

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.1.49>고해상도 SAR 최적 설계를 위한 영상형성 시스템 변수 및
성능분석에 관한 연구

곽준영*, 정대권**

A study on the image formation system variable and performance
analysis for optimum design of high resolution SAR

Jun-Young Kwak* and Dae-Gwon Jeong**

ABSTRACT

Synthetic aperture radar (SAR) has been employed in various fields due to its capability to generate high resolution images regardless of weather and visibility. This paper presents a performance analysis on the image formation of high resolution SAR according to various slant range distance and synthetic aperture lengths using a range migration algorithm simulator. Although the visual performance on the SAR image is more accurate, a numeric analysis resulted in a comparable measurement. More specifically, raw data were generated for an ideal point target upon imaging geometries and design parameters such as slant range distance and synthetic aperture lengths. Finally, spatial resolution, peak to sidelobe ratio and integrated sidelobe ratio are drawn to provide SAR capabilities in the initial concept design, final in-flight calibration and validation stages.

초 록

합성 개구면 레이더(SAR: synthetic aperture radar)는 날씨 및 주·야간에 관계없이 고해상도의 영상을 형성할 수 있기 때문에 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 논문에서는 고해상도 SAR 설계시 경사거리와 합성개구면의 길이가 영상형성에 미치는 영향을 RMA 시뮬레이터를 이용하여 성능분석을 수행하였다. 형성된 영상의 성능은 직접 육안으로 확인할 수 있었으나, 영상을 분석하는 수치로서도 성능평가가 가능하였다. 보다 구체적으로, 다양한 경사거리와 합성개구면의 길이 변화와 영상획득을 위한 기하구조에 따라 이상적인 점표적에 대한 시뮬레이션의 원시 데이터를 생성하였고, Spotlight 영상 형성 알고리즘을 이용하여 이에 따른 점표적 응답특성의 공간 해상도, 최대 부엽 수준, 누적 부엽 수준에 대한 성능분석을 수행하였다.

Key Words : SAR, Synthetic Aperture Radar(합성개구면레이더), Spotlight Mode(스팟모드), RMA, Range Migration Algorithm(거리천이알고리즘), Spatial Resolution(공간해상도)

I. 서 론

† 2011년 8월 27일 접수 ~ 2011년 12월 2일 심사완료

* 정희원, 국방기술품질원 유도감시통신 연구부
교신저자, jkwak@paran.com

서울시 중구 중림동 441번지

** 한국항공대학교 항공전자공학과 대학원

영상레이더 혹은 합성 개구면 레이더는 마이크로파대의 전자파를 이용하여 지표면 표적에 전자파를 방사하고 반사된 신호를 합성하여 표적에 대한 고해상도 영상 이미지를 얻는 레이더 기술

이며, 기상조건이나 주간·야간에 상관없이 고해상도 영상 이미지를 제공해 줄 수 있는 특징을 가지고 있다. 따라서 항공운항, 관제, 지구 및 우주탐사, 기상 관측 등의 민수용 뿐 아니라 조기경보, 도시방어, 미사일 유도 등 군사적 목적으로도 그 필요성이 날로 증대되고 있다[1-5]. SAR 기술은 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 SAR 영상형성 및 성능품질에 영향을 미칠 수 있다. 즉 영상은 지정된 값에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 시스템 및 부시스템의 규격, 시스템 파라미터의 Trade-off, 에러 할당 및 수행 규격을 통해서 요구되는 것이므로[6-8][12] 시스템 설계 요소 및 운용 변수가 영상형성 및 시스템 성능에 미치는 영향에 대한 분석 및 평가가 필요하다.[6]

SAR 체계의 설계요건은 성능, 기술 및 경제성을 고려하여 설계하는 것이 원칙이며, SAR 임무 요구조건 및 응용 분야에 따라 설계 요구사항들이 결정된다. 특히 군사적인 활용도가 많은 시스템에 대한 요구조건의 경우 표적식별 능력을 고려시, SAR 센서 해상도 성능의 목표 값은 1m 급(탱크확인), 0.5m 급(교량식별, 지상군장비, 운송차 확인), 0.3m 급(레이더 장비확인, 핵무기부품 확인)으로 정의한다[8]. 따라서 고해상도 SAR 영상 운용 모드의 요구도가 최근 들어 급격히 증가하고 있으며 기술 선진국을 중심으로 스팟라이트 영상형성에 대한 알고리즘의 연구가 활발히 진행 중이다. 대부분의 연구 주제는 스팟라이트 알고리즘 자체에 국한되어 있으며 시스템 설계 측면의 관련 연구는 매우 미흡한 실정으로 SAR 시스템 개발측면에서 설계 변수의 변동에 따른 영상 형성 혹은 실제 운용 환경에서의 변동요인이 성능에 미치는 영향을 분석하고 예측하는 연구가 필요하다.

본 논문은 RMA(Range Migration Algorithm) 알고리즘을 이용하여 고해상도 SAR 시스템의 최적화 설계를 위한 분석 Tool을 개발하고 개발된 분석 툴을 활용하여 영상형성 설계 요소 및 성능 분석 연구결과를 제시한다. 제안된 개발 툴은 SAR 임무 요구조건에 따라 설계 변수를 가변 할 수 있도록 설계하였으며 외부 운용환경에서 발생할 수 있는 플랫폼 요동에 따른 성능예측 및 허용범위 분석이 가능하다.

