta_h \leq f_r(PRF) \leq \frac{c}{2R_s} \quad (11)$$

위 식에서 u는 안테나 이동 속도이고, c는 빛의 속도이며,  $R_s$ 는 swathwidth 내에서 최장 거리와 최단 거리의 차 ( $R_{max}-R_{min}$ )이다. (SAR에 대한 자세한 내용은 <sup>[8]</sup>과 <sup>[13]</sup>을 참조하기 바람)

최소의 영상 단위를 pixel이라 하며 이 pixel의 크기는 식 (8)과 (10)에 각각 주어진 방위 해상도와 (ground-) 거리 해상도에 의해 결정된다. 현재 운용되고 있는 SAR의 pixel 크기는 대개 수  $m \times$  수  $m$  (또는 수십  $m \times$  수십  $m$ ) 정도이다. SAR 시스템은 고분해능을 얻을 수 있는 대신에 그 제작과 신호처리 과정이 RAR 보다 훨씬 복잡하다.

#### IV. 마이크로파 원격 탐사의 응용

전파공학 기술의 발달에 의해 얻은 첨단 전자파 센서들(마이크로파 radiometer와 radar)은 원격으로

탐사된 데이터를 얻게 해줌으로써 대기권 탐사, 지질학적 및 고고학적 탐사, 수자원 탐사, 해양 탐사, 식물 상태 탐사 등의 지구과학 제분야의 탐사에 크게 이바지하고 있다. 이 장에서는 이러한 원격탐사 기술 응용에 관한 실제 예들을 분야 별로 소개하려 한다.

### 1. 대기권 탐사

능동 및 수동 원격 탐사 기술의 가장 중요한 응용의 하나가 바로 이 대기권 원격 탐사이다. 지구 환경 감시의 일환으로 대기 중의 이산화 탄소 함유량 증가와 탄화불소 및 질산가스 증가등에 의한 'global warming' 효과와 'greenhouse' 효과 및 오존층 파괴 효과 등을 감시하는 장기적인 원격 탐사 뿐만 아니라 기상학적 측면에서 비, 구름, 바람, 태풍 등의 일기 예보를 제공하는 단기적인 탐사에 이르기 까지 대기권 탐사의 이용도가 높다.<sup>14)</sup> 마이크로파 레이다를 이용 해서 비, 구름 및 대기권 수증기에서의 퇴산란을 측정하기도 하지만, 특히 마이크로파 radiometer가 대기권의 가스 및 수증기 함유량, 대기권의 온도 분포 등을 탐사하는데 아주 유용 하게 이용되고 있다. 예를 들면, Nimbus-5 위성(1972년)에 실렸던 19.3-GHz ESMR을 이용해 해양 위 대기권의 수증기 및 강우량 분포 영상을 얻을 수 있었으며, 인공위성 Nimbus-7와 Seasat에 실렸던 SMMR로는 대기권의 각종 물의 형태 및 바람 속도 등을 측정할 수 있었다. 마이크로파 radiometer에 주파수 채널들을 추가하면  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , CO 등과 같은 대기권의 분자들 함유량도 측정할 수 있게 된다.<sup>15)</sup> 능동 센서인 radar와 수동 센서인 radiometer를 함께 운용함으로써 각 센서의 장점만을 이용해서 지구 대기권의 비구름 등을 더욱 정확하게 탐사하는 방법이 제기 되기도 하였다.<sup>16)</sup>

### 2. 지질학적 및 고고학적 탐사

위성 탑재 센서들이 지형 지물을 원격 탐사하기 위하여 널리 이용되어져 왔는데, Landsat에서 처럼 광파를 이용해서 영상을 얻기도 하지만 이와 독립적인 영상을 얻기 위해 마이크로파 radar 를 이용하기도 한다. 마이크로파를 이용하면 파장이 크기 때문에 정글 속까지 침투하여 그 속의 지형을 탐사할 수 있을 뿐만 아니라, 사막처럼 건조한 지역에서는 땅속 수m 까지 침투하여 땅속 지형을 탐사할 수 있다. 예를 들면 SIR-A SAR에 의해 얻은 이집트-수단 경계지역 영상에서는 땅 밑에 숨겨진 옛날의 강줄기를 발견할 수

