

교육용 합성구경레이더 프로세서(eSAR Processor)의 개발과 공개

이 훈 열

강원대학교 지구물리학과

Development and Distribution of an Educational Synthetic Aperture Radar(eSAR) Processor

Hoonyol Lee

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : I have developed a processor for synthetic aperture radar (SAR) raw data compression using range-doppler algorithm for educational purpose. The program realized a generic SAR focusing algorithm so that it can deal with any SAR system if the specification is known. It can run efficiently on a low-cost computer by selecting minimum size out of a whole dataset, and can produce intermediate images during the process. Especially, the program is designed for educational purpose in such a way that Doppler centroid and azimuth ambiguity can be determined graphically by the user. By distributing the source code and the algorithm to public, I intend to maximize the educational effect on understanding and utilizing SAR data. This paper introduces the principle of SAR focusing algorithm embedded on the eSAR processor and shows an example of data processing using ERS-1 raw data.

Key Words : Synthetic Aperture Radar, Raw Data, Range-Doppler Algorithm.

요약 : 합성구경레이더(Synthetic Aperture Radar) 원시 자료(raw data)를 range-Doppler 알고리즘을 이용하여 처리하는 교육용 공개 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 SAR 시스템에 따라 자료 처리에 필요한 변수를 자유롭게 조절함으로써, 특정 SAR 시스템에 치우치지 않고 다양한 자료를 처리할 수 있도록 일반화된 알고리즘을 구현하였다. 저가 사양의 컴퓨터에서도 최소 단위의 영상을 선택적으로 처리할 수 있고 자료 처리 중간 단계별로 영상 출력이 가능하기 때문에, 프로그램 작동 상태와 SAR의 원리를 직접 확인할 수 있도록 하였다. 특히 Doppler 변수를 자료 처리 중간 단계의 영상을 보고 직접 구할 수 있도록 고안하여 교육적 효과를 높였다. 또한 자료 처리 알고리즘과 원시 프로그램을 모두 공개함으로써, SAR 시스템 원리를 이해하고 응용하는데 도움을 주고자 한다. 이 논문에서는 프로그램의 원리와 작동 환경을 소개하고, ERS-1 원시 자료를 이용한 자료 처리의 예를 보였다.

1. 서 론

영상레이더(imaging radar)는 안테나를 통하여 마이크로파를 입사시켜 물체로부터 후방 산란된 신호를 포착하여 2차원적인 영상을 얻는 원격탐사 센서이다. 마이크로파는 대기 중의 수증기나 구름, 먼지 등에 거의 영향을 받지 않기 때문에 날씨와 태양의 고도에 관계없이 영상을 얻을 수 있어서 원격탐사에서 널리 쓰이는 전자기파의 일종이다. 그 중에서도 최근에 각광받는 '합성구경레이더'(Synthetic Aperture Radar, SAR)는 안테나와 지표물체의 상호 움직임에 따른 도플러 효과를 이용하여, 지상에서의 자료 처리를 통해 높은 해상도를 얻는 원격탐사 센서로서 각광을 받고 있다.

SAR 영상은, 전자기파의 밝기만을 얻는 보통의 광학 센서와는 달리 전자기파의 위상(phase) 자료가 서로 간섭할 수 있는 형태(가간섭성, coherent)로 기록되고 보존되기 때문에, 위성의 고도에 상관없이 뛰어난 해상도를 구현한다. 또한 시간과 위치를 달리하면서 취득된 영상들의 위상차를 이용한 SAR 간섭 기법(interferometry)은 연간 수 센티미터에 걸쳐 일어나는 지표의 미세한 움직임을 측정해 낼 수 있기 때문에, 지진, 화산, 빙하의 움직임, 지반 침하 등으로 인한 지표의 변위를 정밀하게 측정하는데 최근 널리 이용되고 있다.

인공위성 SAR 시스템과 그 응용 연구는 그동안 미국, 유럽연합, 캐나다, 일본 등 우주 개발 선진국들에 의해 주도되어 왔다. 그러나 우리나라에서도 현재 SAR 영상을 이용한 연구가 대학과 연구소에서 대체로 활발히 이루어지기 시작하고 있으며, 인공위성 SAR를 자체적으로 보유하는 국가적인 계획이 진행 중이다. 우주개발중장기기본계획 수정안(국가과학기술위원회, 2000)에 의하면, 우리나라는 2015년까지 총 20기의 인공위성을 개발하려는 목표로, 총 투자 규모 5조 이상, 그리고 4500명의 인력이 필요하다고 명시하고 있다. 그 중에서 2010년 다목적 실용위성 5호와 2014년 다목적 실용위성 7호가 SAR 기술을 이용한 전천후 관측위성이라는 명목으로 발사될 것으로 계획되

어 추진 중이며, 최근에는 이러한 계획이 앞당겨져 시행에 박차를 가하고 있다. 이러한 국내에서의 인공위성 SAR 시스템의 도입 및 연구의 활발한 움직임에 따라 인공위성 SAR 센서와 자료처리 과정을 이해하는 전문적인 인력의 배출이 매우 시급한 실정이라 하겠다.