II. 영상신호 시스템 형성모델

2.1 고해상도 SAR 영상형성 알고리즘

고해상도 SAR 영상형성 알고리즘은 크게 PFA (Polar Format Algorithm), RMA, CSA(Chirp Scaling Algorithm) 등이 있으며 임무 요구 조건과 SAR 시스템 성능 요구 사항에 따라 각각 선택적으로 적용될 수 있다. PFA의 경우 고해상도 영상형성 알고리즘 중에 가장 이상적인 방식이며, 초기 대표적인 기법으로 적용되어 왔으나, 영상형성 과정에서 필수적인 QPE (Quadrature Phase Error)를 처리하지 못하는 단점을 갖고 있다. 따라서 QPE는 넓은 빔폭을 가지는 경우 더욱 극심해지기 때문에 획득 영상의 면적 범위가 큰 경우 적용할 수 없으며 최근에는 활용되지 않고 있다. CSA는 RMA의 변형된 개념으로 RMA에서 적용되는 보간 연산을 스케일 함수의 연산 처리로 대신함으로써 신호처리 측면에서 구현이 용이하고 계산 효율성을 극대화하는 장점이 있다. 하지만 CSA의 경우 요동보상을 근사적으로 수행하기 때문에 RMA 기법보다 상대적으로 정확도 성능이 떨어지는 단점을 갖고 있다[6]. 이들 알고리즘에 비하여 RMA의 경우 넓은 영상 범위에 대해서 완전하게 QPE를 처리하며 요동 보상을 충분히 처리할 수 있기 때문에 본 논문에서는 RMA를 기반으로 하는 방법을 제시하여 SAR의 영상 형성후 성능분석에 대한 결과를 공간 해상도, 최대 부엽 수준, 누적 부엽 수준 등에 대한 성능분석 결과를 제시하고자 한다.

2.2 SAR 기하 구조 및 원시 신호 형성 모델

스팟라이트 모드(Spotlight-mode) SAR 영상화 시스템의 특별한 특징은 길이 2L의 스팟모드 SAR 시스템의 실 개구 레이더가 같은 물리적인 레이더 시스템과 거의 유사한 역할을 하므로 스팟라이트 모드 SAR는 2L의 직경을 가지는 물리적 안테나 개구면의 해상도 특성과 같다. 따라서 스팟라이트 모드 SAR는 레이더가 정해진 비행경로를 따라 이동하여 일정한 목표물 영역에 빔을 조사하여 고해상도 SAR의 영상을 획득하는 모델 중의 하나이다.

Fig. 1은 스팟라이트 모드 SAR 영상 시스템의 신호 수집을 위한 기하구조를 나타낸다. SAR는 거리(Range), 방위(Cross-range), 고도(Altitude)의 3차원(X, Y, Z)으로 이루어진 공간영역에서 전자파 송신신호에 대한 표적의 반사함수를 얻어내는 과정이다. 송신신호는 충분한 신호잡음비를 유

신호이며, 임의의 점표적 거리 R_s 에서 동시에 발생되어 반사되는 점이다.

최종적으로 얻게 되는 기저대역 수신신호의 크기와 위상은 식(7)과 식(8)로 표현되며 이는 RMA를 수행하게 될 기본식이 된다.

2.3 RMA 처리과정

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

2.3.1 전처리(Preprocessing) 단계

RMA의 실행전 선행단계로서 플랫폼의 이동시 표적의 경사각 거리에 대한 요동보상 및 거리방향에 대한 기하학 거리보정을 하며, 이의 목적은 RVP를 제거하기 위해서이다.

식 (8)을 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_t 는 다음과 같이 정의한다.

$$R_t = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + (Y_a - Y_t)^2 + (Z_a - Z_t)^2} \quad (9)$$

식(8)에서 표적과 비행체의 거리인 R_t 와 표적과 원점사이의 거리 $r_t = \sqrt{(X_t)^2 + (Y_t)^2 + (Z_t)^2}$ 의 관계를 이용하여 요동보상을 하며, 이 경우 2차원이 아닌 움직임에 대한 보상은 적용되지 않으며, 신호 위상 ϕ 는 근사값 없이 파수(波數:wavenumber) 투영도면에서 초점을 쉽게 만들기 위해 영상면의 중심점 대신에 중심선에 대한 보상을 한다.

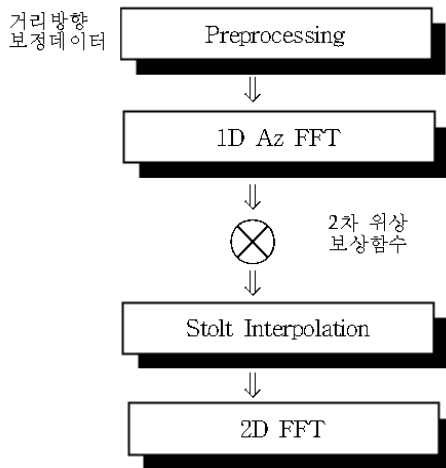


Fig. 2. Flow of the RMA data process

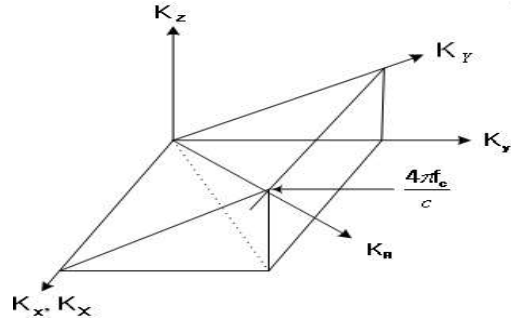


Fig. 3. RMA perspective

2.3.2 1D Along-Track FFT 단계

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

Fig. 3의 투영도에서 RMA는 비행경로인 신호계적이 $K_x K_y$ 경사면에 투영되므로, 영상표시면은 $K_x K_y$ 의 경사면이 데이터 수집면이 된다. 이때 $K_x = K_x$ 이고 K_R 은 공통 성분이다.