있어서 고고학 연구에 큰 보탬이 되었다. 마이크로파 레이다의 퇴산란 계수는 지표면의 기공기나 표면 거칠기에 민감하게 변하므로 다중 입사각에 의해 얻어진 레이다 영상을 조합하여 입체적 영상을 얻을 수도 있다.<sup>14)</sup> 이렇듯이 마이크로파 레이다를 이용하여 지형도를 얻기도 하고 지형을 감시하거나 지형의 모델을 형성하는데 필요한 자료를 제공하기도 하며, 센서 기술과 영상 해석 기술이 발달하면 할수록 좀더 정확한 정보를 다량으로 쉽게 얻을 수 있을 것이다.<sup>16)</sup>

### 3. 수자원 탐사

일정지역의 수자원은 강우(또는 적설), 흐름, 땅속 침투, 관개, 증발 등의 형태로 존재하며 이들 순환 관계는 시간과 공간에 따라 수시로 변하므로 전자파 센서가 이들을 원격 탐사하는데 아주 적절히 이용될 수 있다. 마이크로파 위성 SAR를 이용하면 수십 미터 해상도의 영상을 얻어 국부적으로도 세밀하게 수자원 정보를 얻을 수 있고, 마이크로파 위성 radiometer로는 수 km의 낮은 해상도 영상을 얻어 global scale로 수자원 상태를 측정할 수 있다. 지표면의 유전율은 그 수분 함유량에 좌우되고 지표면의 수분 함유량이 수자원 형태 중에서도 가장 중요한 역할을 하며 이의 시간적 공간적 분포 상태는 hydrology, 기상학, 농산물 작황 등의 모델들에 주요 입력 변수가 된다. 마이크로파 중에서도 L-밴드 (1-2 GHz) 주파수에서는 식물층을 잘 투과할 뿐만 아니라 약간의 지층도 침투하므로 지표면의 수분 함유량을 탐사하기에 L-밴드 주파수가 제일 적격이다.<sup>14)</sup>

### 4. 식물 상태 탐사

연구가 많이 되어온 부분 중의 하나가 레이다를 이용한 농작물 및 산림의 원격 탐사이다. 식물들에서의 마이크로파 퇴산란은 그 식물의 기하학적 구조와 수분 함유량에 제일 민감하게 변화 하는데, 식물 구조 및 수분 함유량의 가장 적절한 척도가 단위 면적당 식물 잎사귀 총 면적을 나타내는 leaf area index(LAI)이다. LAI는 식물에 따라 크게 변하는데 최저 0에서부터 최고 약 23 에 이르기기도 한다. LAI 외에도 초목의 높이, 줄기의 두께, 잎사귀의 모양, 단위 체적당 총 식물 부피 등의 변수들이 있는데, 주파수별 편파 별로 측정된 산란계수를 이용하여 초목의 종류를 알아 낸다든지, 성장상태를 감시하는 등의 연구가 진행 중이다.<sup>17)</sup> 산란계수로부터 식물의 수

분 함유량을 추정하는 알고리즘을 바탕으로 농작물의 성장 과정 및 가뭄 피해 등을 원격 탐사할 수 있으며 마이크로파 위성 SAR를 이용하여 산림의 채벌 상황을 감시하거나 산불 피해를 탐지하는 등의 산림 자원 보호에도 일익을 담당할 수 있다.

