

SAR 영상 처리 기술

이 우 경 · 광 영 길

한국항공대학교

I. 개 요

SAR는 Synthetic Aperture Radar의 약자로써 우리 말로 “합성 개구 레이더”라 불린다. SAR는 레이더를 이용하여 영상을 획득하는 기술의 한가지이며, 레이더를 이용하여 영상을 획득하는 용도로 사용하므로 “영상 레이더”라고도 한다. 1951년 Goodyear Aircraft Corporation의 Carl Wiley가 도플러 주파수 천이 개념을 레이더에 적용하여 방위 해상도를 크게 개선하였다. 이러한 개념을 Wiley는 “Dopple Beam Sharpening”이라고 하였고, SAR의 기본 원리가 되고 있다. 1957년 최초로 군사적 목적의 SAR 시스템이 실험되었으며, 1960년대 초부터는 전파망원경을 이용한 행성 표면의 관찰이 실시되기 시작했다. 1970년 이후로 환경 감시 등의 민간목적으로 개발되었으며, 현재까지 다양한 시스템 및 활용 분야에 걸쳐 비약적인 발전을 이루었다.

지난 2002년 유럽의 Envisat을 시작으로 2007년 캐나다의 Radarsat-2, 일본의 JERS-2, ALOS 위성에 탑재된 PALSAR, 독일의 TerraSAR-X는 다편광, 다파장, 복합 모드라는 특성을 가지는 인공위성 SAR의 제2세대라고 할 수 있다. 전 세계적으로 SAR 시스템이 경량화 노력이 결실을 맺게 될 가까운 미래에는 전천후 SAR 시스템이 GPS 위성처럼 하나의 위성군을 이루어 실시간 지구 환경 감시가 가능해질 전망이다. 이러한 선진국 기술력의 뒷받침으로는 항공기 SAR가 기술 발전의 근간을 이루고 있다. 모든 인공위성 SAR 시스템은 항공기 탑재 SAR를 통하여 먼저 시험되고 개발되고 있다. TOPSAR, IFSARE(미국), C/X-SAR(캐나다), EMISAR(덴마크), Ramses(프

랑스), ESR (영국), DO-SAR, E-SAR, AeS-1, AER-II (독일) 등 다수의 항공기 SAR가 존재한다. 또한 1990년에서 1994까지 금성을 탐사한 Magellan SAR, 2004년에 토성 시스템에 도착하여 토성의 달 타이탄의 지표면을 지속적으로 촬영하고 있는 Cassini SAR 등, 합성개구 레이더 시스템은 행성 탐사에 있어서도 중요한 탑재체가 되어왔다.

최근에는 반도체 기술 및 디지털 신호 처리 기술의 비약적인 발전에 따라 기능의 고도화뿐만 아니라 소형화가 가능해져서 무인 비행기에도 합성 개구 레이더가 탑재되는 등 그 활용은 지속적으로 증대되고 있다.

SAR 센서는 다양한 분야의 기술을 종합화한 시스템이며, 안테나, 초고주파 회로, 광대역 신호 발생기 및 샘플링 시스템, 고속 데이터 처리 및 저장 시스템, SAR 영상 처리와 같은 구성요소가 필요하다. 또한 고성능 SAR 센서를 구현하기 위하여 다중편파 및 주파수 기법, 다중 운용 모드, 전자빔 조향 기술, 고해상도 SAR 영상처리기술, 고해상도 기법, 광대역 신호 발생 및 처리기술, 간섭계 및 스테레오 기술과 같은 기술이 필요하다.

SAR 위성 관측의 장점은 지상의 기상과는 무관하게 언제든지 관측이 가능하다는 점이며, 이는 기존의 가시광선 영역에서의 지구 관측 위성이 갖는 커다란 약점을 보완하는 것으로 지구 관측 및 군사 위성에서의 SAR 위성의 상대적인 위치는 계속해서 증대될 것으로 예측된다.

SAR는 광학에 비해 지상의 기하학적 특성으로 인하여 영상 획득 시 내부적 기하학적 왜곡이 많이 발생한다. 따라서 SAR 영상과의 융합 및 이를 이용한

변화 탐지, 다중 밴드 영상 복구, 영상 모자이크와 같은 여러 가지 데이터의 조합을 이용하는 영상 분석 작업을 위해서는 영상 기하 보정 중요한 전처리 과정 중 하나가 된다.

기존의 SAR는 광학센서에 비해 해상도가 상대적으로 열악했기 때문에 지구 환경을 탐사하는 광역 감시의 목적으로 주로 활용되었다. 그러나 최근 위성에서도 1 m 이내의 고해상도급 SAR 영상이 생성되고 있고, 임무를 수행하는 위성의 숫자도 급격히 증가함에 따라 고해상도 처리를 위한 도플러 파라미터 개선 및 보정기술, 데이터 압축, 실시간 데이터 처리 기술이 도입되고 있다. 고해상도 SAR의 경우는 처리해야 하는 데이터가 급속히 증가하기 때문에, 원시데이터의 효율적인 관리 및 운용이 중요해진다. 해상도 증가로 인하여 광역 감시 기능이 약화되는 것을 보상하기 위해 다중 빔 안테나 기술, 신호처리에 기반한 스캔 영상 처리 기술 등도 도입되고 있다. 초고해상도의 영상 획득을 위해서 무인기 SAR의 운용이 필수적으로 인식되고 있는데, 무인기 SAR의 경우에는 위성에 비해 불안정한 영상 처리 변수의 추정이 가장 중요하다. 기계적인 오차를 수학적으로 보상하는 방법에 대한 연구가 활발하게 사용되고 있으며 해상도를 향상시키기 위해 원형 SAR 기법과 같은 새로운 형태의 신호 처리 기술이 도입되고 있다.

레이다 센서는 전파 자원이 매우 제한되어 있고 송신단에서 전송된 신호 중 극히 일부만 영상 생성에 활용될 뿐 대부분의 에너지는 버려지게 된다. 이러한 단점을 보완하고 보다 광범위한 영역에서의 레이더 영상을 확보하기 위해 단일 레이더 송신부로부터 나온 신호를 여러 개의 수신단에서 받아 영상을 생성하는 Multistatic SAR 기법이 각광받고 있다. 주로 무인기와 같은 이동식 수신단을 사용하지만, 최근에는 GNSS 신호를 이용한 Passive SAR 기술도 큰 관심을 받고 있다. 이러한 기술들은 전통적인 SAR

시스템과 원리는 같지만 교과서적인 Range-Doppler 기법이나 CSA, SPECAN과 같은 기존의 방식만으로는 원하는 해상도의 영상을 확보하기 어렵다.

위성 SAR의 경우 목표 대상 영역이 광범위하게 펼쳐지기 때문에 안테나 패턴에 의한 영향이 두드러지게 나타날 수 있다.