$$K_R = \frac{4\pi\gamma}{c} \left(\frac{f_c}{\gamma} + \hat{t} - \frac{2R_s}{c} \right) \text{ 이고, } \hat{t} = t - nT - \frac{2R_s}{c} = \hat{t} - \frac{2R_s}{c}$$

이라 정의하고, K_R 을 식(7) 및 식(8)에 대입하면

$$s_{rd}(X_a, K_R) = a_t \text{rect} \left(\frac{X_a - X_{ac}}{L} \right) \text{rect} \left(\frac{\hat{t}}{T_p} \right) e^{-jK_R(R_t - R_s)} \quad (10)$$

로 되며, 이 식을 X_a 에 대해 FFT를 수행하면,

$$S(K_x, K_R) = \int s_{rd}(X_a, K_R) e^{-jK_x X_a} dX_a \quad (11)$$

이다. 또한, 식(11)에 식(10)을 대입하면

$$S(K_x, K_R) = \alpha \int \text{rect} \left(\frac{X_a - X_{ac}}{L} \right) e^{-jK_R R_t} e^{-jK_x X_a} dX_a \quad (12)$$

$\alpha = a_t \text{rec} \left(\frac{\hat{t}}{T_p} \right) e^{jK_R R_s}$, 여기에서 T_p 는 초점 지속시간

이며, 위상성분 $\phi(X_a, K_R) = -K_R R_t - K_x X_a$ 이 된다.

Fig. 1로부터 $R_t = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + R_B^2}$ 이므로,

$R_B = \sqrt{(Y_a - Y_t)^2 + (Z_a - Z_t)^2}$ 이다. Y_a 와 Z_a 는 각각 상수이며, R_B 는 $X_a = X_t$ 일 때 스캐터까지의 최소거리, K_x 는 방위 공간 주파수이다.

식(11)의 적분값을 계산하기 위해 PSP(Principle of stationary phase)를 적용하면[6], 거리 보정신호의 방위방향 FFT의 위상(식 13) 및 크기(식 14)는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Phi(X_Y, K_R) = -K_R R_t - R_B \sqrt{K_R^2 - K_X^2} + K_R R_s \quad (13)$$

$$S(K_X, K_R) = a_{rect} \left(\frac{K_R - 4\pi f_c / c}{4\pi \gamma T_p / c} \right) \text{rect} \left(\frac{K_X R_B}{L \sqrt{K_R^2 - K_X^2}} + \frac{X_{sc} - X_t}{L} \right) \quad (14)$$

또한, 방위방향의 FFT는 식(15)의 형식이 된다.

$$S(K_X, K_R) = |S(K_X, K_R)| e^{-j\Phi(K_X, K_R)} \quad (15)$$

2.3.3 정합필터(Matched Filtering) 단계

방위 변환 신호의 2차원 위상 보상을 위하여 영상면 중심부에서 같은 거리에 있는 모든 스캐터의 거리 굴곡을 방위 주파수 영역 K_X 에서 완전히 보상하는 과정이며, 같은 거리에 있지 않은 스캐터들에 대해서는 부분적으로 보상한다. 식(10)을 이용한 정합필터의 위상은 다음과 같다.

$$\Phi_{mf}(K_X, K_R) = -K_R R_s + R_s \sqrt{K_R^2 - K_X^2} \quad (16)$$

거리-도플러 도메인의 수신신호 식(15)은 이차원 정합필터 식(16)을 적용하여 다음과 같이 정리되며 이때 크기성분 $|S(K_X, K_R)|$ 은 바뀌지 않는다. 정합필터 적용후의 신호식(16)은 다음과 같다.

$$S_2(K_X, K_R) = |S(K_X, K_R)| e^{-j[K_X K_t + (R_B - R_s) \sqrt{K_R^2 - K_X^2}]} \quad (17)$$

2.3.4 Stolt Interpolation 단계

수신된 SAR 데이터를 재배치하고 모든 스캐터들의 거리 굴곡을 제거하여 보상하기 위함이며, (K_X, K_R) 영역에 있는 점 스캐터 신호는 K_R 축 상에서 사인함수이므로 특정 스캐터의 사인함수 주파수는 K_X 로 바뀌어 주파수를 낮추는 효과를 이용하여 수정량 만큼 K_X 내의 잔존 거리 굴곡들을 보상한다.

영상면 중심에서 동일한 거리에 있는 모든 스캐터는 새로운 영역을 위해 1차 배열을 수행하며, (K_X, K_R) 변환을 위해 $K_Y = \sqrt{K_R^2 - K_X^2}$ 이라하면 식(17)은 $S_3(K_X, K_Y) = |S(K_X, K_R)| e^{-j[K_X K_t + K_Y (R_B - R_s)]}$ (18)의 새로운 Stolt 식으로 변환된다.

2.3.5 2D- IFFT 단계

마지막 단계로서 핵심요소인 $e^{j[K_X K_t + K_Y K_s]}$ 를 포함하는 2차원 역 FFT변환을 통하여 거리-방위 방향으로의 압축된 영상신호를 얻을 수 있으며, 주 임펄스 응답 특성을 고려하여 이 과정에서 개구가중치 기술들을 이 단계에서 적용한다.

