

論文2003-40SP-1-16

# Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar)에서의 Inversion 기법 성능 분석

(Performance Analysis of the Inversion Schemes in the  
Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar))

崔貞姬 \*

(Jeong-Hee Choi)

## 요 약

Stripmap-mode 합성개구레이더의 고전적인 영상 복원기술은 Range-Doppler 알고리즘이다. 하지만 고 해상도 Spotlight-mode 합성개구레이더 시스템에서는 Range-Doppler 알고리즘을 적용했을 때 성능이 상당히 나빠지므로 Spotlight-mode에 맞는 별도의 Inversion 알고리즘이 연구되어왔다. 본 논문에서는 Spotlight-mode 합성개구레이더에서 Raw-data를 처리하기 위한 알고리즘 연구를 통해 기존의 평면파 근사 방법을 이용하고 있는 Polar format 알고리즘과 근사 방법을 사용하지 않는 Wavefront Reconstruction 기법에 대한 성능분석을 시도하였다. 이 때 Source 신호의 Carrier 주파수, 합성 개구면 Size, 그리고 표적물의 위치에 따라 두 Inversion기법의 결과 영상을 비교함으로써 Wavefront Reconstruction 기법의 우수성을 입증하였다. Spotlight-mode 합성 개구 레이더 시스템을 시뮬레이션하여 Raw-data를 생성시키고 각 알고리즘에 적용하여 역변환을 통해 영상화된 표적물의 형태로 성능을 비교 분석하였다.

## Abstract

The classical image reconstruction for stripmap-mode Synthetic Aperture Radar is the Range-Doppler algorithm. When the spotlight-mode SAR system was envisioned, Range-Doppler algorithm turned out to fail rapidly in this SAR imaging modality. Thus, what is referred to as Polar format algorithm, which is based on the Plane wave approximation, was introduced for imaging from spotlight-mode SAR raw-data. In this paper, we have studied for the raw data processing schemes in the spotlight-mode Synthetic Aperture Radar. we apply the Wavefront Reconstruction scheme that does not utilize the approximation in spotlight-mode SAR imaging modelity, and compare the performance of target imaging with the Polar format inversion scheme.

**Keyword** : SAR, Range-Doppler algorithm, Polar format algorithm, Wavefront Reconstruction, Spotlight-mode

\* 正會員, 大邱大學校 情報通信工學部

(Dept. of Computer & Communication Engineering,  
Daegu University)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R04-2000-000-00077)지원으로 수행되었음.(This work was supported by grant No. R04-2000-000-00077 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation.)

接受日字:2002年7月31日, 수정완료일:2002年10月9日

## I. 서 론

현존하는 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar : SAR) 영상 시스템은 크게 Stripmap-mode와 Spotlight-mode SAR 시스템 모델로 구분된다.

일반적으로 해상도는 좁아지지만 넓은 지역을 영상화하기 위해서는 Stripmap-mode SAR 모델이 이용되며, 좀더 정확한 해상도를 위하여 특정지역을 자세히 탐사하는 방법인 Spotlight-mode SAR 시스템이 사

용되어진다.

Spotlight-mode SAR 영상화 시스템의 특별한 특징은 길이  $2L$ 의 Synthetic aperture를 가지는 Spotlight-mode SAR 시스템은 같은 길이를 가지는 물리적인 안테나 Size의 레이더 시스템과 거의 유사한 역할을 한다는 것이다. 그러므로 Spotlight SAR는  $2L$ 의 직경을 가지는 물리적 Aperture의 해상도 특성을 보여준다.

Spotlight-mode SAR는 레이더의 안테나를 기계적으로 또는 전자적으로 Beam Steering하여 레이더가 정해진 비행경로를 따라서 움직여 감에 따라 일정한 목표물 영역에 빔을 조사하도록 하는 SAR 영상화모델이다. Fresnel 근사 방법을 이용하고 있는 고전적인 Range-Doppler 알고리즘은 본질적으로 Stripmap-mode SAR 시스템을 위해 소개되었다<sup>1,3,4</sup>. 그러나, Spotlight-mode SAR의 영상화에는 적합하지 못하여, Spotlight-mode SAR에서 얻어진 Raw 데이터를 영상으로 복원하기 위하여 평면파 근사 방법을 이용하는 Polar format 처리기법을 사용하게 되었다<sup>1,2,6,8</sup>.

신행기술인 Range-Doppler 알고리즘과 Polar format 알고리즘은 초고주파 전파특성을 단순화하는 근사 방법을 이용하는 영상화 방법이다. 따라서 목표물의 위치, 측정환경, 사용 주파수 등에 따라 원천적인 오차를 항상 포함하고 있게 된다. 이러한 오차를 제거하기 위해 그 동안 여러 가지 필터링기법들이 개발되어 왔으나 잃어버린 정보를 복원하는데는 근사 정도의 한계가 있게 된다.

이에 반해 동일한 전파환경에서 수신한 신호 즉, Raw데이터를 근사 방법을 이용하지 않고 정확한 표현 방법으로 해석하여, 송·수신신호 그리고 시스템 전파 특성을 고려한 목표물의 특성 함수를 추출해 내는 방법인 Wavefront Reconstruction 기법이 실용화 개발 중에 있다.

