Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar)에서의 Raw-data Processing 기법 분석

박 현 복, 최 정 희
대구대학교 정보통신공학부
전화 : 053-850-4409 / 핸드폰 : 017-374-0490

Raw-data Processing Schemes in the Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar)

Hyun-Bok Park, Jeong-Hee Choi
School of Computer & Communication Engi., Daegu University
E-mail : dolphin@biho.taegu.ac.kr

Abstract

The classical image reconstruction for stripmap SAR is the range-Doppler imaging. However, when the spotlight SAR system was envisioned, range-Doppler imaging turned out to fail rapidly in this SAR imaging modality. What is referred to as polar format processing, which is based on the plane wave approximation, was introduced for imaging from spotlight SAR data. This paper has been 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.

I. 서 론

현존하는 SAR 영상화시스템은 크게 Stripmap과 Spotlight SAR 시스템 모델로 구분된다. 보통 해상도는 좀 떨어지지만 넓은 지역을 임의로 영상화하기 위해서는 Stripmap SAR 모델이 이용되고, 좀더 정확한 해상도를 가지고 특정지역을 자세히 탐사하기 위하여 Spotlight-mode SAR 시스템이 사용되어진다. Spotlight-mode는 레이더를 기계적으로 또는 전자적으로 Beam Steering함으로써 레이더가 정해진 비행경로를 따라서 움직여 가면서 일정한 목표물 영역에 대하여 빔을 조사하는 SAR 영상화모델이다.

Fresnel 근사화 방법을 기초로 하는 고전적인 Range-Doppler Imaging 기법은 본질적으로 Stripmap SAR 시스템을 위해 소개되었으며[1][3], Spotlight SAR 영상화에는 부적합하여, Spotlight SAR 데이터로 부터 영상복원을 위해 평면파 근사화 기법을 기반으로 하는 Polar format 처리기법이 사용되었다[1][2][6]. 선행기술인 Range-Doppler Imaging과 Polar format 처리기법은 초고주파의 전파특성을 단순화한 근사화에 의존한 영상화방법이다. 따라서 목표물의 위치, 측정환경, 사용주파수 등에 따라 원천적인 오차를 항상 포함하고 있으며, 이를 제거하기 위한 여러 가지 필터링기법들도 많이 개발되어 왔으나 잃어버린 정보를 복원하는데는 한계가 있다.

반면에, 같은 전파환경에서 수신한 신호를 근사화 없는 정확한 표현방법인 구형파로 해석하여, 송신신호와 수신신호 그리고 시스템 전파특성을 고려하여 목적물의 특성함수를 추출해 내는 것을 Wavefront Reconstruction 기법이라 한다.

본 논문에서는 Spotlight-mode에서 근사화한 영상화 방법인 Polar format 처리기법과 Wavefront Reconstruction기법을 비교 분석하고, 컴퓨터 모의실험을 통하여 처리된 영상을 서로 비교하여 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하고자 한다.

II. 시스템 모델

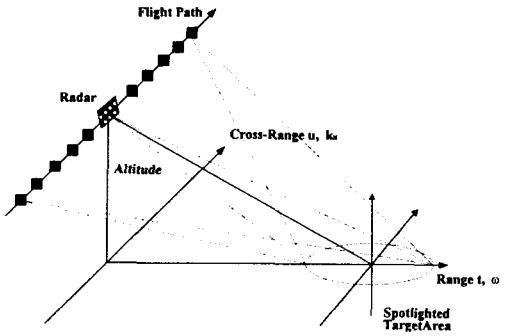

그림 1 Spotlight SAR 영상시스템의 Geometry

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 x 와 Cross-range y의 2차원 Spatial domain에서 영상화 문제를 검토한다.