최근 각 대학이나 여러 교육 기관에서 원격탐사를 가르치는 교과과정이 많이 늘어나고 있고 SAR에 대한 비중도 점차 높아지고 있다. 원격탐사, 특히 SAR의 교육에는 자료 처리를 통한 실습의 비중이 높기 때문에, 실습용 프로그램과 영상의 확보가 매우 중요하다. 그러나 보통의 상업용 SAR 프로세서는 가격이 매우 비싸고 프로그램 소스코드가 공개되지 않기 때문에 교육용 및 연구용으로는 한계가 있어서, 대학에서 SAR를 교육하고 인력을 양성하는데 현실적인 어려움이 많다. 미국 NASA에서는 소스코드와 함께 제공되는 roi_pac이라는 SAR 처리 프로그램을 공개하고 있기도 하다. 그러나 이 프로그램은 Fortran, C, Perl과 같은 여러 언어로 구성되어 있고, 모든 처리가 자동으로 일관되며, 컴퓨터 자원이 많이 소요되기 때문에 대학에서 강의 실습용으로 사용하기에는 적합하지 않다는 것이 저자의 생각이었다.

따라서 이 논문에서는 저자가 대학원 수업 교재로 사용하기 위하여 개발한 eSAR Processor 프로그램에 대한 내용을 소개하고 향후 업그레이드 계획과 프로그램의 공개 방안을 소개하여, 앞으로 SAR의 원리를 교육하는데 널리 이용될 수 있도록 권장하고자 한다.

참고로, 필자는 이 논문을 통하여 'Synthetic Aperture Radar'에 대한 한글 용어로서 '합성구경레이더'를 사용할 것을 제안하는 바이다. 지금까지 우리나라에서는 SAR에 대한 번역어로서 '영상레이더', '합성개구레이더', '합성구경레이더' 등 여러 가지가 혼용되고 있다. 영상레이더란 레이더를 이용하여 영상을 얻는 시스템을 총칭하는 포괄적인 개념으로서, 일례로, 영상의 공간 해상도가 물리적인 안테나 크기에 국한되는 SLAR(Side Looking Airborne Radar)도 포함된다. 따라서 물리

적으로 제한적인 안테나의 크기를 Doppler 효과로 합성하여 공간해상도를 극대화 시키는 SAR의 개념을 구체적으로 지칭하는데 걸맞지 않다. 또한 합성개구레이더는 일본에서 사용하는 용어이고, 중국에서는 ‘합성공경레이더’라고 쓰고 있다. 즉, 우리나라에서 출간되는 논문과 저술에는 주로 일본식을 따라 ‘개구’라는 낯선 언어를 맹목적으로 사용해 왔던 것이다. 이는 보통 총포나 광학 렌즈의 크기를 지칭할 때, 중국에서는 ‘공경(孔徑)’, 그리고 일본에서는 ‘개구(開口)’를 사용하는데서 기인한다. 우리나라는 이와 관련하여 ‘구경(口徑)’을 사용하기 때문에, SAR를 ‘합성구경레이더’로 부르는 것이 적절하다고 판단된다.

2. eSAR 프로세서

1) 사용자 환경

eSAR Processor는 SAR의 원시 자료 형태인 RAW 자료를 이용하여 range-Doppler Algorithm을 이용한 SAR focusing을 수행한다. 이 프로그램은 ANSI-C 언어로만 이루어졌기 때문에, PC, UNIX, Linux 등 컴퓨터 사용 환경에 구애받지 않고 C-컴파일러 프로그램이 있는 모든 컴퓨터에서 사용할 수 있는 장점이 있다. 저자는 마이크로소프트 윈도우즈(MS Windows) 운영체제를 사용하는 PC에서 cygwin (www.cygwin.com)이라는 공개 Linux 모사 프로그램을 사용하였고, GNU C-컴파일러를 이용하여 프로그램 실행에 있어서 비용을 최소화 할 수 있었다.

이 프로그램은 명령어 사용 환경에서 운영되기 때문에, 사용자는 먼저 프로그램에 필요한 변수를 입력하여 파일로 만들고, 이를 통해 프로그램을 제어한다. 전체적인 프로그램의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 사용자가 원하면 프로그램 수행의 각 단계별도 영상을 출력하여 Fig. 2와 같이 확인할 수 있다.