본 논문에서는 고해상도 목표물 영상화기법인 Spotlight-mode SAR에 있어서 근사 방법을 이용하는 영상화 기법인 Polar format 알고리즘과 전파특성을 근사하지 않고 그대로 이용하는 Wavefront Reconstruction 기법을 비교 분석하고, 컴퓨터 모의 실험을 통하여 생성된 Raw데이터에 적용하였다. Carrier 주파수와 합성 개구(L) 크기에 따라 각 알고리즘으로 복원된 표적물의 해상도 변화와 표적물의 위치에 따른 성능을 비교하여, Wavefront Reconstruction 기법의 성능이 어떠

한 조건에서도 우수함을 결과 영상으로 보여준다.

## II. 시스템 모델

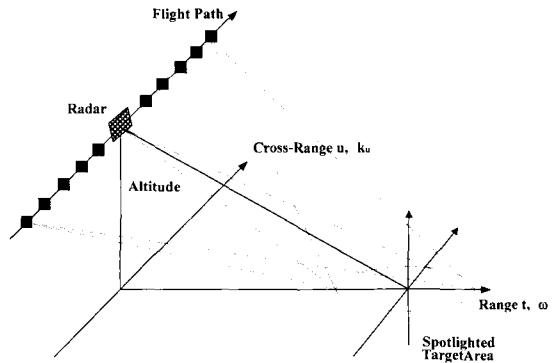


그림 1. Spotlight-mode SAR 시스템의 Geometry  
Fig. 1. The geometry of the spotlight-mode SAR system.

대부분의 영상시스템의 문제해결에 있어서 첫 번째 단계는 측정된 수신신호와 수신신호로부터 복원하기를 원하는 표적의 거리와 반사계수 사이의 수학적인 관계를 확립하는 것이다. 이것을 영상시스템 문제에서의 System Modeling이라고 부른다. 다음 단계는 측정된 신호로부터 원하는 정보인 표적의 거리, 반사계수 등을 추출하기 위한 절차를 전개하는 것이다. 이것을 표적에 대한 Reconstruction 또는 시스템 모델에 대한 Inversion이라고 한다<sup>1,3</sup>.

<그림 1>은 Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상시스템의 Geometry를 나타내고 있다. SAR는 Range, Cross-range, Altitude ( $x, y, z$ )와 같은 다차원으로 이루어진 공간영역에서 표적영역의 반사함수를 계산해내는 문제를 다루는 영상 시스템 모델이다.

본 논문에서는 Range와 Altitude 변수를 결합하여 Slant-range 영역 ( $x_s = \sqrt{x^2 + z^2}$ )으로 사용함으로써 앞으로의 수식 전개를 단순화한다. 따라서 앞으로의 영상화 문제는 Slant-range와 Cross-range ( $x_s, y$ )의 2차원 영역에서 전개될 것이다. 또한 용어 사용의 편의를 위해 영상화하는 평면을 Range와 Cross-range ( $x, y$ )로 부르기로 한다. 공간과 공간주파수 영역을 표현하는 변수로 ( $x, y$ )와 ( $k_x, k_y$ )를 사용한다. 공간영역 신호에 대해서는  $f(x, y)$ , 그리고 이 신호에 대한 공간영역의 Fourier 변환을  $F(k_x, k_y)$ 으로 표현한다.  $x$ 축은

Range 또는 Slant range를 표현하기 위해 사용되고,  $y$  축은 Cross-range 또는 Azimuth (along the track) 영역을 정의한다.

레이더를 탑재하고 있는 비행기가 움직이는 경로인 Cross-range 또는 Synthetic aperture domain을  $u$  로 표시하며, 그것의 공간주파수 영역은  $k_u$ 로 나타낸다. 비행경로 상의 고정된 위치에서, 레이더는 단일 주파수가 아닌 Multi-frequency(having bandwidth) 펄스 신호  $p(t)$ 를 조사하고 표적영역으로부터 반사되어 되 돌아오는 신호를 수신한다. 여기서  $t$  는 전자파가 표적까지 왕복하는 Fast-time domain을 가리키며, 그것의 각 주파수를  $\omega$  로 나타낸다.

표적영역은 모르는 미지의 좌표  $(x_n, y_n), n=1,2,\dots$  에 위치하는 정지된 표적들로 구성되어 있다고 가정한다. 조사된 표적영역은  $(X_c, Y_c)$  주위를 중심으로 하고 있다고 가정한다. 레이더는 신호  $p(t)$ 로 표적 영역을 조사한다. 레이더 신호는 다음의 Fast-time 주파수 영역에서 제한된 대역폭을 가진다.

$$\omega \in [\omega_c - \omega_0, \omega_c + \omega_0]$$

$$= [\omega_{\min}, \omega_{\max}], \quad \omega = 2\pi f$$

여기서,  $\omega_c$  와  $\pm\omega_0$  는 각각 레이더 신호의 중심각 주파수와 Baseband 각주파수이다.  $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$ 는 레이더 신호의 최소와 최대 Fast-time 각 주파수이다.

