

GB-SAR의 개발 (II) : 영상화 기법

이훈열* · 조성준**† · 성낙훈** · 김정호**

*강원대학교 지구물리학과, **한국지질자원연구원 지반안전연구부

Development of a GB-SAR (II) : Focusing Algorithms

Hoonyol Lee*, Seong-Jun Cho**, Nak-Hoon Sung**, and Jung-Ho Kim**

*Department of Geophysics, Kangwon National University, **Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract : In this paper we introduced GB-SAR focusing algorithms for image formation and suggested an optimized solution. We compared the characteristics, advantages, and limitations of the Deramp-FFT (DF) algorithm and the Range-Doppler (RD) algorithm in terms of their image formation principles, memory usage and processing time. We found that DF algorithm is efficient in memory and processing time but can not focus the near range. The RD algorithm can focus the entire range but, considering the refinement on the rail length, it has much redundancy in memory and processing time. In conclusion, we optimized the GB-SAR focusing by using the DF algorithm for a far-range case and the RD algorithm for a near-range case separately.

Key Words : GB-SAR, focusing, Deramp-FFT algorithm, Range-Doppler algorithm.

요약 : 이 논문에서는 GB-SAR(Ground-Based Synthetic Aperture Radar) 시스템의 영상화 기법(focusing algorithm)을 소개하고 최적의 영상화 기법을 찾고자 하였다. GB-SAR 영상의 형성 원리, 메모리 및 처리 시간과 관련하여 Deramp-FFT (DF) 기법과 Range-Doppler (RD) 기법의 특징과 장단점을 소개하였다. DF 기법은 처리비용이 적게 들지만 근거리에서는 영상화가 이루어지지 않는 단점이 있으며, RD 기법은 전 영역에서 영상화가 이루어지지만, 합성 구경의 길이가 레일로 제한되어 있는 GB-SAR의 특성상 원거리에서는 메모리와 자료처리 시간에 낭비적 요소가 많다. 결과적으로, GB-SAR 영상화를 위하여 원거리에서는 DF 기법을, 근거리에서는 RD 기법을 사용하여 최적화 하였다.

1. 서론

GB-SAR는 azimuth 방향으로 안테나를 움직이면서 자료를 얻고 영상화 기법(focusing algorithm)을 통하여 합성 구경(synthetic aperture)을 이루어 높은 해상도를 구현한다는 점에서 항공기/인공위성 SAR 시스

템과 비슷하다. 그러나 GB-SAR 시스템은 합성 구경의 길이가 레일의 길이로 제한되어 있다는 점에서 기존의 SAR와는 크게 다르다. 항공기 및 인공위성 SAR는 탑재체가 빠른 속도로 움직이면서 펄스를 연속적으로 발사하게 된다. 이 때, 펄스가 산란체를 맞고 반사되어 다시 안테나로 수신될 때까지의 시간(fast time) 동안에도

탐재체의 움직임(slow time)이 있기 때문에 신호 처리가 다소 복잡해질 수 있으나, 마이크로파의 전파 속도에 비하여 탐재체의 움직임이 매우 느리다는 것을 이용하여 두 시간을 서로 분리해 영상화 한다(Curlander and McDonough, 1991; 이훈열, 2005). 그러나 GB-SAR에서는 스텝 모터를 이용하여 레일 위에 안테나가 정지해 있는 상태에서 송수신이 이루어지기 때문에, 이러한 가정이 필요가 없게 되어 보다 정밀한 영상화가 가능해진다. 즉, 마이크로파 빔의 중심에서 도플러 효과가 나타나지 않아 zero-Doppler 영상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 기존의 SAR 시스템과 공통점 및 차이점이 있는 GB-SAR 시스템의 영상화에 대한 최적화 연구가 필요하다.

일반적인 SAR 시스템에서 azimuth 해상도를 구현하는 방법에는 여러 가지가 있다. 보통 항공기나 인공위성과 같이 탐재체의 연속적인 움직임을 이용하는 strip mode에서는 처리 효율을 고려하여 Range-Doppler (RD) 기법이나 $\omega-k$ 기법이 보편적으로 사용된다. 그러나 scan mode나 burst mode와 같이 azimuth 방향으로 펄스가 연속적이지 않고 군집을 이루는 경우에는 Deramp-FFT (DF) 나 SPECAN 기법을 사용하는 것이 처리 시간과 메모리가 절약된다(Cumming and Wong, 2004; Carrara *et al.*, 1995).

기존의 GB-SAR 시스템의 영상화와 관련하여, Fortuny and Sieber (1994)는 근거리에서 빠른 영상화를 이루는 알고리즘을 개발한 바 있으며, 현재까지 시간 영역, RD 기법 및 $\omega-k$ 기법과 같은 다양한 영상화 기법이 사용되고 있다(Leva *et al.*, 2003; Nesti *et al.*, 1996; Nico *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2004). 그러나 통상적인 SAR 영상화 기법과는 달리, 영상의 거리 영역이 이론적으로 0에서 시작되고 zero-Doppler 환경에서 작동되는 GB-SAR의 특성에 맞는 이론적 배경이나 영상화 기법의 비교 및 최적화 노력이 필요하다.