그림 1은 Spotlight SAR 영상화 시스템 Geometry를 나타낸다. Synthetic aperture domain을 u로 나타내며, 그것의 Frequency domain을 k_u로 나타낸다. 고정된 위치에서, 레이더는 Wide-Bandwidth 펄스신호 $p(t)$를 전송하고 표적영역에서 되돌아오는 신호를 수신한다. 여기서 t 는 Fast-time domain을 나타내며, 그것의 Fast-time frequency domain을 ω로 나타낸다.

Spatial domain (x, y)에서 좌표 (x_n, y_n) $(n=1,2,\cdots)$에 위치한 반사계수 σ_n을 가지는 점 표적들의 집합으로 구성된 고정되어 있는 표적 영역을 고려해 보자. Range domain에서의 표적영역은 레이더 Range swath에 의해 결정되며, $x \in [X_c - X_0, X_c + X_0]$라고 가정한다. 여기서 X_c는 Mean range이고, $2X_0$는 Range domain에서 Radar footprint의 크기이다. 또한 어떤 SAR 시스템들에서는 관심 있는 표적영역이 합성 개구의 중심에 위치해 있지 않다. 이러한 시스템들은 Squint SAR라고 부른다. 이러한 경우, 합성 개구의 중심($u=0$)으로부터 Cross-range domain에서 표적영역의 중심까지의 거리는 Y_c로 표시한다. $Y_c=0$의 경우는 Broad SAR 시스템이라고 부른다.

본 논문에서는 레이더 방사패턴은 Ommi-directional으로 가정한다. 이와 같은 시스템 모델에서 측정된 수신신호는 다음과 같다.

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

여기서, $2\sqrt{x_n^2+(y_n-u)^2}/c$는 레이더로부터 n번째 표적까지의 Round-trip delay이다.

III. Reconstruction Algorithm

3.1 Plane-wave approximation-based Inversion

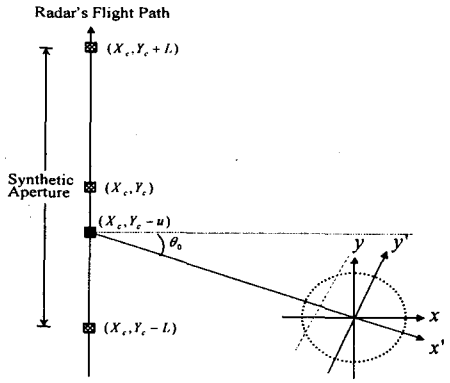

그림 2 Plane wave approximation-based Inversion

Polar format processing은 식(1)에서 전개된 SAR 시스템 모델에 대한 근사화를 기본으로 한다. 즉, 레이더에서 송신된 신호가 표적에서 반사되어 오는 구면파를, 레이더와 표적사이의 거리가 멀기 때문에, 평면파로 근사화 시킬 수 있다는 원리를 이용한다. 그림 2 에서 직선 y'축에 평행한 직선 상에서는 레이더로부터 거리가 동일한 것으로 근사화 된다.

Fast-time t 에 관한 SAR 신호의 Fourier 변환을 고려해보면,

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

원점을 표적영역의 중심으로 움직여 (X_c, Y_c)에 있다고 가정하자. 그 결과 Spatial domain에서의 SAR 시스템 모델은 다음과 같다.

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

레이더에 대한 목표물까지의 거리를 근사화하면,

$$\sqrt{(X_c+x_n)^2+(Y_c+y_n-u)^2}$$
$$= \sqrt{X_c^2+(Y_c-u)^2} + \cos\theta_0 x_n + \sin\theta_0 y_n + \cdots$$
$$\approx \sqrt{X_c^2+(Y_c-u)^2} + \cos\theta_0 x_n + \sin\theta_0 y_n$$

여기서, $\theta_0 = \arctan[(Y_c-u)/X_c]$는 Slow-time u 에서 표적영역의 중심에 대한 레이더의 Aspect angle이다.

