技術論文 DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.2.183

RMA를 이용한 Spotlight SAR 영상형성 및 품질평가를 위한 시뮬레이터 개발 및 구현

곽준영*

Development and application of simulator for spotlight SAR image formation and quality assesment using RMA

Jun-Young Kwak*

ABSTRACT

Synthetic aperture radar (SAR) is widely used because of high resolution imaging capability in all weather and day/night condition. In this paper development of Spotlight SAR simulator is proposed for image quality analysis. Proposed SAR simulator is based on the SAR system design parameters so that SAR image performance can be expected which is essential throughout the full system development procedure from the initial concept design stage to the final in-flight calibration and validation stage. The raw data of ideal point target is first generated by taking account of the flight and imaging geometry and the various SAR system design parameters, and the Spotlight image formation algorithm is implemented in order to obtain the point target response. Finally the image quality of the generated raw data is analyzed in terms of spatial resolution, peak to sidelobe ratio and integrated sidelobe ratio.

초 록

합성 개구면 레이다(SAR: synthetic aperture radar)는 날씨 및 주/야간에 관계없이 고해상도의 영상을 형성할 수 있기 때문에 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 논문에서는 영상 형상 및 품질 평가, 분석을 위한 Spotlight SAR 시뮬레이터를 제안한다. SAR 영상 품질의 예측은 초기 개념 설계 단계부터 최종적인 비행 검증 및 보정 단계에 걸쳐 필수적이다. 제안된 SAR 시뮬레이터는 시스템 설계 변수들에 기반을 두고 있어 전체 시스템 개발과정에서 SAR 영상의 품질을 예측 분석할 수 있다. 이를 위해 영상 획득 기하구조와 다양한 SAR 시스템 설계변수들을 고려하여 이상적인 점표적에 대한 시뮬레이션 원시 데이터를 생성하고 Spotlight 영상 형성 알고리듬을 구현함으로서 점표적 응답특성을 추정한다. 마지막으로 공간 해상도, 최대 부엽 수준, 누적 부엽 수준 등의 주요 품질변수들을 중심으로 생성된 원시 데이터의 영상 품질을 분석한다.

Key Words : SAR(Synthetic Aperture Radar), Spotlight Mode, RMA(Range Migration Algorithm;거리천이 알고리즘), Spatial Resolution(공간해상도), PSLR(Peak to Sidelobe Ratio), ISLR(Integrated Sidelobe Ratio)

† 2010년 10월 20일 접수 ~ 2011년 1월 31일 심사완료

* 정회원, 국방기술품질원 유도감시통신 연구부
교신저자, E-mail : jykwak@paran.com
서울시 용산구 용산동 2가 2-15번지

Ⅰ. 서 론

합성 개구면 레이다(SAR: Synthetic Aperture Radar)는 마이크로파대의 전자파를 이용하여 지표면 표적의 고해상도 영상 이미지를 얻는 발전된 형태의 레이다 기술로서, 단일 센서만을 이용하더라도 전자빔 조향기술 등을 이용하여 저해상도에서 고해상도까지의 영상획득 및 관측폭을 가변시킴으로서 다양한 영상획득이 가능하여 센서의 활용성이 높다. 뿐만 아니라, 기상조건이나 주·야에 관계없이 고해상도 영상 이미지를 제공해 줄 수 있으므로 항공운항, 관제, 지구 및 우주탐사, 기상 관측 등의 민수용뿐 아니라 조기경보, 도시방어, 미사일 유도 등 군사적 목적으로도 그 필요성이 날로 증대되고 있다[1-2]. 기술 선진국을 중심으로 이미 많은 연구가 이루어져 왔으나 그 구체적 기술 노하우에 관해서는 아직 공개되고 있지 않으며 저널에 나와 있는 논문에서도 상세한 서술은 기피하고 있는 실정이다. SAR는 일반적인 광학 영상과 달리 복잡한 영상 형성 과정을 거쳐서 2차원 고해상도 영상을 얻기 때문에 시스템 설계 변수가 직접적으로 SAR영상의 품질에 영향을 미칠 수 있다. 즉 영상품질은 지정된 값에 의해 생기는게 아니며, 시스템 및 부시스템의 규격, 시스템 파라미터의 설계 교환, 에러 할당 및 수행 규격을 통해서 요구되는 것이므로 [3,4,5,9-10] SAR시스템 설계 및 운용 변수가 SAR의 영상 품질에 미치는 영향을 분석하여 SAR 시스템 성능을 평가할 수 있는 자동화된 시뮬레이션 툴이 필요하다[6]. 최근까지 고해상도 영상획득이 가능한 Spotlight SAR 동작 모드에서 영상형성을 위해 다양한 영상형성 알고리즘들이 개발되고 있으며, 이중 Polar Format Algorithm (PFA), Chirp Scailing Algorithm (CSA), Range Migration Algorithm(RMA)이 대표적인 알고리즘이지만 PFA가 타 알고리즘에 비해 구현이 용이하고, 스퀸트 모드(Squint mode)에 적용 가능한 반면 RMA는 고해상도 영상 복원이 가능하고, PFA에 비해 상대적으로 짧은 처리 시간을 가지는 장점을 가지고 있다. 그러나, 본 논문에서는 PFA를 사용하는 방법이 두개의 보간기법(interpolation)등에 의해 연산처리가 복잡하고, 근사화 방법에 의해 영상의 질이 떨어지므로, 영상형성이 가능한 RMA를 기반으로 하는 방법을 제시하여 SAR의 신호처리영상에 대한 품질평가를 결과로 제시 하고자 한다.

Ⅱ. 영상신호 시스템 형성모델

2.1 원시신호 형성 모델

스팟모드(Spotlight-mode) SAR 영상화 시스템의 특별한 특징은 길이 2L의 스팟모드 SAR 시스템이 같은 길이를 가지는 물리적인 안테나 길이의 레이다 시스템과 거의 유사한 역할을 한다. 그러므로 스팟모드 SAR는 2L의 직경을 가지는 물리적 안테나 개구면의 해상도 특성과 같다.

스팟라이트 모드 SAR는 레이다의 안테나를 기계적으로 또는 전자적으로 빔을 조향하여 레이다가 정해진 비행경로를 따라서 이동함에 따라 일정한 목표물 영역에 빔을 조사하도록 하는 고해상도 SAR 영상화모델이다. 초기 Range-Doppler 알고리즘은 본질적으로 빔이 고정된 영상획득 모드인스트립맵 모드(Stripmap mode) SAR 시스템을 위해 도입되었으나[7-8], SAR 시스템의 성능 예측 및 운용 단계에서 일어날 수 있는 시스템 성능 저하 요인을 분석하기 위한 적절한 기법과 검증 툴의 적용을 위해서는 Spotlight mode SAR의 영상화에는 적합하지 못하다.

Fig. 1은 스팟라이트 모드 SAR 영상 시스템의 신호 획득 기하구조를 나타낸다. SAR는 거리(Range), 방위(Cross-range), 고도(Altitude)의 다차원(x, y, z)으로 이루어진 공간영역에서 전자파 송신 신호에 대한 표적의 반사함수를 얻어내는 과정이다.