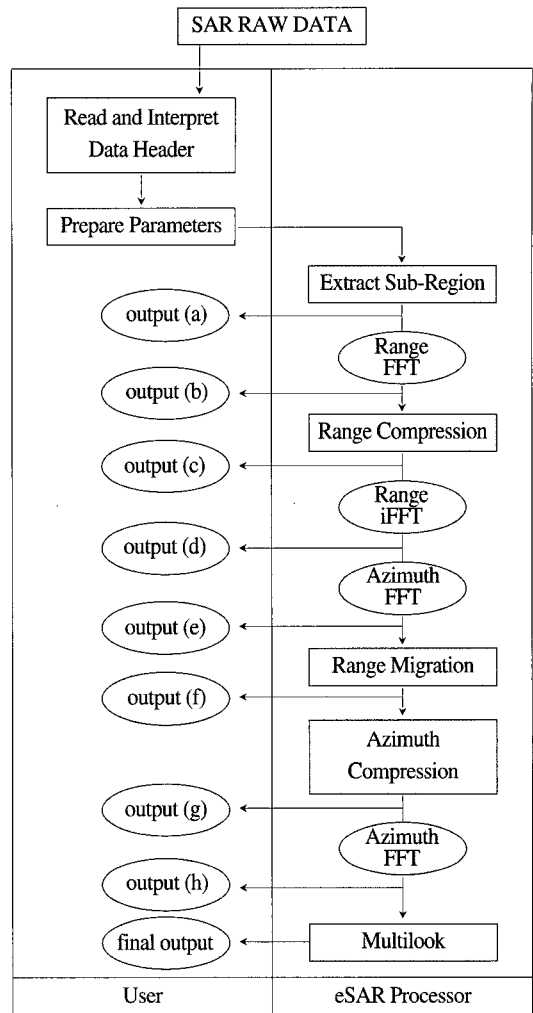


Fig. 1. Flow Chart of eSAR Processor. The output (a)-(h) and the final output are shown in Fig. 2 and 3 in sequence.

2) 변수 및 자료 추출

이 프로그램을 실행하기 위해서는 먼저 RAW 자료의 헤더 정보를 읽어서 자료 처리에 필요한 정보를 수집하고 원하는 부분의 데이터를 분리해 내는 과정이 필요하다. 이러한 변수를 추출하기 위해서는 아래의 SAR focusing 과정을 이해할 필요가 있으며, 이 때 학생들이 자료의 정보를 읽어내고 프로그램에 필요한 변수들을 결정하는 과정에 있어서 SAR 시스템 전체에 대한 이해를 높일