### 5. 해양 탐사

해양은 global scale로 탐사할 필요가 있을 뿐만 아니라 해양의 파도 크기가 파장이 긴 마이크로파에 비교할 정도이므로 위성에서의 해양 원격 탐사에는 마이크로파가 광파보다 더 많은 장점들을 갖고 있다. 특히 마이크로파 영상 radiometer는 구름이 있건 없건 관계없이 해양 표면 온도나 해양 표면 염가 정도 측정에 아주 유효 적절하게 이용된다. Seasat의 SMMR로는 약 1.3°C의 정밀도와 150 km의 해상도로 지구 해양 전체의 온도 분포를 얻을 수 있었고, Seasat의 altimeter로는 5 cm의 정밀도로 해양파고를 측정할 수 있었다. 또한 Seasat의 scatterometer는 약 1.3 m/s의 정밀도로 해양 풍속을 측정하였고, SAR로도 풍속 측정이 가능함이 보여졌다.<sup>14</sup> 위성 SAR로 얻어진 영상을 분석하여 해양의 물 흐름 방향, 해양 표면의 높낮이 등의 정보를 추가로 얻을 수 있어서, 해양 원격 탐사를 통하여 선박 운항, 어업, 일기 예보 등에 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다.

이 밖에도 남극 및 북극의 해양 얼음 상태를 탐지하여 남북극에서의 선박 항해 및 석유 탐사 작업 등을 크게 돕고 있다. 특히 남북극 및 Greenland의 얼음층이 지구상의 모든 민물의 약 60% 나 차지하고 있어서 남북극의 얼음층의 원격 탐사가 주목을 끌고 있다. 마이크로파 radar와 radiometer는 금성 탐사(Magellan, 1989년) 및 토성의 가장 큰 위성인 Titan 탐사(Cassini RADAR, 1996년 예정) 등을 비롯한 천체 관측용으로도 이용되고 있으며<sup>19</sup>, 도시 지역 구조물 및 군사 기지 및 장비 탐지에도 활용될 수 있다.

### V. 향후 발전 추세

첫째, 위성 탑재 마이크로파 센서인 radar와 radiometer의 개발과 발전이 거듭될 전망이다. 전자파 센서 개발에 있어 기술적 주요 쟁점이 그 센서들의 절대적 혹은 상대적 calibration이다. SAR 같

은 경우에 절대적 calibration의 에러는 수 dB 이내이고, 상대적 calibration인 경우에는 1 dB 이내이며, radiometer의 경우에는 절대적 calibration의 에러가 1 K 이내이고, 상대적 calibration인 경우에는 0.1 K 이내인데, 좀더 좋은 calibration 결과를 얻기 위하여 많은 연구가 진행 중이다. Radiometer의 개발은 (1) 대기 중의 수증기, 각종 가스 함유량 및 대기 온도 측정을 위해 주파수 채널을 늘리고, (2) 위성에서 큰 안테나를 이용하여 레이다에 버금가는 높은 해상도를 얻고, (3) 발전된 반도체 증폭기를 이용하여 초 저잡음 수신기를 개발하는 등에 초점이 맞춰지고 있다. Radar의 개발에서는 (1) 다중 편파 및 다중 주파수의 영상 데이터를 동시에 획득하고, (2) 발전된 다량의 반도체 증폭기를 조합하여 효율적인 전원을 얻고, (3) 초고속의 데이터 처리 기술을 이용하여 실시간으로 정보를 얻고, (4) 안테나 scanning을 통하여 마음대로 입사각을 조정하는 등의 첨단 기술 개발에 역점을 두고 있다.

둘째, 그 센서들을 이용한 원격 탐사의 응용 범위를 넓히기 위하여 각계 각층에서 노력하고 있다. 예를 들면, 위성 영상 데이터를 분석하여 지표면이 물인지, 숲인지, 아니면 도시 지역 인지는 지도와 비교하든지, 기존의 각종 분류 방식들(classification methods)에 의해 쉽게 구별될 수 있으나, 그 숲의 나무 높이나, 나무 줄기의 두께 등이 얼마인지 알아내기란 그리 쉽지 않고, 더 나아가 그 숲의 나무 종류(또는 이름)가 무엇인지 가려 내기란 더욱 어려운 문제이다. 이러한 classification(또는 identification)을 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 센서 개발 연구 못지 않게 그 센서를 통해 얻은 데이터로부터 더욱 자세하고 정확한 정보를 산출해내는 방법 연구가 더욱 시급하다고 볼 수 있다. 우리나라에서도 최근에 위성 영상 해석을 통한 정보 산출의 중요성을 인식하고 일본, 미국, 유럽 등에서 영상 데이터를 얻어서, 그 데이터를 분석하는 연구가 시작되고 있다.