송신신호는 충분한 SNR을 유지하기 위해 수신시에 펄스 압축 기법을 통하여 높은 해상도의 성능 유지가 가능하여야 한다. 따라서 넓은 펄스폭과 충분한 주파수 대역폭을 가지는 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 사용한다. 첩변조율 γ, 2차 펄스 주기 T ,중심주파수 f_c 및 송신 펄스 크기 $A(t)$를 가진 선형 FM 첩 신호를 사용하는 $s_t(n,t)$ 송신 펄스는 다음 식(1)과 같이 표현 할 수 있다[3].

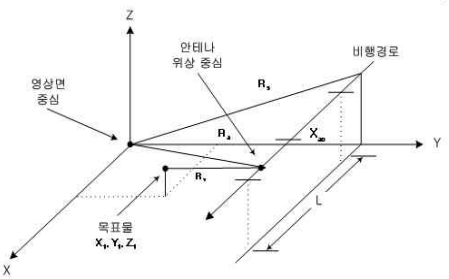


Fig. 1. SAR data collection and imaging geometry structure

$$s_t(n,t) = A(t)\cos[2\pi f_c t + \pi\gamma(t-nT)^2] \quad (1)$$

데이터 획득 과정은 Fig. 1에서와 같이 비행경로 상에서 지속적으로 펄스를 송신하고 점표적 위치 (X_t, Y_t, Z_t)로부터 이동 경로에 따른 반사 신호를 수신하며, 전송된 펄스의 복제신호(Replica)인 기준신호를 이용하여 압축된 신호로 복조한다. 따라서 점표적에 대한 수신신호는 식(2)와 같이 표현할 수 있다[3].

$$s_r(n,t) = a_t rect\left(\frac{\hat{t}-2R_t/c}{T_p}\right)e^{j2\pi f_c\left(t-\frac{2R_t}{c}\right)e^{j\pi\gamma\left(\hat{t}-\frac{2R_t}{c}\right)^2}} \quad (2)$$

송신신호의 프로세서가 가지고 있던 고유의 기준신호를 식(3)이라 할 때

$$s_{ref}(n,t) = e^{j[2\pi f_c(t-\frac{2R_o}{c})+\pi\gamma(\hat{t}-\frac{2R_o}{c})^2]} \quad (3)$$

수신신호에 기준신호를 곱해주면 중간 주파수 신호식(4)가 생성된다.

$$s_{if}(X_a,\hat{t}) = a_t rect\left(\frac{X_a-X_{ac}}{L}\right)rect\left(\frac{\hat{t}-2R_s/c}{T_p}\right)e^{j\Phi_{if}(X_a\hat{t})} \quad (4)$$

이때, 영상 형성을 위한 위상 Φ_{if}는 다음식(5)와 같다.

$$\Phi_{if}(X_a,\hat{t}) = -\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{f_c}{\gamma}+\hat{t}-\frac{2R_o}{c}\right)(R_t-R_a)+\frac{4\pi\gamma}{c^2}(R_t-R_s)^2 \quad (5)$$

여기에서 T_p 는 전송펄스길이, c 는 마이크로파 에너지 진행속도, f_c 는 중심 전송주파수, γ 는 첩 변조율, a_t는 점표적의 레이다 반사면적 δ_t 의 제곱근이다. 또한 $\hat{t} = t - nT$ (T는 주기)로 정의한다.

식(5)는 요동보상을 위한 SAR 신호의 표현식으로서 위상부분에 들어있는 2차 성분은 선 보상(compensation to a line)의 특성을 가진 기준신호를 사용하는 RMA에 있어서 불필요한 성분인 RVP(Residual Video Phase)이며, 문제를 복잡하게 만드는 역할을 하므로 거리보정(Range deskew)의 전처리 단계를 통하여 RVP를 제거해야하며, RMA의 수행전 선행되어야한다. 따라서 거리보정을 위한 시간지연 $t_d = f/\gamma$ 라 할 때, 순시주파수 $f = \frac{1}{2\pi}\frac{d\Phi}{dt}$는 시간 미분으로 얻을 수 있으며 다음과 같이 정리된다.

$$f = -\frac{2\gamma}{c}R_\Delta(1-\frac{2}{c}\frac{dR_\Delta}{dt}) - \frac{2\gamma}{c}(\hat{t}-\frac{2R_s}{c}+\frac{f_c}{\gamma})\frac{dR_\Delta}{dt} \quad (6)$$

단, $R_\Delta = R_t - R_s$이므로 순시주파수는 아래와 같이 근사화된다.

$$f \approx \frac{2\gamma}{c}R_\Delta \quad (7)$$

따라서 시간지연 $t_d = f/\gamma$을 갖는 위상성분은 $\Phi_{rd} = \Phi - \pi f^2/\gamma$ 이므로 다음과 같이 정리된다.

$$s_{rd}(X_a,\hat{t}) = a_t rect\left(\frac{X_a-X_{ac}}{L}\right)rect\left(\frac{\hat{t}-2R_s/c}{T_p}\right)e^{j\Phi_{rd}(X_a\hat{t})} \quad (8)$$

또한 식(8)에서 위상 표현식은 다음과 같다.

$$\Phi_{rd}(X_a,\hat{t}) = -\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{f_c}{\gamma}+\hat{t}-\frac{2R_s}{c}\right)(R_t-R_s) \quad (9)$$

식(8)의 두 번째 크기함수를 살펴보면 $\hat{t}$는 거리보정에 따른 이동신호이며, 어느 점표적에서의 거리 R_s 에서 동시에 발생되어 반사되는 점이다. 최종적으로 얻게되는 기저대역 수신신호의 크기와 위상은 식(8)과 식(9)로 표현되며 이는 RMA를 수행하게 될 기본식이 된다.

2.2 RMA 처리과정

스팟라이트 모드의 SAR 영상형성 신호처리 알고리듬인 RMA의 간략한 데이터 처리 흐름도는 Fig. 2와 같은 과정을 거쳐 수행된다.

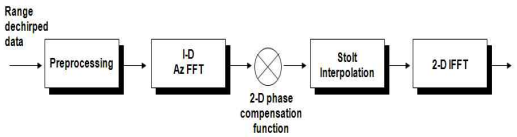


Fig. 2. Block diagram of RMA

2.2.1 전처리(Preprocessing) 단계

RMA의 수행전 선행단계로서 플랫폼의 이동시 표적의 경사각 거리에 대한 요동보상 및 거리방향에 대한 기하학 거리보정을 하며, 이의 목적은 잔존 비디오 위상을 제거하기 위해서이다. 식(9)를 이용한 거리보정은 시간지연 $\hat{t}$에 수신 신호를 이동시켜 보정을 하며, 요동보상은 표적 (X_t, Y_t, Z_t)과 비행체(X_a, Y_a, Z_a)의 거리인 R_t는 다음과 같이 정의한다.

$$R_t = \sqrt{(X_a-X_t)^2+(Y_a-Y_t)^2+(Z_a-Z_t)^2} \quad (10)$$

식(9)에서 표적과 비행체의 거리인 R_t와 표적과 원점사이의 거리 $r_t = \sqrt{(X_t)^2+(Y_t)^2+(Z_t)^2}$ 의 관계를 이용하여 요동보상을 한다. 이 경우 2차원이 아닌 움직임에 대한 보상은 적용되지 않으며, 신호위상 ϕ는 영상면의 중심점 대신에 중심선에 대한 보상을 하는데, 이유는 근사값 없이

wavenumber 투영도면에서 촛점을 쉽게 만들기 때문이다. 이 과정은 신호 궤적에서의 거리 압축, 방위 첩신호의 제거 이전에 행해져야한다.