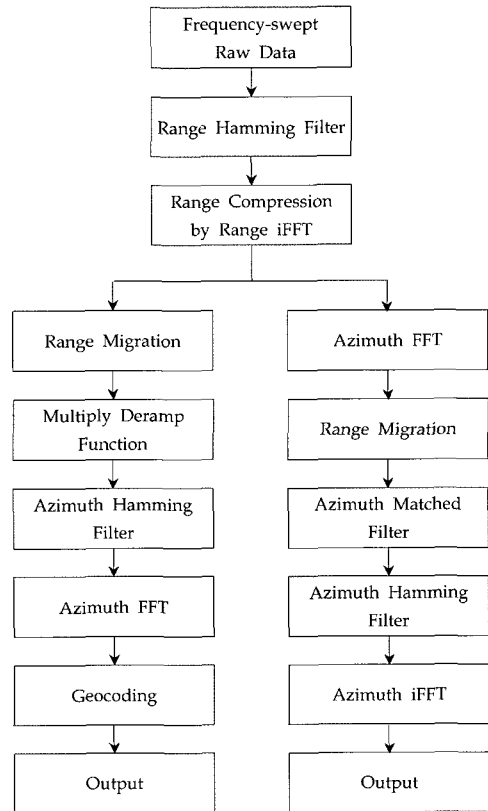
이 논문에서는 GB-SAR 시스템의 용도가 근거리, 혹은 원거리일 경우를 대비하여 자료처리의 효율성을 확보하기 위하여 DF 기법과 RD 기법을 비교 검토하였다. 또한 GB-SAR 시스템을 구성하기 위하여 원거리에는 DF, 근거리에는 RD 기법을 채택한 이유에 대하여 이론적 배경을 소개하고 실내 및 실외 실험을 통하여 입증하였다.

2. 이론

GB-SAR 영상화 기법(focusing algorithm)의 이론적 배경과 자료처리 과정을 소개하고자 한다. Fig. 1은 이 연구에서 구축된 GB-SAR 영상화 프로그램의 개략적인 흐름도로서, 원시 자료를 range compression 한 다음 azimuth compression하는 과정에서 DF 및 RD 알고리즘을 모두 나타내고 있다. Table 1에서는 GB-SAR 영상화에 사용되는 약어, 수식, 및 실내외 실험에 사용된 변수들을 정리하였다.

1) Range Compression

GB-SAR 시스템은 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA)에서 일정한 주파수의 마이크로파를 stepped-frequency sweep 방식으로 송수신하여 다음과 같은 신호를 얻는다.



(a) Deramp-FFT Algorithm for far-range (b) Range-Doppler Algorithm for near-range

Fig 1. A flowchart of the GB-SAR focusing program.

Table 1. GB-SAR acronyms, equations, and examples (DF: Deramp-FFT algorithm, RD: Range-Doppler algorithm).

	Symbol	Description	Dimension	Indoor Experiment	Outdoor Experiment
Coordinates	f	frequency	Hz		
	t	time	s		
	R	range	m		
	x	azimuth	m		
	u	wavenumber	m^{-1}		
System	f_c	center frequency	Hz	5.3 GHz	
	B_R	range bandwidth	Hz	600 MHz	200 MHz
	N_R	number of range samples		201	1601
	X	azimuth (rail) scan length	m	4	5
	Δx	azimuth scan step	m	0.05	
	L_R	antenna aperture range size	m	0.25	
	L_x	antenna aperture azimuth size	m	0.25	
	c	speed of light,	m/s	3e8	
	λ	wavelength, lambda $\lambda = c/f_c$	m	0.0566	
	θ_R	range beam angle, $\theta_R = \lambda/L_R$	rad	15 deg	
θ_x	azimuth beam angle, $\theta_x = \lambda/L_x$	rad	15 deg		
Range Compression	δt	time resolution $\delta t = 1/B_R$	s	1.667 ns	5 ns
	δR	range resolution $\delta R = c\delta t/2 = c/(2B_R)$	m	0.25	0.75
	Δf	frequency step, $\Delta f = B_R/(N_R - 1)$	Hz	3 MHz	125 KHz
	t_{max}	maximum time, $t_{max} = 1/(2\Delta f)$ (halved to void negative time)	s	0.167 μ s	4 μ s
	R_{max}	maximum range, $R_{max} = ct_{max}/2$	m	25	600
	N_{Rfft}	number of range samples for FFT, $N_{Rfft} = 2^n \geq N_R$		256	2048
	B_{Rfft}	range bandwidth for FFT, $B_{Rfft} = (N_{Rfft} - 1) \Delta f$	Hz	765 MHz	256 MHz
	Δt	time pixel size, $\Delta t = 1/B_{Rfft}$	s	1.30 ns	3.91 ns
Azimuth Compression	ΔR	range image pixel size, $\Delta R = c\Delta t/2 = c/(2B_{Rfft})$	m	0.195	0.587
	N_x	number of azimuth samples, $N_x = X/\Delta x - 1$		81	101
	N_{xfft}	number of azimuth samples for FFT, DF: $N_{xfft} = 2^n \geq N_x$ RD: $N_{xfft} = 2^m \geq \lambda R_c/(2\Delta x^2) + 1$, (n, m : integer)		DF: 128, RD: 256	DF: 128, RD: 8192
	X_{fft}	azimuth scan pseudo-length for FFT, $X_{fft} = (N_{xfft} - 1) \Delta x$	m	DF: 6.35, RD: 12.75	DF: 6.35, RD: 409.6
	Δu	wavenumber pixel size for FFT, $\Delta u = 1/X_{fft}$	m^{-1}	DF: 0.158, RD: 0.0784	DF: 0.158, RD: 2.44e-3
	R_0	range in image space	m		
	R_c	range from the rail center to target, $R_c = \sqrt{R_0^2 + x_c^2}$	m		
	u_{DC}	wavenumber Doppler centroid (RD only)	m^{-1}	0	0
	u_R	wavenumber Doppler rate RD only: $u_R = -2/(\lambda R_0)$	m^{-2}	-35.36/ R_0	-35.36/ R_0
	L_{beam}	beam width, $L_{beam} = \lambda R_0/L_x$	m	0.226 R_0	0.226 R_0
	L_s	synthetic aperture length, $L_s \leq X$ and $L_x \leq L_{beam}$	m	see Section 2.5	
	δx	azimuth resolution DF: $\delta x_c = \lambda R_c/(2L_s)$, RD: $\delta x = \lambda R_0/(2L_s)$	m		
ϕ	phase, DF: $\phi = -4\pi R_c/\lambda$, RD: $\phi = -4\pi R_0/\lambda$	rad	DF: -222.2 R_c , RD: -222.2 R_0		
Δx_{image}	azimuth pixel size DF: $\Delta x_{image} = \lambda R_c \Delta u/2$, RD: $\Delta x_{image} = \Delta x$	m	DF: 0.00445 R_c , RD: 0.05		
x_{width}	azimuth width $x_{width} = (N_{xfft} - 1) \Delta x_{image}$	m	DF: 0.566 R_c , RD: 12.75	DF: 0.566 R_c , RD: 409.6	

