

**창 립**  
**40주년학술대회**  
**논문 87-K-20-1**

X-대역 단일 주파수 신호에 의한 회전물체의 영상 재현

서 경환\*, 신 성원, 라 정웅  
 한국과학기술원

Image reconstruction of rotating objects using X-band CW signal

Kyoung-whoan suh, Seong-won shin, Jung-woong, Ra

KAIST

ABSTRACT

To obtain a high resolution microwave images, backscattering microwave fields from one, two, four poles on a rotating object is measured. A computation algorithm to reconstruct these poles images from measured data is programmed. The program is tested for these poles on a rotating object for different frequency intervals in the X-Band. The more frequency data yield the reduction of side lobe level. The reconstructed image for the two pole objects having the diameter of 1cm and separated by 1 lambda, 2 lambda (lambda=3.75 cm) from the measured data is shown. And, the image of two objects having the different reflectivity coefficient from the measured data is also shown and it assumes that this reconstructing algorithm from the measured angular spectrum provides quite accurate images.

Range 방향의 해상도는 대역폭이 넓은 신호를 사용함으로써 높일 수가 있으며 해상도  $R$  은  $\frac{c}{2B}$  로 주어진다. 여기서  $C$  는 전자파의 전파속도이며  $B$  는 신호의 대역폭이다. 또한 Cross-Range 방향의 해상도  $X$  는 최대  $\lambda/2$  까지 얻을 수 있으며 여기서  $\lambda$  은 십계 안테나 길이 를 나타낸다. SAR 장치의 움직이는 효과와 같은 결과를 내기 위해서 송수신 안테나를 고정시키고 물체를 움직이는 Inverse SAR 장치를 실험실내에서 구현할 수 있다. 따라서 SAR 의 도플터 주파수 편이 효과를 얻기 위해 물체를 회전시키면서 되반사되는 전자파의 위상과 진폭을 측정하여 역푸리에 변환함으로써 물체의 반사함수를 재현시켜 물체의 영상을 얻는다. 본 논문에서는 실험실내에서 구현한 Inverse SAR 시스템에 X-Band 초고주파 CW 신호를 이용하여 식파대기 및 반사함수가 다른 물체의 영상을 Circular convolution 알고리즘을 적용하여 3차원 그래픽으로 나타내었다.

1. 서 론

SAR (Synthetic Aperture Radar) 시스템은 일정한 고도를 유지하고 백에다를 탑재한 비행체를 움직여, 송신된 전자파의 지표면으로부터 되반사되는 신호를 시간과 주파수상에서 분석하여 지표면의 영상을 재현하는 장치이다. 이는 수신신호의 시간지연차에 의한 Range 방향과 도플터 주파수 분석을 통한 Cross-Range 방향으로 물체를 구별한다.

2. 회전물체에 의한 전자파의 되반사 측정 및 영상 재현

회전물체에 의한 초구조파 영상시스템의 구상도를 그림(2-7)에 간단히 나타내었다. 물체의 크기가 송수신기와 물체 사이의 거리보다 매우 작다고 가정하면 물체에 입사되는 전자파가 거의 평면파 (Plane Wave)로 되므로 같은 Range상에 있는 Iso-Range 선은 U 축과 평행하다고 볼 수 있다. 송, 수신 신호에 대해 (x,y) 점에서 Point 물체에 대한 수신 신호의 비를 반사함수  $g(x,y)$  라고 정의하면 반사함수는 물체의 회전각도에 따라 물체의 국면에 의해 반사가 되지 않은 부분이 존재하나 여기서는 그러한 부분이 없다고 가정한다. 물체가 어떤 각도  $\theta$  만큼 회전되어 있다면 V 축상의 한점으로부터 수신되는 전자파  $P(v,0)$  는 물체의 반사함수를 U 축에 대해 좌편한 임펄스식

$$P(v,0) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) dx \quad (2.1)$$

로 표현된다. 여기서  $U = x \cos\theta + y \sin\theta$  이고,  $V = -x \sin\theta + y \cos\theta$  이다. 주파수 영역에서 Range V 축에 따른 전체 반사된 전자파의 각도에 따른 함수는 다음과 같다.

$$G(U,0) = \int_{-\infty}^{\infty} P(v,0) \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}v) dv \quad (2.2)$$

V 축상에 있는 반사함수의 총합을 표현하기 위해 식(2.1)을 식(2.2)에 대입하면,

$$G(U,0) = \iint g(x,y) \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}(-x \sin\theta + y \cos\theta)) dx dy \quad (2.3)$$