2.2.2 1D Along-Track FFT 단계

RMA는 Along-Track을 따라서 방위방향으로 FFT를 수행하는데, 영상 형성 프로세서는 신호궤적으로부터 거리압축 및 방위방향의 첩 제거 이전에 이 변환을 수행한다.

Fig. 3의 투영도에서 RMA는 비행경로인 신호궤적이 K_XK_Y 경사면에 투영되므로, 영상표시면은 K_XK_Y 경사면이 데이터 수집면이다. 이때 $K_x = K_X$ 이고 K_R 은 공통 성분으로 다음과 같이 표현된다.

$$K_R = \frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{f_c}{\gamma} + \hat{t} - \frac{2R_s}{c}\right) \tag{11}$$

이때 $\hat{t} = t - nT - \frac{2R_s}{c} = \hat{t} - \frac{2R_s}{c}$ 이다.

이를 식(8)과 식(9)에 대입 전개하면 다음과 같이 정리된다.

$$s_{rd}(X_a, K_R) = a_t rect\left(\frac{X_a - X_{ac}}{L}\right) rect\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) e^{-jK_R(R_t - R_s)} \tag{12}$$

X_a에 대해 FFT 정의식은 다음과 같다.

$$S(K_X, K_R) = \int s_{rd}(X_a, K_R) e^{-jK_X X_a} dX_a \tag{13}$$

식(12)를 대입 전개하여 변환식을 정리하면 다음과 같이 표현식을 얻을 수 있다.

$$S(K_X, K_R) = \alpha \int rect\left(\frac{X_a - X_{ac}}{L}\right) e^{-jK_R R_t} e^{-jK_X X_a} dX_a \tag{14}$$

또한 식(14)의 스케일부분은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = a_t rec(\frac{\hat{t}}{T_p}) e^{jK_R R_s} \tag{15}$$

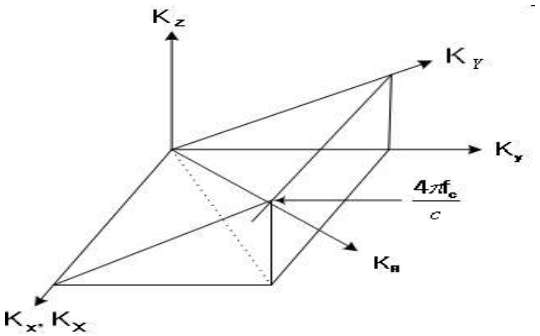


Fig. 3. RMA perspective

여기에서 T_p는 첩 지속시간이며, 위상성분 $\Phi(X_a, K_R) = -K_R R_t - K_X X_a$이 된다. Fig. 1로부터 $R_t = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + R_B^2}$, $R_B = \sqrt{(Y_a - Y_t)^2 + (Z_a - {}_t)^2}$ 이다. Y_a 와 Z_a 는 각각 상수이며, R_B는 $X_a = X_t$ 일 때 스캐터까지의 최소거리, K_X는 방위 공간 주파수이다. 식(14)의 적분값을 계산하기 위해 PSP(Principle of stationary phase)를 적용하여 근사화하면, 식(13)과 같은 방위방향의 FFT 형식이 된다[3].

$$S(K_X, K_R) = |S(K_X, K_R)| e^{-j\Phi(K_X, K_R)} \tag{16}$$

2.2.3 정합필터(Matched Filtering) 단계

방위방향 변환 신호의 2차원 위상보상에 적용하며, 영상면 중심부에서 같은 거리에 있는 모든 스캐터의 거리 굴곡을 방위 주파수 영역 K_X에서 완전히 보상하는 단계이며 정합필터는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{mf}(K_X, K_R) = -K_R R_s + R_s \sqrt{K_R^2 - K_X^2} \tag{17}$$

거리-도플러 도메인의 수신신호 식(16)은 이차원 정합필터 식(17)을 적용하여 다음과 같이 정리되며 이때 크기성분 $|S(K_X, K_R)|$은 바뀌지 않는다.

$$S_2(K_X, K_R) = |S(K_X, K_R)| e^{-j\left[K_X K_t + (R_B - R_s)\sqrt{K_R^2 - K_X^2}\right]} \tag{18}$$

2.2.4 Stolt Interpolation 단계

모든 스캐터들은 동일한 R_B를 가지기 때문에 영상면 중심에서에 대하여 수신신호 $S(K_X, K_R)$는 동일 거리선상에 있는 모든 스캐터에 대해 2차원의 선형 위상 격자를 가지며 Stolt 보간을 적용하기 위해 $\sqrt{K_R^2 - K_X^2} \Rightarrow K_Y$ 이라 하면 Stolt 보간 적용 후 최종 수식은 다음과 같이 얻어진다.

$$S_3(K_X, K_Y) = |S(K_X, K_R| e^{-j[K_X K_t + K_Y (R_B - R_s)]} \tag{19}$$

2.2.5 2D- IFFT 단계

최종적으로 핵심요소인 $e^{j[K_X K_a + K_y K_s}$를 포함하는 2차원 역 FFT변환을 통하여 거리-방위 방향으로의 압축된 영상신호를 얻을 수 있으며, 주 임펄스 응답 특성을 고려하여 이 과정에서 개구 가중치 기술들을 이 단계에서 적용한다.

III. 스팟모드 SAR 시뮬레이터 설계

3.1 시뮬레이터 설계

시뮬레이터 구성은 Fig. 4와 같이 RMA를 바

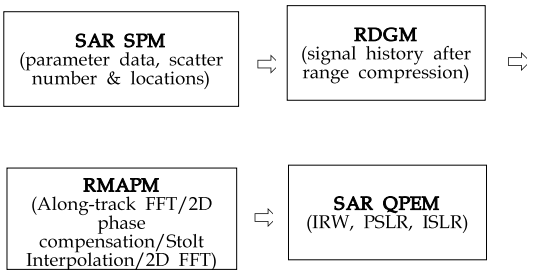


Fig. 4. Block diagram of simulator

탕으로한 순서도를 Matlab GUI 기반하의 시뮬레이터 최적화를 통한 처리속도 향상 및 목적에 따라 처리방법의 선택 및 유연성을 확보 할 수 있도록 모듈별로 구성하였다.

따라서 시뮬레이터의 구성은 시스템 파라미터 입력 및 수정모듈(SPM: System Parameter Module), 원시 신호형성 모듈(RDGM: Raw Data Generation Module), RMA 처리모듈(RMAPM: Range Migration Algorithm Process Module), 영상 품질분석 모듈(QPEM: Quality Performance Evaluation Module) 등 네 개의 중요모듈로 구성하였다.

