

# Stripmap-mode SAR에서의 영상복원 알고리즘의 성능분석

<sup>u</sup>박현복, 김형주, 최정희

대구대학교 정보통신공학부 레이더영상시스템연구실

## Performance Analysis of the reconstruction Algorithms in the Stripmap-mode SAR

<sup>u</sup>Hyun-Bok Park\*, Hyung-Joo Kim\*, Jeong-Hee Choi\*\*

Radar Imaging System Lab., School of Computer & Communication Eng., Taegu University

\*Master's degree course, \*\*Assistant professor

Tel. +82-53-850-4409/ Fax. +82-53-850-6619 E-mail: dolphin(kimhj, choijh}@biho.taegu.ac.kr

### Abstract

The classical image reconstruction for stripmap SAR is based on the Fresnel approximation which utilizes deramping or chirp deconvolution in the synthetic aperture(slow-time) domain. Another approach in formulating stripmap SAR processing and imaging is based on the SAR wavefront reconstruction theory, and analysis of the SAR signal in the slow-time via the spherical wave Fourier decomposition of the radar radiation pattern. In this paper, we compare the Fresnel approximation and the wavefront reconstruction methods using simulated stripmap SAR data.

### 요 약

Stripmap SAR 시스템에서 레이더는 Slant range-domain에서 고정된 Strip상에 Data acquisition period 동안 계속해서 같은 Broadside 방사 패턴을 유지하며, Range domain에서 고정된 Strip내의 지형의 지도를 제공하는 SAR 영상 시스템이다. Stripmap SAR를 위한 고전적인 영상 복원은 Synthetic aperture (slow-time) domain에서 Deramping 또는 Chirp deconvolution을 이용하는 Fresnel approximation에 의존하였다. 또 다른 Stripmap SAR 영상화의 접근방법으로는 SAR wavefront reconstruction이론과 레이더 방사 형태에 대한 spherical wave Fourier decomposition을 통하여 slow-time domain에서의 SAR 신호의 분석에 기본을 두고 있다. 본 논문에서는 컴퓨터 모의 실험을 통해 생성된 Stripmap SAR 데이터를 이용하여 Fresnel approximation 기법과 Wavefront Reconstruction 기법을 비교 분석한다.

### I. 서 론

Synthetic Aperture Radar (SAR)는 지형, 혹성 등의 먼 거리의 표적들에 관한 고해상도의 지도를 제공하는 비행탐재 또는 위성탐재 레이더 시스템이다. 현존하는 SAR 영상 시스템은 크게 Stripmap과 Spotlight-mode SAR 시스템모델로 구분되는데 대개 해상도는 좁아 떨어지지만 넓은 지역을 임의로 영상화하기 위해서는 Stripmap SAR가 이용되고, 좀더 정확한 해상도를 가지고 특정지역을 자세히 탐사하기 위해서 Spotlight SAR가 사용되어질 수 있다.

Stripmap SAR에 대한 고전적인 영상복원은 Synthetic aperture domain에서 Deramping 또는 Chirp Deconvolution을 이용하는 Fresnel approximation에 그 기반을 두고 있다. 그리고 레이더 빔이 전방부를 곧바로 비추기 때문에(Broadside) 일단 합성되는 개

구 안테나 크기가 표적의 영역 밖으로 나가면 의미가 없으므로 Cross-range resolution을 향상시키기 위한 SAR 데이터처리를 방해한다. 이를 보완하여 일정 표적영역을 계속해서 탐색하는 Spotlight mode가 제안되었고, 이를 처리하는 기법이 Plane wave approximation-based Inversion 방법이다.

Fresnel approximation을 기반으로 하는 고전적인 Range-Doppler Imaging은 본질적으로 Stripmap SAR 시스템을 위해 소개되었다. 그러나 Spotlight SAR 시스템이 도입되었을 때, Fresnel approximation은 이러한 Spotlight SAR imaging 모델에서는 적용이 불가능하였고, Spotlight SAR 데이터로부터의 영상화를 위해 Plane Wave Approximation에 기반으로 하는 Polar Format Processing이 소개되었다. Polar Format Processing은 Spotlight SAR에서는 잘 수행

하지만, Stripmap SAR 시스템의 분석에 있어서는 적절하지 못하다.