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

이 때, $H(f)$ 는 중심이 f_c 이고 밴드 폭(bandwidth)이 B_R 인 상자 함수(box function)로서, 마이크로파 주파수의 영역을 나타내며, $G(f)$ 는 목표물의 주파수에 따른 반사 계수이다. 이를 역푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)을 통해 시간 영역으로 변환시키면 다음의 레이더가 구현된다.

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

만약 목표물이 시간 $t = t_0 = 2R/c$ 에 있으며 반사계수가 $g(t) = \delta(t - t_0)$ 인 한 점이라면 레이더에서 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 $t = 2R/c$ 에서 최대값을 나타내며, 위상은 안테나와 목표물간의 거리의 함수가 된다. 식(3)에서 sinc 함수의 크기가 최대값에서 3 dB 떨어지는 시간을 레이더의 시간 해상도 $\delta t = 1/B_R$ 로 정의하고, 이에 따라 거리 해상도(slant range resolution)는 $\delta R = c\delta t/2 = c/(2B_R)$ 이 된다. 샘플링 개수가 N_R 일 때 레이더의 최대 거리는 $R_{\max} = (N_R - 1)\delta R$ 로 주어진다. 여기서 최대 거리는 네트워크 분석기의 최대 샘플링 개수, 밴드 폭, 시스템 파워에 따라 결정된다. 한편, 주파수 sweep을 하는데 걸리는 시간동안 시스템과 목표물의 움직임이 심한 경우에는 레이더 작동 원리를 구현할 수 없기 때문에, 매우 안정적인 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

실제 자료 처리에는 sinc 함수의 주요 피크만을 강조하기 위하여 Hamming filter를 가한 후, Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)를 이용하여 range compression을 수행하였다(Fig. 1).

2) Deramp-FFT (DF) 기법

SAR 영상화 기법 중에서 처리 시간과 메모리가 적게 드는 DF 기법에 대해 먼저 알아보자. Fig. 2에서와 같이 (R_0, x_c) 에 위치한 P점에서 반사된 신호를 안테나 위치 x 에서 받은 신호는 다음과 같다.

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

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

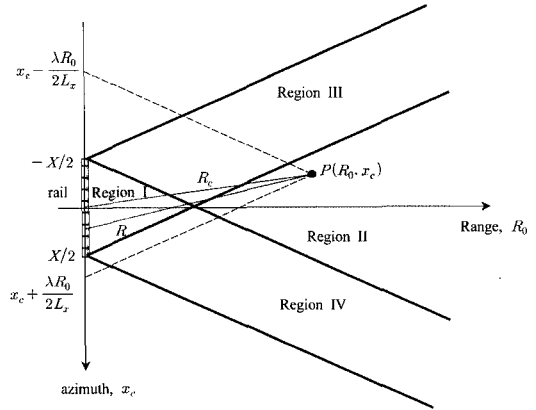


Fig. 2. GB-SAR geometry for a point P at (R_0, x_c) . Two dashed-lines from this point indicate the effective antenna position due to the beam pattern. The length of synthetic aperture changes according to the antenna beam pattern, rail length, and the image locations divided into four regions.

$$R(x|R_0, x_c) = R(0) + R'(0)x + \frac{R''(0)}{2!}x^2 + \dots \quad (5)$$

로 주어지며, 이를 계산하면

$$s(x|R_0, x_c) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_0 - \frac{x_c}{R_c}x + \frac{R_0^2}{2R_c^3}x^2 + \dots\right)} \quad (6)$$

가 된다. DF 기법은 단일 산란체에 의한 신호를 range 방향으로 정렬하는 range migration 과정을 거친 후 다음의 deramp 함수인 $h^{-1}(x)$ 를 수신 신호에 곱하고, azimuth 방향으로의 Hamming filter를 거친 후, x 에 대한 wavenumber 영역인 u 공간으로 FFT 하는 순서로 이루어진다(Fig. 1).

$$h^{-1}(x) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{R_0^2}{2R_c^3}x^2\right)} \quad (7)$$

$$g(u) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)h^{-1}(x)e^{j2\pi ux} dx \quad (8)$$

여기서 수신 신호의 정의구역은 $[C - L_s/2, C + L_s/2]$ 로 나타낼 수 있는데, C 는 레일에서 산란체를 비추는 안테나의 중심 위치, L_s 는 합성 구경의 길이를 의미하며, 이는 산란체가 위치한 영역과 안테나의 빔폭에 따라 다를 수 있다. 위 수식을 계산하면 다음과 같은 영상화가 이루어진다.

$$g(u) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} e^{-j2\pi(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c})C} L_s \text{sinc}\left[\pi L_s\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \quad (9)$$

위의 sinc 함수는 $u = 2x_c/(\lambda R_c)$ 에서 최대 피크를 가지며 해상도는 $\delta u = 1/L_s$ 로 정의된다. 따라서 이 신호의 최대 진폭을 가지는 u -공간, 혹은 x_c -공간에서 해석이 가능하다.