SAR 신호에 대한 표현식에서 근사화를 이용하면,

$$s(\omega,u) \approx P(\omega)\sum_n \sigma_n \exp\left[-j2k\sqrt{X_c^2+(Y_c+u)^2}\right] \times \exp\left[-jk_x x_n - jk_y y_n\right] \qquad (4)$$

여기서, $k_x = 2k\cos\theta_0$, $k_y = 2k\sin\theta_0$이다.

Spatial frequency domain에서 표적함수 Inversion은 다음과 같다.

$$F(k_x, k_y) = s(\omega, u)P^*(\omega)\sum_n \exp[j2k\sqrt{X_c^2+(Y_c+u)^2}] \quad (5)$$

Spatial domain에서 표적을 Reconstruction 하기 위해서는, $F(k_x, k_y)$의 이용 가능한 Polar형태의 샘플들로부터 Rectilinear샘플들로 Interpolation한 후, Inverse 2-D FFT를 통해 구할 수 있다[1][2][5].

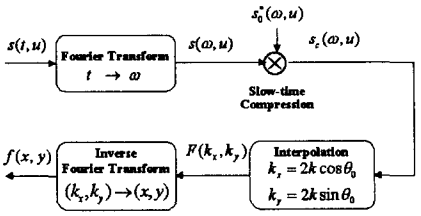

그림 3 Polar format processing Block Diagram

3.2 Wavefront reconstruction 기법

본 논문에서는 SAR 모델을 $u\in(-\infty,\infty)$에서 측정이 이루어진다고 가정한다. Slow-time u에 관한 Spherical PM 신호의 Fourier 변환은 $k_u\in[-2k, 2k]$에 대하여 다음과 같이 계산된다[1][3].

$$\begin{aligned} &F_{(u)}[\ \exp[-j2k\sqrt{x_n^2+(y_n-u)^2}]] \\ &\quad = \exp(-j\sqrt{4k^2-k_u^2}x_n - j\,k_u\,y_n) \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$S(\omega,k_u) = P(\omega)\sum_n \sigma_n \exp[-j\sqrt{4k^2-k_u^2}x_n - j\,k_u\,y_n] \quad (7)$$

$$S(\omega,k_u) = P(\omega)\sum_n \sigma_n \exp[-j\,k_x\,x_n - j\,k_y\,y_n] \quad (8)$$

여기서 두 개의 새로운 함수들을 다음과 같이 정의하여, SAR Spatial frequency mapping이라 부른다.

$$\begin{aligned} k_x &= \sqrt{4k^2-k_u^2} \\ k_y &= k_u \end{aligned} \quad (9)$$

Spatial domain에서 이상적인(Ideal) 표적함수를 다음과 같이 정의해 보자.

$$f_0(x,y) = \sum_n \sigma_n \delta(x-x_n, y-y_n) \quad (10)$$

$$F_0(k_x,k_y) = \sum_n \sigma_n \exp(-j\,k_x\,x_n - j\,k_y\,y_n) \quad (11)$$

SAR 수신신호 $S(\omega,k_u)$에서 $F_0(k_x,k_y)$의 표현을 사용하면 다음과 같이 된다.

$$S(\omega,k_u) = P(\omega)\,F_0(k_x,k_y) \quad (12)$$

측정된 신호 $S(\omega,k_u)$에서 $f_0(x,y)$를 영상화하기 위해 Fast-time matched filtering을 통해 다음과 같이 실행될 수 있다[1][3].

$$\begin{aligned} F(k_x,k_y) &= P^*(\omega)\,S(\omega,k_u) \\ &= |P(\omega)|^2 \sum_n \sigma_n \exp(-j\,k_x\,x_n - j\,k_y\,y_n) \end{aligned} \quad (13)$$