III. 스팟모드 SAR 시뮬레이터 개발

3.1 시뮬레이터 설계

시뮬레이터 구성은 Fig. 4와 같이 RMA를 바탕으로 한 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 모듈(SPM : System Parameter Module), 원신호 형성모듈(RDGM : Raw Data Generation Module), RMA 처리 모듈(RMAPM : Range Migration Algorithm Process Module), 영상 품질 분석 모듈(QPEM : Quality Performance Evaluation Module) 등 네 개의 중요 모듈로 구성하였다.

첫 번째 단계인 SPM은 원시 데이터를 생성하기 위해 기본이 되는 시스템 파라미터 입력모듈로서 주로 영상 형성에 영향을 미치는 기하구조, 거리 및 방위 해상도와 관련된 파라미터를 입력 변수로 사용하며, 입력화면을 통해 파라미터 변수를 변화시켜 입력하여 해상도 변화 및 시스템에 미치는 영향 여부에 대해 분석이 가능하다.

두 번째 단계인 RDGM은 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 푸리에 변환, 정합 필터인 방위 변환신호에 대한 2차 위상보상, 기공보간 및 2차 역 푸리에 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 측정된 값으로 영상의 해상도를 나타내며, PSLR은 임펄스 응답의 주엽 최대치에서 부엽 최대치까지의 비율

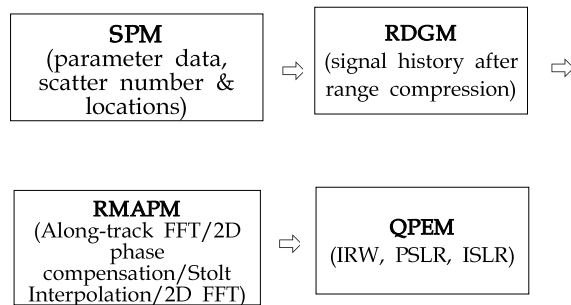


Fig. 4. Block diagram of simulator

로서 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 구성하였다.

3.2 설계 파라미터 입력 모듈

SAR 시스템 설계 파라미터는 주로 SAR 영상 형성에 영향을 미치는 기하구조와 거리 및 방위 해상도와 관련된 파라미터를 입력변수로 사용한다. 특히, 원시 신호 형성 모듈에서는 SAR 기하학적인 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 사용하기 때문에 파라미터의 변화에 따른 영향 분석이 용이하다. Table 1 에는 영상 형성을 위한 SAR 설계 파라미터의 예[참고문헌 6]를 인용하였다.

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

Fig. 5는 개발한 시뮬레이터를 구현한 메인화면이다.

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	4 μ s
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/ μ s
B	Bandwidth	133.5MHz
F_s	Sampling rate	128MHz
ρ_r	Range resolution	1.0m
ρ_a	Azimuth resolution	1.0m
R_s	Broadside slant range to scene center	1000m
L	Synthetic aperture length	760.8m

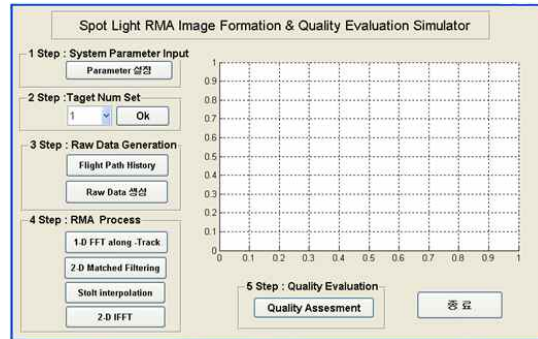


Fig. 5. Simulator main screen

3.3 원시신호 생성모듈

RMA의 수행 전 선행단계로서 플랫폼의 이동시 목표 표적의 경사각 거리에 대한 요동보상 및 거리방향에 대해 RVP를 제거하기 위해 기하학 거리보정을 한다.

3.4 RMA 처리모듈

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

3.4.1 1D Along-Track FFT 단계

방위방향에서의 FFT 실행단계로서 IFP(Intermediate Formation Processor)는 신호계적로부터 거리 압축 및 방위방향의 칩(chirp) 제거 이전에 이 변환을 수행한다.

3.4.2 정합필터(Matched Filtering) 단계

고정경사각 R_s 상의 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.

3.4.3 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.

3.4.4 2-D IFFT 단계

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

IV. 시뮬레이터를 이용한 SAR 시스템 성능분석

4.1 개발된 시뮬레이터 성능검증

Table 1의 파라미터를 이용하여 구현한 시뮬레이터의 영상형성 결과는 Fig. 6, 7과 같으며 Table 1의 Parameter 값은 참고문헌 6의 값 인용], 시뮬레이션된 모든 정보를 볼 수 있는 정보 화면은 Fig. 8에서 Range 및 Azimuth 방향에 대한 정량적 정보(거리 및 방위방향의 IRW, PSLR, IRF) 및 정성적 정보(그래프) 결과가 표시되며, 또한 Profile 정보에서는 시뮬레이션 결과에 대한 거리 및 방위 해상도가 초기 설정 값과 비교하여 표시된다. Fig. 9 와 10은 IRF에 대한 상세도이며, 최종 결과인 점표적 영상형성 결과는 윈도우 필터중 하나인 해밍필터를 적용한 결과이며, Range 및 Azimuth profile의 그래프에서 부엽레벨이 전혀 없는 것이 아니라 주엽 레벨에 비해서 상대적으로 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4.2 시스템 성능 분석