며, 그 관계는 $x_c = \lambda R_{c0}/2$ 가 되고 azimuth 해상도는 $\delta x_c = \lambda R_c \delta u/2 = \lambda R_c/(2L_x)$ 와 같다. 영상의 위상(phase)은 $\phi = -4\pi R_c/\lambda$ 로서 R_c 의 함수로 주어지며, 일정한 위상을 가지는 지점을 연결하면 레일의 중앙부를 원점으로 하는 동심원의 형태를 띠게 된다. FFT에 사용된 azimuth sample을 $N_{x_{fft}} (= 2^n \geq N_x)$ 라 하면, 가상의 레일 간격은 $X_{x_{fft}} = (N_{x_{fft}} - 1)\Delta x$ 와 같이 된다. 그리고 영상의 픽셀 간격은 $\Delta x_{image} = \lambda R_c \Delta u/2 = \lambda R_c/(2X_{x_{fft}})$ 와 같이 거리의 함수로 주어지기 때문에 SAR 영상화 후 기하학적 보정 과정을 거쳐야 한다 (Fig. 1). Azimuth 영상의 폭 또한 $x_{width} = (N_{x_{fft}} - 1)\Delta x_{image} = \lambda R_c/(2\Delta x)$ 로서 거리의 함수임을 알 수 있다.

DF에 필요한 최소한의 메모리는 $N_{R_{fft}} \times N_{x_{fft}} \times 4$ (bytes precision) $\times 2(I/Q)$ 로서, 원시 자료의 크기인 $N_R \times N_x \times 4$ (bytes precision) $\times 2(I/Q)$ 와 비슷한 크기이다 (Table 1). 주된 처리 시간은 1회의 azimuth FFT 과정에서 발생하며, 기하보정에 소요되는 시간은 미미하다.

3) DF 알고리즘의 거리 제한

식 (7)의 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 함수를 사용하여 FFT를 반복 수행해야 하는데, 이는 시간과 비용이 시간영역 (time-domain) 영상화 기법과 동일하게 낭비된다. 따라서 실제 DF 기법에서는 deramp 함수로서 $R_c \simeq R_0$ 로 근사하여 사용한다.

$$\tilde{h}(x) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}(\frac{1}{2R_0}x^2)} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda R_0}x^2} \quad (10)$$

이 함수는 x_c 와는 무관하기 때문에, azimuth 방향으로 단 한번의 FFT를 수행하여 SAR 영상화가 근사적으로 이루어져 시간비용이 대폭 줄어든다. 그러나 deramp 함수에서 $R_c \simeq R_0$ 의 근사로 인하여 다음과 같은 phase error가 발생한다.

$$|\delta\phi| = \frac{4\pi}{\lambda} \left| \frac{R_0^2}{2R_c^3} - \frac{1}{2R_0} \right| x^2 = \frac{2\pi}{\lambda R_0} \left| \left(\frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + x_c^2}} \right)^3 - 1 \right| x^2 \quad (11)$$

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

$$R_0 \geq \frac{\pi X^2}{2\lambda} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2L_x} \right)^2}} \right)^3 - 1 \right] \frac{1}{\delta\phi_{crit}} \quad (12)$$

예를 들면 $f_c = 5.3$ GHz, $X = 5$ m, $L_x = 25$ cm인 경우 $\delta\phi_{crit} = \frac{\pi}{4}$ 로 하면, $R_0 \geq 16.7$ m가 되어야 영상화가 이루어진다. 이와 같이 근거리에서는 DF 기법은 영상화가 이루어지지 않으며, 이 경우에는 다음의 RD 기법의 사용을 고려해 볼 수 있다.

4) Range-Doppler (RD) 알고리즘

Fig. 2의 한 점 $P(R_0, x_c)$ 에 위치한 산란체에 대한 RD 기법의 이론적 배경은 다음과 같다. 식(4)의 신호에서 $R = \sqrt{R_0^2 + (x - x_c)^2}$ 에 대하여 DF 기법에서는 $x = 0$ 에서 근사한 반면, RD 기법은 산란체가 위치한 $x = x_c$ 를 중심으로 다음과 같이 근사한다.

$$R(x|R_0, x_c) = R(x_c) + R'(x_c)(x - x_c) + \frac{R''(x_c)}{2!}(x - x_c)^2 + \dots \quad (13)$$

위 식은 다음과 같이 분석할 수 있다.

$$\text{위상(phase): } \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} R(x) \quad (14)$$

위상변화율(rate of phase, wavenumber Doppler):

$$u_D = \frac{\phi'}{2\pi} = -\frac{2}{\lambda} R'(x) \quad (15)$$

Wavenumber Doppler rate:

$$u_D'(x) = \frac{\phi''}{2\pi} = -\frac{2}{\lambda} R''(x) \quad (16)$$

식(13)을 위의 Doppler 변수로 치환하면,

$$R(x|R_0, x_c) = R(x_c) - \frac{\lambda u_{Dc}}{2}(x - x_c) - \frac{\lambda u_{Dc}'}{4}(x - x_c)^2 + \dots \quad (17)$$