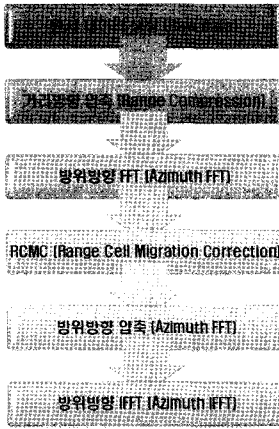
최근의 EUSAR나 APSAR 학회의 기술적 동향을 분석해보면 고해상도 SAR 영상 획득이 가능한 위성 탑재체에 대응하여 SAR 신호처리에 기반한 고품질의 서브 미터급 영상의 확보에 많은 관심을 보이고 있다. 고해상도 SAR 영상에서는 영상의 기하학적 보정 작업이 훨씬 어려워지며 광학 영상과의 상호 보완적인 관계를 유지하기 위해서는 영상 fusion 기술이 뒤따라야 한다. 추가적으로 보이는 신기술 동향에서는 Passive SAR, GNSS, Circular SAR를 포함하는 Multistatic SAR 등이 있으며 이러한 시스템에서의 레이더 송수신단과 목표물과의 기하학적 관계는 기존의 SAR 시스템과는 구별되기 때문에 새로운 SAR 영상 처리 기술이 도입되어야 한다. 본 기고에서는 SAR 신호 처리에 대한 간략한 소개를 하고 이어서 최근 SAR 학회에서 소개된 기술들을 중심으로 관련 기술 동향을 소개한다.

II. SAR 영상 형성 알고리즘

2-1 기하 모델

표적에 대한 신호처리를 위해 사용하는 RDA는 1970년대 후반 SEASAT SAR 신호처리를 위해 개발되어 현재까지 이용되고 있다. RDA는 거리(range)와 방위(azimuth) 두 개의 주파수 도메인을 1차원으로 처리가 가능하며, 두 방향에 대한 독립적인 처리가 가능하다. RDA 수행 과정은 [그림 1]과 같다.

원시 데이터를 생성하기 위해 신호는 baseband로 복조(demodulation)를 수행한다. 복조된 레이더 신호 $S(\tau)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 1] RDA 순서도

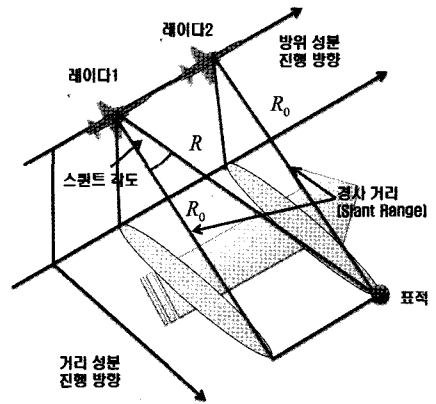
$$s_r(\tau) = A_0 \omega_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) \omega_a (\eta - \eta_c) \exp \left\{ -j4\pi f_0 \left(\frac{2R(\eta)}{c} \right) \right\} \exp \left\{ j\pi K_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

여기서 η 는 방위 방향의 시간(azimuth time), f_0 는 레이더의 중심 주파수, ω_r 은 펄스의 포락선(envelope), K_r 은 거리 방향 칩 FM율(range chirp FM rate), ω_a 는 방위 방향 포락선, $R(\eta)$ 는 경사거리(slant range)를 말한다. 경사거리 즉, $R(\eta)$ 는 거리방정식으로 표현할 수 있다. [그림 2]와 같이 곡면인 지구를 평평하게 가정을 하면, curved 지구 기하구조를 rectilinear 기하구조로 근사시킬 수 있다. 플랫폼과 표적이 이루는 직각삼각형을 고려했을 때, 피타고라스 정리를 적용하면 식 (2)로 나타낼 수 있는데, 이를 거리방정식이라고 부른다.

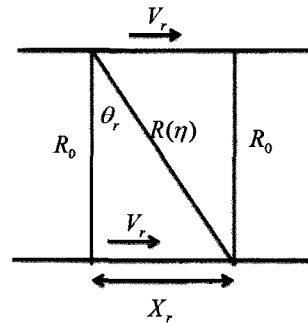
$$R^2(\eta) = R_0^2 + X_r^2 = R_0^2 + V_r^2 \eta^2 \quad (2)$$

[그림 3]은 이를 단순화시킨 것으로 변수들에 대한 관계식은 식 (3)과 같다.

$$R(\eta) = \sqrt{R_0^2 + V_r^2 \eta^2} \approx R_0 + \frac{V_r^2 \eta^2}{2R_0} \quad (3)$$



[그림 2] SAR 기하구조



[그림 3] 사각선형 기하구조

여기서 V_r 은 레이더 속도, R_0 표적과의 거리가 가장 가까운 경사거리를 의미한다. 스핀트 각도가 작을 경우 $K_r \approx 2V_r^2/\lambda R_0 = 2V_r^2 f_0/cR_0$ 로 근사가 가능하다.

다음으로 생성된 원시 데이터를 바탕으로 거리 방향 압축(range compression)을 수행한다. 이 때, 거리 방향 압축은 거리방향으로 FFT를 수행하고, 이 신호에 정합 필터(matched filter)를 곱한다. 시간 영역에서의 convolution은 주파수 영역에서는 곱으로 수행할 수 있다. 특정 목표물이 SAR에 관측되는 동안에는 거리가 지속적으로 변하게 되는데, 이를 RCM(Range Cell Migration)이라 하며 $\frac{\lambda^2 \eta^2}{8V_r^2} f_0^2$ 에 비례하는 값을 갖는

다. 방위 방향 압축을 수행하기 위해서는 거리방향 압축 후에는 RCMC(Range Cell Migration Correction)을 통해 오차를 보정해 주어야 한다.

RCMC를 수행하여 신호를 보정한 후 방위 압축(azimuth FFT)을 수행하여 한다. 신호 압축을 위한 정합 필터는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$H_{az}(f_\eta) = \exp\left(-j\pi \frac{f_\eta^2}{K_a}\right) \quad (4)$$

방위 압축을 수행하기 위해서 주파수 도메인으로 전환 해주어야 하는데, 현재의 도메인이 거리-도플러 도메인이므로, 별도의 변환 없이 RCMC를 수행한 신호에 정합 필터를 곱해 주면 된다. 방위 압축 후 신호 처리를 완료하여 영상을 생성하기 위해서는 방위 IFFT를 수행한다.

SAR 성능을 확인하기 위해서는 임펄스 응답으로 확인이 가능하다. 임펄스 응답은 시스템에 임펄스를 송신함으로써 얻을 수 있는 응답을 말한다. SAR 영상의 임펄스 응답에서 부엽 레벨은 영상의 해상도와 영상의 질과 관련이 있다. 신호처리된 SAR 영상에서 표적으로부터 얻은 신호는 Sinc-like 형태를 띤다. 성능 확인을 위한 주요 파라미터는 응답폭(Impulse Response Width, IRW), 최대 부엽 레벨(Peak SideLobe Ratio, PSLR) 그리고 누적 부엽 레벨(Integrated SideLobe Ratio, ISLR)이 있다. 응답 폭의 경우 영상의 해상도로 나타내며, 최대 부엽 레벨과 누적 부엽 레벨은 영상의 대조비로 나타낸다.

응답 폭은 임펄스 응답의 주엽의 넓이로 정의되는데, 영상의 해상도와 직접적인 관련이 있으므로, 표적의 응답 신호에서 신호 최대치의 3 dB 값으로 IRW를 알 수 있다. 최대 부엽 레벨은 주엽 최대치와 부엽 최대치의 비율로 정의된다. 누적 부엽 레벨은 부엽 레벨이 균일하지 못할 경우 부엽 레벨의 누적 값으로 성능을 나타낸다.