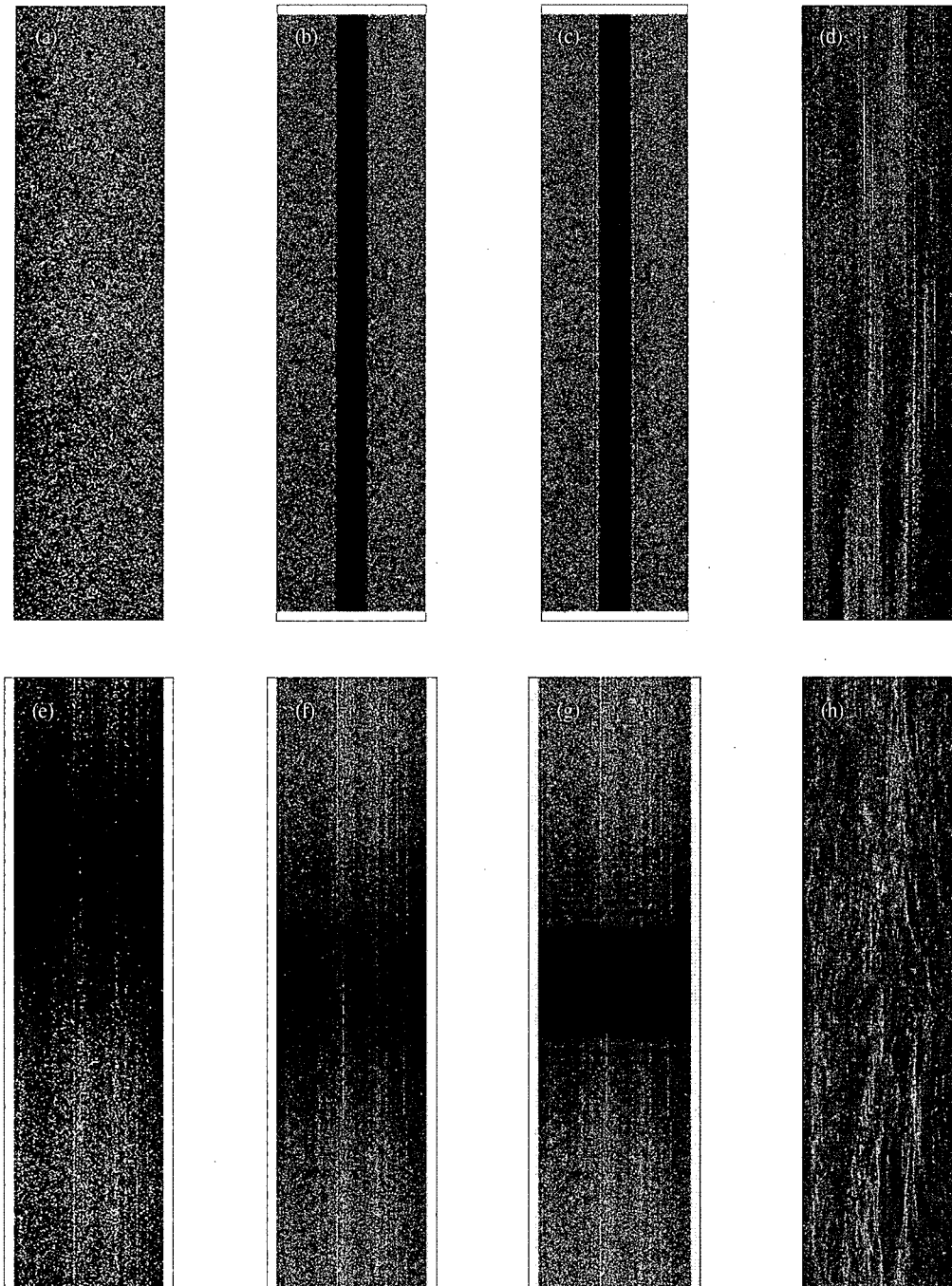


Fig. 2. An example of SAR focusing by eSAR Processor. (a) ERS-1 SAR RAW Data. 1024×4096 pixels in (f, s) coordinates. (b) After FFT in range direction. (f, s) coordinate. (c) After range matched filtering. (f, s) coordinates. (d) After range compression. (f, s) coordinates. (e) After FFT in azimuth direction. (f, s) coordinates. (f) After range migration. (f, s) coordinates. (g) After azimuth matched filtering. (f, s) coordinates. (h) After azimuth compression, i.e., SLC(Single Look Complex). (t, s) coordinates. All images shown are amplitude only. t is range (fast) time, s azimuth (slow) time, f frequency in each coordinates. Additional grey bars along the axis of each image indicate the axis is in frequency domain.

수 있기 때문에 교육적으로 매우 효과가 크다 하겠다. ERS-1 RAW 자료에 대한 대표적인 변수 값과 수식에 사용된 기호, 그리고 간략한 설명을

Table 1에 예시하였다. 이 변수 파일과 함께 eSAR 프로그램을 실행하면 원시자료에서 필요한 부분을 추출하게 된다(Fig. 2a).

Table 1. Typical Parameters for eSAR Processor(ERS-1 SAR raw data).

Variable	Value	Description
fname_in	/DAT_01.001	input SAR data file name
fhead	gra	head of output files
nrange_whole	5616	number (n.) of range, whole scene(w.s.)
nazimuth_whole	28000	n. of azimuth, w.s
nbyte_per_record	11644	n. of byte per record, w.s
nskip_record	1	n. of record to skip, w.s
nskip_byte_per_record	412	n. of byte to skip per record, w.s
range_start	1500	start range of sub-scene(s.s)
range_end	2523	end range of s.s
nrange	1024	n. of range, s.s
azimuth_start	18000	start azimuth of s.s
azimuth_end	22095	end azimuth of s.s
nazimuth	4096	n. of azimuth, s.s.
nrange_fft	1024	FFT size in range
nazimuth_fft	4096	FFT size in azimuth
carrier_frequency	5.3e9	carrier frequency, f_c
chirp_rate	4.17788e11	range chirp rate, K
chirp_duration	37.12e-6	pulse duration, τ_p
range_sampling_frequency	18.962468e6	range sampling frequency
pulse_repetition_frequency	1679.902	pulse repetition frequency (PRF), f_p
nominal_mean_I	15.5	nominal mean of 5-bit in-phase data
nominal_mean_Q	15.5	nominal mean of 5-bit quadratic data
DC_bias_I	-0.2	bias of in-phase data
DC_bias_Q	-0.115	bias of quadratic data
range_first_time	5.5410340e-3	delay time of first range sample
range_centre_time	5.6891160e-3	delay time of centre range sample
range_last_time	5.8371980e-3	delay time of last range sample
satellite_radius	7159154.98	radius of satellite orbit [m]
satellite_velocity	7552.00924246	velocity of satellite [m], V_{st}
satellite_squint_radian	0.	squint angle in radian, θ_s
antenna_azimuth_length	10.	length of antenna in azimuth [m], L_a
nominal_incidence_degree	23.737	nominal incidence angel in degree, θ_i
Doppler_centroid0_1	-373. 0.	Doppler centroid Hz, Hz/s, f_{Dc}
Doppler_rate	0.	Doppler rate, f_r
maverage_nx_ny	1 5	multilook in range and azimuth
multilook_azsample	1	azimuth resampling rate
output	1	output index