송신/수신하는 레이더는 인공위성이나 비행기에 탑재되어 있으며,  $(x, y)$  영역에서  $x=0$  선상을 따라 움직인다고 가정한다. 이 때 움직이면서 송수신하는 레이더의 위치를 Synthetic aperture 또는 Slow-time 영역이라고 부르고,  $(x, y)$  평면상의 좌표  $(0, u)$  에서 송신과 그에 대응하는 수신을 한다[<그림 2> 참조]. 이와 같은 시스템 모델에서 측정된 수신신호  $s(t, u)$  는 다음과 같다.

$$s(t, u) = \sum_n \sigma_n p\left[t - \frac{2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}}{c}\right] \quad (1)$$

여기서,  $2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}/c$ 는 레이더로부터  $n$  번째 표적까지의 왕복지연 시간이며  $\sigma_n$  은  $n$  번째 표적의 반사계수이고  $c$ 는 전자파의 전파속도이다.

### III. Reconstruction Algorithm

#### 1. Plane-wave approximation-based Inversion (Polar-format algorithm)

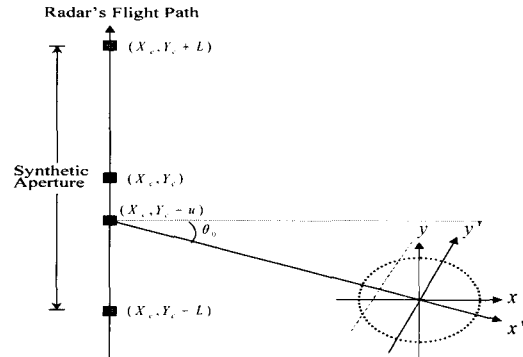


그림 2. 평면파 근사방법을 이용하는 영상화  
Fig. 2. Plane wave approximation-based Inversion.

Polar format 알고리즘은 식 (1)에서 전개된 SAR 시스템 모델을 근사 하는 것을 기본으로 한다. 즉, 레이더와 표적 사이의 거리가 멀기 때문에, 레이더에서 방사된 송신신호가 표적과 상호 작용하여 반사되어 오는 구형파를 평면파로 근사 시킬 수 있다는 원리를 이용한다. <그림 2>에서 직선  $y'$ 축에 평행한 직선 상에서는 레이더로부터 직선거리가 동일한 것으로 근사 된다.

Fast-time  $t$  에 관한 SAR 신호의 Fourier Spectrum 은 다음과 같이 표현된다.

$$s(\omega, u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \quad (2)$$

수식의 전개를 쉽게 하기 위해, 원점을 표적영역의 중심으로 움직여  $(X_c, Y_c)$ 에 있다고 가정하면, 공간 영역에서의 SAR 시스템 모델은 다음과 같이 된다.

$$s(\omega, u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \times \exp[-j2k\sqrt{(X_c + x_n)^2 + (Y_c + y_n - u)^2}] \quad (3)$$

레이더에 대한 목표물까지의 거리를 다음과 같이 근사하면,

$$\begin{aligned} & \sqrt{(X_c + x_n)^2 + (Y_c + y_n - u)^2} \\ &= \sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2 + 2X_c x_n + 2Y_c y_n + \dots} \\ &= \sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2} + \cos \theta_0 x_n + \sin \theta_0 y_n + \dots \\ &\approx \sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2} + \cos \theta_0 x_n + \sin \theta_0 y_n \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left[ \frac{2X_c x_n + 2Y_c y_n + x_n^2 + y_n^2 - 2u y_n}{X_c^2 + (Y_c - u)^2} \right] \ll 1 \quad (5)$$

식 (5)의 조건이 만족될수록, 식 (4)의 근사가 더 타당해진다. 여기서,  $\theta_0 = \arctan[(Y_c - u)/X_c]$ 는 Synthetic aperture 위치  $u$ 에서 표적영역의 중심에 대한 레이더의 Aspect angle이다. 식 (3)에서 식 (4)의 근사 방법을 이용하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$s(\omega, u) \approx P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2}] \times \exp[-jk_x x_n - jk_y y_n] \quad (6)$$

여기서,  $k_x = 2k \cos \theta_0$ ,  $k_y = 2k \sin \theta_0$ 이다. 따라서 공간 주파수영역에서 표적함수의 Inversion과정은 다음과 같이 된다.

$$F(k_x, k_y) = s(\omega, u) \cdot P^*(\omega) \times \sum_n \exp[j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2}] \quad (7)$$

이때,  $P^*(\omega) \sum_n \exp[j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2}] = s_0^*(\omega, u)$  로써 표적영역의 중심에서 반사된 수신신호의 conjugate이며 Reference신호라고도 한다. 따라서 식 (7)에서 표적함수  $F(k_x, k_y)$ 를 얻기 위해서 알고 있는 수신신호를 Reference신호의 conjugate  $s_0^*(\omega, u)$ 로 곱해주면 된다 (compression 효과).

공간영역  $(x, y)$ 에서 표적을 Reconstruction (Inversion)하기 위해서는  $F(k_x, k_y)$ 의 이용 가능한 Polar형태의 샘플들로부터 Rectilinear 샘플들로 Interpolation한 후, Inverse 2-D FFT를 통해 구할 수 있다<sup>[1,2,5]</sup>. <그림 3>은 Polar format 알고리즘의 신호처리 과정을 블록도로 나타낸 것이다.