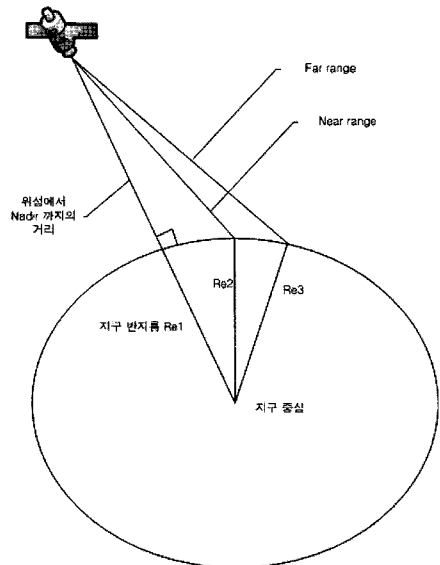
2-2 SAR 영상의 기하 보정

SAR는 지상의 목표물에 대해 비스듬하게 관측(Side-looking)을 하기 때문에 일반 광학 센서를 이용한 관측과는 달리 거리방향으로 비선형적 특성을 보인다.

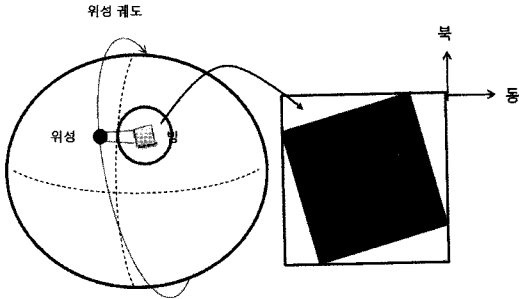
[그림 4]에 나타난 바와 같이 거리 방향의 비선형적 특성으로 생성한 영상에서 보이는 지형은 센서와 관측 대상점에 대해서 상대적으로 먼 거리(far range)와 상대적으로 가까운 거리(near range)로 표현할 수 있는 경사 거리로 나타난다. 따라서 신호 영상을 지상거리 보정 영상으로 변환하기 위해서는 경사거리 영상을 지상거리 기준의 영상으로 보정하여야 한다. 또한 위성은 [그림 5]와 같이 태양 동기 궤도를 따라 지구를 회전하기 때문에 도북 방향 영상을 생성하기 위해서는 이로 인해 발생하는 영상의 전방위 오차를 북 방향으로 보정해 주어야 한다.

2-2-1 SAR 위성 내부 정보를 이용한 기하보정

지상거리 보정 영상은 픽셀 간격이 지상거리로 균등하게 재 표본화된 영상이다. 경사거리로 나타나 있



[그림 4] 지구 타원체 기준 SAR 기하 구조

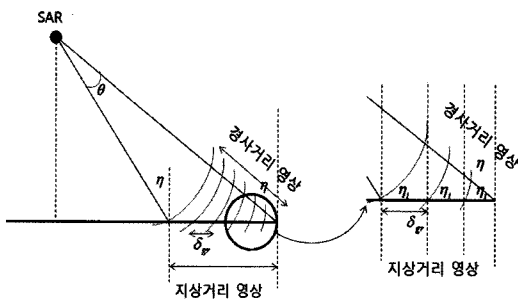


[그림 5] 위성 궤도 기하 구조

는 신호 영상을 등간격의 지상거리로 변환하기 위해서는 영상을 재 표본화해야 한다^[1]. 2-2-1-1 경사거리를 지상거리로 변환 [그림 6]의 좌측에 나타나 있는 것처럼 SAR 관측시 경사거리는 등간격인 반면, 지상거리는 δ_{gr} 만큼의 차이를 보인다. 우선, 경사거리로부터 지상거리로 변환하기 위해서는 [그림 6]의 우측 그림처럼 각각의 지점에 대한 입사각을 구한 후 이 입사각(η)을 이용하여 δ_{gr} 을 구한다^[2].

$$\eta = \sin^{-1} \left(R_s \sin \frac{\theta}{R_t} \right) \quad (5)$$

여기서 θ 는 관측각, R_s 는 지구 중심에 대한 위성의 위치 벡터 크기, R_t 는 지구 중심에 대한 표적의 위치 벡터 크기이다. [그림 7]은 Radarsat-1의 스트립맵 모드 영상에서의 방위 방향 중심 시간에서의 거리 방향 입사각 변화

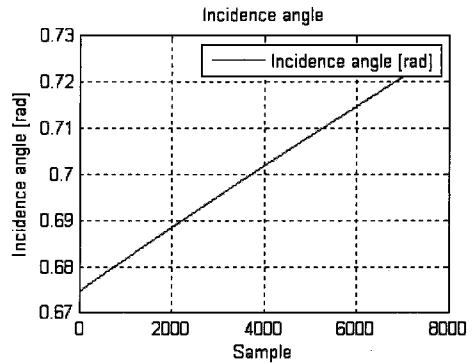


[그림 6] 경사거리와 지상거리의 관계

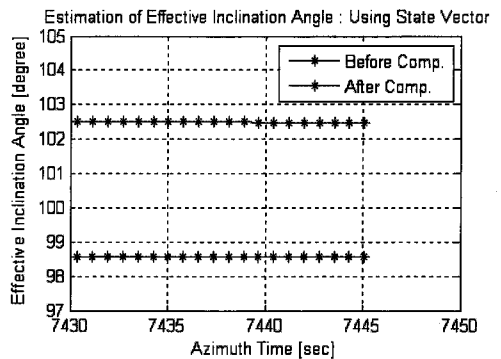
방향 입사각 변화를 나타내는 그래프이다.

위성은 지구를 비스듬히 즉, 태양동기 궤도를 돌며 지상을 관측한다. 이때 지구 또한 자전을 하게 되어 태양 동기 궤도와 오차가 발생한다. 지구 자전 효과 보정을 위해서 현재의 위치 벡터와 바로 다음 시간의 위치 벡터를 이용한 속도 벡터로 궤도를 보정해 줄 수 있다. [그림 8]은 Radarsat-1의 영상에서의 방위 방향 중심 시간 근처에서의 궤도오차 보정 전과 후의 그래프이다.

등간격의 경사거리 영상을 지상거리 영상으로 변환하게 되면 입사각(η)에 따라 지상거리 변화량(δ_{gr})이 변하게 되므로 지상거리 영상은 경사거리와는 달



[그림 7] 방위 방향 중심 시간에서의 거리 방향 입사각 변화



[그림 8] 지구 자전 효과 보정

리 등간격이 아니다. 따라서 변환된 지상거리를 영상으로 활용하기 위해서는 각각의 샘플 또는 픽셀을 등간격으로 만들어 줄 필요가 있다. 지상거리 재 표현화를 resampling과 resizing의 단계로 구분하고, resampling을 위해서는 Sinc-보간을 활용하게 된다.

2-2-2 지상 기준점을 이용한 기하 보정

지상 기준점을 이용한 기하보정을 위해서는 두 영상에 대한 기준점 선정이 필요하며, 선정된 기준점을 최소자승법을 통해 다항 방정식에 적절히 맞춘다^[4]. 이를 통해 생성한 좌표 변환식을 이용하여 원 영상의 좌표를 기준 영상의 좌표로 이동하는데, 이때 영상의 재배열 과정이 필요하게 된다.

지상기준점이 선정되고 영상에서의 좌표와 실제 좌표가 결정되면, 좌표 변환식을 통하여 두 개의 위치를 하나로 연결시켜야 한다. 즉, 두 개의 위치를 함수관계로 연결하여 원 영상의 좌표를 기준 영상의 좌표로 변환해야 한다. 이 단계가 좌표 변환 단계이다. 영상에서의 왜곡 정도, 사용되는 기준점의 수, 그리고 영상의 크기 등에 따라 보다 높은 고차 다항 방정식이 기하 보정에 필요 할 수 있다^[5].

일반적으로 비교적 작은 지역의 영상에서 그 왜곡이 크지 않을 경우, 6개의 변수를 가지는 1차 선형 변환을 이용한다.