SAR 시스템을 확인하는 최선의 방법은 시스템에 의해 만들어지는 실제적인 영상을 측정하여 입증하는 방법과 영상의 품질을 분석하는 방법이

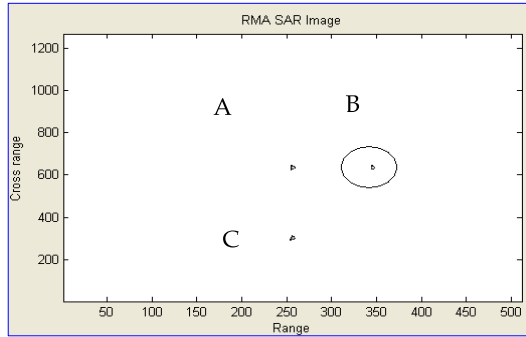


Fig. 6. Image formation after RMA signalprocess



Fig. 7. Detail of the B point target

있다. 따라서 SAR 시스템 설계 파라미터는 영상품질에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 시스템의 성능을 분석하기 위해서는 SAR 시스템 파라미터의 변화에 따른 영향을 분석할 필요가 있다.

본 논문의 경우 개발한 시뮬레이터를 이용하여 외부 환경인자에 의한 변수요인 및 SAR 시

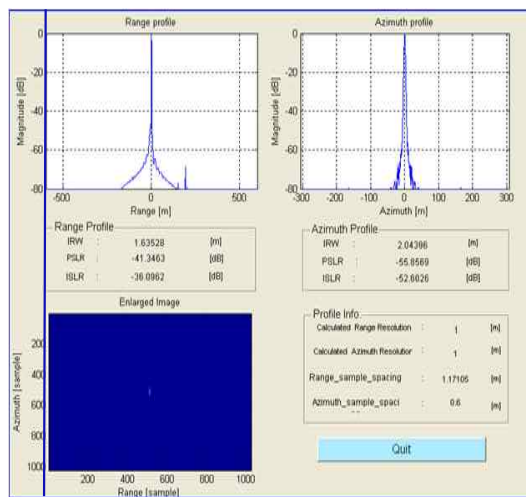


Fig. 8. Total information screen after simulation

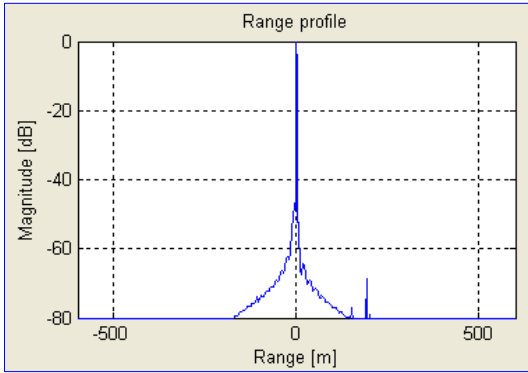


Fig. 9. Detail for range IRF profile

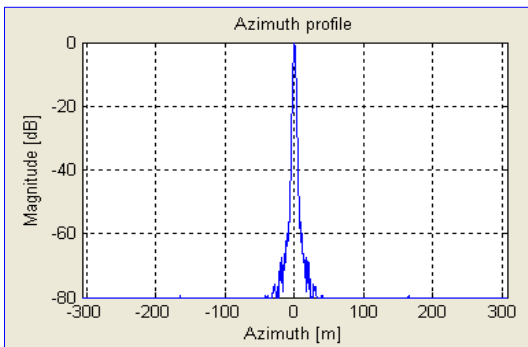


Fig. 10. Detail for azimuth IRF profile

시스템 내부 요인으로 구분하여 영상 강도에 관련된 파라미터 값(해상도, 피크 사이드로브 레벨 등)의 변화에 대한 영상을 분석하여 시뮬레이터의 성능 특성을 분석하였으며, 파라미터의 변화에 따른 영향을 보기위한 기준으로 SAR시스템 파라미터를 사용한 원신호 형성 모듈을 사용하여 생성된 표적을 분석하는 과정을 거쳤다.

4.2.1 외부 환경 요인(경사거리) 변동에 따른 시스템 성능 분석

획득한 영상의 해상도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 요동이며, 안테나 위상 중심에서 원하지 않는 움직임이다. 따라서 이러한 요동의 원인을 파악하고 분석하여 요동에 대한 대책을 세우는 것이 중요하다. 모든 요동은 레이더 신호가 자유 공간내 혹은 펄스들 간의 사이에 있는 동안 발생하며, 해상도에 미치는 영향은 매우 크므로, 데이터를 수집하는 동안 측정된 안테나 요동의 발생 원인을 분석하여야한다. 일반적으로 요동발생 원인은 다음과 같이 구분할 수 있다. 즉 첫째 연속적인 송신펄스 사이에 발생하는 요동, 둘째 펄스의 송수신 주기 간 발생하는 요동 및 셋째

펄스의 송수신 간의 간격에 있어서의 발생하는 요동이며, 둘째 및 셋째는 SAR 센서가 연속적으로 움직이는 플랫폼으로 인해 발생한 결과이지만, 영상형성에 영향을 미치지 않는 작은 원인이므로 무시할 수 있다.

RMA에서 송신펄스 사이에 발생하는 요동은 영상형성 프로세서에서 순수한 요동보상 및 R_a 에서 예측되는 dechirp 지연 시간을 갖는 R_a 와 R_o 사이의 차이에 의해 보상된다. 그러나, 기류 및 예기치 못한 외부 환경 인자에 기인한 경사거리 변화는 SAR 영상 품질에 심각한 성능저하의 결과로 나타나므로 개발된 시뮬레이터를 이용하여 경사거리 변화에 따른 성능분석을 수행하고 결과를 분석하여 제시하였다.