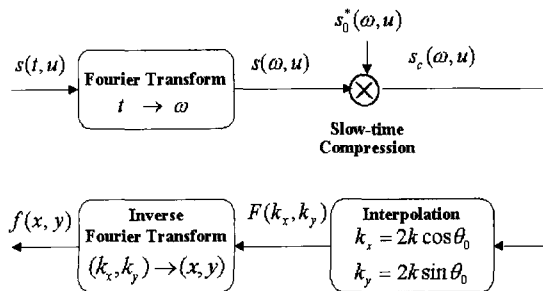


그림 3. Polar format 알고리즘 블록도  
Fig. 3. Polar format algorithm Block Diagram.

여기서 Polar-format reconstruction 기법의 특징은 수신신호가 Reference로 Compression 된 후  $u \rightarrow k_u$  영역으로 Fourier 변환 없이 바로 Target의 Spatial frequency 영역  $(k_x, k_y)$ 으로 Polar mapping 된다는 점이다.

### 2. Wavefront reconstruction 기법

먼저 SAR 모델을  $u \in [-\infty, \infty]$ 에서 측정이 이루어진다고 가정한다. Slow-time  $u$ 에 관한 식 (2)의 Spherical PM 신호의 Fourier 변환은  $k_u \in [-2k, 2k]$ 에 대하여 다음과 같이 계산된다<sup>[1,3]</sup>.

$$F.T. (\omega) [ \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] ] = \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n) \quad (8)$$

Spherical PM 신호의 Slow-time Fourier 특성을 이용하면, Slow-time  $u$ 에 관한  $s(\omega, u)$ 의 Fourier 변환은 다음과 같이 계산된다.

$$S(\omega, k_u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n] \quad (9)$$

$$S(\omega, k_u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-jk_x x_n - jk_y y_n] \quad (10)$$

식 (10)에서, 두 개의 새로운 함수들을 다음과 같이 정의하며, SAR Spatial frequency mapping이라 부른다.

$$k_x = \sqrt{4k^2 - k_u^2}, \quad k_y = k_u \quad (11)$$

공간 영역에서 이상적인 표적함수를 다음과 같이 정의해 보자.

$$f_0(x, y) = \sum_n \sigma_n \delta(x - x_n, y - y_n) \quad (12)$$

$$F_0(k_x, k_y) = \sum_n \sigma_n \exp(-jk_x x_n - jk_y y_n) \quad (13)$$

식 (10)~(13)로부터 SAR의 수신신호  $S(\omega, k_u)$ 와  $F_0(k_x, k_y)$ 의 관계를 유도하면 다음과 같이 된다.

$$S(\omega, k_u) = P(\omega) F_0(k_x, k_y) \quad (14)$$

$$F_0(k_x, k_y) = \frac{S(\omega, k_u)}{P(\omega)}$$

식 (14)의 관계에서  $F_0(k_x, k_y)$ 를 측정된 Echo 신호  $S(\omega, k_u)$ 에서 얻어내기 위해 실제로 사용하는 방법은 Fast-time matched filtering이며, 다음과 같이 실행될 수 있다<sup>[1,3]</sup>.

$$F(k_x, k_y) = P^*(\omega) S(\omega, k_u) \tag{15}$$

$$= |P(\omega)|^2 \sum_n \sigma_n \exp(-j k_x x_n - j k_y y_n)$$

식 (14)의 관계에서 Bandlimit 된  $F_0(k_x, k_y)$ 를 Non-bandlimit 된  $S(\omega, k_u)$ 에서 구할 수 없으므로 식 (15)에서  $F_0(k_x, k_y)$ 를 구하는 대신 근사화된 표적함수  $F(k_x, k_y)$ 를 구한다. 이 때, 실제 Aperture size(L)이 유한하므로 이를 고려한  $P^*$  신호인  $S(\omega, k_u)$ 의 Support band는 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$k_u \in \bigcup_n [-2ksin(\theta_n(L)), 2ksin(\theta_n(-L))] \tag{16}$$

$$\approx \bigcup_{|y_n| \leq Y} [2k \frac{y_n - L}{x}, 2k \frac{y_n + L}{x}]$$

$$= [-2k \frac{Y_0 + L}{x}, 2k \frac{Y_0 + L}{x}].$$

여기서  $\theta_n(L)$ 는 Synthetic aperture 위치  $u=L$  과  $n$  번째 표적이 이루는 레이더 Aspect angle이며, 전체 표적영역에서 Echo되는 수신신호는 각 표적신호의 Support band를 합한 영역 내에서만 주로 존재함을 알 수 있다.