기준 영상을 이용한 기하보정 방법은 기준점 선정, 선정된 기준점간의 정합, 변환 함수 결정, 영상 재배열의 4단계로 나눌 수 있다^[6]. 기준점 선정을 위한 기하 보정 요소는 영상 간 관계를 결정하기 위한 지역적 요소로서, 이를 이용한 투영 변환식을 찾기 위한 방법으로는 경계(에지), 코너 점, 선 등의 기하학적 정보를 이용하는 방법과 영상의 화소 값으로부터 두 영상간의 투영 변환식을 유도하는 것이 있다. 기하보정 영상 간 관계를 결정하기 위해서 영상에서 특징점을 추출하는 것이 일반적이며^[7], 대표적으로 Shi & Tomasi 코너 검출기[Good features to track], 헤

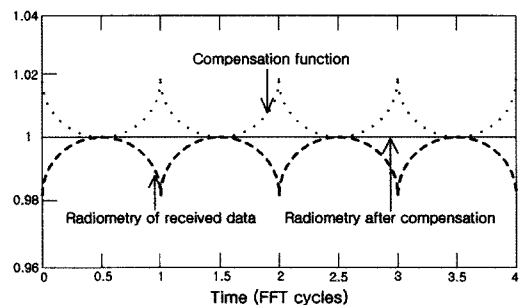
리스 코너 검출기, 헤이시안 검출기, 헤리스-라플라시안 검출기, 가우시안 차분 검출기, 고속 헤이시안 검출기 등을 들 수 있다^{[8]~[12]}.

최근 컴퓨터 비전 영역에서는 SURF(Speeded Up Robust Features)라는 개념의 특징 추출기법을 개발하여 영상의 다양한 왜곡에 대해서도 안정적으로 인식 기술을 수행할 수 있는 특징 추출에 대한 연구를 수행하고 있다^[13]. 일반적으로 기준점 선정은 교각, 건물, 강, 해안 지역 등 식별이 용이한 지점을 찾아 선정한다. 이때 사람의 육안 판단에 의지하여 기준점을 선정하므로 SURF 알고리즘을 이용하여 자동으로 기준점을 선정할 경우보다 효율적일 것이다.

2-3 방위 방향의 방사 보정 기법

기후 및 자연 감시 목적의 SAR 위성은 넓은 영역을 관측할 수 있는 ScanSAR 모드에서 운용된다. 스캔 모드 영상에서는 넓은 영역을 관측함에 따라 영상의 품질이 안테나 패턴의 영향을 받게 된다. 방위 방향으로 연속적인 영상을 형성하는 경우 전체 영상에 포함되는 표적들의 에너지가 표적의 위치에 따라 다르다. 이러한 현상은 ‘scalloping’ 현상이라 한다. 또한, scalloping 현상은 방위 방향의 안테나 패턴을 이용하여 보정하게 되며, 이 과정을 ‘descalloping’이라 한다^[2].

따라서 방위압축 후에 전체 영상에 포함되는 표적들이 갖은 신호의 크기는 [그림 9] 파선과 같은 형



[그림 9] 방위 방향의 방사 보정

태가 된다. **Scalloping** 현상을 보정하기 위해서는 방위 방향의 빔 패턴을 추출하고, 표적이 갖는 에너지를 계산한다. 그리고 [그림 9]의 점선과 같이 보정 필터를 설계하여 방위 방향의 방사 보정을 수행할 수 있다.

III. SAR 신호처리 기술 발전

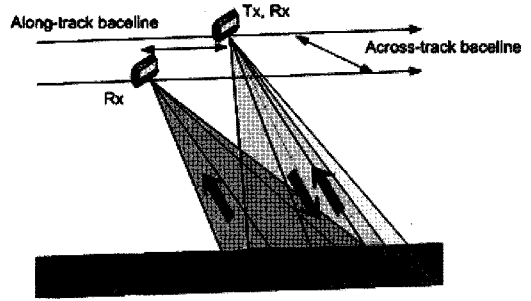
3-1 Bi-static SAR

Bistatic SAR는 다른 속도 또는 다른 경로의 두 플랫폼을 기반으로 송, 수신기가 분리되어 있다. 송신기의 빔 조향 구간과 수신기의 빔을 정합시킴으로써 간섭의 영향을 최소화한 영상을 획득할 수 있다. 즉, **bistatic SAR**는 **monostatic SAR**에 비해 표적의 RCS 탐지능력 강화, 재밍신호로부터의 수신기 노출보호 측면에서 다양한 장점을 보유하고 있어 최근 관련된 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. [그림 10]은 **Bi-static** 획득 모델을 보여준다.

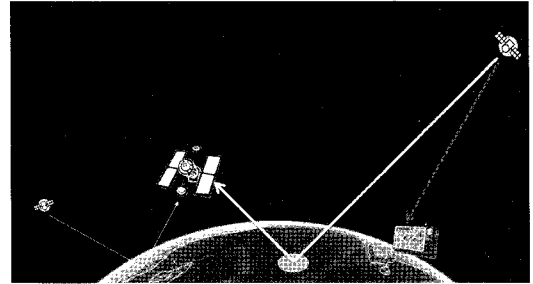
하지만 다른 경로의 송, 수신기간의 기준선과 각이 시간에 대한 함수이므로 이에 정량적인 분석이 재밍 신호에 대한 SAR의 영상왜곡을 감소할 수 있는 요소가 될 것이다. 따라서 **Bistatic** 자체 기술은 이미 성숙한 기술이지만, 위성 SAR에 대한 보다 정확한 시나리오를 구성함으로써 재밍신호에 대한 영향을 최소화하는 모델이 요구되며, 이를 활용한 시스템 개발과 관련된 신호처리 기술에 대한 연구가 필요하다.

현재 위성에 적용되고 있는 **Bi-static SAR**는 **Tandem** 임무가 유일하지만, 점차 위성과 무인기 간의 **Bi-static SAR**의 중요도가 강조되고 있다. 최근에는 GNSS 전파나 일반 방송국의 신호를 이용하여 영상을 획득하는 수동 SAR 영상 기술도 발전하고 있다^[13]. [그림 11]은 GNSS를 이용한 수동 SAR의 영상 형성 과정을 도시하고 있다.

능동형 SAR 영상은 송신단에서 전송된 강한 전력으로 고해상도의 영상을 획득하게 되지만, 영상 획득



[그림 10] Bi-static SAR 획득 모델



[그림 11] GNSS 신호를 이용한 Passive SAR

기회가 매우 제한되어 있다. 반면, GPS와 같은 위성의 신호는 항시 제공되고 있으므로 언제든지 원하는 위치의 정보를 획득할 수 있는 기회를 제공한다. 능동형 SAR에 비해서 해상도와 영상의 품질은 열악하지만, 상시 감시를 가능하게 함으로서 SAR 영상의 활용도를 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대된다.

3-2 Wide-swath 신호 처리 기술

스캔 모드는 주로 위성 시스템에 사용하며, 넓은 관측 범위라는 장점으로 인하여 같은 지역에 대한 영상을 쉽게 확보하기 어려운 위성 시스템의 단점을 보완할 수 있다. 따라서 지표나 해양 관측 같이 장기간의 모니터링과 지속적인 관측이 필요하며, 영상의 해상도보다 넓은 지역의 관측 범위가 우선시되는 응용분야에 주로 사용된다.