첫 번째 단계인 SPM은 원시 데이타를 생성하기 위해 기본이 되는 시스템 파라미터 입력모듈로서 주로 영상 형성에 영향을 미치는 기하구조, 거리 및 방위 해상도와 관련된 파라미터를 입력변수로 사용하며, 입력화면을 통해 파라미터 변수를 변화시켜 입력하여 해상도 변화 및 시스템에 영향 여부에 대해 분석이 가능토록 구성하였으며, 두 번째 단계인 RDGM은 이를 기반으로 주어진 기하구조를 이용하여 원시신호를 형성하는 일련의 과정으로서, 기하구조에 대한 수신 신호의 모델을 정립하고, 이를 기반으로 탑재체 파라미터와 시스템 파라미터를 이용한 모의 원시신호를 생성하기 위한 전처리 과정의 모듈이다. 세 번째 단계인 RMAPM은 알고리즘의 흐름도에 따른 전처리과정 결과, 1차 방위 퓨리어 변환, 정합필터인 방위 변환신호에 대한 2차 위상보상, 기공보간 및 2차 역 퓨리어 변환 단계로 구성된 RMA를 수행하여 영상을 형성하는 과정이다.

마지막 단계로서 QPEM은 영상 품질분석 모듈로서 임펄스 응답 특성을 이용해서 3dB 빔 폭, PSLR 등의 영상 품질에 대한 성능을 분석할 수 있다. 3 dB 빔 폭은 임펄스 응답의 주엽 최대치에서 3 dB 떨어진 위치의 주엽 폭을 측정한 값으로 영상의 해상도를 나타내며, PSLR은 임펄스 응답의 주엽 최대치에서 부엽 최대치까지의 비율로서 영상의 명암을 나타낸다. 또한 영상품질분석을 위한 거리 및 방위에 대한 IRW와 PSLR 기능 등을 그래프로 표현하여 정량적 판단이 가능토록 하였으며, 설계된 시스템의 검증과정을 거치도록 하여 신뢰성을 높이도록 구성하였다.

제안된 시뮬레이터는 원시 영상 데이터를 생성하는 과정에서 다양한 설계 파라미터를 입력할 수 있기 때문에 파라미터의 변화에 따른 영향 분석이 용이하다. 시뮬레이터는 각 단계별로 구현되는 과정의 결과를 직접적으로 확인 가능토록 구성하여 각 단계별 진행상황 및 중간과정에서의 오류 유·무 혹은 Trade-off 사항을 중간에 점검할 수 있도록 설계 구현하였다. 또한 개발된 시뮬레이터는 Matlab 코드를 이용하여 구현하였으며, 파라미터 입력은 GUI를 이용하여 출력 및 각 모듈별 동작 결과를 확인하고 분석하기에 용이하도록 구현하였다.

Ⅳ. 스팟모드 SAR 시뮬레이터 구현

4.1 설계 파라미터 입력 모듈

SAR 시스템 설계 파라미터는 주로 SAR 영상형성에 영향을 미치는 기하구조와 거리 및 방위 해상도와 관련된 파라미터를 입력변수로 사용한다. 특히, 원시 신호 형성 모듈에서는 SAR 기하

Table 1. Design parameter for SAR image formation table

기호	내 용	값
Δ_x	Along-track sampling spacing	0.6m
T_p	Pulse length	4μs
W_r	Range scene size	575.3m
W_a	Azimuth scene size	442.9m
f_c	Radar center frequency	242.4MHz
γ	Chirp rate	33.375MHz/μs
B	Processed bandwidth	131.5MHz
F_s	Complex sampling rate	128MHz
ρ_r	Range resolution	1.0m
ρ_a	Azimuth resolution	1.0m
K_r	Range mainlobe-broadening factor	0.89
K_a	Azimuth mainlobe-broadening factor	0.89
R_s	Broadside slant range to scene center	1000m
L	Synthetic aperture length	760.8m
$\Delta\Theta$	Coherent processing angle interval	41.6deg

학적인 구조에 대한 수신 신호의 모델을 정립하고, 이를 기반으로 SAR 탑재체 파라미터와 SAR 시스템 파라미터를 이용하여 파라미터에 따른 모의 원시 신호를 생성한다. 영상을 형성하는 과정에서 SAR 설계 파라미터를 이용하기 때문에 파라미터의 변화에 따른 영향 분석이 용이하다. Table 1. 에는 영상 형성을 위한 SAR 설계 파라미터의 예를 인용하였다[3].

생성된 모의 원시 신호는 거리 및 방위에 따른 2 차원 신호로서 표적의 종류와 갯수, 위치의 조정이 가능하며, SAR 시스템 파라미터 조정에 따른 영향이 반영되도록 설계되었다. 시뮬레이션을 위한 파라미터는 항공기용과 위성용 SAR 시스템 파라미터를 사용할 수 있으며, 사용자의 환경에 맞게 각 파라미터를 조정할 수 있다. 그리고 모의 신호는 요동보상, 거리보정 및 방위 압축 모듈의 영상 형성과정을 통해 점표적에 대한 응답 영상을 얻을 수 있으며, 형성된 점표적의 응답 특성을 통하여 파라미터 변화에 따라 영상에 나타나는 영향을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 시뮬레이터의 실행 화면의 구성도이며, 점표적 생성부터 최종 영상의 품질평가까지의 모든 시뮬레이터가 구현되어 결과를 확인할 수 있는 메인 화면이며, Fig. 6은 원시 데이타를 생성하기 위한 시스템 입력 파라미터의 화면으로서, 처음 기준 데이터를 설정, 변경할 수 있는 데이터 입력용 화면 구성도이다. 초기값은 Table 1 의 값으로 설정되어 있으며, 비행조건, 변경을 요하는 파라메터 등 의 변경에 대한 수정 및 변경이 가능하다.

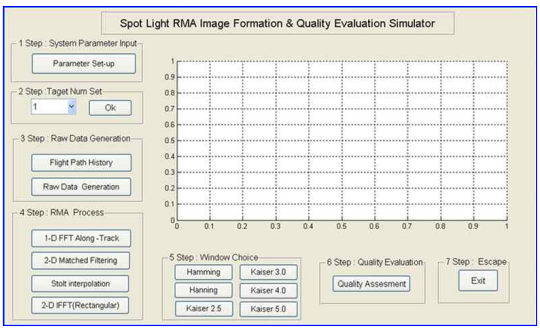


Fig. 5. Simulator main screen

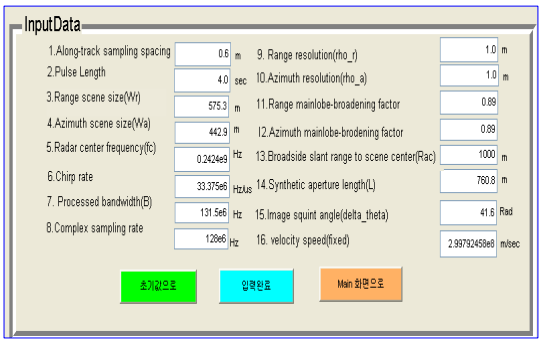


Fig. 6. Parameter input and edit screen

4.2 원시신호 생성모듈

RMA의 수행 전 선행단계로서 플랫폼의 이동시 목표 표적의 경사각 거리에 대한 요동보상 및 거리방향에 대해 RVP를 제거하기 위해 기하학 거리보정을 한다. Fig. 7은 점표적에 대한 비행경로 궤적을 표시하며, 요동보상 경로 및 크기를 나타내는데 3점 점표적의 경우, 요동보상은 A 타겟의 경우 약 70M, B 타겟의 경우 약 150M, C 타겟의 경우 약 60M의 요동보상이 되었음을 알수 있다. Fig. 8은 RMA 실행전 원시 클러터 데이터를 2차 함수로 표현한 그래프로서 모의 원시데이터의 크기를 보여준다.