플랫폼에서 영상 면까지의 경사거리는 외부영향을 받지 않는 상태(정상 비행시)는 Fig.11에서 보듯이 PSLR이 거리방향에서의 변화는 $-39.07\text{dB} \sim -41.56\text{dB}$ 로서 변화는 거의 없었으며, Fig. 12에서와 같이 방위방향의 변화는 $-48.92\text{dB} \sim -57.28\text{dB}$ 로서 변화의 범위는 조금 넓었으나, 인접 표적에 의해 영향을 받지 않는 조건인 -20dB 이상을 만족한다. 그러나, 여러 환경조건하에서의 PSLR의 변화(비정상 비행)는 Fig. 11 및 12에서 볼 수 있듯이 거리방향에서의 $-23.16\text{dB} \sim -42.76\text{dB}$ 이며, 방위방향의 변화는 $-3.63\text{dB} \sim -55.86\text{dB}$ 로서 변화의 범위는 방위해상도에 큰 영향이 미침을 알 수 있었으며, 외부 영향을 받지 않는 정상상태(-55.86dB)를 중심으로 고도가 낮은 방향 혹은 높은 방향으로 진행할수록 인접 주변의 해상도에 많은 영향이 미치는 것을 볼 수 있었다. 다음 Fig. 13은 경사거리에 따른 비행경로의 환경 변화가 있을 때와 없을 때 변화에 대한 인식은 못하지만 해상도는 매우 현격한 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 거리 및 방위 PSLR의 프로파일(Fig. 16 및 17) 역시 그래프로 관찰시 현격한 차이가 있음을 알 수 있었다.

즉 SAR에 있어서 APC와 표적 사이의 이동은 안테나와 표적 사이의 각도는 변하지 않고 거리만 변하는 경우일 때 발생하는 요동으로 볼 수 있다. 따라서 수신 신호는 이동에 따른 위상 오차 항이 곱해진 형태로 나타나고 위상은 거리와 밀접한 관계가 있으므로 거리방향으로 위상 오차에 따른 거리 변화가 생기며 이는 방위 방향으로의 coherence가 떨어짐을 의미한다. 결론적으로 위상 오차로 인하여 SAR 영상의 해상도가 떨어짐을 볼 수 있다.

Fig. 13,14,15,16,17은 경사거리가 990m일 때의 비

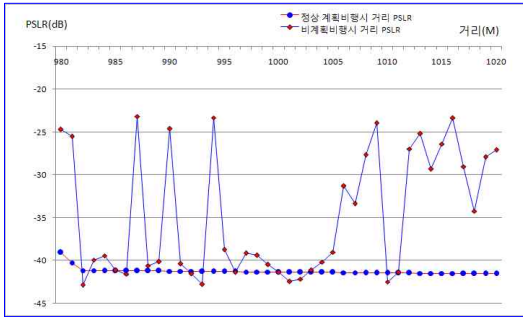


Fig. 11. Result from range PS LR with slant range (R_s) change

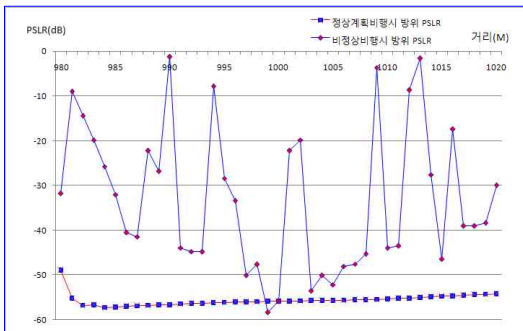


Fig. 12. Result from azimuth PS LR with slant range (R_s) change

행 경로, 영상 형성 결과, 거리 및 방위 PS LR에 대한 결과이며, 외부 요동의 영향이 없다면 IRF는 경사거리의 영향을 받지 않으나, 방위 방향의 PS LR이 -3.63~55.85로 상당히 많이 변화하고 있음을 알 수 있으며, 이유는 플랫폼이 정상적인 비행을 하고 있는 것으로 인식을 하고 있으나, 실제적으로는 플랫폼(비행체)이 외부로부터 이상기류 혹은 여러 환경요인에 의한 비정상 비행 상황을 가정하여 시뮬레이션을 함으로서 SAR의 영상에 미치는 영향을 분석하기 위해