캐나다에서는 Radarsat으로 알려진 인공위성을 곧 발사할 예정이며, 이 인공위성에는 5.3 GHz, hh-편파, 20-49° 입사각에서 운용되는 SAR가 있어서, ERS-1의 SAR(5.3 GHz, vv-편파, 23° 입사각)나 JERS-1의 SAR(1.28 GHz, hh-편파, 35° 입사각)에서 얻을 수 없는 값진 데이터를 제공해 주리라 생각된다. 미국 NASA에서는 원격 탐사 기술의



총집산이라 할 수 있는 EOS (Earth Observing System)를 계획하고 있는 데, EOS-A 시리즈의 위성은 세개로 구성되어 각 5년씩 연속으로 궤도를 돌기로 되어 있어서 총 15년의 생명을 갖고 있으며 1998년에 첫 위성이 발사될 계획이다. EOS-B 시리즈의 위성도 마찬가지로 15년의 생명을 갖기로 설계되어 있는데, 첫 EOS-A 위성 발사 후 2-3년 후에 첫 EOS-B 위성이 발사될 계획이다.<sup>[20]</sup> 이 EOS project는 21세기를 통하여 계속되어질 전망이다. 이 위성들에는 SAR, altimeter, scatterometer, 마이크로파 radiometer 등을 포함한 광파 및 마이크로파와 수동 및 능동 원격 탐사의 센서들을 총 망라하였다고 볼 수 있다. 이렇듯이 선진국들에서는 이미 원격 탐사 분야에서 많은 발전을 거듭해 왔으며 앞으로 도 막대한 투자를 할 계획이다.

## VI. 결 론

지구 대기권 및 지표면 상태의 마이크로파 원격 탐사는 지구 환경 감시와 자원 탐사 등에서 다른 방법으로는 얻을 수 없는 매우 소중한 정보를 제공해 주고 있다. 원격 탐사용 마이크로파 radar와 radiometer는 1960년대 부터 급격히 발전되어 왔는데, radiometer는 저 잡음 수신기와 안테나를 이용하여 각종 물체들의 brightness 온도를 측정하도록 제작된 수동 센서이며, 원격 탐사용 radar는 송 수신기와 안테나를 이용하여 분포된 목표물의 산란 계수를 측정하도록 제작된 능동 센서이다.

지금 이 시간에도 지구 궤도를 돌고 있는 위성들에 탑재된 SAR와 radiometer 등의 마이크로파 센서들을 통하여 대기권의 수증기와 각종 가스 함유량, 대기권 온도, 지형 지물 형태, 지면 수분 함유량, 농작물과 산림 상태, 해양의 바람과 파고, 빙산 이동 등 이루 헤아릴 수 없이 많은 분야의 중요한 정보를 얻고 있다.

향 후 마이크로파 원격 탐사용 센서 개발과 측정 데이터 활용 연구 및 그에 대한 투자가 21 세기를 통하여 계속될 전망이며, 이러한 선진국들의 마이크로파 원격 탐사에 대한 높은 관심과 투자에 발맞추어 우리 나라에서도 관심이 높아지고 있는 추세이며 앞으로 더욱 많은 인력과 재정적 투자가 기대된다.