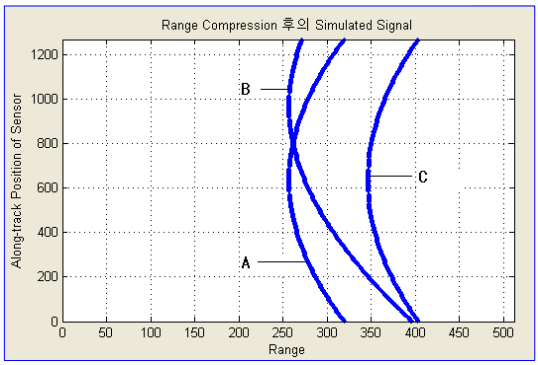


Fig. 7. Flight path history for 3 point target

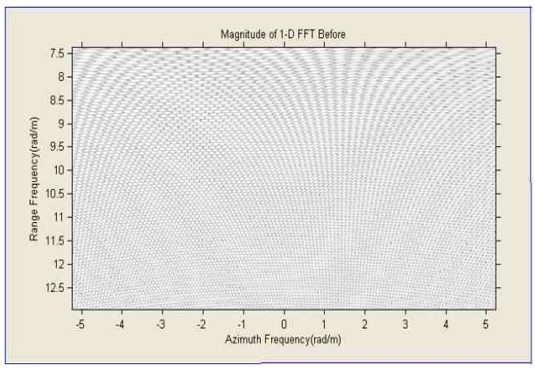


Fig. 8. Generated RAW signal for 3 point target

4.3 RMA 처리모듈

RMA 처리 모듈은 생성된 모의 SAR 신호에 대하여 4단계의 처리과정을 거치며 각 단계별 상세설명은 아래와 같다.

4.3.1 1D Along-Track FFT 단계

방위방향에서 FFT의 실행단계로서 IFP(Intermediate Formation Processor)는 신호궤적으로부터 거리 압축 및 방위방향의 첩(chirp) 제거 이전에 이 변환을 수행한다. Fig. 9에서 수직축은 거리공간 주파수이며, Dechirp된 SAR 신호의 거리 공간 주파수는 $4\pi/c$ 크기의 RF 주파수이다. 크기는 단위 길이당 라디안이며, K_R로 표시하고, 값은 최소범위 $4\pi(f_c - B/2)/c$에서 최대범위 $4\pi(f_c + B/2)/c$까지 변하며, B 는 전송 밴드폭이다. 수평축은 방위 공간주파수이며, 단위 길이당의 라디안으로서 음의 도플러 주파수이다. 방위 공간주파수는 K_X 로 표시하고, 방위 방향 FFT의 출력신호 데이터 값은 π/Δ_x에서 $-\pi/\Delta_x$ 로 변하는 K_X 이며, Δ_X는 단위 거리에 대한 맥동 2차 펄스 샘플링 간격이다.

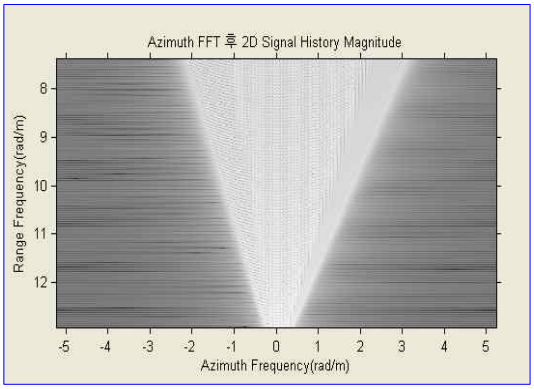


Fig. 9. Raw data graph after 1D Along-track FFT

4.3.2 정합필터(Matched Filtering) 단계

고정경사각 R_s상의 모든 스캐터에 대해 거리 변환 수정 및 방위 변환 신호의 2차원 위상보상을 위한 단계이다. 방위 주파수 영역으로의 전환은 곱셈 연산과 FFT에 의해 간편하게 행해지며, 영상면 중심부와 같은 거리방향에 있는 모든 스캐터들의 거리 굴곡을 완벽하게 수정하고, 다른 거리방향에 있는 스캐터들에 대해서는 부분적으로 보상을 한다. Fig. 10은 정합필터의 위상 크기를 표현한 결과 그래프이다.

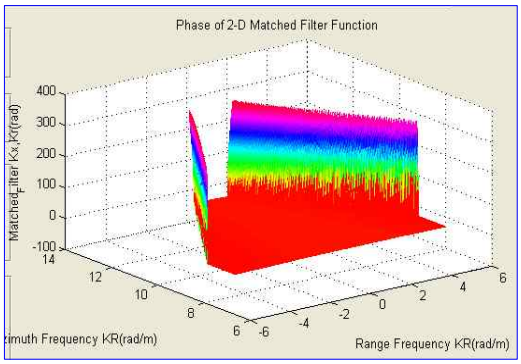


Fig. 10. Phase of 2-D matched filtering

4.3.3 Stolt Interpolation 단계

기공보간은 X 축 상의 데이터 재배치에 의해 거리방향의 굴곡 제거를 위한 RMA의 3번째 단계로서, SAR 신호데이터의 적절한 포장에 의해 모든 스캐터들의 거리굴곡을 동시에 보상한다. 즉, (K_X, K_R)영역에 있는 점 스캐터 신호는 K_R 축 상에서 사인함수이므로 특정 스캐터의 사인함수 주파수는 K_X로 바뀌어 주파수를 낮추는 효과를 이용하여 수정량 만큼 K_X내의 잔존 거리 굴곡들을 보상하며, 영상면 중심에서 동일한 거리에 있는 모든 스캐터는 새로운 영역을 위해 1차 배열을 수행하고 새로운 Stolt 식으로 변환된다.

Fig. 11은 거리 방향에서의 Stolt interpolation 수행 결과이며, Along-track 위치가 다르므로, Map은 같은 원호의 다른 구획내에 있음을 볼 수 있다.