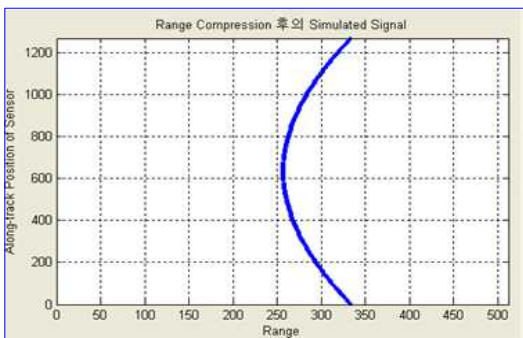


Fig. 13. Flightpath result for actual $R_s = 990m$

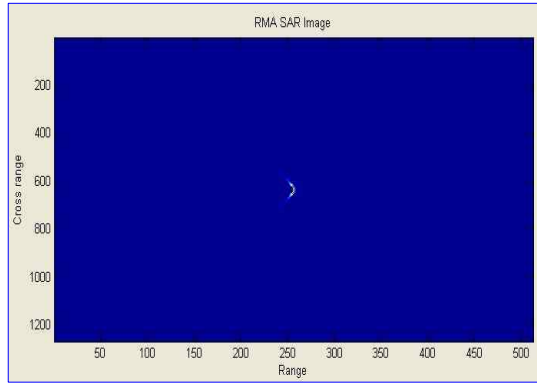


Fig. 14. Image formation result for actual $R_s = 990m$

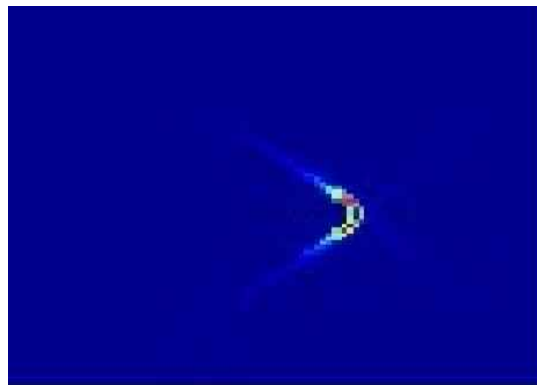


Fig. 15. Detail image formation result for actual $R_s = 990m$ (range PS LR : -24.59dB/ azimuth PS LR : -1.27dB)

인위적으로 경사거리를 변동시킨 결과이다.

위의 결과 그림에서 휘어진 이유는 요동 적용으로 인하여 QPE(Quadrature Phase Error) 혹은 RVP가 처리되지 못해 발생한 것으로 보인다.

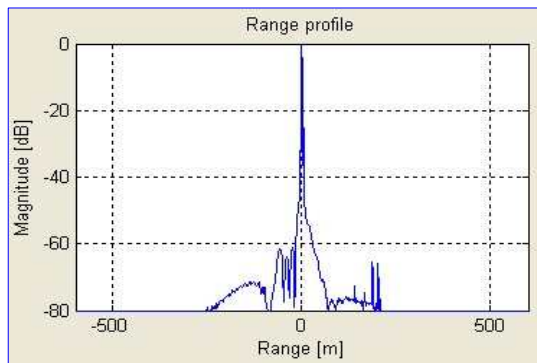


Fig. 16. Range PS LR result for actual $R_s = 990m$

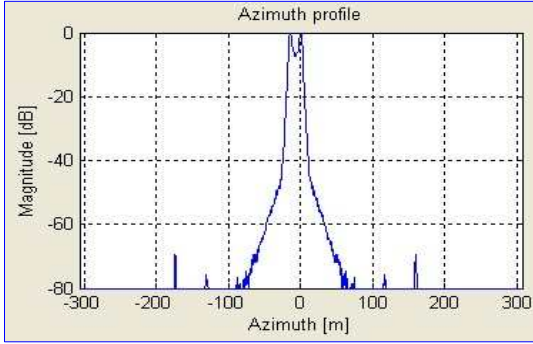


Fig. 17. Azimuth PSLR result for actual $R_s = 990m$

4.2.2 시스템 설계 파라미터(합성개구면의 길이) 변동에 따른 성능 분석

합성 개구면의 길이가 증가할수록 방위방향 빔폭이 증가하며 결과적으로 목적물의 해상도가 증가하게 된다. 거리방향 해상도는 송신신호의 대역폭에 영향을 받으므로 합성 개구면 변화에 따른 차이는 발생하지 않는다.

Spot 모드 해상도 $\rho = \frac{\lambda}{2\theta}$ 로 표현되며, λ 는 파장, θ 는 안테나 스티어링 각도(단위:라디안)이다.

스트립모드의 해상도 $\rho = \frac{L}{2}$ 과 유사성이 있으며, 합성 개구 면에 합성된 안테나 빔폭 $\theta = \frac{\lambda}{L}$

을 스트립모드의 분해능 식에 넣으면 스팟모드와 동일한 결과를 얻을 수 있으나, 중요한 것은 안테나 길이보다는 표적이 안테나 빔에 노출되는

Table 2. Result for resolution test with change of antenna length

길이 (L)	구 분	거리 (dB)	방위 (dB)	IRW 거리/방위
306.6m	PSLR	-43.0	-50.2	1.64 / 4.31
	ISLR	-36.5	-52.5	
350.0m	PSLR	-42.99	-50.20	1.64 / 4.31
	ISLR	-42.99	-50.20	
380.4m	PSLR	-41.5	-21.9	1.61 / 3.81
	ISLR	-35.1	-21.6	
500.0m	PSLR	-43.2	-60.9	1.66 / 3.06
	ISLR	-37.2	-56.4	
613.8m	PSLR	-44.4	-58.9	1.66 / 2.56
	ISLR	-38.4	-55.4	
760.8m	PSLR	-41.3	-55.8	1.63 / 2.04
	ISLR	-36.1	-52.6	
913.8m	PSLR	-42.8	-53.4	1.66 / 1.81
	ISLR	-38.1	-51.7	