지금까지 언급된 선행기술인 Range-Doppler Imaging 과 Polar Format Processing 두 방법 모두 초고주파의 전파특성을 단순화한 Approximation-based 영상화방법이다. 그래서 원천적으로 근사화를 이용한 해석 때문에 표적의 위치, 측정환경, 사용 주파수 등에 따라 오차를 계속 지니고 있으며 이를 제거하기 위한 여러 가지 필터링 기법들도 많이 개발되어왔으나 원천적으로 잃어버린 정보는 되찾는 데는 한계가 있다.

이에 반해 같은 전파환경에서 수신한 신호를 근사화 없는 정확한 표현방법인 구형파로 해석하여 송신된 신호와 수신 신호, 그리고 시스템 전파특성을 고려하여 표적함수를 추출해 내는 기법을 Wavefront Reconstruction 기법이라 한다.

본 논문에서는 Stripmap SAR 영상화 기법중에서 전파환경을 근사화 없이 그대로 구형파의 전파특성을 그대로 이용하는 Wavefront Reconstruction 기법과 Fresnel-approximation 기법을 분석하고, 같은 시스템 모델 환경에서 컴퓨터 모의 실험을 통하여 만들어진 Stripmap SAR 데이터에 두가지 기법을 적용하여 영상을 비교 분석한다.

## II. 시스템 모델

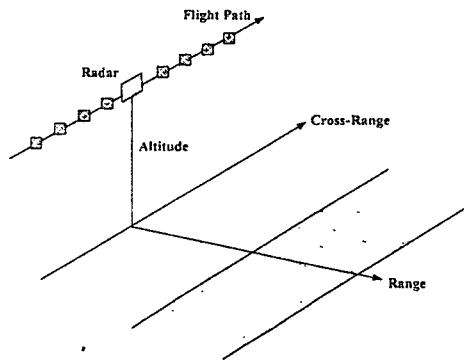


그림 1 Stripmap SAR 영상시스템의 Geometry

Synthetic Aperture Radar (SAR)는 range, cross-range, altitude  $(x, y, z)$ 의 다차원으로 이루어진 spatial domain에서 표적영역의 반사함수를 계산해내는 문제를 다루는 영상모델이다. 본 논문에서는 range와 altitude 변수를 결합하여 slant-range domain을 만들어, slant range와 cross-range의 2차원의 spatial domain에서 영상화 문제를 검토한다. 이러한 영역을  $(x, y)$ 로 나타낸다.

그림 1은 stripmap SAR 영상화 시스템 Geometry를 나타낸다. 비행체에 탑재된 레이더는 synthetic

aperture domain 또는 slow-time domain이라고 불리는 좌표  $(0, u)$  line을 따라 움직인다. synthetic aperture domain을  $u$ 로 나타내며, 그것의 frequency domain을  $k_u$ 로 나타낸다. 고정된 synthetic aperture 위치에서, 레이더는 wide-bandwidth 펄스 신호  $p(t)$ 를 전송하고 표적영역으로부터 되돌아 오는 신호를 수신한다. 여기서  $t$ 는 fast-time domain을 나타내며, 그것의 fast-time frequency domain을  $\omega$ 로 나타낸다.

Spatial domain  $(x, y)$  domain에서 좌표  $(x_n, y_n)$  ( $n=1, 2, \dots$ )에 위치한 반사계수  $\sigma_n$ 을 가지는 점 표적들의 집합으로 구성된 고정되어 있는 표적 영역을 고려해 보자. 변수  $x$ 는 range domain(slant range)을 나타내며, 변수  $y$ 는 cross-range(azimuth 또는 along the track)를 나타내기 위해 사용된다.

Spatial domain에서  $(0, u)$ 에 위치한 레이더는 다중주파수 신호  $p(t)$ 로 표적 영역을 방사한다. 여기서 레이더 방사패턴은 omni-directional으로 가정한다.

이와 같은 시스템 모델에서 측정된 수신신호는 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,  $\frac{2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}}{c}$ 는 레이더로부터  $n$ 번째 표적까지의 Round-trip delay이다. Wave divergence에 관계되는 진폭 함수

$$\frac{1}{\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}}$$

은 위 모델 우변의  $\sigma_n$ 에 흡수된다.