로 정렬된다. 식(2.3)의 지수항의 변수들을 식(2.4)와 같이 정리하여 식(2.3)에 대입하여 식(2.5)와 같이 표현된다.

$$f_x = \frac{2\sin\theta}{\lambda}, \quad f_y = \frac{-2\cos\theta}{\lambda} \quad (2.4)$$

$$G(U, f_y) = \iint g(x,y) \exp(j2\pi(f_x x + f_y y)) dx dy \quad (2.5)$$

식(2.5)는 물체에 대한 반사함수의 2차원 푸리에 변환형 식이며 원래의 반사함수를 재현하기 위해서는 식(2.6)에 나타낸 것처럼 2차원 역푸리에 변환을 거쳐야 한다.

$$s(x,y) = \iint G(U, f_y) \exp(-j2\pi(U_x x + f_y y)) df_y dU \quad (2.6)$$

여기서  $g(x,y)$  는 한정된 공간의 함수이나  $f_x, f_y$  의 좌표에서는 무한 주파수 영역을 나타낸다. 무한 주파수 영역을 이용하여 영상을 얻기에는 실제로 불가능하며 한정된 주파수 대역을 사용하여 물체의 영상을 얻을 때는 근사적으로 얻을 수 있다. 물체를 회전시키면서 각도에 따른 물체의 반사함수를 재현시킬때 푸리에 주파수 영역에서의 추정 대역이란 실제로 극좌표 형식으로 얻어진다.

따라서 식(2.6)의 직각좌표형 2차원 역푸리에 주파수 영역의 식으로 물체의 영상을 재현시키는 방법을 사용할 수 있다.

물체의 영상을 재현시키기 위해서는 주파수 영역에서 극좌표형식으로 받은 실험에 의한 데이터를 Interpolation하여 직각좌표형으로 변환하여 2차원 역푸리에 변환을 하여야 한다. Interpolation 에 의한 계산상의 복잡함과 어려움을 없애기 위해서 직각좌표형식의 2차원 역푸리에 변환식으로 표현된 식(2.6)을 1차원 Circular Convolution 식으로 변환시켜 물체의 영상을 재현시킨다. 식(2.6)에서 직각좌표 변수와 극좌표 변수로 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} x &= r \cos\phi & f_x &= \rho \cos\theta \\ y &= r \sin\phi & f_y &= \rho \sin\theta \end{aligned} \quad (2.7)$$

식(2.7)을 식(2.6)에 대입하여 정리하면

$$s(r,\phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} G_p(\rho,\theta) \exp(-j2\pi r \rho \cos(\phi-\theta)) \rho d\rho d\theta - \frac{2}{\lambda} \int_0^{\infty} G_r(U,0) \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda} U \cos(\phi-\theta)) dU \quad (2.8)$$

이 된다. N 개의 주파수를 사용하였을 때 식(2.8)은 주파수에 대한 합으로 다음과 같

이 표현된다.

$$r(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_0^{2\pi} G(r, \theta) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r \cos(\phi - \theta)) d\theta \quad (2.9)$$

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 데이터는 반사체에 의해 반사되는 전자파의 신호를 구하여 단일 주파수를 이용한 경우는 식(2.8)을 사용하였고 다수의 주파수를 사용할 경우에는 식(2.9)의 1차원 Circular Convolution

신호를 이용하여 물체의 영상을 재현하는 방법을 이용하였다. 반사체가 여러개인 경우 반사계 상호간에는 상호작용이 있다고 가정하여 중첩의 원리를 이용하여 복소 데이터를 얻는다. 시뮬레이션에서는 두 물체간의 분해능의 한계 및 다주파수를 사용하여 재현된 영상을 나타내었고, 또한 반사계수가 서로 다른 두 물체를 가정하여 재현된 영상을 3차원으로 그래픽하여 나타내었다.

그림(3.1)은 주파수가 10GHz ( $\lambda = 3\text{cm}$ )인 경우의 point spread function을 나타낸 것으로서 물체를 1.80씩 증가시켜 360°를 완전히 돌면서 받은 위상과 진폭의 데이터를 이용하여 재현시킨 것이다. 이 그림에서 첫번째 side lobe 외의 모든 main lobe 외의 -8dB 정도로서 약간 높은 것을 알 수 있다. Main lobe 크기의 -3dB 되는 점의 너비를 분해능이라하면, 이때의 분해능은  $\frac{\lambda}{4}$  정도가 되므로 사용시 분해능은 0.75cm 가 된다.