3) Range-Doppler SAR Focusing

(1) Range Compression

eSAR Processor는 앞에서 추출된 변수 자료를 사용하여 range-Doppler algorithm을 이용, SAR focusing을 수행한다. SAR 시스템이 영상을 취득하는 과정은 아래와 같다. SAR 안테나에서 지상으로 보내지는 한 개의 펄스는 range 방향으로 시간 t (fast time)에 따라 수직적으로 다음과 같이 표현된다(Curlander and McDonough, 1991).

$$s(t) = e^{j\phi} = \exp[j2\pi(f_c t + Kt^2/2)], |t| < \tau_p/2 \quad (1)$$

이 파형은 진동수가 시간에 따라 선형으로 변하는 $(f(t) = \dot{\phi}/2\pi = f_c + Kt)$ chirp 신호로서, SAR 시스템에서 사용되는 중심 진동수 f_c 에 따라 P, L, S, C, 그리고 X 밴드 등으로 나뉘며, 밴드 폭은 $B_R = K\tau_p$ 가 된다. 이 신호가 지상에서 목표물과 반응하여 후방 산란(back-scatter)되어 되돌아오는 신호는 $v(t) = s(t - t_n)$ 이라 할 수 있다. 이때, $t_n = 2R/c$ 로서, 안테나와 목표물 사이를 마이크로파가 왕복하는데 걸리는 시간이다. 이 신호를 Matched-filtering 기법으로 아래와 같이 range compression을 수행하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s^*(t' - t)v(t')dt' \\ = \exp(j2\pi f_c t) \exp(-j4\pi R/\lambda) \frac{\sin[\pi K\tau_p(t - t_n)]}{\pi K(t - t_n)} \quad (2)$$

위 수식의 첫 번째 항인 중심 진동수 f_c 에 의한 파형은 안테나에서 자료를 받을 때 복조(demodulation) 과정을 거쳐 사라지게 되고, 두 번째 파형은 안테나와 목표물간의 거리에 대한 함수이다. 그리고 마지막 sinc 함수의 최대값($t = t_n$)에서 3dB 내려가는 지점이 SAR의 range 방향의 시간적인 해상도인 $\delta t = 1/B_R$ 로 결정되며, range sampling에 의해 sinc 함수의 최고값이 되는 $t = t_n$ 에서 그 목표물에 대한 값을 취하게 된다.

자료 처리 과정을 살펴보면, 먼저 각 펄스별로 matched filtering을 진동수 영역에서 시행하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform, Brigham, 1988) 알고리즘을 사용한다. 이 프로그램에서는 Numerical

Recipe in C(Press, 1993)에서 제공되는 FFT 알고리즘을 사용하였다. 참고로 이 알고리즘에서 사용된 forward Fourier transform의 정의가 이 논문에 사용된 것과는 반대의 부호를 갖기 때문에 주의하여야 하며, 이는 프로그램 상에서 보정되었다.

먼저 안테나에서 보내진 chirp 신호를 원시 자료의 헤더부분에서 관련 변수를 얻어 시간 영역에서 구현하고, 이를 FFT를 이용하여 진동수 영역으로 전환한다. 그리고 SAR 원시자료의 각 펄스를 range 방향으로 FFT하여(Fig. 2b), FFT된 chirp 신호와 각각 곱하고(Fig. 2c), 그 결과를 다시 역 FFT를 이용하여 시간 영역으로 환원시킴으로서 range-compression 과정이 완성된다. Fig. 2d에서 보듯이, range 방향으로 focusing이 이루어 졌고, 강한 신호를 가지는 목표물로부터 얻어진 신호들이 azimuth 방향으로 길게 늘어져 있음을 확인할 수 있다. 이러한 신호는 다음의 azimuth compression 과정을 통해 초점이 맞추어 지게 된다. 이를 위해 먼저 한 목표물로부터 얻어지는 신호를 일렬로 맞추는 range migration 과정이 필수적이며, 이 과정이 아래에 설명되어 있다.