주파수 영역  $(\omega, k_u)$ 내의 데이터는 표적함수의 주파수  $(k_x, k_y)$ 영역으로 mapping된다.  $F_n(k_x, k_y)$ 의 Support 영역에 대한 2차원 역 Fourier변환은 Stripmap SAR 시스템의 Point spread 함수의 모양을 나타내는 2차원 sinc 패턴이다. 해상도는  $(x, y)$  domain에서 두 sinc 함수들의 주엽(main lobe)으로, 다음과 같이  $\pm \Delta_x$ 와  $\pm \Delta_y$ 로 나타낸다.

$$\Delta_x = \frac{\pi c}{2\omega_0}, \quad \Delta_y = \frac{D_y}{2} \quad \text{for planar radar}$$

Stripmap SAR 시스템에서 range와 cross-range resolution은 표적의 좌표변화와 관계 없다. 또한 Planar 레이더의 Cross-range resolution  $\Delta_y$ 는 레이더의 직경이 감소함에 따라 향상된다.

## III. Reconstruction Algorithms

### 1. Fresnel Approximation 기법

시스템 모델에서 수신된 신호  $s(t, u)$ 가 원점이 목표영역의 중심  $(X_c, 0)$ 으로 천이 되었을 때, Fast-time  $t$  에 관한 SAR 신호의 Fourier 변환을 고려해보면,

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

$X_c$  주위에 Slow-time  $u$ 에서  $n$ 번째 목표물로부터 레이다 거리에 대해 Taylor series expansion은

$$\sqrt{(X_c + x_n)^2 + (y_n - u)^2} = X_c + x_n + \frac{(y_n - u)^2}{2X_c} + \dots$$

이다.

위 Taylor series에서 Higher-order term들을 무시하면, SAR 신호 모델은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} s(\omega, u) &\approx P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp\left[-j2k(X_c + x_n) - jk\frac{(y_n - u)^2}{X_c}\right] \\ &= P(\omega) \exp(-j2kX_c) \sum_n \sigma_n \exp\left[-j2kx_n - j\frac{k(y_n - u)^2}{X_c}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

위 수식을 SAR 신호 모델에 대한 Fresnel approximation이라 한다. 여기서 우리는  $2k$ 를 Range spatial frequency domain으로 할당한다. 즉,  $k_x = 2k$ .

Spatial domain에서 이상적인 목표물 함수를 고려하여 보자.

$$f_0(x, y) = \sum_n \sigma_n \delta(x - x_n, y - y_n) \quad (4)$$

Range  $x$  domain에 관한 이상적인 목표물 함수에 대한 1차원 Fourier 변환은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{0x}(k_x, y) &\approx F_{(x)}[f_0(x, y)] \\ &= \sum_n \sigma_n \exp(-jk_x x_n) \delta(y - y_n) \end{aligned} \quad (5)$$

이 식을 이용하면, Fresnel approximation-based SAR 신호 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(\omega, u) \approx P(\omega) F_{0x}(2k, u) * \exp\left(-j\frac{k u^2}{X_c}\right) \quad (6)$$

여기서 \*는 Slow-time  $u$  domain에서 Convolution 을 나타낸다.

SAR 영상화문제 즉, 목표물 함수  $f(x, y)$ 를 또는 1차원 Fourier 변환인  $F_{0x}(k_x, y)$ 를 복원하는 문제는 SAR 신호  $s(\omega, u)$ 로 부터 다음과 같은 알려진 chirp 신호의 deconvolution으로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\exp\left(-j\frac{k u^2}{X_c}\right) \\ \text{Matched-filter된 형태에서의 영상화 방법은} \\ F_x(k_x, y) &\approx P^*(\omega) s(\omega, u) * \exp\left(j\frac{k u^2}{X_c}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $F_x(k_x, y) = F_{(x)}[f(x, y)]$ 는 Range  $x$  domain에 관한 표적 함수의 1차원 Fourier 변환이고,  $k_x = 2k$ ,

$y = u$ 이다.

Spatial domain 표적함수  $f(x, y)$ 는 다음과 같이  $k_x$ 에 대한  $F_x(k_x, y)$ 의 Inverse Fourier 변환에 의해 계산될 수 있다.