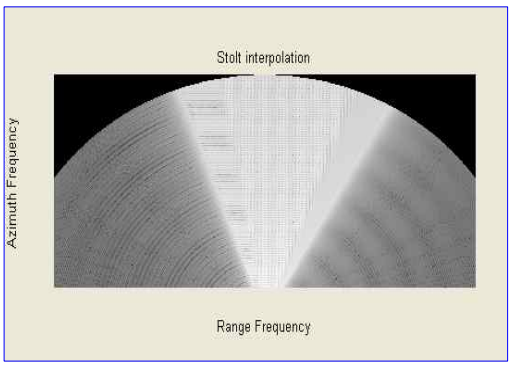


Fig. 11. Result after stolt interpolation

4.3.4 2-D IFFT 단계

RMA에 있어서, 모든 점의 스캐터들은 2차 선형위상 격자구조를 갖는데, 2차 역 트랜스변환은 거리 및 방위에서의 스캐터를 완전히 압축하기

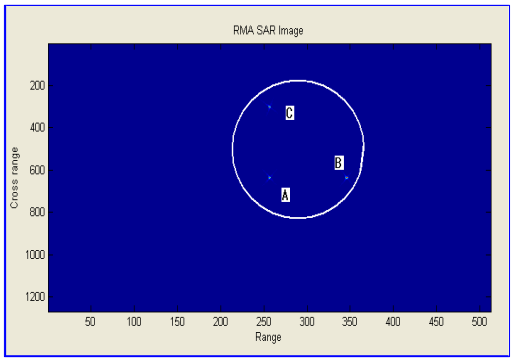


Fig. 12. Image formation after RMA signal process

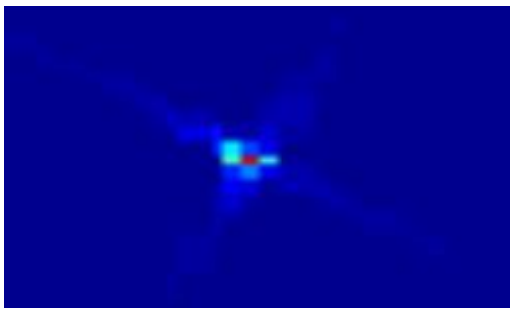


Fig. 13. Detail for target C

위해 계산된다. 불연속 데이터를 위한 이러한 변환은 일차 방위방향의 FFT후 거리방향 FFT를 처음 수행한 FFT를 경유하여 계산하는데, 개구 가중치 기술은 임펄스 응답 부엽을 조정하기 위해 이곳에 적용한다. 즉, 1차로 기공보간 데이터의 거리압축 및 개구 가중치, 2차로 방위 압축 및 개구 가중치 수행후 부엽의 불규칙면을 피하는 직사각형의 개구 처리를 적용한다.

Fig. 12는 RMA의 4단계인 2차 영상형성을 위한 역 퓨리어 변환 수행후 최종 영상이 형성된 결과 및 Fig. 13은 점표적 C의 상세도이다.

4.4 품질평가 모듈 구현

Fig. 14는 품질평가 단계 모듈인 품질평가 종합정보 실행결과(Fig. 15 및 Fig. 16은 상세도)를 표시한다. 영상 품질 분석 모듈에서의 임펄스 응답 특성은 주엽 최대치 아래에서 3 dB 떨어진 위치의 주엽 폭을 측정한 값으로 영상의 해상도를 나타내며, PSLR은 임펄스 응답의 주엽 최대치에서 부엽 최대치까지의 비율로서 영상의 명암을 나타낸다.

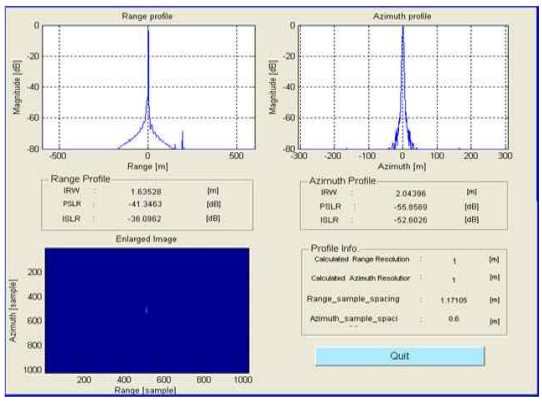


Fig. 14. Total information for quality assessment

ISLR은 부엽레벨이 균일하지 않을 경우 PSLR만으로 성능을 평가하기에는 부족할 때 적절한 구간의 임펄스 응답의 파워를 누적한 값이며, 시스템 임펄스 응답에서 주엽 에너지에 대한 모든 부엽 에너지의 비율이다. 또한 시스템의 계산된 최종 거리 및 방위 해상도 및 거리, 방위방향의 샘플링 간격를 표시하여 PRF를 환산할 수 있도록 하였다.

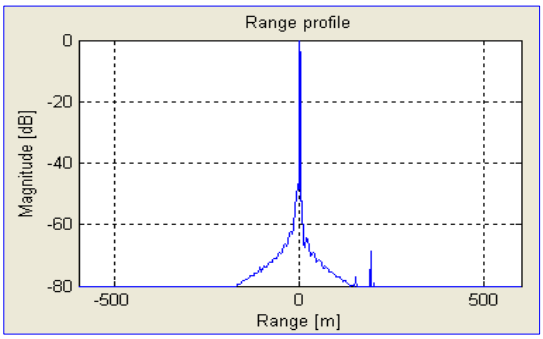


Fig. 15. Range IRF profile

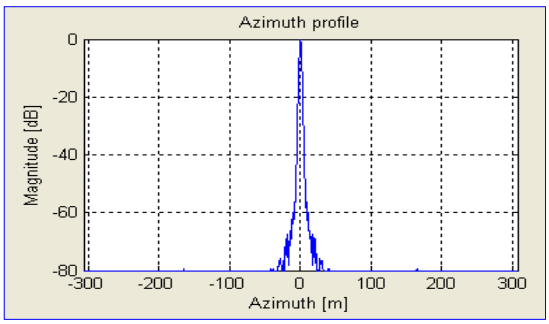


Fig. 16. Azimuth IRF profile

4.5 시뮬레이터 성능검증

SAR 시스템을 확인하는 최선의 방법은 시스템에 의해 만들어지는 실제적인 영상을 측정하여 입증하는 것이다. 영상 품질 분석은 임펄스 응답 특성을 이용하여 영상 품질의 주요 속성인 스캐터들의 검출, 공간 분해성, 관련 위치 정확성, 스캐터 RCS간의 관계 및 영상 강도에 관련된 해상도, 피크 사이드로브 레벨, MNR(multiplicative noise ratio), 추가 잡음 σ_n의 등가 후방산란 계수와 기하왜곡을 평가하여야 한다. 그러나 본 논문의 경우 개발한 시뮬레이터를 이용하여 영상 강도에 관련된 해상도, 피크 사이드로브 레벨 등을 윈도우 필터에 적용하여 분석하였다.

윈도우 필터로는 Kaiser, Hanning, Hamming, Gaussian, Chebyshev, Blackman 등 많은 윈도우 필터가 있다. 윈도우 필터링의 목적은 Aperture의 중심부분에 가중치를 주는 것을 의미하며, 주로 부엽을 제어하여 PSLR을 향상시키는데 사용하지만, 해상도의 퍼짐현상에 대한 Trade-off 관계가 있다. 주엽의 해상도는 rectangular weighting에서 가장 좋으므로 서로 간의 장점을 혼합하여 영상형성의 해상도를 향상시키는 방법이 요구되며, Hamming weighting 기법은 부엽의 크기를 감소시키지만, 주엽의 길이를 넓게 만드는 단점이 존재한다. 여기에서는 대표적인 Hanning, Hamming, Kaiser 등 3개의 윈도우 필터들을 사용하여 PSLR, 해상도 등이 영상형성 성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석 및 평가하였으며, 성능분석을 위하여 구현한 시뮬레이터를 이용하여 거리방향, 방위방향에 윈도우 필터를 적용하여 성능을 분석하였다. Table 2는 Rect. 윈도우를 기준으로 하였을 때, 윈도우 함수에 따른 거리, 방위방향의 PSLR과 해상도의 영상성능 결과를 나타내었다.