SAR의 영상 복원은 Measurement domain,  $(\omega, k_u)$  영역에서 얻어진 유효 데이터와 표적의 Spatial frequency domain인  $(k_x, k_y)$  영역으로의 매핑을 통하여 이루어진다. Raw 데이터의 측정시에는  $(\omega, k_u)$  영역에서 Rectangular grid상에  $S(\omega, k_u)$ 의 균일한 간격의 샘플들로 이루어지지만,  $(\omega, k_u)$  영역에서  $(k_x, k_y)$  영역으로의 2차원 매핑에서 나타나는 비선형 특성(식 11)으로  $F(k_x, k_y)$ 의 결과 데이터들은 불균일한 간격으로 이루어진 샘플을 가지게 된다. 따라서 Inverse 2-D FFT를 통해  $f(x, y)$ 를 복원하기 위해서는 균일한 Rectangular grid상의  $F(k_x, k_y)$  값을 Interpolation해야 한다. 또한 신호  $F(k_x, k_y)$ 의 역 Fourier변환이  $(X_c, Y_c)$ 를 중심으로 하는 Bandpass 신호이므로, Interpolation를 하기 전에 신호를 Lowpass로 변환해야 하며, 이를 위해 다음의 Baseband conversion을 수행하여야 한다.

$$F_b(k_x, k_y) = F(k_x, k_y) \exp(jk_x X_c + jk_y Y_c) \tag{17}$$

<그림 4>는 Wavefront reconstruction의 신호처리과정을 블록도로 나타낸 것이다.

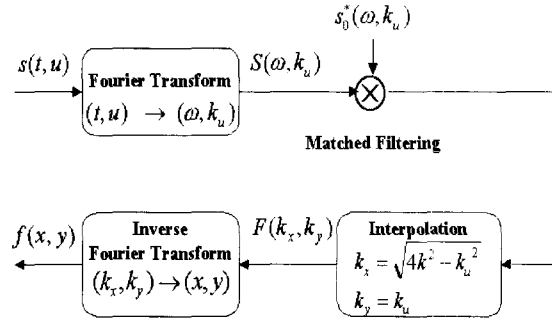


그림 4. Wavefront reconstruction 블록도  
Fig. 4. Wavefront reconstruction Block Diagram

#### IV. 실험 및 성능 분석

<표 1>과 <표 2>는 본 논문의 실험에서 사용된 주요 파라미터와 표적의 위치를 나타낸다.

표 1. Spotlight-mode SAR 시뮬레이션 주요 파라미터

Table 1. The parameter of Spotlight-mode SAR Simulation.

Center frequency ( $f_c$ )	750 MHz 3 GHz	Synthetic aperture length(L)	[-200, 200]m   400, 400]m
Source signal bandwidth( $f_b$ )	50 MHz	Footprint ( $X_0, Y_0$ )	(100, 100)m
Source signal pulse duration( $T_p$ )	0.25usec	Resolution $\Delta_x \times \Delta_y (m) / (f_c (MHz), L (m))$	1.5x5.36 / (750, 200) 1.5x2.67 m / (750, 400) 1.5x1.27m / (3000, 200) 1.5x0.64m / (3000, 400)
Chirp rate ( $\alpha$ )	1.26e15	Slant range( $X_c$ )	10,000m

본 논문에서 사용한 시스템 모델은 Target 영역의 중심과 Synthetic aperture의 center가 Broadside에 있는 경우이고 <표 1>에 나와있는 System 파라미터를 이용하여 Chirp 신호를 Source 신호로 하여 Active SAR data를 시뮬레이션하였다. 이 때 Simulation 된 SAR 데이터를 수신 Microwave 신호로 간주하고 여기에 두 가지 Inversion 기법을 적용시켜 Target 영상을 만들어내어 성능 비교를 수행하였다. Target reconstruction까지 까다롭고 복잡한 신호 처리 단계를 거치는데, 이는 Matlab code를 이용하였고 그 결과로 <그림 5~16>까지의 결과영상을 얻을 수 있었다.

표 2. Spotlight-mode SAR 시뮬레이션 표적의 위치(m)

Table 2. The target location of Spotlight-mode SAR Simulation.

$(X_c, Y_c)$	$(X_c - 0.4 * X_0, Y_c + 0.9 * Y_0)$	$(X_c - 0.5 * X_0, Y_c)$
$(X_c - 0.7 * X_0, Y_c)$	$(X_c - 0.9 * X_0, Y_c)$	$(X_c + 0.5 * X_0, Y_c)$
$(X_c, Y_c + 0.5 * Y_0)$	$(X_c, Y_c + 0.7 * Y_0)$	
$(X_c + 0.9 * X_0, Y_c)$		
$(X_c - 0.4 * X_0, Y_c - 0.9 * Y_0)$		
$(X_c + 0.4 * X_0, Y_c + 0.9 * Y_0)$		
$(X_c + 0.4 * X_0, Y_c - 0.9 * Y_0)$	$(X_c, Y_c - 0.5 * Y_0)$	
$(X_c, Y_c - 0.7 * Y_0)$	$(X_c + 0.4 * X_0, Y_c + 0.4 * Y_0)$	
$(X_c + 0.4 * X_0, Y_c - 0.4 * Y_0)$		
$(X_c - 0.4 * X_0, Y_c + 0.4 * Y_0)$		
$(X_c - 0.4 * X_0, Y_c - 0.4 * Y_0)$		
$(X_c + 0.8 * X_0, Y_c + 0.8 * Y_0)$		
$(X_c + 0.8 * X_0, Y_c - 0.8 * Y_0)$		
$(X_c - 0.8 * X_0, Y_c + 0.8 * Y_0)$		
$(X_c - 0.8 * X_0, Y_c - 0.8 * Y_0)$		
$(X_c + 0.8 * X_0 + \Delta_x, Y_c + 0.8 * Y_0 + \Delta_y)$		
$(X_c - 0.8 * X_0 - \Delta_x, Y_c + 0.8 * Y_0 + \Delta_y)$		
$(X_c + 0.8 * X_0 + \Delta_x, Y_c - 0.8 * Y_0 - \Delta_y)$		
$(X_c - 0.8 * X_0 - \Delta_x, Y_c - 0.8 * Y_0 - \Delta_y)$		
$(X_c + 0.9 * X_0, Y_c + 0.45 * Y_0)$		
$(X_c + 0.9 * X_0, Y_c - 0.45 * Y_0)$		
$(X_c - 0.9 * X_0, Y_c + 0.45 * Y_0)$		
$(X_c - 0.9 * X_0, Y_c - 0.45 * Y_0)$		