(2) Range Migration

Range compression을 한 후, 지상의 한 정점에 있는 목표물에 대한 여러 펄스들의 신호는 위성이 지나가는 azimuth 방향에 따른 시간 s (slow time)에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$g(s) = e^{j\phi(s)} = \exp(-j4\pi R(s)/\lambda) \quad (3)$$

이 때, 위성과 목표물간의 거리 $R(s)$ 는 시간에 따른 함수이며, 이는 레이더 빔의 중심이 목표물을 지나가는 시간 s_c 에 대하여 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$R(s) = R_c + \dot{R}(s_c)(s - s_c) + \ddot{R}(s_c)(s - s_c)^2/2 + \dots, |s - s_c| < S/2 \quad (4)$$

여기서 S 는 목표물에 여러 빔들이 비추어지는 시간으로서 coherent integration time이라고 부르며, 보통 위 식의 2차 항까지의 근사 값을 쓰는 것만으로 충분하다. 위 $s = s_c$ 일 때 위 펄스 위상의 시간에 따른 일차 미분과 이차 미분 값은 각각

Doppler Centroid, Doppler rate라고 다음과 같이 정의되며, range migration과 azimuth compression에 있어서 영상의 질을 결정짓는 가장 중요한 변수가 된다.

$$f_{Dc} = \dot{\phi}(s_c)2\pi \text{ (Doppler Centroid)} \quad (5)$$

$$f_R = \ddot{\phi}(s_c)2\pi \text{ (Doppler Rate)} \quad (6)$$

위 두 식을 식(3)과 (4)에 대입하면 다음과 같이 근사된다.

$$R(s) \approx R_c - \frac{\lambda}{2} f_{Dc}(s - s_c) - \frac{\lambda}{4} f_R(s - s_c)^2 \quad (7)$$

$$\hat{g}(s) \approx \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \exp\{j2\pi[f_{Dc}(s - s_c) + f_R(s - s_c)^2/2]\}, \quad |s - s_c| < S/2 \quad (8)$$

이 때, f_{Dc} 와 f_R 을 정확히 결정해 주는 것이 azimuth compression 성공의 관건이라 하겠다. 이 값들은 위성의 궤도 정보에서 위성의 위치와 속도 자료가 정확하게 주어진다면 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$f_{Dc} = \frac{2V_{st}}{\lambda} \sin \theta_s \quad (9)$$

$$f_R = -\frac{2V_{st}^2}{\lambda} R_c \quad (10)$$

위성 궤도 정보가 부정확할 경우에는 SAR 원시 자료 자체에서 clutterlock과 autofocus 방법을 이용하여 자동적으로 얻을 수 있다. 그러나 eSAR 프로세서에서는 f_R 은 식(10)을 이용하여 위성 궤도 자료에서 간단히 계산하도록 하였고, f_{Dc} 는 사용자가 중간 과정의 영상을 보면서 직접 수동으로 다음과 같은 방법을 이용하여 구하도록 하여 교육의 효과를 높였다.

Range compression이 끝난 자료를 azimuth 방향으로 FFT를 하게 되면 다음 관계식에 의해 진동수와 azimuth 시간이 서로 선형적 관계가 된다.

$$s - s_c = (f - f_{Dc})/f_R \quad (11)$$

즉, 진동수가 펄스가 얻어지는 시간 순서대로 나열되어 나타내게 된다. 따라서, 빔의 중심에 해당하는 Doppler Centroid가 높은 amplitude를 가지는 것이 영상으로 확인 가능하며(Fig. 2e), 이를 통해 Doppler Centroid를 설정하게 된다. 이렇게 측정된 값을 \tilde{f}_{Dc} 이라고 할 때, Fourier Transform의 주기성

에 의하여 $|\tilde{f}_{Dc}| < f_p/2$ 의 값의 제한이 있게 된다. 즉, 정수 m 에 대하여 실제 Doppler centroid는 다음과 같은 여러 가능성을 가지게 되기 때문에, azimuth ambiguity 문제가 대두된다.

$$f_{Dc} = mf_p + \tilde{f}_{Dc} \quad (12)$$

이는 높은 반사계수를 가지는 몇몇 목표물에 의한 신호가 Doppler Centroid에서 range가 변화함($\Delta R = R - R_c$, range migration)에 따라 진동수의 변화량($\Delta f = f - f_{Dc}$)을 영상에서 측정하여 얻어질 수 있다. 식(11)을 식(7)에 대입하여 정리하면, 이와 같은 기울기 측정에 의한 Doppler Centroid 값 \hat{f}_{Dc} 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\hat{f}_{Dc} = -\frac{2}{\lambda} f_R \frac{\Delta R}{\Delta f} - \frac{\Delta f}{2} \quad (13)$$

이 때, 측정상의 오차가 있을 수 있으므로, 위 측정값에서는 azimuth ambiguity number인 $m = \text{mod}[\hat{f}_{Dc}, f_p]$ 을 구하는 것으로 만족하고, 이 값을 식(12)에 대입하여 최종적으로 Doppler Centroid를 결정한다. 이렇게 얻어진 Doppler parameter를 이용하여, 한 목표물에 대한 각각 펄스의 신호가 azimuth 방향으로 일정하게 정렬되도록 식(7)에 의해 range migration을 실시한다(Fig. 2f).