스캔 모드에서는 목표 지점이 연속적으로 획득되

지 않고 시간축에서 버스트라는 불연속적인 펄스 단위로 영상 정보를 획득한다. 불연속적인 버스트 데이터 처리에는 버스트 사이의 공백 구간에 제로 연장(zero padding)을 수행하여 처리하는 방식과 직접 버스트 데이터만을 사용하는 방식이 있다.

버스트 사이의 공백 구간에 제로 연장을 수행하여 처리하는 방식으로는 Full-Aperture 알고리즘^[16]과 Short IFFT(SIFFT) 알고리즘^[17]이 있다. Full -Aperture 알고리즘은 데이터 사이의 공백을 영으로 채워 신호처리를 수행하는 방식이다. 따라서 스트림 모드의 데이터를 처리하는 RDA, CSA 등의 알고리즘을 동일하게 사용할 수 있으며 적용이 간단하다. 하지만 처리하는 데이터량이 증가하므로 매우 비효율적인 방식이며, 데이터 사이의 공백에 의하여 방위 방향 신호에서 크기 변조가 발생한다. 한편, SIFFT 알고리즘은 방위 방향의 정합 필터를 적용하는 부분까지는 Full-Aperture 알고리즘과 동일하지만, IFFT를 취하는 방식을 변형하여 적용한다. SIFFT는 동일한 표적에 대하여 IFFT를 취하는 구간 내에 단일 버스트에 노출된 신호만을 사용한다. 따라서 임펄스 응답이 일반적인 sinc 함수의 형태로 유지되며, IFFT를 취하는 데이터 크기가 감소하므로 효율성을 높일 수 있다.

제로 연장을 사용하지 않고 직접 버스트 데이터만을 사용하는 방법으로는 SPECAN 알고리즘이 있으며, 주파수 영역에서 효율적 계산이 가능하기 때문에 ScanSAR 데이터를 처리하기에 적합하다고 알려져 있다. SPECAN 알고리즘은 단일 버스트에 대하여 Deramping과 FFT를 수행하여 방위 압축을 수행하며, 방위 압축된 결과에서 일부분의 데이터의 취한 후, 서로 연결하여 방위 방향의 연속적인 영상을 획득하게 된다. 하지만, 단순히 SPECAN 알고리즘만을 적용하는 방법은 거리에 따라서 방위 방향의 샘플 간격이 달라지는 문제가 존재하며, 선형 RCMC만을 수행하므로 고해상도의 신호처리에는 적합하지 않다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 SPECAN 기반의

알고리즘으로는 Modified SPECAN 알고리즘^[18]과 ECS (Extended Chirp Scaling) 알고리즘^[19]이 존재한다. Modified SPECAN 알고리즘은 방위 방향의 샘플 간격을 일치시키기 위하여 FFT 단계를 스케일링 커널(kernel)을 사용하는 CZT 모듈로 수정하여 적용한다. CZT 모듈은 방위 방향으로 두 번의 FFT와 한번의 IFFT가 포함되지만, 방위 방향의 re-sampling을 FFT를 사용하여 수행하므로 방위 방향의 샘플 간격을 효율적으로 일치시킬 수 있다. ECSA는 RCMC 과정을 CSA를 통하여 수행하며, 동시에 방위 방향의 스케일링을 수행하여 방위 방향의 샘플 간격을 일치시킨다. ECSA는 SPECAN 알고리즘과 비교하여 매우 정확한 RCMC와 SRC(Second Range Compression)를 수행하며, 보간법을 수행하지 않으므로 RDA보다도 더 나은 정확도를 제공한다. 또한, 버스트 사이에 제로 연장을 사용하지 않으므로 효율성을 높일 수 있다. 하지만 처리과정이 복잡한 단점이 있다.

3-3 데이터 압축 전송 기술

일반적인 SAR 탑재체는 엄청난 양의 데이터 전송량을 요구하며, 지상 관측 임무가 많은 위성에서는 이로 인해 SAR 임무 수행에 지장을 초래하기도 한다. 한정된 위성의 저장 공간을 최대한 활용하기 위해서는 SAR 데이터를 압축하거나 실시간 처리를 통해 데이터량을 줄인 후 전송하는 과정을 택하기도 한다. 이러한 실시간 처리는 보통 FPGA와 같은 고속 연산 시스템을 활용하는데 전쟁이나 재난과 같은 긴급한 상황에서 주로 요구되는 기술이 된다. 데이터를 압축해서 전송하더라도 원본 데이터의 위상 정보는 최대한 손실없이 유지되어야 하는데, 이에 대한 연구는 근래에도 꾸준히 연구되고 있다. Tandem 위성과 같은 고해상도 SAR 영상이 증가하고, 무인기 SAR의 활동 반경이 증대될수록 실시간 SAR 영상처리의 중요성은 점차 강조될 것이다.

SAR 데이터 압축 성능을 평가하는 요소로는 신호

대잡음비(SNR), 위상의 표준편차, 평균 위상 오차, 압축비 등이 있다. 대표적인 기술로는 Magnitude-phase 부호화 기술, Block Adaptive Quantization(BAQ) 등이 있으며 이는 마젤란 위성이나 SIR-C 위성 SAR에서도 사용된 바 있다. BAQ 방식 압축은 SAR 원시 데이터를 여러 개의 블록으로 분할한 후에 각 블록마다의 데이터를 분석해서 각각 다른 비율로 양자화를 적용하는 방식이다. 이는 SAR 영상의 대상에 따라 영상의 레벨이 달라지는 특성을 이용한 것으로서 중저해상도의 지구탐사 임무에 적합하다. 사용되는 양자화 정도에 따라 4배 이상의 데이터 압축 효율을 얻을 수 있다^[20].

SAR는 위상정보를 이용하여 비교적 정밀한 3차원 지형 정보를 제공할 수 있으며, 이를 활용한 지진/화산과 같은 자연 재해를 감시하는 분야에 활발히 적용되고 있다. 3차원 위상 정보를 처리하기 위해서는 Interferometry SAR 처리 기법을 활용한다. 이는 두 개 이상의 SAR 영상간의 위상 변이를 추적하여 이를 거리 정보로 변환하는 방식이다. 이러한 방식은 산과 같은 자연 지형물에는 잘 적용될 수 있으나 복잡한 도심 지역에 바로 적용하기는 어렵다. 최근 SAR 위성은 스폿모드를 활용하면 1 m 이하의 해상도를 얻을 수 있다. 그러나 Interferometry SAR에서 얻을 수 있는 고도 데이터의 정밀도는 이보다 훨씬 낮고 따라서 고정밀의 3차원 데이터를 획득하는 것은 매우 어렵다.

TomoSAR(SAR Tomography)는 이처럼 복잡한 지형에서도 고정밀의 3차원 영상을 얻고자 할 때 사용되는 기술이다. 이는 서로 다른 각도에서 관측되는 정보를 바탕으로 거리와 방위뿐만 아니라 높이 방향으로도 고해상도의 수치 정보를 획득한다. Differential TomoSAR는 4D 영상 형성 기술이라 불리며 고도 방향으로도 지형 변형 속도를 측정하게 된다. 이러한 신호 처리를 위해 사용되는 대표적인 처리 방식이 CS (Compressive Sensing)이다^[21]. Diff. TomoSAR와 CS 기술을 동시에 적용하면 거리 및 방위 해상도와 유사

한 단위의 고도 정밀데이터를 획득할 수 있게 된다.