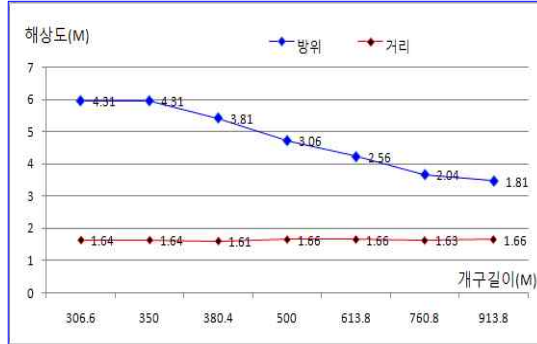


Fig. 18. Result for resolution test with change of synthetic antenna length

합성개구면의 길이변화에 따른 빔폭의 변화가 표적신호에 대해 어떠한 영향을 끼치는가를 확인하기 위하여 Table 2와 같이 합성 개구 길이 L의 값을 변화시켰다.이 경우, 시스템의 파라미터는 760.8m를 기준으로 설계되었으므로 변화요인에 대한 분석은 이 값을 기준으로 분석할 때, 안테나의 길이가 길어지더라도 거리해상도는 1.61 ~ 1.66 사이값을 가지며 해상도에 영향을 미치지 않으나, 방위해상도는 안테나 길이가 길어질수록 4.31 ~ 1.81까지 변함을 보여주며, 방위 해상도가 점점 좋아짐을 볼 수 있으므로 방위해상도는 안테나 길이에 따라 변함을 볼 수 있었다.(Fig.18 참조)

4.2.3 시스템 성능 분석 결과

본 연구는 고해상도 SAR 운용모드인 Spotlight에 대한 시뮬레이터를 개발하고 SAR 시스템 설계 요소와 성능 분석을 수행하였지만, 모든 환경 요인과 설계 변수들을 해석하기는 불가능하기 때문에 영상 품질에 큰 영향을 미치는 요소들만 고려하였다. SAR 시스템 성능은 탑재 플랫폼뿐만 아니라 대기 전파 손실 등에 매우 다양한 요소들이 복합적으로 구성되기 때문에 정밀한 시스템 분석을 위한 수학적 모델링을 하기에는 제한적인 수밖에 없다. 하지만 주요 SAR 센서와 관련된 설계 변수들은 모두 포함하였고 수리적인 기본적인 성능 분석에는 문제가 없으며 기저대역의 신호를 수학적으로 모델링하였기 때문에 정밀한 분석이 가능하다.

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 성능을 좌우하므로 이를 비교 및 분석하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 개발된 시뮬레이터를 이용하여 시스템 설계 파라미터 기반의 영상형성 및 영상 성능에 영향을 미치는 내적/외적 환경요인들이 획득된 영상 해상도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석을 통해 시뮬레이터를 구현하여 성능분석을 한 결과 외부 환경요인에 의한 결과는 방위 방향의 PSLR 값은 현격한 변화를 보여줌으로서 해상도에 많은 영향이 미침을 볼 수 있었으며, 합성개구 안테나 길이에 변화는 개구면의 길이가 증가 할수록 목적물의 해상도가 점점 증가하나, 거리방향 해상도는 Bandwidth에 영향을 받으므로 큰 차이는 발생하지 않음을 알 수 있었다.

따라서 개발된 시뮬레이터는 특히 시스템 설계 및 운용 환경에 따라 파라미터 설정을 용이하게 할 수 있으므로 안정도 평가가 가능하며, 파라미터의 입력으로 SAR 영상 데이터를 생성하여 영상의 해상도 검증을 위한 주엽의 최대치 및 부엽 최대치의 비율(PSLR), 임펄스 응답함수(ISLR) 등을 계산 할 수 있는 시뮬레이터로서 향후 SAR 시스템 개발, 설계시 성능예측, SAR 영상 품질 분석, 교육 Tool로서의 활용 등에 활용도가 매우 높을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1) 광준영, RMA를 이용한 Spotlight SAR 영상형성 및 품질평가를 위한 시뮬레이터 개발 및 구현, 항공우주학회, 제39권 2호, pp183~194, Feb. 2011
- 2) 국방기술품질원, 국방과학기술수준조사서, 감시정찰분야, Mar. 2007
- 3) 광준영, SAR 동향보고서, 기품원, Mar. 2010
- 4) 국방기술품질원, "국방과학기술조사서", 제3권 감시정찰, 제3장 SAR 체계, pp.163 ~ 237, Nov. 2010
- 5) 광준영, 정대권, 기술 수준조사 및 분석을 통한 SAR(합성개구면 레이더)핵심기술 개발방안 연구, 한국 군사과학기술학회지 제14권 제4호, pp. 655-662, Aug. 2011
- 6) Walter G. Carrara, Ron S. Goodman, Ronald M. Majewski, Artech House Spotlight Synthetic Aperture Radar - Signal Processing Algorithms, 1995, pp.401-442
- 7) Ian G. Cumming, Frank H.Wong, Digital

Processing of Synthetic Aperture Radar Data - Algorithms and Implementation - ARTECH HOUSE, 2005, pp.21-221

- 8) 광영길외 23, 위성탑재 영상레이더(ROK-SAR) 체계설계, 국방과학연구소(KTRC-517-991067), Dec. 1999, pp61-68, pp.369-371

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

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

- 11) 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

- 12) 정철호, 정재훈, 광영길, 실제 클러터 배경에서 SAR 영상 임펄스 응답특성 분석, 대한 원격탐사학회, 제24권 제2호, 2008, pp99~106

- 13) Spotlight-mode SAR(Synthetic Aperture Radar)에서의 Inversion 기법 성능 분석 Jeong-Hee Choi, 대한전자공학회, 제40권 제1호, Jan. 2003, pp.130~138

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

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

- 16) 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

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

- 18) C.V. Jakowatz, D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, and P. A. Thompson. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1996

- 19) 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

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

21) John C. Curlander, Robert N. McDonough Rocca, F., C. Cafforio, and C. Prati, "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing "1991, pp.20