SAR Reconstruction은 (ω,k_u)domain에서 습득된 데이터에 대한 (k_x,k_y) domain으로의 Mapping을 통하여 이루어진다. 측정시에는 (ω,k_u)domain에서 Rectangular grid상에 $S(\omega,k_u)$의 균일한 간격의 샘플들로 이루어지지만, (ω,k_u)에서 (k_x,k_y)domain으로의 2차원 Mapping에 있어서의 비선형 특성으로 $F(k_x,k_y)$의 결과데이터들은 불균일한 간격으로 이루어진 Sample을 가지게 된다. 따라서 Inverse 2-D FFT를 통해 $f(x,y)$를 복원하기 위해서는 균일한 Rectangular grid상의 $F(k_x,k_y)$의 샘플들이 필요하므로 불균일한 샘플에 대하여 Interpolation이 필요하다. 또한 신호 $F(k_x,k_y)$의 역 Fourier변환이 (X_c, Y_c)를 중심으로 하므로 Bandpass 신호이다.

Interpolation를 하기 전에 신호를 Lowpass로 변환할 필요가 있으며, 이를 위해 다음의 Baseband conversion을 수행하여야 한다[1].

$$F_b(k_x,k_y) = F(k_x,k_y)\exp(jk_xX_c + jk_yY_c) \quad (14)$$

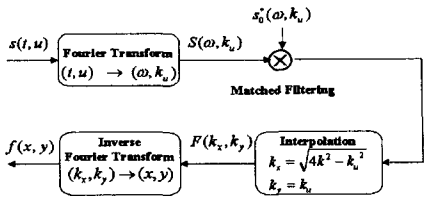

그림 4 Wavefront reconsturction Block Diagram

Ⅳ. 실험 및 성능분석

다음은 본 논문의 실험에서 사용된 주요 파라미터와 결과 영상을 나타낸다.

- Carrier frequency : 750MHz, 1.2GHz, 3GHz
- Half Aperture Size : 200m, 300m, 400m
- Target Area : $X_c = 10Km$ $X_0 = Y_0 = 200m$