3-4 고해상도 SAR 영상 처리 기술

2008년도에 발사된 독일의 SAR-Lupe 위성은 5개의 위성이 군집을 이루면서 초고해상도의 전략적 SAR 영상을 획득하고 있다. 기존의 SAR에서 한 단계 진보한 영상을 획득하는 것으로 알려져 있으며 5개의 위성으로부터 전송되는 초고해상도의 영상이 지속적으로 처리되어야 하기 때문에 신속한 자동 영상 처리 기술이 필수적으로 요구된다. SAR 영상처리에서 신호 처리에 사용되는 입력 변수값이 정확하게 파악된다면 그 정밀도는 이상적인 이론값에 가까워지지만 위성의 자세 오차 및 대기에 의한 전파의 산란 회절, 시스템 오차 등으로 인해 측정된 값을 보정하는 과정이 반드시 필요하다. 초고해상도 SAR에서는 이 과정에서 요구되는 정밀도가 매우 엄격한데 그 중에서도 가장 큰 영향을 미치는 것이 azimuth phase 정보 오차다. SAR 신호 처리 품질은 정확한 도플러 파라미터의 확보에 의해서 결정되는데, 이를 위해 기하모델을 정립하고 정밀한 자세제어 센서를 사용하여 보정하더라도 고해상도 영상에 필요한 충분한 정확도를 보장할 수 없다. 따라서 SAR 자동 처리 시스템에서는 외부 데이터가 아닌 SAR 원시 자료 내부의 정보만을 이용하여 영상처리에 필요한 변수를 추출하는 방식을 택한다. 이를 위해서는 정확한 SAR 검보정이 선행되어야 한다. 위성영상의 핵심 정보인 대역폭, 신호 안정성 및 항법 자료들은 영상 데이터의 검보정에서 획득된 데이터와 위성 자세제어 시스템 자료로부터 끊임없이 비교 분석되어야 한다. 안테나 빔지향 오차는 결국 도플러 변수 오차를 유발하게 된다. 이는 SAR 데이터의 외부 검보정 절차를 통해 보정된다.

SAR-Lupe 데이터는 지상국에서 자동처리되는데, 요즘에는 일반 표준 PC를 사용하여 경제적이면서도 안정적인 연산이 가능하다. RDA 방식은 일반 표준 모

드 SAR 데이터에 적용하기에 적합하지만, SAR-Lupe에서 채택하고 있는 SlipSAR(Sliding spotlight) 모드처럼 특수 모드에 대해 높은 정확도를 유지하면서도 신속한 결과를 획득하기를 기대하기는 어렵다. SAR의 운용 모드에 따라 각각 적합한 신호처리 기법을 개발하기도 하는데, SAR Lupe에서는 Extended SPECAN이라는 방식이 적용되었다^[22]. SPECAN 방식은 원시 데이터의 구간을 여러 개로 나누어서 신속한 신호처리를 수행하는 것을 목적으로 하는데 실제로는 RDA 방식과 병합하여 병렬처리로 수행함으로써 신뢰성과 신속성을 모두 확보할 수 있다.

특수한 모드에서의 정밀한 SAR 처리 방식은 오랫동안 꾸준히 연구되어 오는 주제이다. 레이더 동작이 복잡해질수록 RCMC로 인한 오차도 커지게 되는데 CSA(Chirp Scaling Algorithm) 방식은 RDA의 interpolation 연산을 제거하고 오직 푸리에 변환 연산만을 사용하기 때문에 비교적 정확도가 높고 요구되는 연산을 위해 사용된다^[23]. 여기에서는 azimuth 데이터에 대한 푸리에 변환 함수의 생성이 중요한 요소인데 이에 대한 성능향상을 위해 Extended CSA가 제안되기도 했다^[24]. CSA 알고리즘의 적용을 위해서는 Range 방향의 cell migration 현상에 의한 오차를 직접 수정해야 하는 문제가 있다. Extended frequency scaling algorithm (EFSA)은 CSA의 주파수 변환 정밀도를 개선하기 위해 제안된 방식이다^[25]. 그러나 이러한 방식들 모두 SAR 탑재체의 정확한 궤도 데이터에 의한 보정 작업이 전제되어야 하므로 SAR 운용 시스템에 의한 성능 변화가 존재한다. 특히 UAV SAR나 Circular, Bi-static SAR처럼 불안정하거나 특수한 궤도를 갖는 운용 모드에서는 자세 제어 보정에 의해 전체 영상의 품질이 결정된다. Liu는 이러한 궤적의 변화에 따른 도플러 주파수 변화를 추정할 수 있는 기법을 제안하였고 이를 ECSA와 EFSA에 모두 적용할 수 있는 가능성을 제안하였다^[26]. Liu는 직선이 아닌 궤도를 갖는 SAR 시스템에 의한 원시 데이터의 도플러 오차를 보

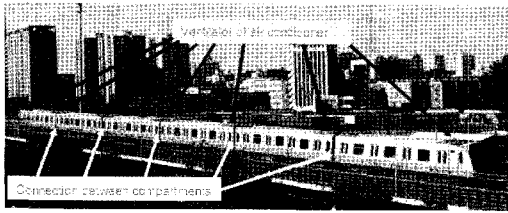
정한 후 비교적 우수한 품질로 점표적을 생성하는 것을 보였다.

이밖에도 고해상도의 SAR가 운용되는 high squint 모드에서 이동하는 표적물을 처리하기 위한 알고리즘으로 Keystone Transform이 있다. 이는 range 방향의 신호 처리 변수와 이동속도에 의한 데이터 위상 정보 왜곡이 상호 결합되어 발생하는 문제를 해결하기 위한 방법으로 제안된 바 있다^[27]. 고해상도 영상에서 임의의 방향으로 움직이는 표적물은 clutter와 같은 정도 레벨로 품질 저하가 발생할 수 있는데, 이를 극복하기 위한 연구는 앞으로도 계속될 것으로 보인다.

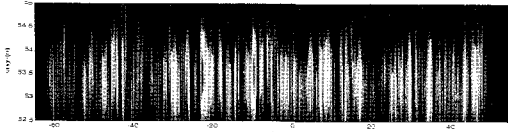
Range 방향의 고해상도 영상을 얻기 위해서는 초광대역 신호의 펄스를 사용해야 한다. 단일 시스템을 통해 광대역을 생성하는 것은 비효율적이므로 복수개의 송신기를 사용하는 방법을 사용하는데 stepped 주파수 기법이 대표적이다^[28]. 광대역을 여러 단위로 분할하여 각각의 서브대역을 나누어 처리한 후 합성하는데 SPECAN이 azimuth 영역에서 버스트 단위로 푸리에 영상처리를 수행하는 것과 유사하게 Range 방향에 대해서도 버스트 단위로 영상처리를 수행하게 된다. Wenshuai는 지상실험을 통해 광대역 고해상도 SAR 영상 획득 실험을 수행하였다^[29].

[그림 12]는 서브펄스의 개수가 증가함에 따라 SAR 영상의 해상도 역시 그에 비례하여 증가하고 있음을 보여준다.

