

GB-SAR 시스템의 영상화 및 간섭기법

이훈열¹⁾, 조성준²⁾, 성낙훈²⁾, 김정호²⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, hoonyol@kangwon.ac.kr

²⁾한국지질자원연구원 지반안전연구부, (mac, nhsung, jungho)@kigam.re.kr

Focusing and Interferometry of a GB-SAR System

Hoonyol Lee¹⁾, Seong-Jun Cho²⁾, Nak-Hoon Sung²⁾, Jung-Ho Kim²⁾

¹⁾Dept. of Geophysics, Kangwon National University

²⁾Geotechnical Engineering Div., KIGAM

Abstract: We briefly introduce the theory of GB-SAR focusing and interferometry. Deramp-FFT algorithm is evaluated as a far-range, partial focusing method along with its limitations in the near-range application. Various interferometric configurations with temporal, spatial, and/or frequency baselines are also discussed.

eywords: GB-SAR, focusing, interferometry, deramp-FFT, range-Doppler

1. 서론

GB-SAR 시스템은 안테나가 레일 위를 이동하면서 합성 구경(synthetic aperture)을 이루어 고해상도의 SAR 영상이 이루어진다(이훈열 외 2007). GB-SAR는 레일에 근접한 부분을 제외한 대부분의 이미지 영역에서 합성 구경이 레일의 길이로 제한된다는 의미에서 partial focusing이라 할 수 있으며, 해상도 역시 대부분 영역에서 거리의 함수가 된다는 점에서 보통의 항공기/위성 SAR와는 다르다. 또한 GB-SAR에서는 스텝 모터를 이용하여 레일 위에 안테나가 정지해 있는 상태에서 송수신이 이루어지기 때문에 (조성준 외 2007) zero-Doppler에 기초한 보다 정밀한 영상화 및 반복 측정이 가능하다. 이 논문에서는 GB-SAR 신호처리 과정을 소개한다. 원시 자료를 Range compression 한 후 Azimuth Compression 과정에서 deramp-FFT algorithm 하는 방법에 대해 논하고, GB-SAR 시스템으로 구현할 수 있는 다양한 간섭기법(interferometry)에 대한 이론적 배경을 소개한다.

2. GB-SAR Focusing

2.1. Range Compression

GB-SAR 시스템은 네트워크 분석기에서 주파수 sweep을 통해 다음과 같은 신호를 얻는다.

$$S(f) = H(f)G(f) \quad (1)$$

이 때, $H(f)$ 는 중심이 f_c 이고 밴드 폭이 B_R 인 box function으로서, 주파수 sweep의 영역을 나타내며, $G(f)$ 는 목표물의 주파수 영역의 반사계수이다. 이를 역푸리에 변환을 통해 시간 영역으로 변환시키면 다음과 같은 레이더의 작동 원리가 구현된다.

$$s(t) = h(t) * g(t). \quad (2)$$

만약 목표물이 $t = t_0 = 2R/c$ 에 있으며 반사계수가 $g(t) = \delta(t - t_0)$, 즉 한 점이라면 레이다에서 얻어진 값은 다음과 같이 된다.

$$s(t) = B_R \text{sinc}[\pi B_R(t - t_0)] \exp[j2\pi f_c(t - t_0)]. \quad (3)$$

즉, 신호의 크기는 $t = t_0 = 2R/c$ 에서 최대값을 나타내며, 위상은 안테나와 목표물간의 거리의 함수가 된다. 위 식의 sinc 함수의 크기가 최대값에서 3dB 떨어지는 시간을 보통 레이다의 시간 해상도로 정의하며, $\delta t = 1/B_R$ 이 되고, 이에 따라 거리 해상도(slant range resolution)는 $\delta R = c\delta t/2 = c/(2B_R)$ 이 된다. 레이다의 최대 거리는 주파수 샘플링 수가 N_R 일 때 $R_{\max} = (N_R - 1)\delta R$ 로 주어진다. 여기서 최대거리는 네트워크 분석기의 최대 샘플링 개수, 밴드 폭, 시스템 파워에 따라 결정된다. 한편, 주파수 sweep을 하는 데 걸리는 시간동안 시스템과 목표물의 움직임이 심한 경우에는 레이다 작동 원리를 구현할 수 없기 때문에, 매우 안정적인 시스템 구축이 필요하다.