이다. GB-SAR 시스템에서는 $u_{Dc} = 0$, $u_{Dr} = -\frac{2}{\lambda R_0}$ 로 주어지며, 식 (4)는

$$s(x|R_c, x_c) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} R(x_c)} e^{j2\pi[u_{Dc}(x - x_c) + u_{Dr}(x - x_c)^2/2]}, \quad |x - x_c| < R_0 \frac{\lambda}{L_x} \text{ and } |x| \leq X/2 \quad (18)$$

로 표현되어 azimuth linear chirp을 형성한다. RD 기법은 영상화를 위한 filter로서 다음을 사용한다.

$$h^{-1}(x) = e^{j2\pi[u_{Dc}x + u_{Dr}x^2/2]}, \quad |x| < \frac{\lambda R_0}{2L_x} \quad (19)$$

이를 이용하여 다음의 matched filtering을 수행하면

SAR focusing이 이루어진다.

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h^{-1}(x' - x)s(x') dx' \quad (20)$$

DF 기법에서와 마찬가지로, 적분구간의 중심을 C, 합성 구경의 길이인 L_s 라고 할 때, 적분 구간은 $[C - L_s/2, C + L_s/2]$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 계산하면 다음과 같다.

$$g(x) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_0} e^{j2\pi\left[\frac{2}{\lambda R_0}(x-x_c)\left(\frac{x+x_c}{2}-C\right)\right]} L_s \text{sinc}\left[\frac{2\pi L_s}{\lambda R_0}(x-x_c)\right] \quad (21)$$

위 함수는 $x = x_c$ 에서 최대값 L_s 를 가지며, azimuth 밴드폭 $B_x = 2L_s / (\lambda R_0)$, 해상도는 $\delta x = \lambda R_0 / (2L_s)$ 로 주어진다. phase는 $\phi = -4\pi R_0 / \lambda$ 로서, R_0 의 함수이며, 이는 DF 결과가 R_c 의 함수인 것과 대별된다.

영상화 프로그램에서는 식 (20)의 계산 속도를 높이기 위하여 자료를 azimuth FFT를 하여 range migration을 거치고, azimuth matched filter의 주파수 영역 값을 곱해주는 방법을 이용한다(Fig. 1). 또한 위의 sinc 함수의 주 피크만을 강조하기 위해 azimuth 방향으로 Hamming filter를 적용한 후, azimuth iFFT를 이용하여 다시 시간영역으로 되돌아오게 하여 SAR 영상화가 끝나게 된다.

이 때 사용된 azimuth sample 개수를 $N_{\text{azff}} (= 2^n \geq N_x)$ 라 하면, 가상의 레일 간격은 $X_{\text{azff}} = (N_{\text{azff}} - 1)\Delta x$ 와 같이 된다. 그리고 영상의 azimuth 픽셀 간격은 $\Delta x_{\text{image}} = \Delta x$ 와 같이 되며, azimuth 영상의 폭 또한 $x_{\text{width}} = (N_{\text{azff}} - 1)\Delta x$ 로서 거리에 무관하여, Deramp-FFT와는 달리 기하 보정이 필요 없다. 그러나 Δx 가 고정되어 있기 때문에, 거리가 늘어날수록 N_{azff} 가 증가하여야 영상 영역이 충분히 확보된다. 따라서 많은 메모리를 필요로 하고 그만큼 처리 시간도 늘어나는 단점이 있다.

RD에 필요한 최소한의 메모리는 $N_{R\text{azff}} \times N_{\text{azff}} \times 4(\text{bytes precision}) \times 2(I/Q)$ 이다. 이 때, DF와 동일한 azimuth 폭을 가지는 영상을 얻기 위해서는 $N_{\text{azff}} \geq \lambda R_c / (2\Delta x^2) + 1$ 로서, 원시 자료의 크기인 $N_R \times N_x \times 4(\text{bytes precision}) \times 2(I/Q)$ 보다 매우 커야 하며(Table 1), 처리 시간 또한 azimuth FFT 및 iFFT 과정에서 주로 발생한다.

5) 영역별 영상화 및 해상도

Fig. 2의 영역을 고려 할 때, DF 기법과 RD 기법의 합성구경, 적분 구간, 영상화 및 해상도는 다음과 같다.

(1) Region I: Near range (full focusing, partial rail scan)

이 영역은 안테나에서 비교적 가까운 거리에 있는 산란체에 해당된다. 레일의 스캔에 의하여 안테나 빔폭과 동일한 합성구경 영역이 얻어져 full focusing이라 할 수 있으며, 일반적인 항공기/인공위성 SAR에서와 동일한 특성을 가진다. 그러나 거리가 가까울수록 빔 폭의 제한으로 레일의 영역 또한 제한되기 때문에 partial rail scan이라 칭할 수 있다.