그럼 2에 Fresnel approximation을 사용한 Range-Doppler imaging의 Block diagram을 나타내었다. 위 (7)식은 Cross-range doppler domain에서 다음 (8)식과 같이 계산되어질 수 있다.

$$F_x(k_x, k_y) \approx P^*(\omega) S(\omega, k_u) \exp\left(-j\frac{k_x^2 X_c}{4k}\right) \quad (8)$$

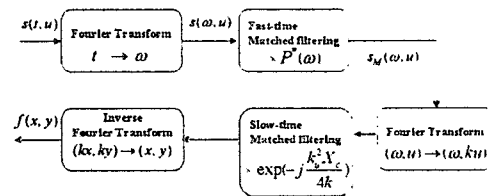


그림 2 Fresnel Approximation Block Diagram

## 2. Wavefront Reconstruction 기법

Fast-time  $t$ 에 관한 SAR 신호  $s(t, u)$ 의 Fourier 변환은 다음과 같다.

$$s(\omega, u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \quad (9)$$

여기서,  $k = \omega/c$ 는 wavenumber이다.

본 논문에서의 SAR 모델은  $u \in (-\infty, \infty)$ 에서 측정 이 이루어진다고 가정한다. Slow-time  $u$ 에 관한 spherical PM 신호의 Fourier 변환은  $k_u \in [-2k, 2k]$ 에 대하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} F_{(u)}[\exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}]] \\ = \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n) \end{aligned} \quad (10)$$

$k_u$ 를 Synthetic aperture frequency domain 또는 Slow-time frequency domain이라고 부른다.

Spherical PM 신호의 Slow-time Fourier 특성을 사용하여, Slow-time  $u$ 에 관한  $s(\omega, u)$ 의 Fourier 변환은

$$S(\omega, k_u) = P(\omega) \sum_n \sigma_n \exp[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n] \quad (11)$$

위상함수  $\exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n)$ 이  $(x_n, y_n)$ 의 선형 위상함수라는 사실은 SAR 영상시스템에서 실제적인 reconstruction 알고리즘을 공식화하는 데에 있어 중요한 역할을 한다.

우리는 두 개의 새로운  $(\omega, k_u)$ 의 함수를 정의함으로써 다음 형태로 SAR 신호를 다시 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} S(\omega, k_u) &= P(\omega) \sum_n \sigma_n \\ &\times \exp[-jk_x(\omega, k_u) x_n - jk_y(\omega, k_u) y_n] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 두 개의 새로운 함수들은 다음과 같이 정

의된다.

$$\begin{aligned} k_x(\omega, k_u) &= \sqrt{4k^2 - k_u^2} \\ k_y(\omega, k_u) &= ku. \end{aligned} \quad (13)$$

우리는 이 두 함수를 SAR Spatial frequency mapping 또는 Transformation이라고 부른다.

Spatial domain에서 이상적인 표적함수를 다음과 같이 정의해 보자.

$$f_0(x, y) = \sum_n \sigma_n \delta(x - x_n, y - y_n) \quad (14)$$

이것을 2차원 Spatial Fourier변환하면 다음과 같이 된다.

$$F_0(k_x, k_y) = \sum_n \sigma_n \exp(-j k_x x_n - j k_y y_n) \quad (15)$$

$F_0(k_x, k_y)$ 는 또한 Fourier shift 특성으로  $(x_n, y_n)$   $n=1, 2, \dots$ 의 선형 위상함수의 선형조합으로 구성되어 있다. SAR신호  $S(\omega, k_u)$ 에서  $F_0(k_x, k_y)$ 의 표현을 사용하면 다음과 같이 된다.

$$S(\omega, k_u) = P(\omega) F_0[k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)] \quad (16)$$

여기서  $k_x(\omega, k_u)$ ,  $k_y(\omega, k_u)$ 는 SAR Spatial frequency mapping으로 계산된다. Reconstruction을 위해, 즉 측정된 신호  $S(\omega, k_u)$ 의 Fourier변환으로부터  $f_0(x, y)$ 를 영상화하기 위해, 다음과 같이 표현한다.

$$F[k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)] = \frac{S(\omega, k_u)}{P(\omega)} \quad (17)$$

위의 수식은  $p(t)$ 는 대역 제한된 신호이며  $S(\omega, k_u)$ 는  $|k_u| > 2k$ 에 대해서는 0이기 때문에 이론적인 Reconstruction이다.