그림(3.2) 및 (3.3)은 두 point 물체의 분해능을 보기 위해서 0.5 $\lambda$  및 1 $\lambda$  떨어진 경우에 주파수 10 GHz 에서 재현된 영상을 나타내었다.

그림(3.4)는 x, y 의 좌표 (0.1m, 0.1m)

(-0.1m, 0. m), (0. m, -0.15m), (-0. m, -0.15m)에 위치한 4 point object 에 대해 재현된 영상이며, 또한 한 물체에 대해 다른 물체의 반사계수가 0.7, 0.5인 경우의 영상을 그림 (3.5), 그림(3.6)에 나타내었다.

그림(3.7)은 8-12 GHz 의 주파수 범위를 스펙트로 증가시켜 얻은 point spread function 이며, side lobe 가 -13.2db 로서 10 GHz 의 단일 주파수의 CW를 사용했을 때보다 side lobe 가 -5.2db 정도 더 낮다.

시뮬레이션 결과 두 point 물체가 서로 겹친 경우에는 side lobe 가 커지게 되어 0.5 $\lambda$  보다 작게 멀어짐 경우에는 두 물체의 구별이 어렵게 됨을 알 수 있고, 반사계수가 서로 다른 두 물체의 경우에는 한 물체의 영상의 세기가 1인 경우에 다른 물체의 영상의 세기는 0.49, 0.25로 됨을 알 수 있다.

또한 단일 CW 주파수에 대한 물체의 영상보다 넓은 주파수 범위의 CW 를 사용하여 물체의 영상을 얻는 것이 side lobe 도 줄이고 분해능을 높일 수 있음을 보였다.

### 4. 실험 방법

본 실험에서는 물체를 회전시킴에 따라 송신전자파와 비교하여 변하는 수신전자파의 phase 정보와 magnitude 정보를 360° 전 각도에서 측정하여 영상을 재현하는 방법을 이용하였다.

phase 와 magnitude 정보를 측정하기 위한 분력 선도를 그림 4-1에 나타내었다. sweep oscillator로부터 나오는 wave 는 약 10 dbm 정도로 너무 작으므로 TWT Amp 에서 약 20 dB 정도 증폭시켜 대략 1W 정도가 송신 안테나로부터 anechoic chamber 에 송신된다.

송수신 신호를 비교하기 위해서 Harmonic Converter 와 Network analyzer 를 썼으며 Network analyzer 의 polar display 에서 출력되는 I 와 Q 신호는 DC level 이다. 이 I,Q 신호를 A/D Converter 로 Digital 값으로 전환하여 IBM-PC 에 그 값을 저장한다. 제어 신호는 HP-IB 를 통해 sweep oscillator와 A/D Converter 로 보내어 진다. 하나의 I,Q 신호가 저장되면 Computer 로부터 Stepping Motor 회전 명령이 나가게 되어 Motor 를  $1.8^\circ$  씩 회전시킨다음 다시 반복한다.  $360^\circ$  전구간에 대해 모든 신호를 수신하면 모든 제어신호가 경지하고 측정이 끝난다. 여러개의 주파수에 대해 측정할 때는 회전체의 어떤 각에 대해 원하는 frequency step 만큼 변화시키면서 data 를 받은 후에, 회전체 각도를 변화시킨다. 실험결과 그림 4-2는 지름 1 cm 길이 40cm 의 봉을 세워 얻은 값이다. 그림(4-3), (4-4)은 4-2와 같은 봉이 각각  $1\lambda$ ,  $2\lambda$  씩 어졌을 때 얻은 결과이다. 실험결과 두봉을 구별할 수 있는 거리는 약  $2\lambda$  정도로 된다. 그림(4-5)는 반사계수가 1, 0.5인 두봉에 대해 얻은 것이다. 그림(4-5)로부터 갖의 크기는 반사계수의 제곱에 비례하게 된다. 그림(4-2) - (4-4)는 8GHZ single frequency 를 사용하였다. 그림(4-5)는 (4-2)와 같은 봉을 네개의 주파수에 대해 측정할 결과이다. 이때 봉 주위의 side lobe 가 감소하는 효과를 관찰할 수 있다. 그림 (4-7)은 주파수 8GHZ 에 대해서 4개의 봉에 대한 영상이다.