$$\text{합성 구경: } \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}, x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} \right] \quad (22)$$

$$\text{적분 구간: } C = x_c, L_s = \frac{\lambda R_0}{L_x} \quad (23)$$

$$\text{DF 영상: } g(u) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} e^{j2\pi\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)x_c} \times \frac{\lambda R_0}{L_x} \text{sinc}\left[\pi \frac{\lambda R_0}{L_x} \left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \quad (24)$$

$$\text{DF 해상도: } \delta x_c = \frac{L_x}{2} \frac{R_c}{R_0} = \frac{L_x}{2} \sqrt{1 + (x_c / R_0)^2} \quad (25)$$

$$\text{RD 영상: } g(x) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_0} e^{j2\pi\left[\frac{2}{\lambda R_0}(x-x_c)\left(\frac{x+x_c}{2}-x_c\right)\right]} \times \frac{\lambda R_0}{L_x} \text{sinc}\left[\frac{2}{L_x}(x-x_c)\right] \quad (26)$$

$$\text{RD 해상도: } \delta x = \frac{L_x}{2} \quad (27)$$

DF 기법의 해상도는 레일의 중심에서 수직인 방향에 있는 산란체($x_c = 0$)는 안테나 구경의 절반의 해상도를 가지게 된다. 그리고 여기에서 벗어나는 경우, 즉, x_c 가 증가하면 해상도가 줄어든다. RD 기법의 해상도는 안테나 실구경의 절반의 해상도를 가지게 되며, 이는 SAR strip mode의 전형적인 예에 해당한다.

(2) Region II: Far range (partial focusing, full rail scan)

이 영역은 산란체가 안테나로부터 비교적 멀리 떨어져 있기 때문에, 레일 길이의 한계로 인하여 합성 구경이 빔의 폭보다 작아서 partial focusing이라 할 수 있다. 반면에 안테나가 레일의 어떠한 위치에 있더라도 빔의 조사를 받게 된다는 의미에서 full rail scan이라 할 수 있다.

$$\text{합성 구경: } [-X/2, X/2] \quad (28)$$

$$\text{적분 구간: } C = 0, L_s = X \quad (29)$$

$$\text{DF 영상: } g(u) = e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} X \text{sinc}\left[\pi X\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \quad (30)$$

$$\text{DF 해상도: } \delta x_c = \frac{\lambda R_c}{2X} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{RD 영상: } g(x) = & X e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_0} e^{j\frac{2\pi}{\lambda R_0}(x^2 - x_c^2)} \\ & \times \text{sinc}\left[\frac{2\pi}{\lambda R_0} X(x - x_c)\right] \end{aligned} \quad (32)$$

$$\text{RD 해상도: } \delta x = \frac{\lambda R_0}{2X} \quad (33)$$

DF 해상도는 R_c 가 증가함에 따라, RD 해상도는 R_0 가 증가함에 따라 나빠진다.

(3) Region III: Upper edge (Partial focusing, partial rail scan)

이 영역은 Fig. 2의 윗부분 영상으로서, 위에서의 설명에 의하여 partial focusing, partial rail scan의 특성을 가진다.

$$\text{합성 구경: } \left[-\frac{X}{2}, x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right] \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{적분 구간: } C = & \frac{1}{2}\left[-\frac{X}{2} + x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right], \\ L_s = & \left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right] + \frac{X}{2} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{DF 영상: } g(u) = & e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} e^{j2\pi\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\left[\frac{X}{2} + x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]} \\ & \times \left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right] \text{sinc}\left[\pi\left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right]\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\text{DF 해상도: } \delta x_c = \frac{\lambda R_c}{2\left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right]} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \text{RD 영상: } g(x) = & e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_0} e^{j2\pi\left[\frac{2}{\lambda R_0}(x-x_c)\left[\frac{x+x_c}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{X}{2} + x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right)\right]\right]} \\ & \times \left[\left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right] \text{sinc}\left[\frac{2\pi}{\lambda R_0}\left[\left[x_c + \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right](x - x_c)\right]\right]\right] \end{aligned} \quad (38)$$

$$\text{RD 해상도: } \delta x = \frac{1}{\frac{2}{\lambda R_0}\left(\frac{X}{2} + x_c\right) + \frac{1}{L_x}} \quad (39)$$

DF 해상도는 R_c 가 증가함에 따라, RD 해상도는 R_0 가 증가함에 따라 나빠진다. 또한 두 경우 모두 x_c 가 작아짐(원점에서 멀어짐)에 따라 나빠진다.

(4) Region IV: Lower edge (Partial focusing, partial rail scan)

이 영역은 Fig. 2의 아래쪽 영역으로서, Region III와 대칭되는 특성을 지닌다.

$$\text{합성 구경: } \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}, \frac{X}{2}\right] \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \text{적분 구간: } C = & \frac{1}{2}\left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right], \\ L_s = & \frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \text{DF 영상: } g(u) = & e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_c} e^{j2\pi\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\left[\frac{1}{2}\left(x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right)\right]} \\ & \times \left[\frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]\right] \text{sinc}\left[\pi\left[\frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]\right]\left(u - \frac{2x_c}{\lambda R_c}\right)\right] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\text{DF 해상도: } \delta x_c = \frac{\lambda R_c}{2\left[\frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]\right]} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \text{RD 영상: } g(x) = & e^{j\frac{4\pi}{\lambda}R_0} e^{j2\pi\left[\frac{2}{\lambda R_0}(x-x_c)\left[\frac{x+x_c}{2} - \frac{1}{2}\left(x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x} + \frac{X}{2}\right)\right]\right]} \\ & \times \left[\frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]\right] \text{sinc}\left[\frac{2\pi}{\lambda R_0}\left[\frac{X}{2} - \left[x_c - \frac{\lambda R_0}{2L_x}\right]\right](x - x_c)\right] \end{aligned} \quad (44)$$

$$\text{RD 해상도: } \delta x = \frac{1}{\frac{2}{\lambda R_0}\left(\frac{X}{2} - x_c\right) + \frac{1}{L_x}} \quad (45)$$

DF 해상도는 R_c 가 증가함에 따라, RD 해상도는 R_0 가 증가함에 따라 나빠진다. 또한 두 경우 모두 x_c 가 커짐(원점에서 멀어짐)에 따라 나빠진다. 이 영역은 Region III와 대칭을 이룬다.