(3) Azimuth Compression

식(8)의 두 번째 항은 밴드 폭이 $B_D = f_R S$ 인 선형의 chirp 신호를 이룬다. 이를 $h(s)$ 라고 놓고 아래 수식을 통해 matched filtering을 실행하면 다음과 같이 azimuth compression이 완성된다.

$$\begin{aligned} \zeta(s) &= \int_{-\infty}^{\infty} h^*(s' - s) \hat{g}(s') ds' \\ &= \exp[j2\pi f_{Dc}(s - s_c)] \exp(-j4\pi R_c/\lambda) \frac{\sin[\pi f_R S(s - s_c)]}{\pi f_R (s - s_c)} \end{aligned} \quad (14)$$

위 수식의 첫 번째 항인 f_{Dc} 에 의한 파형은 자료 처리 시 진동수 영역에서의 자료 이동, 혹은 시간 영역에서 이에 상응하는 phase ramp를 곱해 줌으로서 없애줄 수 있으며, 이렇게 생성된 SAR 영상을 zero Doppler 영상이라고 부른다. 두 번째 파형은 레이더 빔이 목표물 중앙에 왔을 때 안테나와 목표물간의 거리에 대한 함수로서, 이 신호

가 잘 보존되도록 해야 SAR 간섭 기법에 이용될 수 있으며, 이러한 SAR focusing 방법을 위상 보존(phase-preserved) SAR 프로세서라고 부른다. 그리고 마지막 sinc 함수의 중심 최대 진폭에서 3dB 내려가는 지점이 SAR의 azimuth 방향으로의 시간 해상도인 $\delta t = 1/B_D$ 로 결정되며, sampling 방법에 의해 sinc 함수의 최고값이 되는 $s = s_c$ 에서 그 목표물에 대한 값을 취하게 된다. Azimuth 방향으로 안테나의 길이가 L_a 일 때 해상도의 이론적 최대값은 $\delta x = L_a/2$ 로서, 안테나 크기의 절반이다. 즉, 안테나의 크기가 작을수록 더 높은 해상도를 얻을 수 있다는 것이다. 그러나 안테나 크기는 보통 range swath W_s 와 $W_s/\delta x < c/(2V_{st})$ 의 관계에 의해 서로 절충하게 된다(Curlander and McDonough 1991, p.21).

자료처리 과정을 보면, azimuth chirp 신호를 만들어 이를 FFT한 후 SAR 자료와 각각 곱하고 (Fig. 2g), 그 결과를 다시 역 FFT를 이용하여 시간 영역으로 환원시킴으로서 azimuth compression 과정이 완성되어 SLC(Single Look Complex)가 생성된다(Fig. 2h).

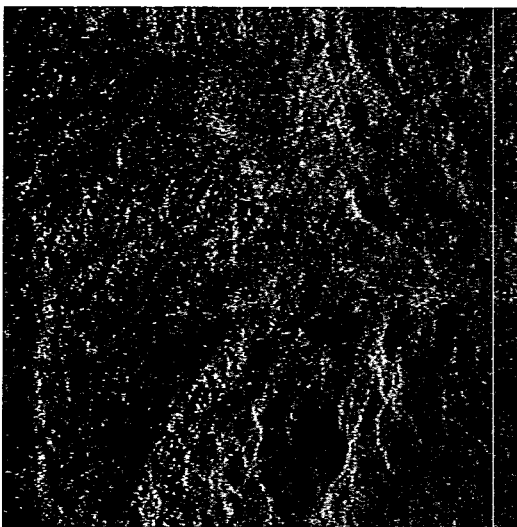


Fig. 3. 4-look image in geographic scale of approximately 20km × 20km. (t, s) coordinates.

(4) Post-processing

후처리 과정으로서 multi-look processing과 자료 출력기능이 있다. SAR 영상의 특징인 speckle 잡음을 제거하기 위한 multi-look processing으로서는 SAR focusing 후 생성된 SLC 영상의 amplitude에 azimuth 방향으로만 average filter를 적용하는 방법을 채택하였다.

eSAR Processor는 프로그램이 수행되는 중간 단계의 결과들을 선택적으로 출력할 수 있기 때문에 교육적 효과가 있다. 출력된 자료는 기존의 영상 디스플레이 프로그램을 이용하여 후처리가 가능하다. 특히 앞에서 설명한 경우와 같이 cygwin에서 eSAR Processor를 구성한 경우에는 MS Windows 상에서 설치된 기존의 영상처리 프로그램을 그대로 사용하여 디스플레이가 가능하다. 출력 형식은 I/Q 혹은 amplitude/phase 중에서 선택할 수 있으며, 각 band의 형식 또한 BIL, BIP, BSQ 중에 선택되며, 자료 출력 단위도 4-byte와 8-byte 중에 하나를 선택할 수 있다. Fig. 3은 SAR focusing 과정이 끝나서 처리된 4-look amplitude 영상을 지리적으로 보정하여 보여주고 있다.