Table 2. Performance analysis by window filter table

윈도우 / 성능파라미터		Rect.	Hanning	Hamming	Kaiser (β=2.5)	Kaiser (β=3)	Kaiser (β=4)	Kaiser (β=5)
거리	PSLR (dB)	-15.5	-35.9	-41.3	-19.4	-21.2	-27.0	-39.1
	해상도	1.15	1.77	1.63	1.31	1.37	1.50	1.63
방위	PSLR (dB)	-28.4	-59.7	-55.8	-32.6	-34.1	-47.9	-54.6
	해상도	1.91	2.05	2.04	1.97	1.98	2.01	2.04

Table 2에서 알 수 있듯이 시뮬레이션 구현결과 필터를 적용하지 않은 Rect. 의 거리 및 방위 PSLR은 각각 -15.5 및 -28.4로서, 균일분포를 가지는 스펙트럼의 FFT 결과 Sinc 함수에 대하여 -13dB이상을 요구하는 이론치[4]를 만족하므로 시뮬레이터의 신뢰도는 높은 편이다.

고해상도의 윈도우 필터 선정을 위해 Rect. 필터를 기준 필터로 하여, 윈도우 별로 성능분석을 했다. PSLR은 작은 표적이 인접한 표적에 의해 영향을 받지 않기 위해서는 -20dB 이상을 요구하며[4], 윈도우 필터를 적용한 결과표에서 거리방향의 경우 Kaiser (β=2.5)가 약간 못 미치나 대부분 -20dB의 PSLR을 만족하는 것으로 나타났다. 방위 방향의 경우도 모든 윈도우의 경우 PSLR만 보면 우수한 성능을 가짐을 확인하였다.

Hamming과 Kaiser(β=5)인 경우 우수한 것으로 나타났다. 방위방향의 경우에는 기준필터 뿐만 아니라 모든 윈도우에서 PSLR만 보면 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 그러나 PSLR의 성능이 향상됨에 따라 해상도의 성능이 저하되는 Trade- off 관계가 현저함을 확인 할 수 있었다. 윈도우의 퍼짐은 거리 해상도의 경우 카이저 윈도우와 방위해상도는 모든 윈도우가 1.0~1.2배 사이의 값으로 허용범위에 있는 것으로 확인되었으며, 거리방향의 PSLR이 우수했던 Hamming와 Hanning의 경우는 해상도가 1.4~1.5배 이상의 퍼짐으로 해상도가 저하되는 것을 확인하였다. 또한 방위해상도의 경우 해상도가 모든 필터의 해상도가 기준필터의 해상도에 근접되었음이 확인되었다. 성능분석결과 Kaiser 필터(β=2.5,3)가 성능이 우수한 성능을 나타내었다.

다음 Fig. 17~20은 표적의 위치를 영상면의 중심점과 같은 거리 및 방위방향 좌표를 갖는 점표적을 고려하여 윈도우 필터에 따른 해상도의 영향을 표시한 각 필터의 결과 그림들이다.

Fig. 21 및 22는 Rect 윈도우의 경우 PSLR의 성능은 윈도우 필터를 수행한 경우보다 떨어지나, 빔 퍼짐이 적어 표적 식별성이 좋다.

카이저 윈도우의 경우 Rect 윈도우에 비해 상대적으로 빔폭은 넓어졌지만 PSLR이 향상되어 부엽이 제거되어 표적 식별이 용이하다. 윈도우 필터를 적용함에 있어서 PSLR 및 해상도의 Trade- Off를 고려하여 본 결과 카이저(β=3)윈도우가 영상형성 성능에 가장 적합함을 알 수 있었다.

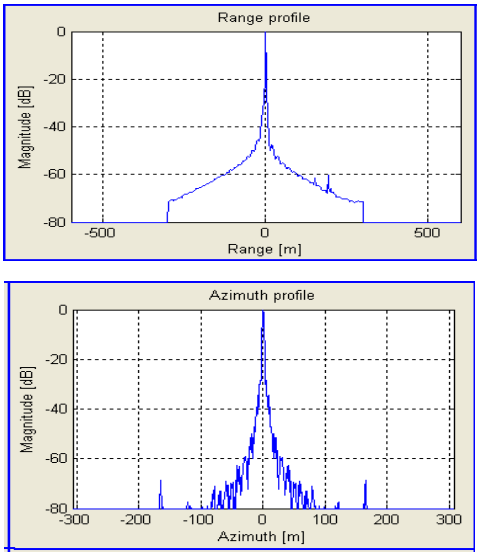


Fig. 17. Range PLSR=15dB(up)/azimuth PLSR=28dB(down) when rect

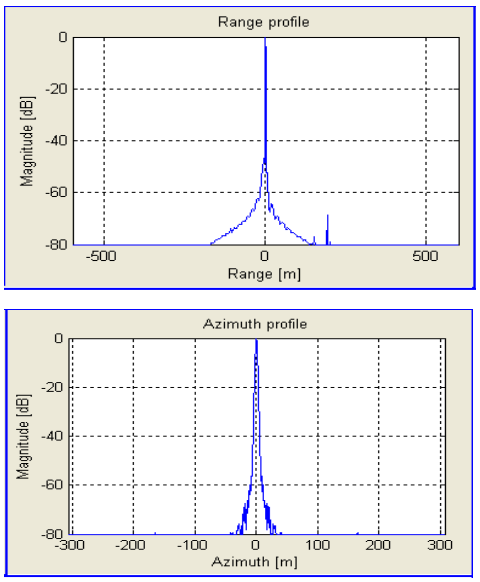
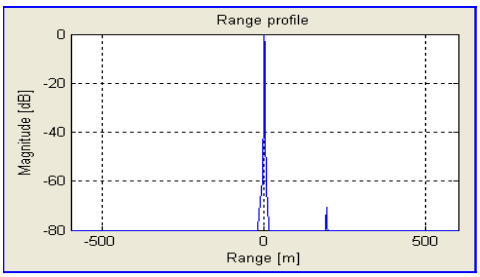