3. GB-SAR 영상화 실험

위의 이론에 의하면, 거리에 따라 메모리, 처리시간 및 영상화 가능성에 있어서 DF 기법과 RD 기법이 서로 다른 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 실증하기 위하여 다음의 두 가지 실험을 실시하였다. 첫 번째는

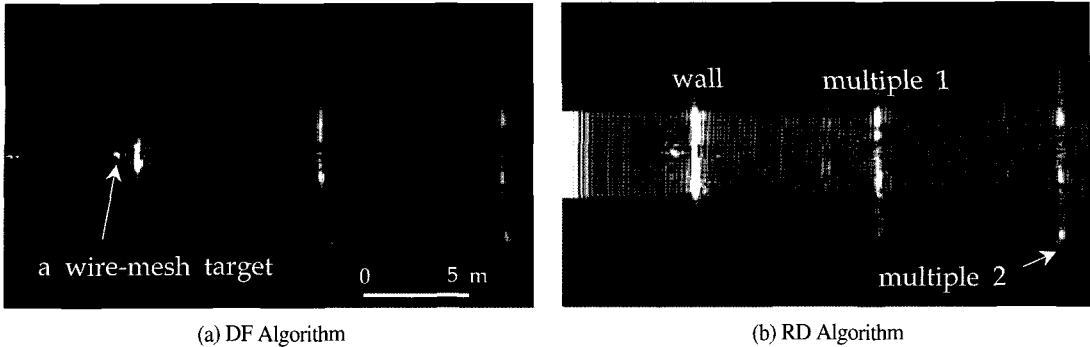


Fig. 3. A GB-SAR indoor experiment as a near-range case (HH polarization). The Deramp-FFT (DF) algorithm (a) can not focus the near range part of the image while the Range-Doppler (RD) algorithm (b) can. A wire-mesh target is placed at a range of 5 m (point target) in front of a wall at 6 m (vertical linear feature). Multiple reflections from the wall appears at 15 m and 24 m, respectively. The maximum range in this image is 25m, and the polarization is VV.

실내에서 근거리 영상화의 예를 보였고, 두 번째로는 실외에서 원거리 영상화의 예를 보였다.

Fig. 3은 근거리에서의 영상화 예를 보이기 위한 실내 실험(indoor) 결과이다 (HH polarization). 안테나에서 실내의 벽까지의 거리는 약 6 m이고, 5 m 거리에 철조망으로 된 산란체를 두었다. Table 1에서와 같이 C-band인 5.3 GHz를 중심으로 600 MHz의 bandwidth를 사용하여 201개의 range sample을 얻었다. Azimuth 방향으로로는 5 cm 간격으로 레일 위를 움직이면서 4 m에 걸쳐 스캔하여 총 81개의 azimuth sample을 얻었다. Fig 3(a)는 DF 기법으로 처리한 결과로서, 이론에서 밝힌 바와 같이 영상화가 이루어지지 않음을 알 수 있다. Fig 3(b)는 RD 기법이 근거리의 영상화에 최적임을 보여준다. 안테나에서 5 m 거리에 위치한 산란체가 영상화 되었고, 그 뒤로 6 m 지점에 있는 벽에서 산란된 신호가 뚜렷이 나타났다. 또한 벽에서의 신호는 여러 회 재반사되어 15 m, 24 m 지점에서 각각 다시 나타나고 있다.

Fig. 4는 원거리에서 영상화 예를 보여주는 실외 실험(outdoor) 결과로서, 실험의 구성은 이훈열 외(2007)의 T1 실험과 동일하다. Table 1에서 보인 바와 같이, 영상의 최대 거리를 넓히기 위하여 주파수 영역을 200 MHz로 좁혀 600 m 거리까지 영상화가 되도록 하였다. Fig. 4(a)는 DF 기법을 이용하여 영상화된 것으로서(VV polarization) 기하보정 전 영상이며, 해상도가 거리의 함수로 나타나는 DF 기법의 특성을 잘 나타내주고 있다. DF 알고리즘은 2 MBytes의 메모리(2048 range ×

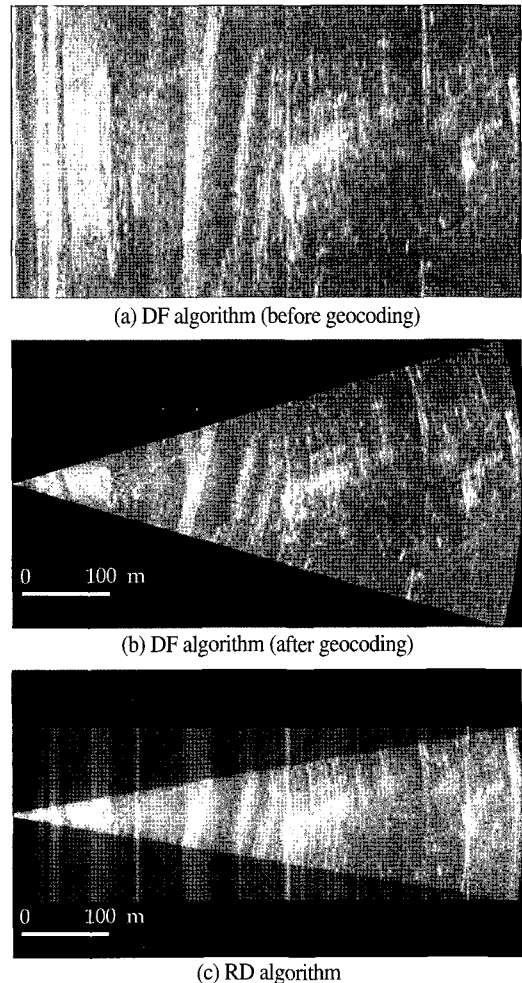


Fig. 4. A GB-SAR outdoor experiment for a far-range case (VV polarization). The DF algorithm (a) efficiently focused the entire GB-SAR data with 2 MBytes memory in less than 1 minute. (b) is the DF result after geocoding. The RD algorithm (c) needed 128 MB memory with longer processing time.