5. 결 론

X - band ( 8 - 12 GHZ ) 의 주파수 영역에서 마이크로파 영상 system 을 구성하여 물체를 회전한 각도에 대해 phase 및 Amplitude 변화를 측정하여 물체의 반사함수를 1차원 Circular Convolution 으로 계산하여 물체에 대한 영상을 재현하였다. CW 에 대해  $360^\circ$  측정함으로써 물체에 대한 영상을 분해능  $2\lambda$  정도도 얻을 수 있다는 결론이 나왔다. 여러개의 주파수를 쓰면 side lobe 를 줄일 수 있어 보다 선명한 영상을 얻을 수 있다.

REFERENCE

1. W.M. Brown, "Synthetic Aperture Radar," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-3, No. 2, pp. 217-229, March 1967.
2. C.C. Chen, and H.C. Andrews, "Multi-frequency Imaging of Radar Turntable Data," IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-27 No.2, pp. 989-998, April 1980.
3. D.R. Wehner, High Resolution Radar, Artech House, Inc. 1987.

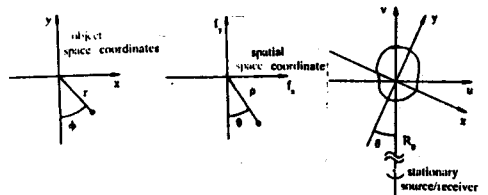


Fig. (2.1) Space and Frequency Domain Coordinates

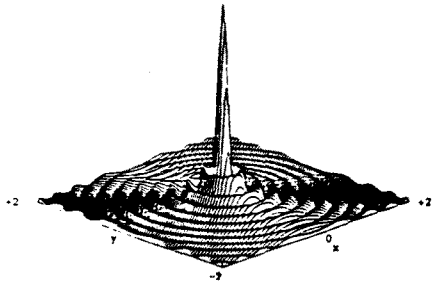


Fig. 3-1. point spread function of one point object ( $\lambda = 0.03\text{m}$ )

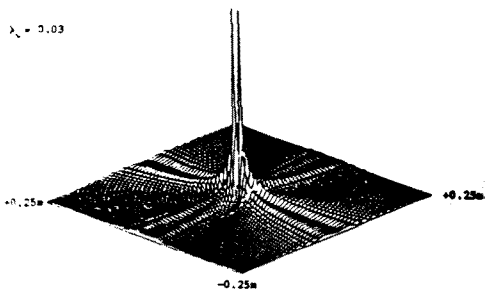


Fig. 3-2. reconstructed image of 2 point objects (separated by 0.5 lambda)

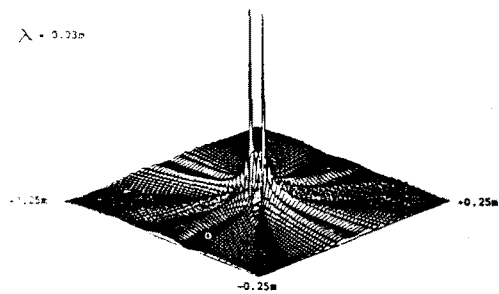


Fig. 3-3. reconstructed image of 2 point objects (separated by 1 lambda)

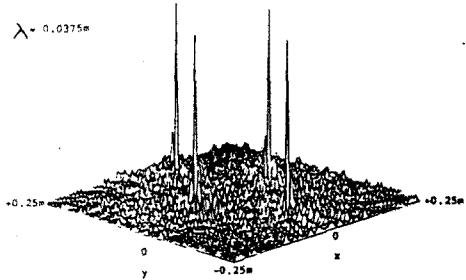


Fig. 3-4. reconstructed image of 4 rods

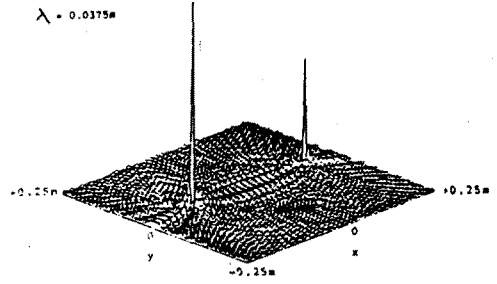


Fig. 3-5. reconstructed image of 2 point objects (reflectivity : 1 and 0.7)

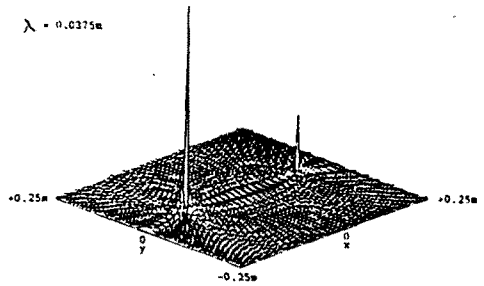


Fig. 3-6. reconsted image of 2 point objects (reflectivity : 1 and 0.5)