알고리즘의 성능 분석을 위하여 Synthetic aperture의 길이와 Carrier center 주파수를 다르게 조정하여 시뮬레이션 하였다. <그림 5~16>에서는 Synthetic aperture의 길이와 주파수 변화에 따른 Polar format inversion기법과 Wavefront Reconstruction 기법의 결과 영상을 나타내었다. 이론적인 Approximation에서 예측되듯이 Polar format 알고리즘 결과 영상에서는 목적물의 위치가 목적지역의 중심에서 방사상의 거리가 멀어질수록 표적의 해상도 및 표적물의 위치 또한 열화되는 현상이 나타났으며(<그림 5, 9, 13>), Wavefront Reconstruction에서는 결과영상이 전체 영역에서 동일한 해상도를 보였다(<그림 6, 10, 14>). 또한 <그림 7, 11, 15>에서 보이듯이 Polar format 알고리즘은 Center 주파수와 Synthetic aperture의 길이가 증가할수록, 평면파 근사로 인한 표적영역의 Edge 부분에 위치한 표적의 해상도 열화가 감소됨이 결과영상에서 나타난다. 또한 이론에서 예측하듯이 두 기법 모두 사용 주파수와 합성 개구면이 증가할수록 목적물의 해상도가 점점 증가됨도 결과 영상에서 나타남을 볼 수 있다.

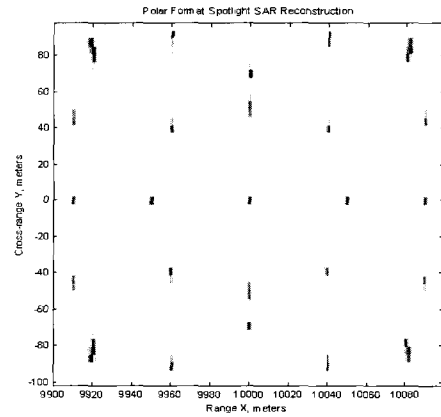


그림 5. Polar format 알고리즘 :  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$   
Fig. 5. Polar format algorithm :  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ .

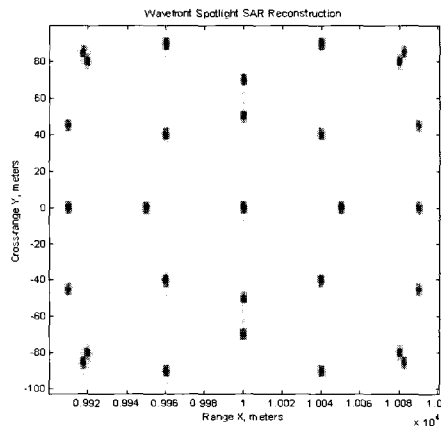


그림 6. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$   
Fig. 6. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ .

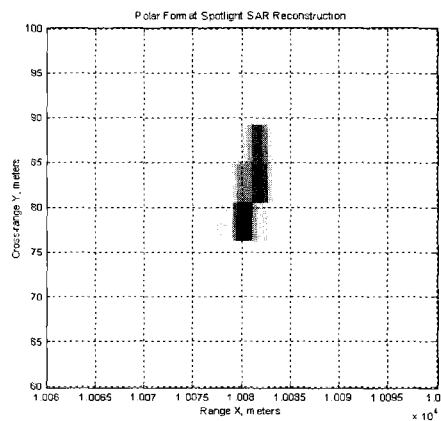


그림 7. Polar format 알고리즘 :  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
표적 :  $(X_c+0.8*X_0, Y_c+0.8*Y_0)$   
Fig. 7. Polar format algorithm :  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
Target :  $(X_c+0.8*X_0, Y_c+0.8*Y_0)$ .

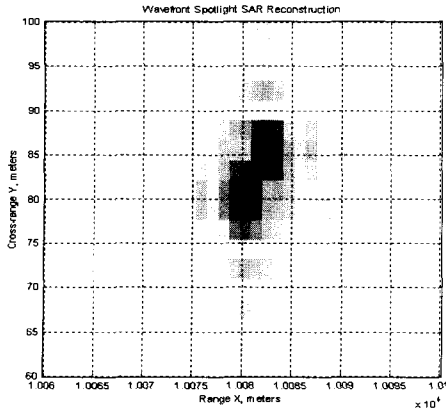


그림 8. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 표적 :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$   
 Fig. 8. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 Target :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$ .