128 azimuth×4 bytes precision×2 I/Q)를 이용하여 Pentium-VI 3.0GHz CPU PC 환경에서 약 1 분 이내에 GB-SAR 영상화를 효율적으로 수행하여, 실시간 처리가 가능함을 알 수 있었다. DF 기법에서 사용된 메모리의 크기는 실제 자료 크기인 1.2 MBytes(1601 range×101 azimuth×4 bytes precision×2 I/Q) 보다 약간 크며, 이는 2의 정수승의 자료 크기를 사용하는 FFT의 요건 때문이다. Fig. 4(b)는 기하보정 후의 영상으로서, 대부분의 영상 영역에서 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 이에 반하여 Fig 4(c)는 RD 기법을 이용한 결과로서, 128 MBytes의 메모리(2048 range×8192 azimuth×4 bytes precision×2 I/Q)를 사용하여 약 5분 이상의 시간이 걸렸다. 영상의 최대 거리인 600 m에서 DF와 동일한 azimuth 폭인 400 m를 영상화하기 위하여, 위에서 설명한 바와 같이 8192개의 azimuth 샘플이 필요로 하기 때문이다(Table 1). 이에 따라 처리 시간이 증가하였으며, azimuth FFT와 iFFT의 두 번의 자료처리 시간이 많이 소요되었다. 그림에서 보듯이 RD 기법에서는 영상의 기하학적 왜곡이 발생하지 않는다.

4. 결 론

GB-SAR 시스템은 합성 구경의 크기가 레일의 폭으로 제한되어 있고 송수신이 정지된 상태에서 얻어지는 등 항공기/위성 SAR 시스템과는 크게 다르기 때문에, GB-SAR의 특징에 맞는 이론적 기술과 함께, 최적의 영상화 기법을 찾아낼 필요가 있다.

GB-SAR 영상화를 위한 DF 기법은 최소한의 메모리로 단 한번의 iFFT를 통해 빠른 시간 내에 영상화가 이루어져, 실시간 영상화가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 영상에서의 거리(range) 및 위상(phase)이 원점(레일의 중심 축)으로부터의 산란체까지의 거리로 주어지기 때문에 기하보정 과정이 필요하며, 간섭 위상 해석 시에도 주의해야 한다. 또한 빠른 처리 시간을 위해 사용된 근사로 인하여 근거리에서는 영상화가 되지 않는 단점이 있다. 이에 반하여 RD 기법은 영상 및 위상에서 거리에 따른 왜곡이 없어 모든 거리에서의 영상화가 가능하고 기하보정 과정이 필요가 없다. 그러나 메모리가 영상의 폭에 비례하여 급증하고 FFT와 iFFT를 거쳐야

하기 때문에 처리 시간이 많이 소요된다. 결론적으로, 실내 실험과 같은 근거리에서는 RD 기법을 사용하고, 실외 실험과 같이 장거리에서는 DF 기법을 적용하는 것이 최선임을 이 연구 결과를 통해 알 수 있었다.

GB-SAR 시스템의 최대 장점은 인공위성이나 항공기로 얻기 힘든 정밀한 반복 측정 능력과 함께 다양한 운용의 편리성에 있다. 이러한 장점을 활용하면 인공위성/항공기 SAR로는 아직까지 실현할 수 없는 새로운 연구 및 실용화 분야가 개척되리라 기대해본다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 전문연구사업인 '지하정밀 영상화 융합기술 개발'의 지원을 받았다.

참고문헌

- 이훈열, 2005. 교육용 합성구경레이더 프로세서(eSAR Processor)의 개발과 공개, 대한원격탐사학회지, 21(2): 163-171.
- 이훈열, 조성준, 성나훈, 김정호, 2007. GB-SAR의 개발 (I): 시스템 구성과 간섭기법, 대한원격탐사학회지, 23(4).
- Carrara, W. G., R. S. Goodman, and R. M. Majewski, 1995. *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Artech House, Norwood, MA, USA.
- Cumming, I. G. and F. H. Wong, 2004. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Artech House, Norwood, MA, USA
- Curlander, J. C. and R. N. McDonough, 1991. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons,
- Fortuny, J. and A. J. Sieber, 1994. Fast algorithm for a near-field synthetic aperture radar processor, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42(10): 1458-1460.

- Leva, D., G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny-Guasch, and A. J. Sieber, 2003. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 745-757.
- Nesti, G., J. Fortuny, and A. J. Sieber, 1996. Comparison of backscattered signal statistics as derived from indoor scatterometric and SAR experiments, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5): 1074-1083.
- Nico, G., D. Leva, J. Fortuny-Guasch, G. Antonello, and D. Tarchi, 2005. Generation of digital terrain models with a Ground-Based SAR system, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1): 45-49.
- Zhou, Z. -S., W. -M. Boerner, and M. Sato, 2004. Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for noninvasive ground-truth validation in vegetation monitoring, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(9): 1803-1810.