2.2. Azimuth Compression

SAR 시스템에서 azimuth 해상도를 구현하는 방법에는 여러 가지가 있다. 보통 항공기나 인공위성과 같이 탑재체의 연속적인 움직임을 이용하는 strip mode에서는 처리 효율을 고려하여 range-Doppler algorithm이나 ω - k algorithm이 보편적으로 사용된다. 그러나 scan mode나 burst mode와 같이 azimuth 방향으로 펄스가 연속적이지 않고 군집을 이루는 경우에는 deramp-FFT (혹은 SPECAN) algorithm을 사용하는 것이 처리 시간과 메모리가 절약된다. GB-SAR의 경우도 이에 속하며, GB-SAR의 특성에 맞는 자료 처리 과정은 다음과 같다.

Deramp-FFT Algorithm

한 점 (R_0, x_c) 에 위치한 산란체에서 얻어진 자료에 대한 처리는 다음과 같다. GB-SAR 원시 자료를 base-banded 후 iFFT를 하여 range compression 을 실시하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$s(x|R_0, x_c) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R(x|R_0, x_c)}, \quad |x - x_c| < R_0 \frac{\lambda}{L_x} \quad \text{and} \quad |x| \leq X/2 \quad (4)$$

안테나와 산란체의 거리의 함수는 $R = \sqrt{R_0^2 + (x - x_c)^2}$ 로 주어진다. 이를 $x = 0$ (레일의 중심)을 중심으로 Taylor Series를 적용하면,

$$s(x|R_0, x_c) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_0 - \frac{x_c}{R_0}x + \frac{R_0^2}{2R_0^3}x^2 + \dots\right)} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. Deramp-FFT algorithm은 단일 산란체에 의한 신호를 Range 방향으로 정렬하는 range migration 과정을 거친 후 다음의 deramp function $h^{-1}(x)$ 를 수신 신호에 곱하고 이를 x 에 대한 wavenumber 영역 u 로 FFT 하는 순서로 이루어진다.

$$h^{-1}(x) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{R_0^2}{2R_c^3}x^2\right)} \quad (6)$$

$$g(u) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)h^{-1}(x)e^{-j2\pi ux}dx \quad (7)$$

여기서 수신 신호의 정의구역은 $[C-L_s/2, C+L_s/2]$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 C 는 레일에서 산란체를 비추는 안테나의 중심 위치, L_s 는 안테나의 해당 레일 구간의 폭(합성구경 길이)을 의미하며, 산란체가 위치한 영역과 안테나의 빔폭에 따라 다를 수 있다. 이를 계산하면 다음과 같은 focusing된 영상이 얻어진다.

$$g(u) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} e^{-j2\pi\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)C} L_s \text{sinc}\left[\pi L_s\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \quad (8)$$

위의 함수는 $u = \frac{2}{\lambda R_c}x_c$ 에서 최대 peak를 가지며 half power width로 정의되는 해상도는 $\delta u = \frac{1}{L_s}$ 을 가진다. 따라서 이 신호의 최대 진폭을 가지는 u -공간, 혹은 x_c -공간에서 해석이 가능하며, 그 관계는 $x_c = \frac{\lambda R_c}{2}u$ 가 되며, azimuth 해상도는 $\delta x_c = \frac{\lambda R_c}{2}\delta u = \frac{\lambda R_c}{2L_s}$ 와 같이 된다. FFT에 사용된 azimuth sample을 $N_{x_{fft}} (= 2^n \geq N_x)$ 라 하면, 가상의 레일 간격은 $X_{fft} = (N_{x_{fft}} - 1)\Delta x$ 와 같이 된다. 그리고 영상의 픽셀 간격은 $\Delta x_{image} = \frac{\lambda R_c}{2} \Delta u = \frac{\lambda R_c}{2X_{fft}}$ 와 같이 거리의 함수로 주어지기 때문에 SAR focusing 후 resampling을 통하여 기하학적 보정 과정을 거쳐야 한다. Azimuth 영상의 폭 또한 $x_{width} = (N_{x_{fft}} - 1)\Delta x_{image} = \frac{\lambda R_c}{2\Delta x}$ 로서 거리의 함수임을 알 수 있다.