Fig. 18. PLSR=41(up)/azimuth PLSR=56 (down) when hamming window range



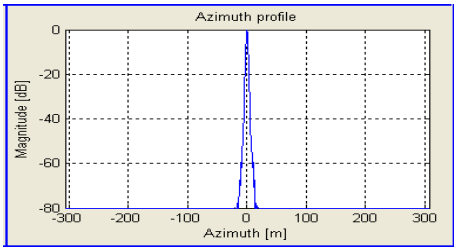


Fig. 19. PLSR= 36(up)/azimuth PLSR=60 (down) when hanning window range

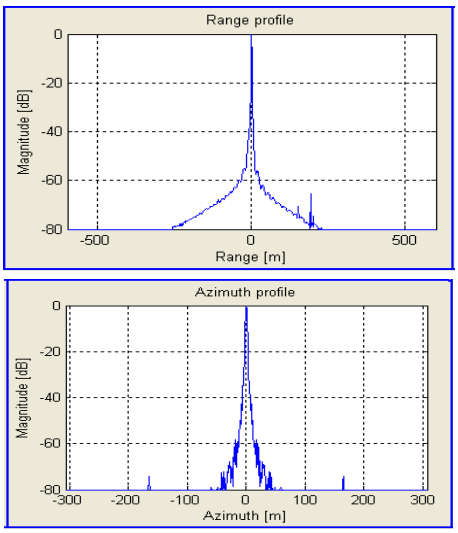


Fig. 20. PLSR=19(up)/azimuth PLSR=32 (down) when Window range kaiser(β=2.5)

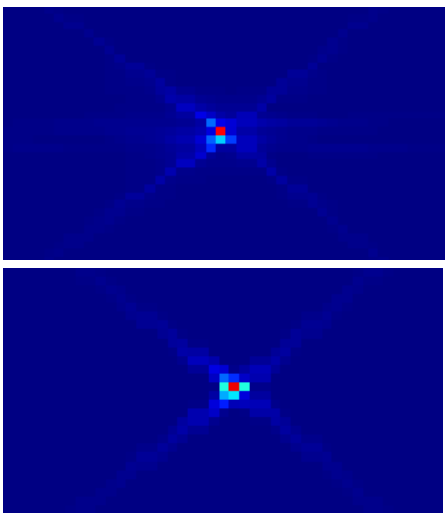


Fig. 21. Compare to rect.(up) and hamming (down) broadening

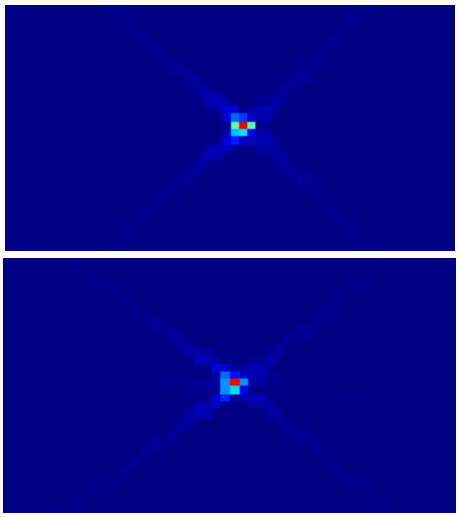


Fig. 22. Compare to hanning(up) and kaiser(β=3.0)(down) broadening

Ⅴ. 결 론

스팟모드 SAR는 고해상도 영상형성 운용 모드로서 탑재체 및 플랫폼 등 시스템 설계변수에 매우 민감하며 시스템의 주요 성능 및 요구조건에 따른 설계 파라미터의 변화가 SAR 영상 품질성능을 좌우하므로 이를 비교 및 분석하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 시스템 설계 파라미터 기반의 영상형성 및 영상 품질분석을 위한 시뮬레이터를 구현하였다. 개발된 시뮬레이터는 유연성과 확장성을 고려하여 주요 모듈로 구성하고 Trade-off분석 연구에 용이하도록 Matlab 코드를 이용한 GUI 기반에서 구현하였다. 주요 기능으로 SAR 시스템 설계 파라미터를 이용한 모의 SAR 원시 신호생성, RMA를이용한 SAR 영상형성, 그리고 SAR 시스템 파라미터가 영상의 품질에 미치는 영향 분석 등이 포함된다. 특히 본 시뮬레이터는 시스템 설계 및 운용환경에 따라 파라미터 설정을 용이하게 할 수 있으므로 안정도 평가가 가능하며, 파라미터의 입력으로 SAR 영상 데이터를 생성하고, 해상도, PSLR, ISLR 등을 계산 할 수 있는 프로그램을 개발 및 구현하여 향후 SAR 시스템 개발, 설계시 성능예측, SAR 영상 품질 분석, 교육툴로서의 활용 등에 매우 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1) 국방기술품질원, “국방과학기술수준조사서”, Vol 3, 감시정찰무기체계, Mar. 2007.

2) 곽준영, “SAR 동향보고서”, 국방기술품질원, 제24호, Mar. 2010.

3) Walter G. Carrara, Ron S. Goodman, Ronald M. Majewski, Artech House Spotlight Synthetic Aperture Radar - Signal Processing Algorithms.

4) Ian G. Cumming, Frank H.Wong, Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data - Algorithms and Implementation - ARTECH HOUSE, pp. 262-372.

5) 곽영길외 23, “위성탑재 영상레이다(ROK-SAR) 체계설계“, 국방과학연구소(KTRC-517-991067), Dec.1999 pp. 61-68, pp. 369-371.

6) Mehrdad Soumekh, Synthetic Aperture RADAR Signal Processing with MATLAB Algorithms, A wiley-interscience Publication.

7) J.M. Horrell, M. R. Inggs, "Satellite and airborne SAR simulator", Proc. IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing, Aug. 1993.

8) Extension of Range Migration Algorithm for Airborne SAR Data Processing Hee-Sub Shin, Won-Gyu Song, Jun-Won Son, Yong-Hwan Jung, and Jong-Tae Lim.

9) 정철호, 정재훈, 곽영길, “실제 클러터 배경에서 SAR 영상 임펄스 응답특성 분석“, 대한 원격탐사학회,제24권 제2호 pp. 99~106.

10) 정철호, 오태봉, 곽영길, “고해상도 SAR 영상형성 및 품질 분석을 위한 시뮬레이터“, 한국전자파학회, 제18권 제8호 pp. 997~1004.

11) Jeong-Hee Choi,“Spotlight-mode SAR에서의 Inversion 기법 성능 분석“ 대한전자공학회, 제40권 제1호, pp. 130~138.

12) Born, M., and E. Wolf , Principle of Optics, New York, Press, 1959, Appendix III.

13) Caffori, C., C. Pari, and F.Rocca " SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques " IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System Vol. 27, March 1991, pp. 194-206.

14) F.H. Wong and Y.T. Soon, " Processing Spotlight Mode SAR Data without Azimuth Oversampling in Range Migration Algorithm" IEEE Asia Pacific Microwave Conference, pp. 527-530, 1990.

15) C. Prati, A. Guarnieri, and F. Rocca, "Spotlight Mode SAR Focusing with the omega-k Technique", pp. 527-530, 1999.

16) C.V. Jakowatz, D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C.

Ghiglia, and P. A. Thompson. Spotlight-Mode Synthtic Aperture Radar: A Signal Processing Approach. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1996.

17) Kirk, J.C., Jr., "Motion Compensation for Synthetic Aperture Radar", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-11, No.3, May 1975, pp. 338-348.

18) Rocca, F., C. Cafforio, and C. Prati, "Synthetic Aperture Radar: A New Application for Wave Equation Technique, "Geophysical Prospecting 37, 1989, pp. 809-830.