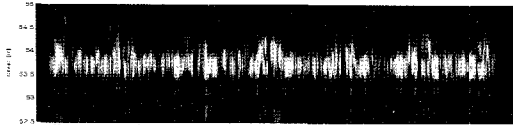
초고해상도 SAR 영상을 획득하는데 있어서 올바른 자세제어 정보를 확보하는 것은 필수적이다. 위치 및 자세제어 정보가 단순한 위성의 경우와는 달리 지상에서 무인기를 사용하는 경우는 이동 경로가 매우 복잡하고 지터링이 심해지므로 영상의 품질열화가 발생한다. 이를 극복하기 위해서는 자세제어 시스템 정보를 SAR 신호처리단에 입력하여 오차를 수정한다. [그림 14]는 무인 헬기에서 발생하는 위치 및 자세 오차와 이를 GPS/INS 센서 정보로 극복하여 SAR 점표적의 품질을 개선한 결과를 보여준다^[29]. SAR 신호의 열



(a) 지상 목표물



(b) 서브 대역 1개



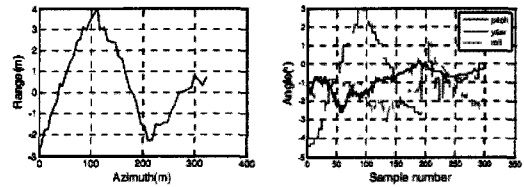
(c) 서브 대역 4개



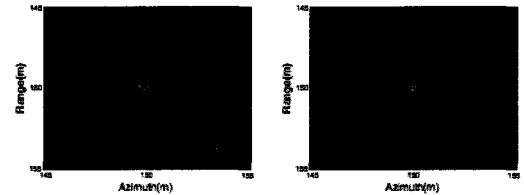
(d) 서브 대역 20개

[그림 12] Stepped 주파수 대역 버스트 증가에 따른 해상도 향상 (Source:APSAR2011[28])

화질이 주어진 시스템에서 최적의 해상도를 얻는 방법으로는 Omega-K 알고리즘이 있으나, 광대역 신호에 적용하면 계산이 매우 복잡해지는 단점이 있다. 초고 해상도에서는 광대역 펄스를 사용하면서도 목표물에 대한 투영 시간은 길어지기 때문에 표준 RDA 방식으로는 오차발생 가능성이 높다. 이를 보정하기 위해 SAR 신호처리단을 여러 단계로 나누어 처리하는 방식이 개발되었다. 특히 SAR 원시자료 처리를 신속하게 하기 위해 수신단에서 아날로그 신호의 대역폭을 줄이는 Dechirp-On-Receive라고 하는 기술이 제안되었다^[30]. 이 방식에서는 표적물에서 반사된 Chirp 변조 신호를 SAR 시스템의 수신부에서 물리적으로 복조하여 신호 대역폭을 획기적으로 줄인다. 이후 Omega-K

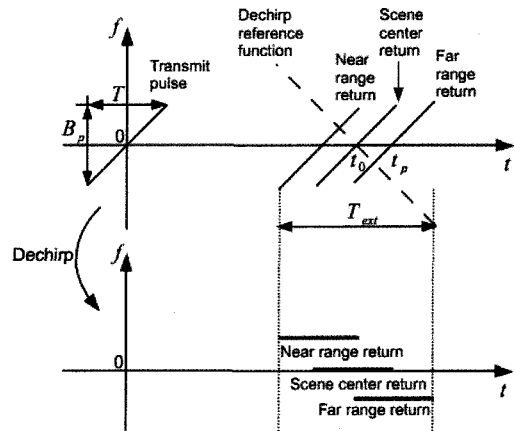


(a) 자세제어 정보 오차(GPS/INS 데이터)



(b) 자세제어 보상에 의한 SAR 점표적 품질 향상
[그림 13] 자세제어정보 추적 및 보상에 따른 SAR 영상 품질 변화 (Source:APSAR2011[29])

알고리즘을 적용하면 신호 품질의 열화를 최소화하면서도 정밀한 SAR 영상을 획득할 가능성이 높다. 이는 본질적으로 수신단을 여러 개의 서브 대역으로 나누어서 처리하는 계단형 주파수 변조 방식과 유사하다. [그림 14]에서 보여주는 바와 같이 각각의 거리에서 들어오는 신호들이 주파수와 시간 영역에서 중첩



[그림 14] Dechirp-on-receive 방식을 사용한 SAR 원시자료 처리 과정(Source: APSAR2011^[30])

이 발생하게 되는데, 수신부에서 **dechirp** 복조를 해주면 각각의 변조 신호가 주파수 영역에서 분리된다. 이를 푸리에 변환을 하면 데이터 처리 용량이 줄어들어 효율적인 **Omega-K** 신호 처리가 가능하다. 이러한 기법은 특히 높은 **squint** 각을 갖는 고해상도 SAR 시스템에 적용하기에 용이하다.

이러한 SAR 영상처리 기술이 시행되기에 앞서 지상국에서는 초고해상도 영상 시스템에서 생성되는 방대한 데이터를 처리하기 위해 신속한 하드웨어 저장 기술도 필요한데 보통 RAID 방식이 적용되며 하나의 원시데이터를 모두 수용할 수 있는 RAM의 확보도 중요하다. 테라급 이상의 용량이 필요함에 따라 별도의 데이터 압축 기술을 적용해 RAM 소비량을 줄이기도 하는데 **BFQ(Block Floating Quantization)** 기술의 그 한 예이다.

3-5 다중 빔을 사용한 영상 품질 향상

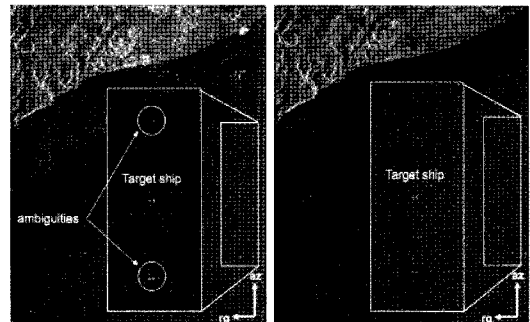
SAR 영상을 형성하는데 있어서 안테나는 목표물에서 반사되는 신호를 왜곡시키는 경우가 있다. 보통의 경우는 패턴 보정에 의해 보상되기도 하지만 부엽레벨에 의한 SAR 영상의 **ambiguity** 발생은 물리적으로 피하기가 어렵다. 기존에는 SAR 영상의 원시자료에서 인위적으로 **ambiguity**를 제거하기도 했지만 이는 사용자의 직관적인 판단에 의존하기 때문에 신뢰도가 낮다고 할 수 있다. 직접적인 대책으로는 안테나 빔패턴을 인위적으로 제어하는 방법이 최선인데 이와 관련해서는 디지털 빔형성(**DBF: Digital Beam-Forming**) 기술이 가장 활발한 연구 분야라 할 수 있다. DBF는 배열안테나의 후면부에 장착되어 수신신호에 적절한 가중치를 부여함으로써 **azimuth ambiguity**가 발생할 수 있는 가능성을 최소화하는 역할을 한다. 이를 위해서는 복수개의 수신 채널을 만든 후 각각의 채널에서 부엽 레벨 신호를 찾아내서 제거하는 알고리즘이 필요하다. 최근 TerraSAR에서는 이러한 DBF 기술이 직접 적용되어 운용되고 있다^[31]. DBF에는 시간차를 두

고 안테나에 입력되는 신호를 기억해 둔 후 비교 및 상쇄 알고리즘을 적용하여 **ambiguity**를 발생할 수 있는 신호를 제거하는 기법이 적용되었다. [그림 15]는 DBF에 의한 TerraSAR 영상 품질의 변화를 보여준다.