Range Limit of Deramp-FFT Algorithm

위의 deramp 함수는 $R_c = R_c(R_0, x_c)$ 의 함수이므로 정확한 SAR focusing을 위해서는 R_0 는 물론, x_c 에 대해서도 서로 다른 deramp function과 FFT를 반복 수행해야 하는데, 이는 시간과 비용이 time-domain compression과 동일하게 낭비된다. 따라서 deramp-FFT Algorithm은 위의 deramp function (6)에서 $R_c \simeq R_0$ 라는 근사값을 한다. 즉,

$$\tilde{h}(x) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{1}{2R_0}x^2\right)} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda R_0}x^2} \quad (9)$$

을 사용한다. 이 함수는 x_c 와는 무관하기 때문에, 단 한번의 deramp-FFT 과정으로도 SAR focusing이 근사적으로 이루어져 시간비용이 대폭 줄어든다. 하지만, 이 때문에 아래와 같은 영상화에 거리 제한이 따르게 된다. 위의 $R_c \simeq R_0$ 근사로 인하여 다음과 같은 phase error가 발생한다.

$$|\delta\phi| = \frac{4\pi}{\lambda} \left| \frac{R_0^2}{2R_c^3} - \frac{1}{2R_0} \right| x^2 = \frac{2\pi}{\lambda R_0} \left| \left(\frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + x_c^2}} \right)^3 - 1 \right| x^2 \quad (10)$$

이 때, phase error의 최대값은 $x = \pm X/2$ 일때, 그리고 $x_c = \pm \frac{\lambda R_0}{2L_x}$ (half beam footprint) 에서 발생하며, defocusing이 일어나지 않기 위해서는 phase error가 $\delta\phi_{crit}$ 보다 작아야 한다. 이를 거리 제한으로 환산하면 다음과 같다.

$$R_0 \geq \frac{\pi X^2}{2\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2L_x}\right)^2}} \right)^3 - 1 \left| \frac{1}{\delta\phi_{crit}} \right| \quad (11)$$

예를 들면 $f_c = 5.3\text{GHz}$, $X = 5\text{m}$, $L_x = 25\text{cm}$ 인 경우 $\delta\phi_{crit} = \frac{\pi}{4}$ 로 잡으면 $R_0 \geq 16.71\text{m}$ 가 되어야한다. 이와 같이 근거리에서는 deramp-FFT algorithm으로는 영상화가 이루어지지 않으며, 이 경우에는 range-Doppler algorithm을 사용할 것이 권장된다.

3. GB-SAR 간섭기법

SAR Focusing 후 영상에서 얻어지는 위상(phase)은 식(8)에서 보듯이 $\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}R$ 로 주어지는 거리의 함수이다. 시간, 공간, 혹은 중심 진동수를 달리하여 얻어진 영상에서 얻어지는 위상의 차이를 이용하여 산란체의 움직임이나 지형을 알아내는 기술을 간섭기법(interferometry)라 한다. 여기서는 GB-SAR 시스템을 이용하여 구현할 수 있는 여러 interferometry의 여러 가능성을 살펴보았다.

3.1. Differential Interferometry (DInSAR) for Motion Detection

시간차를 두고 얻어진 두 GB-SAR영상에서, 산란체가 레이더 방향으로 r 만큼 이동했을 때, 각각의 phase, phase difference, motion sensitivity는 다음과 같다.

$$\text{phase: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1, \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 + r) \quad (12)$$

$$\text{phase difference: } \phi = \phi_2 - \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}r \quad (13)$$

$$\text{motion sensitivity: } \frac{\partial\phi}{\partial r} = -\frac{4\pi}{\lambda} \quad (14)$$

3.2. Cross-Track Interferometry for DEM

그림 1과 같이 두 영상 간 시스템의 위치에 수직기선 (vertical baseline) B_v 가 존재할 때, phase, phase difference, range fringe ramp, height sensitivity는 다음과 같다.