실제적인 Reconstruction은 Fast-time matched filtering을 통해 다음과 같이 실행된다.

$$\begin{aligned} k_u &\in [-2k, 2k] \text{와 } \omega \in [\omega_c - \omega_0, \omega_c + \omega_0] \text{에 대하여} \\ F[k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)] \\ &= P^*(\omega) S(\omega, k_u) \\ &= |P(\omega)|^2 \sum_n \sigma_n \exp(-j k_x x_n - j k_y y_n) \end{aligned} \quad (18)$$

SAR reconstruction은  $(\omega, k_u)$  domain에서 습득된 데이터에 대한  $(k_x, k_y)$  domain으로의 Mapping을 통하여 이루어진다. 실제로 SAR 시스템은 측정에 있어서는 사용자에게  $(\omega, k_u)$  domain에서 Rectangular grid 상에  $S(\omega, k_u)$ 의 균일한 간격의 샘플들로 이루어지나,  $(\omega, k_u)$  domain에서  $(k_x, k_y)$  domain으로의 2차원 Mapping에서의 비선형 특성으로,  $F(k_x, k_y)$ 의 결과적인 데이터들은 불균일한 간격의 샘플을 가지게 된다. 그러나, 우리는 2차원 FFT를 통해  $f(x, y)$ 를 복원하기 때문에 균일한 Rectangular grid상의  $F(k_x, k_y)$ 의 정보를 요구한다.

$k_y$  domain으로의 SAR mapping은 균일한 간격으로 이루어지므로,  $k_u$ 의 균일한 간격의 값들에서

$S(\omega, k_u)$ 의 값들을 가지게 되는 반면,  $k_x = \sqrt{4k^2 - k_u^2}$ 에서는  $(\omega, k_u)$ 함수의 비선형 함수이므로,  $k_x$ 의 불균일한 샘플 간격의 값들로부터  $k_x$  domain에서 1차원 Interpolation을 하여야 한다.

Range domain에서의 표적영역은 레이더 Range swath에 의해 결정되며,  $x \in [X_c - X_0, X_c + X_0]$ 라고 가정하자. 여기서  $X_c$ 는 mean range이고,  $2X_0$ 는 Range domain에서 Radar footprint의 크기이다. 따라서, 신호  $F(k_x, k_y)$ 의 역 Fourier변환이  $x = X_c$ 를 중심으로 하기 때문에, 신호  $F(k_x, k_y)$ 는  $k_x$  domain에서 Bandpass 신호이다. Interpolation 단계를 위해 이 신호를 Lowpass로 변환할 필요가 있으며, 이를 위해 다음의 Baseband conversion을 수행한다.

$$F_b(k_x, k_y) = F(k_x, k_y) \exp(jk_x X_c) \quad (19)$$

Spatial  $(x, y)$  domain에서 원점은 Baseband 표적 함수  $f_b(x, y)$ 의 중심에 있다. Lowpass 표적 함수를 위한 Reconstruction 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_b[k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)] \\ &= P^*(\omega) S(\omega, k_u) \exp[jk_x(\omega, k_u) X_c] \\ &= P^*(\omega) \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c) S(\omega, k_u) \end{aligned} \quad (20)$$

Spatial domain에서  $(x, y) = (X_c, 0)$ 에 위치한 점 표적에 대한 SAR 신호를 고려해 보자.

$$s_0(t, u) = p\left[t - \frac{2\sqrt{X_c^2 + u^2}}{c}\right] \text{ for } u \in (-\infty, \infty) \quad (20)$$

$s_0(t, u)$ 를 Reference SAR 신호라고 부른다. Reference signal의 2차원 (fast-time 과 slow-time) Fourier 변환을 하면,

$$S_0(\omega, k_u) = P(\omega) \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c) \quad (21)$$

SAR Baseband reconstruction에서  $S_0(\omega, k_u)$ 에 관한 표현식을 사용하면, 우리는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F_b[k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)] = S(\omega, k_u) S_0^*(\omega, k_u) \quad (22)$$

이것은 Spatial frequency domain에서 Baseband 표적 함수는 Reference SAR 신호를 이용하여 측정된 SAR 신호와 함께 2차원 Matched filtering을 통하여 복원될 수 있음을 나타낸다.

여기서 2차원 Frequency domain matched filter는 Fast-time domain matched filter인  $P^*(\omega)$ 와 Spatial domain에서 Target area의 중심을 Origin으로 가져오는 위상함수  $\exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c)$ 으로 두 부분으로 구성되어 있다.

그림 3에는 Spatial frequency interpolation을 사용한 SAR wavefront reconstruction 기법을 나타내었다.