Ambiguity가 발생한 경우 한 개의 표적물이 3개로 분리되어 표시되고 육지가 바다와 중첩되어 보이는 현상이 나타난다. 이는 안테나의 부엽 레벨의 영향이 두드러지는 해안의 SAR 영상에서 흔하게 볼 수 있는데 DBF를 적용할 경우 이러한 현상이 발생하는 채널 신호를 억제하여 **ambiguity**가 사라지는 것을 확인할 수 있다. 과거에는 SAR **ambiguity**를 영상처리의 후처리 단계에서 수동적인 방식으로 해결해야 했지만, 향후에는 이처럼 전처리 단계에서 채널 분리를 통한 방식으로 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

최근 1 m이하급의 고해상도 영상 획득 기능을 갖는 SAR 위성이 운용되기 시작하고, 수 cm까지의 정밀 해상도를 갖는 무인기 SAR가 운용되면서 SAR 영상 처리 기술은 고도의 정밀도를 요구하는 방향으로 발전하고 있다. 또한 자연 재해와 해상 감시와 같은 분야로의 응용이 확대되면서 넓은 영역에 대해



[그림 15] SAR 영상에서의 **azimuth ambiguity** 생성 및 DBF 적용에 의한 억제 효과(Source: APSAR 2011^[31])

실시간으로 신속한 영상 정보를 획득하는 요구도 크게 증가하고 있다.

향후 SAR 영상 처리 기술은 초고해상도의 SAR 영상을 높은 신뢰도로 추출하고 이를 기존의 광학 영상과 상호 보완하는 역할을 수행할 수 있도록 꾸준히 발전하게 될 전망이다. 또한 실시간으로 데이터를 지속적으로 수신하고 처리하여 지진이나 화산, 홍수와 같은 자연 재해를 예측하거나 감시할 수 있는 기능을 강화하는 기술이 선보이게 될 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

- [1] 고보연, 김만조, 이석호, "Radarsat-1 신호처리 S/W 개발 및 검증", *Korean Journal of Remote Sensing*, 21(2), pp. 163-171, 2005.
- [2] John C. Curlander, "Utilization of spaceborne SAR data for mapping", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-22, 2, 1984.
- [3] RADARSAT Data products Specifications, May 2000.
- [4] K Novak, "Rectification of digital imagery", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 58, no. 3, pp. 339-344, 1992.
- [5] J. Jensen, D. Cowen, W. narumalani, O. Weatherbee and J. Althausen, "Evaluation of coastwatch change detection protocol in South Carolina", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 59, no. 6, pp. 1039-1046, 1993
- [6] B. Zitova, J. Flusser, "Image registration methods : a survey", *Image and Vision Computing* 21, pp. 977-1000, 2.
- [7] A. A. Goshtasby, *2-D and 3-D Image Registration-for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 4-5, 2005.
- [8] C. Harris, M. Stephens, "A combined corner and edge detector", *Proc. Alvey Vision Conf.*, pp. 147-151, 1988.
- [9] T. Lindeberg, "Feature detection with automatic scale selection", *International Journal of Computer Vision*, vol. 30, no. 3, pp. 79-116, 1998.
- [10] K. Mikolajczyk, C. Schmid, "Indexing based on scale invariant interest points", *International Conference Computer Vision*, vol. 1, pp. 525-531, 2001.
- [11] D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *Int'l J. Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [12] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "Surf: Speeded up robust features", *European Conference on Computer Vision*, vol. 3951, pp. 404-417, 2006.
- [13] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "Surf: speeded up robust features", *European Conference on Computer Vision*, vol. 3951, pp. 404-417, 2006.
- [14] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*, Artech House, 2005.
- [15] Oleg V. Goryachkin, Rashid R. Yangazov, *Some Parameters of Bistatic Sar Based O Tvsigals*, Eurasar, pp. 724-727, 2010.
- [16] R. K. Raney, A. P. Luscombe, E. J. Langham, and S. Ahmed. "RADARSAT", *Proc. of the IEEE*, vol. 79, no. 6, pp. 839-849, 1991.
- [17] Frank Wong, David Stevens, and Ian Cumming, "Phase-preserving processing of ScanSAR data with a modified range Doppler algorithm", *IEEE*, 1997.
- [18] K. Leung, M. Jin, C. Wong, and J. Gilbert. "SAR data processing for the magellan prime mission", In *Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., IGARSS'92*, pp. 606-609, Clear Lake, TX, May 1992.

- [19] A. Moreira, J. Mittermayer, and R. Scheiber. "Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR Data processing in stripmap and scan-sar imaging modes", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 5, pp. 1123-1136, Sep. 1996.
- [20] R. Kwok, "Block adaptive quantization of Magellan SAR data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 27, no. 4, pp. 375-383, 1989.
- [21] Zhu Xiaoxiang, Richard Bamler, "Super-resolution for 4-D SAR tomography via compressive sensing", *EUSAR 2010*, pp. 273-276.
- [22] Gunnar Trilitzsch, "Challenges of automated processing of spaceborne high resolution SAR data", *AP SAR 2011*, pp. 96-97.
- [23] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, and F. Wong, "Precision SAR processing using chirp scaling", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 32, no. 4, pp. 786-799, Jul. 1994.
- [24] A. Moreira, J. Mittermayer, and R. Scheiber, "Extended chirp scaling for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 5, pp. 1123-1136, Sep. 1996.
- [25] D. Zhu, M. Shen, and Z. Zhu, "Some aspects of improving the frequency scaling algorithm for dechirped SAR data processing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 6, pp. 1579-1588, Jun. 2008.
- [26] Liu. Gao-gao, Wang Chun, and Liu Nan, "Some aspects of general azimuth spectrum algorithm using series reversion", *AP SAR 2011*, pp. 149-152.
- [27] D. Zhu, Y. Li and Z. Zhu, "A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 18-22, 2007.
- [28] Armin W. Doerry, "SAR processing with stepped chirps and phased array antennas", *SANDIA Report*, SAND2006-5855, 2006.
- [29] Wenshai and Yunhua, "A stepped frequency chirp scaling algorithm for high resolution SAR imaging", *AP SAR 2011*, pp. 48-51.
- [30] Minh Phuong, "Omega-K algorithm-A generalization for highly squinted spotlight SAR imaging with dechirp-on-receive", *AP SAR 2011*, pp. 137-140.
- [31] Jung-Hyo Kim, Marwan Younis, Martina Gabele, Pau Prats and Gerhard Krieger, "Contribution of terra SAR-X to digital beamforming experiment for future SAR techniques", *AP SAR 2011*, pp. 80-83.

≡ 필자소개 ≡

이 우 경



1990년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2000년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과 (공학박사)
 1999년 9월: KAIST 인공위성센터 연구

교수

2003년 1월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 부교수

[주 관심분야] 인공위성 시스템, 위성전자 레이다 탑재체

곽 영 길



1976년 2월: 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)
 1981년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1987년 6월: 미국오하이오 대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1976년 3월~2001년 3월: 국방과학연구소 책임연구원, 레이다 신호처리 및 SAR 연구실장

1997년 2월~1999년 2월: 영국 Matra Marconi Space 위성 SAR 개발 프로젝트 책임자

2001년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 정교수 및 대학부설 항공전자연구소 역임/현재 레이다연구소 소장

2002년 4월~2008년 12월: 전자파학회 레이다연구회 위원장

2006년 7월~현재: 항공우주학회 항공전자부문의 위원장

2000년~현재: IEEE Senior Member, IEEE International Radar Society 및 EUSAR/APSAR Committee 위원

2007년 9월~2008년 8월: 영국 옥스퍼드대학교 방문연구교수

2009년 11월~2011년: General Chair of APSAR 2011, 대회장

2009년 1월~2011년 2월: 국회 한국과학기술정책연구회 회장

2010년 1월~현재: IEEE AESS Korea Chapter Chair

[주 관심분야] Radar system design, radar signal processing, synthetic aperture radar processing, collision avoidance for UAV and automotive radar, avionics. adaptive interference rejection, spectrum management DSP based sensor signal processing