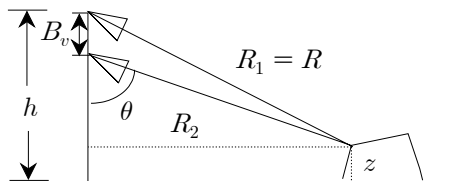


Fig. 1. InSAR configuration.

$$\text{phase: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_2$$

$$\text{phase difference: } \phi = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R = \frac{4\pi}{\lambda}B_v \cos\theta = \frac{4\pi h B_v}{\lambda R} \quad (15)$$

$$\text{range fringe ramp: } \frac{\partial\phi}{\partial R} = -\frac{4\pi}{\lambda R}B_v \cos\theta = -\frac{4\pi h B_v}{\lambda R^2} \quad (16)$$

$$\text{height sensitivity: } \frac{\partial\phi}{\partial z} = -\frac{4\pi B_v}{\lambda R} \quad (17)$$

3.3. Δk -Interferometry for DEM

중심 진동수가 $f_2 = f_1 + \Delta f$ 만큼 변화시킨 경우를 생각하면, 다음과 같다.

$$\text{phase: } \phi_1 = -\frac{4\pi R}{c}f_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi R}{c}f_2 \quad (18)$$

$$\text{phase difference: } \phi_1 = -\frac{4\pi R}{c}\Delta f \quad (19)$$

$$\text{range fringe ramp: } \frac{\partial\phi}{\partial R} = -\frac{4\pi}{c}\Delta f \quad (20)$$

$$\text{height sensitivity: } \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{4\pi\Delta f}{c\cos\theta} = \frac{4\pi h\Delta f}{cR} \quad (21)$$

3.4. Cross-Track and Δk -Interferometry for DEM

Vertical baseline B_v 와 중심 진동수 차이 Δk 가 동시에 존재하면 다음과 같다.

$$\text{phase: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{c}f_1R_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi}{c}f_2R_2 \quad (22)$$

$$\text{phase difference: } \phi = -\frac{4\pi R}{c}\Delta f - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (23)$$

$$\text{range fringe ramp: } \frac{\partial\phi}{\partial R} = -\frac{4\pi}{\lambda R}B_v \cos\theta - \frac{4\pi}{c}\Delta f = -\frac{4\pi h B_v}{\lambda R^2} - \frac{4\pi}{c}\Delta f \quad (24)$$

$$\text{height sensitivity: } \frac{\partial\phi}{\partial z} = -\frac{4\pi B_v}{\lambda R} + \frac{4\pi\Delta f}{c\cos\theta} = -\frac{4\pi B_v}{\lambda R} + \frac{4\pi h\Delta f}{cR} \quad (25)$$

4. 결론

GB-SAR 시스템은 azimuth 밴드 폭이 레일의 폭으로 제한되어 있고 송수신이 정지된 상태에서 얻어진다는 점에서 항공기/위성 SAR 시스템과는 다르다. 본 연구 결과, GB-SAR focusing 알고리즘으로서 far-range에서는 신호처리 시간과 메모리를 절약할 수 있는 deramp-FFT algorithm을 제시하였으며, near-range에서는 range-Doppler algorithm을 사용하는 것이 최선임을 알 수 있었다. 또한 GB-SAR를 이용하여 각종 다양한 간섭기법을 구현하고 실용화 할 수 있음을 보였다.

GB-SAR 시스템의 최대 장점은 인공위성이나 항공기로 얻기 힘든 정밀한 반복 측정 능력과 함께 다양한 운용의 편리성에 있다. 이러한 장점을 활용하면 인공위성/항공

기 SAR로는 아직까지 실현할 수 없는 새로운 연구 및 실용화 분야가 개척되리라 기대해본다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 한국지질자원연구원의 전문연구사업인 ‘지하정밀 영상화 융합 기술 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

이훈열, 조성준, 성낙훈, 2007, GB-SAR 시스템의 개발과 응용, 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 134~137.

조성준, 이훈열, 성낙훈, 김정호, 2007, 지반 변형 모니터링을 위한 Ground Based-SAR 시스템 개발, 지구시스템공학회 춘계학술발표회 논문집.