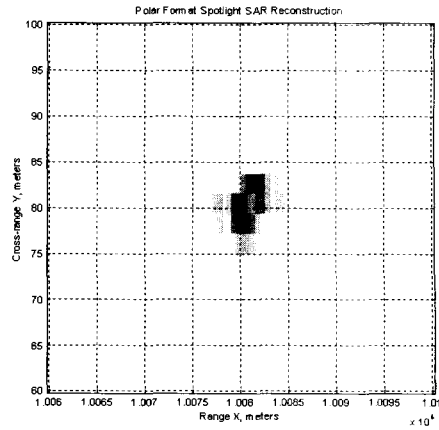


그림 11. Polar format 알고리즘:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$ ,  
 표적 :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$   
 Fig. 11. Polar format algorithm:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$ ,  
 Target :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$ .

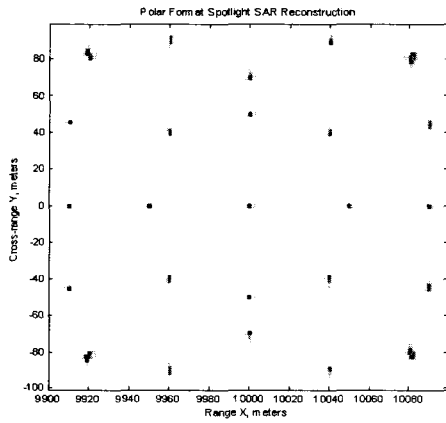


그림 9. Polar format 알고리즘:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$   
 Fig. 9. Polar format algorithm:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$ .

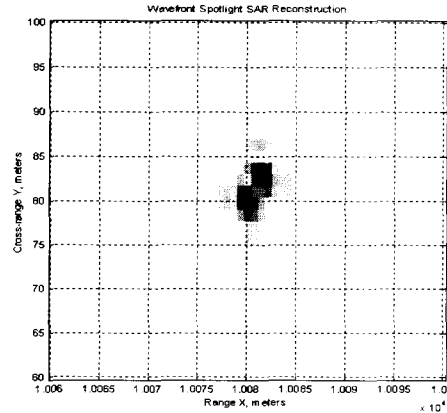


그림 12. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$ ,  
 표적 :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$   
 Fig. 12. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$ ,  
 Target :  $(X_c+0.8*X_o, Y_c+0.8*Y_o)$ .

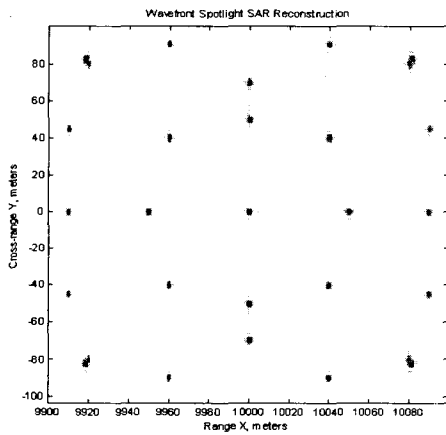


그림 10. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$   
 Fig. 10. Wavefront reconstruction:  $f_c=750\text{MHz}$ ,  $L=400\text{m}$

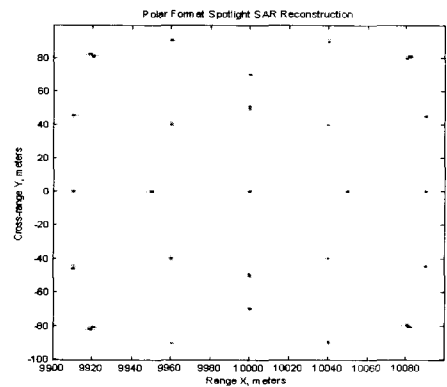


그림 13. Polar format 알고리즘 :  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$   
 Fig. 13. Polar format algorithm :  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ .

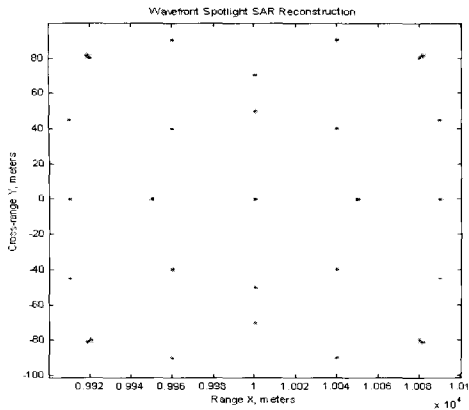


그림 14. Wavefront reconstruction:  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$   
 Fig. 14. Wavefront reconstruction:  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ .

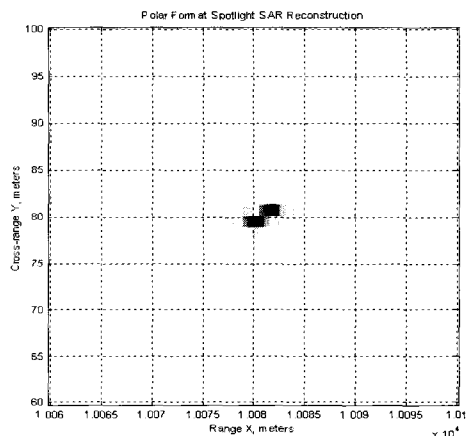


그림 15. Polar format 알고리즘 :  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 표적 :  $(X_c+0.8 \times X_0, Y_c+0.8 \times Y_0)$   
 Fig. 15. Polar format algorithm :  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 Target :  $(X_c+0.8 \times X_0, Y_c+0.8 \times Y_0)$ .