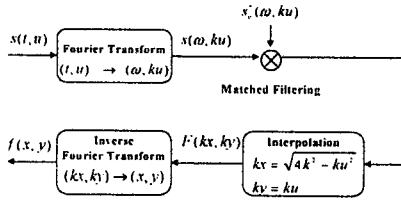


그림 3 Wavefront Reconstruction Block Diagram

#### IV. 실험 및 성능분석

본 논문에서의 실험에 사용된 주요 파라미터와 해상도는 다음과 같다.

- Fast-time sample spacing :  $\Delta_t = 5 \text{ ns}$
- 레이더의 Fast-time 대역폭 :  $[250, 350] \text{ MHz}$
- Fast-time sampling의 Start point :  $3.6152 \text{ us}$
- 레이더의 Carrier 주파수 :  $f_c = 300 \text{ MHz}$
- Mean range :  $X_c = 800 \text{ m}$
- Synthetic aperture domain에서의 Sample spacing :  $\Delta_u = 0.5 \text{ m}$
- Synthetic aperture :  $[-L, L] = [-877.3503, 877.3503] \text{ m}$
- 레이더 안테나의 Diameter :  $2.4 \text{ m}$
- 해상도 :

$$\Delta_x = \frac{\lambda c}{4\omega} = 1.5 \text{ m}, \quad \Delta_y = \frac{D_y}{2} = 1.2 \text{ m}$$

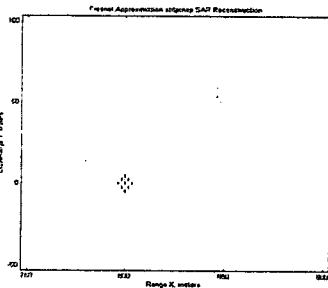


그림 4 Fresnel Approximation 기법 적용결과 영상

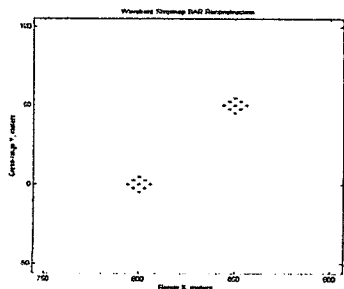


그림 5 Wavefront Reconstruction 기법 적용결과 영상

그림 5와 그림 6은 각각 Fresnel approximation 기법과 Wavefront Reconstruction 기법을 Matlab을 이용하여 Stripmap SAR 데이터에 적용하여 얻은 결과 영상이다. 영상에서 볼 수 있듯이 근사화를 하지 않은 Wavefront Reconstruction 기법은 영상전체에서 동일한 해상도를 잘 나타내어 주었으나, Fresnel approximation 기법을 적용한 영상에서는 영상 중심에서는 정확한 해상도를 보이나 가장자리쪽으로 갈수록 해상도의 Degradation이 심각하게 나타난다.

#### V. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 Fresnel approximation 기법과 Wavefront reconstruction 기법을 컴퓨터 모의실험으로 생성된 Stripmap 데이터에 각각 적용하였다. Fresnel approximation 기법에서는  $X_c$  주위에 Slow-time  $u$ 에서  $n$ 번째 목표물로부터 레이더 거리에 대해 Taylor series expansion에서 Higher-order term들을 무시함으로써, 결과 영상의 중심위치에서 벗어난 표적에 대해서는 심각한 Degradation을 보이고 있었고, 근사화 없는 전파 모델을 사용한 Wavefront reconstruction 기법에서는 결과영상 전체에서의 해상도가 동일하게 나타남을 확인할 수 있었다. 향후 과제로는, Wavefront Reconstruction 기법을 실제 운용중인 위성탑재 Stripmap SAR 데이터에 적용하여 그 성능을 분석하는 것이다.

#### 참고문헌

- [1] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms*, Wiley, 1999.
- [2] M. Soumekh, *Fourier Array Imaging*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1994
- [3] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar*, New York: Wiley, 1991.
- [4] M. Soumekh, "A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging," *IEEE Trans. Image Process.*, 1:64-76, 1992.
- [5] M. Soumekh, "Band-limited interpolation from unevenly spaced sampled data," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, 36:110-122, 1988
- [6] Jeong-Hee Choi, "A System Modeling, Inversion, and Phase Error Estimation in Synthetic Aperture Radar Imaging," *'96 IEEE Invited workshop on pattern recognition for multimedia technique*, pp.111-123, 1996.10