3. 토론

eSAR Processor는 SAR focusing에 사용되는 다양한 변수들을 바꾸어서 처리해 보는 실험이 가능하고, 또한 원시 프로그램(source code)이 함께 제공되기 때문에 학생들로 하여금 SAR의 원리를 익히고 이 프로그램 자체를 변형 및 발전할 수 있는 여지를 남기고 있다. 또한, 이 프로그램은 어떤 특정한 인공위성 SAR 자료에만 국한되지 않고, 기본 변수 값들을 결정하여 입력해주면 처리가 가능한 형식이기 때문에, SAR의 원리를 이해한다면 어떠한 종류의 자료도 처리가 가능한 프로그램이다. 더욱이, 전체 데이터에서 일부분만을 추출하여 선택적으로 처리할 수 있도록 설계되어 있어서, 컴퓨터의 메모리, 저장장치의 공간, 프로세싱 시간

등을 교육 여건에 맞게 조절할 수 있다. 이는 보통 컴퓨터 자원이 한정되어있는 학교의 교육 실습용 공동 컴퓨터들을 활용하는데 매우 효율적인 방안이 된다.

Range-Doppler 알고리즘을 이용하여 SAR focusing 하는데 소요되는 자료 처리 시간은, 대부분 2차원 자료 공간에 대한 range, azimuth 방향으로 각각 두 번에 걸친 1차원적인 순방향, 역방향 FFT가 주로 차지한다. SAR focusing에 필요한 컴퓨터 메모리는, 영상의 픽셀 크기가 가로, 세로 방향으로 각각 nrow, ncol 일 때 $nrow \times ncol \times 16$ byte (double precision 기준, single precision을 사용할 경우 16대신 8을 곱함)이다. 예를 들어, 현재 존재하는 대부분의 인공위성 SAR 시스템에서 자료처리에 필요한 최소한의 영상 크기라고 할 수 있는 1024×4096 크기의 부분 영상은 약 70Mbyte의 메모리와 이와 비슷한 크기의 하드디스크 저장 공간이 최종 자료 처리 결과를 내는데 필요하며, 이는 펜티엄-3 700MHz CPU에서도 수 분 이내에 처리가 끝나기 때문에, 강의시간에 학생 개개인이 실시간으로 실습이 가능하다.

eSAR 프로그램과 샘플 자료 및 자세한 사용안내는 강원대학교 지구물리학과 홈페이지의 일부인 아래의 인터넷 주소에서 받을 수 있다.

<http://www.kangwon.ac.kr/~geophy/geoinfo/index.htm>

앞으로 이 프로그램의 사용이 활성화 되면 사용자 포럼을 인터넷상에 만들어서 상호 정보 교류, 업그레이드 방안 등을 논의할 계획이다. eSAR Processor는 현재까지 SAR focusing까지만 공개되어 있는 상태이다. 앞으로 SAR 간섭 기법을 구현할 수 있는 교육용 프로그램 (einsar) 또한 공개할 예정이다. 그리고 GUI 환경을 구축하여 사용자들이 보다 쉽게 접근하도록 노력할 계획이다.

4. 결 론

필자는 이 논문을 통하여 교육용 SAR 처리 소프트웨어인 eSAR Processor의 개발과 그 공개 활용 방안을 제안하면서, 앞으로 대학 및 대학원을 비롯한 각종 교육 기관에서 인공위성 SAR에 관계되는 강좌가 많이 개설되어 교육할 때 도움이 되기를 바란다. 아직 eSAR Processor는 개발의 초기 단계에 있고 교육용이라는 목적으로 개발되었기 때문에, 자동으로 모든 것을 행하는 프로그램이 아니며 사용자는 SAR의 원리를 공부하고 eSAR Processor의 원시프로그램을 읽고 처리과정을 이해하는 정도의 노력이 요구된다. 앞으로 관심 있는 분들과의 상호 교류를 통하여 이 프로그램을 지속적으로 발전시켜 나갈 수 있기를 기대한다.

사 사

이 연구는 2004년도 강원대학교 학술연구조성비의 지원을 받았다. ERS-1 원시 자료는 유럽우주국(ESA)의 AO3-113 프로그램에 의해 제공받았다.

참고문헌

- 국가과학기술위원회, 2000. 우주개발중장기기본계획 수정안.
- Curlander, J. C. and R. N. McDonough, 1991. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc.
- Press, W. H., 1993. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed., Cambridge.
- Brigham, E. O., 1988. *The Fast Fourier Transform and its Applications*, Prentice-Hall, Inc.