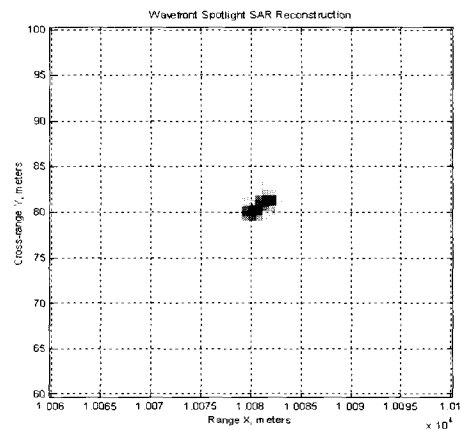


그림 16. Wavefront reconstruction:  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 표적 :  $(X_c+0.8 \times X_0, Y_c+0.8 \times Y_0)$   
 Fig. 16. Wavefront reconstruction:  $f_c=3\text{GHz}$ ,  $L=200\text{m}$ ,  
 Target :  $(X_c+0.8 \times X_0, Y_c+0.8 \times Y_0)$ .

### V. 결 론

본 논문에서는 Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar에서의 Raw 데이터를 처리하기 위한 알고리즘인 Polar format 알고리즘과 Wavefront Reconstruction 알고리즘을 분석하였으며, 각 단계별 처리과정을 Matlab 컴퓨터 언어를 이용하여 수행하였다. 실험을 위한 Raw-data는 Spotlight mode SAR 시스템을 S/W적으로 모델링하여 생성시킨 후 각 알고리즘을 적용하였다.

평면파 근사 방법에서 근사의 정확도에 관한 타당성 정도는 식 (5)를 고려해 보았을 때 결과 영상의 방사상 거리가 증가할수록 근사의 정확도가 떨어져 결과영상에서의 해상도가 열화됨을 예상하고 실험하였다. 그 결과 평면파 근사를 이용하는 Polar format 알고리즘의 결과 영상에서는 방사상으로의 거리가 증가할수록 해상도가 현저히 떨어짐을 볼 수 있었으며, 표적의 위치 변화도 생김을 알 수 있었다.

이에 반해 Wavefront Reconstruction에서는 결과 영상이 전체 영역에서의 동일한 해상도로 표적들을 잘 표현하였다. 또한, 중심주파수와 Synthetic aperture의 길이의 영향을 알아보기 위하여 다른 값으로 조절해가며 모의 실험한 결과, 중심주파수와 Synthetic aperture의 길이가 증가할수록 Polar format 알고리즘의 근사 정도가 정확해지므로 근사를 이용하지 않는 Wavefront Reconstruction의 결과와 비슷하게 됨을 관찰할 수 있었다.

본 논문에서는 고 해상도 목적물 영상시스템인 Spotlight-mode SAR 시스템에서, 근사 방법을 이용한 알고리즘인 Polar format 알고리즘과 전파모델의 근사 방법을 사용하지 않는 Wavefront Reconstruction 기법을 사용하였을 때의 표적물의 위치와 해상도가 여러 가지 시스템 파라메타에 따라 성능이 달라짐을 비교 분석함으로써 정확한 Raw-data processing의 중요성을 보여준다.

### 참 고 문 헌

[1] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms*, Wiley, 1999.



- [2] W. Carrara, R. Goodman, and R. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA:Artech House, 1995.
- [3] M. Soumekh, *Fourier Array Imaging*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1994.
- [4] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar*, New York: Wiley, 1991.
- [5] D. Ausherman, A. Kozma, J. Walker, H. Jones, and E. Poggio, "Developments in radar imaging," *IEEE Trans, Aerospace and Electronic System*, 20:363, July 1984.
- [6] M. Soumekh, "Reconnaissance with ultra wideband UHF synthetic aperture radar," *IEEE Signal Processing Magazine*, 12:21-40, 1995.
- [7] M. Soumekh, "A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging," *IEEE Trans. Image Process.*, 1:64-76, 1992.
- [8] D. Munson, J. O'Brien, and W. Jenkins, "A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar," *Proc, IEEE*, Vol. 71, p. 917, August 1983.

---

 저 자 소 개
 

---



崔貞姬(正會員)

1986년 2월 경북대학교 전자공학과 학사. 1989년 2월 뉴욕주립 버팔로 대학교(SUNY at Buffalo) 전기 및 컴퓨터공학과(Dept. of Electrical and Computer Engineering) 석사. 1992년 6월 뉴욕주립 버팔로 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 박사. 1994년 1월~1998년 2월 SK 텔레콤 중앙연구소 선임연구원. 1998년 3월~현재 대구대학교 공과대학 정보통신공학부 조교수. <주관심 분야 : Microwave Active Imaging 시스템(Synthetic Aperture Radar Imaging)과 Wireless Communication에서의 Signal and Image Processing임>