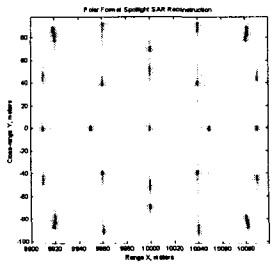

그림 5 Polar : fc=750MHz, L=200m

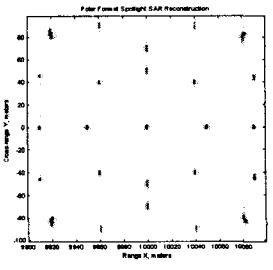

그림 6 Polar : fc=750MHz, L=300m

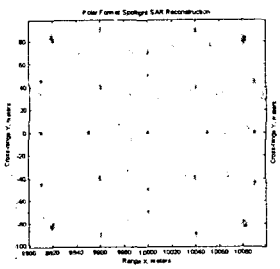

그림 7 Polar : fc=750MHz, L=300m

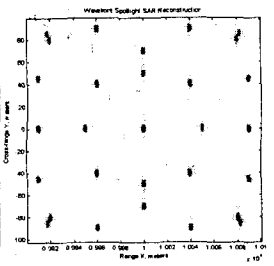

그림 8 Wavefront : fc=750MHz, L=200m

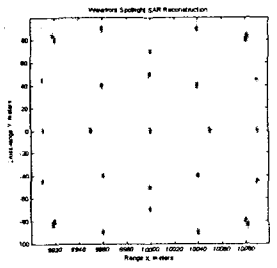

그림 9 Wavefront: fc=750MHz, L=300m

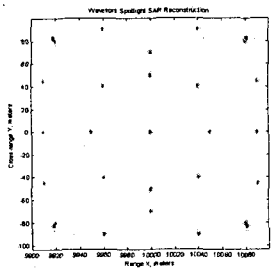

그림 10 Wavefront: fc=750MHz, L=300m

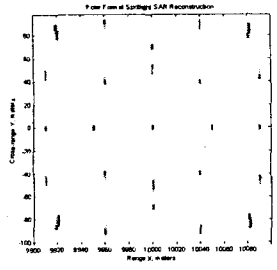

그림 11 Polar : fc=750MHz, L=200m

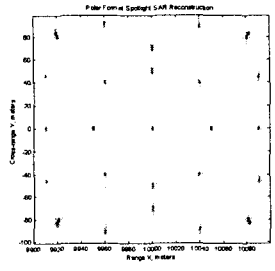

그림 12 Polar : fc=1.2GHz, L=200m

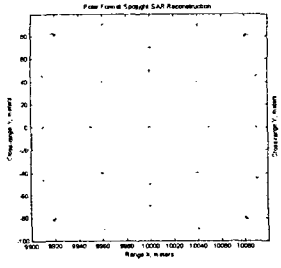

그림 13 Polar : fc=3GHz, L=200m

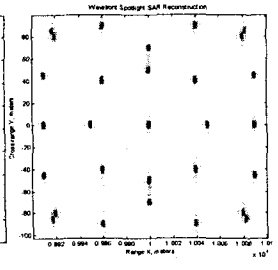

그림 14 Wavefront: fc=750MHz, L=200m

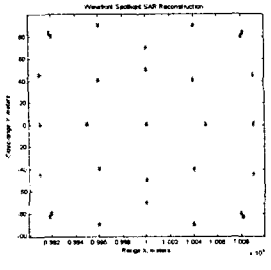

그림 15 Wavefront: fc=1.2GHz, L=200m

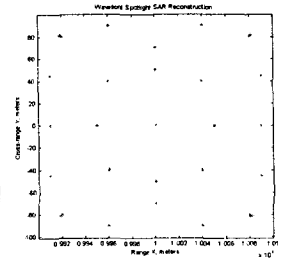

그림 16 Wavefront: fc=3GHz, L=200m

그림 5~16은 Polar format processing 기법과 Wavefront reconstruction 기법을 Matlab을 이용하여 Spotlight SAR 모델에 맞도록 임의의 점 표적들에 관한 Raw data를 생성하여 각 알고리즘에 따라 처리된 결과 영상이다. 그림 5, 6, 7은 고정된 Carrier 주파수 상에서 Aperture가 클수록 평면파 근사는 정확해짐을 보이며, 그림 11, 12, 13은 고정된 Aperture 크기에서 Carrier 주파수가 클수록 근사가 정확해짐을 보여준다. 또한 방사상의 거리가 멀어질수록 Plane wave로 Spherical wave를 근사하여 야기되는 Phase error가 증가함을 확인할 수 있다. 동일한 Spotlight-mode Geometry 환경에서 Polar format processing은 전체 Target영역 내의 점 표적의 위치에 따라 Target의 위치와 Degradation이 달라지는 반면에, 그림 8, 9, 10, 14, 15, 16에서 볼 수 있듯이 SAR raw data에 대해 근사화 되지 않은 Inversion 기법을 사용함으로써 영상 전체에서의 해상도가 동일하게 나타남을 확인 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Polar format 알고리즘과 Wavefront reconstruction기법을 서로 비교 분석하였고, 컴퓨터 모의실험을 통해 근사화가 거의 없는 Wavefront reconstruction기법의 성능을 확인하였다. 초고주파의 전파특성을 단순화하여 근사화에 의존한 Imaging방법인 Polar format 처리기법은 컴퓨터 모의실험 결과에서 원하는 Imaging영역의 중심에서 벗어날수록 목표물의 초점과 해상도가 열화됨을 볼 수 있었고, 수신신호를 근사화 없이 구형파로 해석한 Wavefront reconstruction 기법에서는 원하는 Imaging 영역 전체의 해상도가 동일함을 확인하였다.

본 논문은 Spotlight-mode SAR의 Raw-data processing 기법에 있어서 근사화가 없는 알고리즘인 Wavefront reconstruction기법을 사용함으로써, 보다 높은 질의 영상을 얻을 수 있음을 보였다. 기존의 Polar format processing에서 탈피하여 차세대의 알고리즘으로 Wavefront reconstruction 기법을 제안한다.

참고문헌

[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.