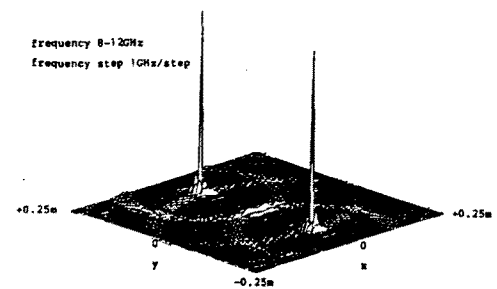


Fig. 3-7. reconstructed image of 2 point objects

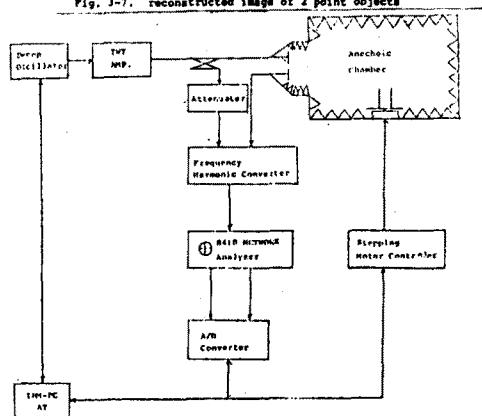


Fig. 4-1 실험장치 block diagram

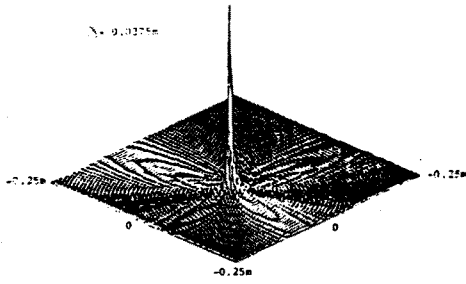


Fig. 4-2. reconstructed image of 1 rod

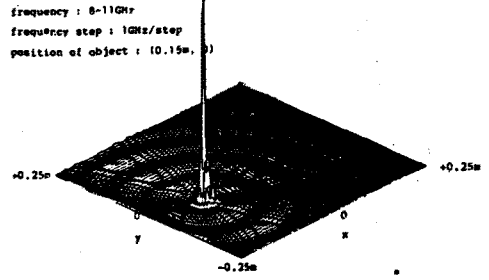


Fig. 4-6. reconstructed image of 1 rod

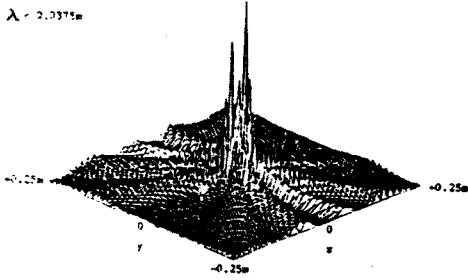


Fig. 4-3. reconstructed image of 2 rods  
(separated by 1 rods)

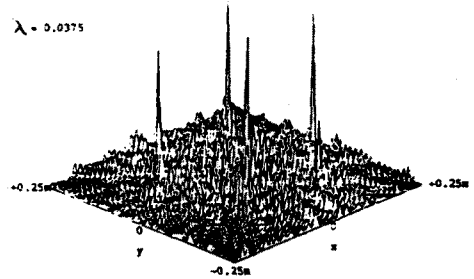


Fig. 4-7. reconstructed image of 4 rods

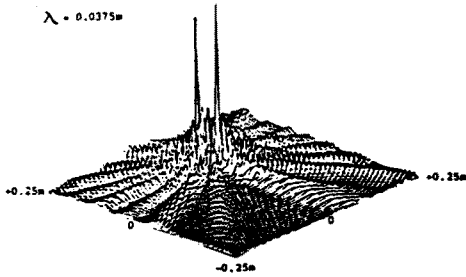


Fig. 4-4. reconstructed image of 2 rods  
(separated by 2 rods)

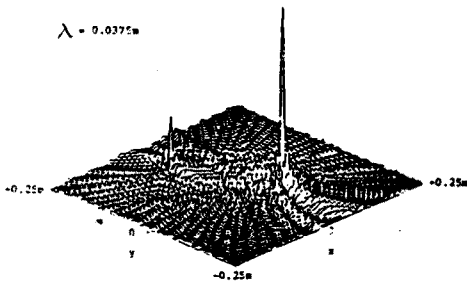


Fig. 4-5. reconstructed image of 2 rods  
(reflectivity : 0.5 and 1)