## 參 考 文 獻

- [1] F.T. Ulaby and A.F.H. Goetz. "Remote sensing techniques" in Encyclopedia of Physical Science and Technology, vol. 12, Academic Press, 1987.
- [2] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung, Microwave Remote Sensing, Active and Passive, vol. 1, Artech House, 1986.
- [3] K.R. Carver, C. Elachi, and F.T. Ulaby, "Microwave remote sensing from space", IEEE Proceeding, vol. 73, No. 6, pp. 970-996, June 1985.
- [4] D.M. Le Vine, A. Griffis, C.T. Swift, and T.J. Jackson, "ESTAR: A synthetic aperture microwave radiometer for measuring soil moisture", International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Digest vol. 1, pp. 483-485, Houston, Texas, May 1992.
- [5] R. Bernard, A.L. Cornec, L. Eymard, and L. Tabary, "The microwave radiometer aboard ERS-1: Part 1- Characteristics and performances", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 31, No. 6, pp. 1186-1198, November 1994.
- [6] L. Tsang, J.A. Kong, and R.T. Shin, Theory of Microwave Remote Sensing, John Wiley and Sons, Inc., 1985.
- [7] F.T. Ulaby, T.E. van Deventer, J.R. East, T.F. Haddock, and M.E. Coluzzi, "Millimeter-wave bistatic scattering from ground and vegetation targets", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 26, No. 3, pp. 229-243, May 1988.
- [8] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung, Microwave Remote Sensing, Active and Passive, vol. 2 and 3, Artech House, 1986.
- [9] K. Sarabandi, Y. Oh, and F.T. Ulaby, "Measurement and calibration of

- differential Mueller matrix of distributed targets". IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 40, No. 12, pp. 1524-1532, Dec. 1992.
- [10] Y. Oh, K. Sarabandi, and F.T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, No. 2, pp. 370-382, March 1992.
- [11] F.M. Naderi, M.H. Freilich, and D.G. Long, "Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean-an overview of the NSCAT scatterometer system", Proceedings of the IEEE, vol. 79, pp. 850-866, June 1991.
- [12] P.C. Marth 외 9명, "Prelaunch performance of the NASA altimeter for the TOPEX/POSEIDON project", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 31, No. 2, pp. 315-332, March 1993.
- [13] C. Elachi, Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques, IEEE Press, New York, 1988.
- [14] F.P. Bretherton, "Earth system science and remote sensing", IEEE Proceeding, vol. 73, No. 6, pp. 1118-1127, June 1985.
- [15] J. Vivekanandan, J. Turk, and V.N. Bringi "Comparisons of precipitation measurements by the advanced microwave precipitation radiometer and multiparameter radar", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 31, No. 4, pp. 860-870, July 1993.
- [16] J.E. Estes, "Geographic applications of remotely sensed data", IEEE Proceeding, vol. 73, No. 6, pp. 1097-1107, June 1985.
- [17] F.T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt and M.C. Dobson, "Michigan microwave canopy scattering model", Int. J. Remote Sensing, vol. 11, No. 7, pp. 1223-1253, 1990.
- [18] Y. Wong and E.C. Posner, "A new clustering algorithm applicable to multispectral and polarimetric SAR images", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 31, No. 3, pp. 634-644, May 1993.
- [19] J. Way and E.A. Smith, "The evolution of synthetic aperture radar systems and their progression to the EOS SAR", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 29, No. 6, pp. 962-985, November 1991.
- [20] S. Wilson and J. Dozier, "NASA selects payload for first EOS satellite", IEEE Geosci. Remote Sensing Society Newsletter, No. 78, pp. 7-9, March 1991. 🌐

筆者紹介
------



吳 二 錫

1957年 2月 4日生

1982年 2月 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

1988年 12月 University of Missouri-Rolla 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)

1993年 12月 University of Michigan, Ann Arbor 전기공학및 컴퓨터과학과 (공학박사)

1977年 11月 ~ 1980年 4月 군 복무

1982年 1月 ~ 1984年 7月 현대 엔지니어링 (주)

1985年 2月 ~ 1986年 7月 미8군. Area Facility Engineer

1994年 3月 ~ 현재 홍익대학교 전파공학과 조교수

주관심 분야 : 마이크로파 원격탐사, 레이더 시스템, 마이크로파 회로 설계, RCS기술